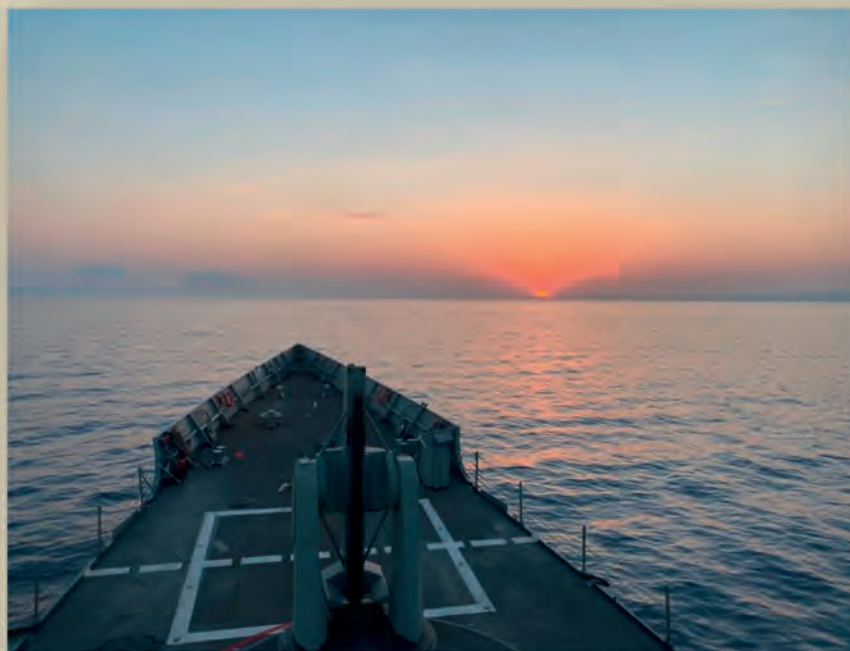




# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Diciembre 2020  
Número 19



**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: Catálogo General de Publicaciones Oficiales

<https://cpage.mpr.gob.es/>

Catálogo de Publicaciones Defensa

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

App Revistas Defensa:

Google Play: <http://play.google.com/store>

AppStore: <http://store.apple.com/es>

## A NUESTROS COLABORADORES

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

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

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

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

Se citará la bibliografía consultada.

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

Maquetación:

M<sup>a</sup> José Pizarro García



## Índice

<b>EDITORIAL</b>	Pág. 2
<b>ESTABILIDAD TRANSVERSAL DE UN SUBMARINO DURANTE LAS MANIOBRAS DE INMERSIÓN Y SALIDA A SUPERFICIE</b>	Pág. 3
CF (CIA) Dr. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
<b>CONSTRUCCIÓN INTEGRADA, PRE-ARMAMENTO Y ESTRATEGIA CONSTRUCTIVA EN BUQUES</b>	Pág. 15
CC (CIA) Dr. D. Raúl Villa Caro	
<b>LA SUPERVIVENCIA DEL BUQUE Y SU RELACIÓN CON LOS CONCEPTOS DE SUSCEPTIBILIDAD Y VULNERABILIDAD</b>	Pág. 21
AN (CIA-MILCOM EOF) D. José María Torres do Rego	
<b>LAS TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 QUE MEJORARÁN LAS ETAPAS DEL DISEÑO NAVAL</b>	Pág. 27
D. Rodrigo Pérez Fernández	
<b>RECUPERACIÓN DE PIEZAS OBSOLETAS MEDIANTE TÉCNICAS DE ESCANEADO LÁSER. APLICACIÓN A LA CULATA DEL MOSQUETÓN MÁUSER 7,92 MODELO CORUÑA 1943 DE LA GUARDIA REAL</b>	Pág. 36
D. Enrique Molinelli Fernández	
D <sup>a</sup> . Cristina Soriano Gómez	
D. Manuel González Gallego	
<b>BIOGRAFÍA:</b>	Pág. 50
D. MARIANO ROCA DE TOGORES Y CARRASCO	

Foto portada: «Amaneciendo en el Cuerno de África desde la F-84. (Fragata Reina Sofía)»

Autor: AN Carlos Celedonio Ameyugo Fernández del Campo



**EDITORIAL**

**El Capitán de Navío del Cuerpo de Ingenieros  
Comandante-Director de la ETSIAN**

Estimados amigos y compañeros,

Con este número del Boletín Técnico de Ingeniería finalizamos un año que ha sido especialmente complejo pero del que debemos quedarnos con los aspectos positivos. La pandemia nos ha obligado a implantar, prácticamente sobre la marcha, la enseñanza a distancia con un resultado muy satisfactorio gracias a la gran profesionalidad de profesores y alumnos. La experiencia adquirida es una excelente oportunidad para tratar abrir la enseñanza de la Ingeniería en Armas Navales a otros colectivos como puede ser los ingenieros de la industria de defensa en España, algo que creo que potenciaría enormemente la profesión de Ingeniero de Armas Navales.

Durante este también hemos iniciado el proceso de verificación del Programa de Doctorado que quedó en suspenso años atrás. En este contexto, este número publicamos varios artículos relacionados con la capacidad de supervivencia del buque de guerra, una de las principales características que le diferencian del buque mercante y que ha sido elegida como línea principal de investigación del futuro Programa de Doctorado.

También en este número publicamos varios artículos relacionados con la llamada cuarta revolución industrial o industria 4.0. Después de más de 75 años formando Ingenieros de Armas Navales, la ETSIAN necesita modernizar sus laboratorios y se ha elevado una propuesta para adecuarlos a las tecnologías habilitadoras de la nueva industria 4.0 dotándolos de impresoras 3D, escáneres y robots colaborativos.

Y puesto que hablamos de laboratorios es imprescindible agradecer la gran labor realizada por el Doctor D. Manuel Laguna quien este año se retira después de casi cuatro décadas de dedicación a esta Escuela.

Finalmente deseamos unas felices Navidades con vuestras familias y que el próximo año nos restituya la normalidad que tanto deseamos.

CN (CIA) Francisco J. Pérez Villalonga

## ESTABILIDAD TRANSVERSAL DE UN SUBMARINO DURANTE LAS MANIOBRAS DE INMERSION Y SALIDA A SUPERFICIE

CF (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE  
Doctor Ingeniero Naval por la UPM

**Resumen.**- En este trabajo se va a analizar la estabilidad transversal de submarinos de casco sencillo durante la transición entre las condiciones de inmersión y superficie, y en base a dicho análisis se propondrá una expresión sencilla que sirva como punto de partida para cuantificar la probabilidad de que un diseño dado pueda presentar problemas en este sentido.

### 1.- Introducción

La estabilidad transversal de cuerpos capaces tanto de flotar en la superficie como de sumergirse bajo la misma es una rama de la arquitectura naval de aplicación directa al diseño de cualquier plataforma de combate submarina y sobre la que existen multitud de publicaciones.

Sin embargo, la estabilidad transversal durante las transiciones que inevitablemente tendrá que afrontar cualquier submarino al pasar de inmersión a superficie (y viceversa) es un campo de estudio sobre el que resulta algo más difícil encontrar información de detalle: así por ejemplo, en la referencia [1] se plantea la posibilidad de tener problemas en este sentido pero sin aportar herramientas de predicción concretas.

La gestión de los problemas arriba citados puede enfocarse de muchas maneras, pasando una de ellas por usar el esquema iterativo descrito a continuación:

- Paso 1: Diseñar el submarino de manera que su estabilidad en inmersión y en superficie (por separado) sea satisfactoria.
- Paso 2: Una vez alcanzada una solución de diseño, valorar la probabilidad de tener dificultades durante las maniobras de inmersión y salida a superficie mediante las herramientas disponibles en cada momento (simulaciones numéricas, etc.).
- Paso 3: En el caso de que la probabilidad arriba citada sea elevada, tomar las medidas correctivas que sean necesarias.

En este documento el autor va a desarrollar una expresión analítica que sirva para afrontar el paso 2 de una manera sencilla y eficiente desde las etapas más tempranas de diseño, habiéndose dividido el trabajo en tres partes claramente diferenciadas:

- Establecimiento de una primera aproximación al problema mediante el uso de técnicas dimensionales (ver referencia [2])
- Desarrollo de una formulación de tipo analítico para calcular la estabilidad transversal de un submarino de casco sencillo

- Definición de la condición crítica a cumplir por cualquier diseño para que el margen de seguridad durante las maniobras de inmersión y salida a superficie resulte aceptable.

Tabla 1.- Nomenclatura

$b$	Valor medio de las mangas máximas de todos los TLP (m)
$B$	$b/d$
$c$	Suma de las capacidades máximas de todos los TLP (kg)
$C$	$c/m_0$
$d$	Diámetro máximo del CR (m)
$k_x$	Movimiento transversal máximo del centro de gravedad de $m_m$ (m)
$k_y$	Movimiento vertical máximo del centro de gravedad de $m_m$ (m)
$K_x$	$k_x/d$
$K_y$	$k_y/d$
$m$	Masa total del submarino (kg)
$m_0$	Masa total del submarino en la condición de superficie (kg)
$m_m$	Masa contenida en todos los tanques del submarino (kg)
$p$	Brazo de adrizamiento (m)
$P$	$p/d$
$q_x$	Movimiento transversal máximo del CCH del submarino (m)
$q_y$	Movimiento vertical máximo del CCH del submarino (m)
$Q_x$	$q_x/d$
$Q_y$	$q_y/d$
$s_0$	Altura metacéntrica sin corregir en la condición de superficie (m)
$S_0$	$s_0/d$
$t$	Calado (m)
$t_0$	Calado en la condición de superficie (m)
$T$	$t/d$
$T_0$	$t_0/d$
$y$	Coordenada vertical del centro de gravedad de $m$ a escora nula (m)
$y_B$	Coordenada vertical del CCH del submarino a escora nula (m)
$Y$	$(y_B - y)/d$
$\theta$	Ángulo de escora (radianes)
$\Delta s_{max}$	Pérdida de altura metacéntrica máxima al moverse el agua en los TLP (m)
$\Delta S_{max}$	$\Delta s_{max}/d$
$\Delta x$	Movimiento transversal del centro de gravedad de $m$ (m)
$\Delta x_B$	Movimiento transversal del CCH del submarino (m)
$\Delta x_m$	Movimiento transversal del centro de gravedad de $m_m$ (m)
$\Delta y$	Movimiento vertical del centro de gravedad de $m$ (m)
$\Delta y_B$	Movimiento vertical del CCH del submarino (m)

$\Delta y_m$	Movimiento vertical del centro de gravedad de $m_m$ (m)
<b>Minúscula</b>	Denota variable con dimensiones
<b>Mayúscula</b>	Denota variable no dimensional
<b>CCH</b>	Centro de carena hidrostática (CR y TLP según la restricción R1.2)
<b>CR</b>	Casco resistente
<b>TLP</b>	Tanques de lastre principales

En todo lo que sigue, se hará uso de las siguientes restricciones simplificadoras:

**R1.1.-** Solo se tendrán en cuenta submarinos de casco sencillo en los que:

- Aparte de la superestructura/vela, la carena exterior será un cuerpo de revolución cilíndrico en la zona central (en donde coincidirá con el CR) y cerrado en sus extremos por formas hidrodinámicas de diámetro decreciente.
- Los TLP irán situados en el exterior del CR justo a proa y popa del mismo, y por tanto, dentro de las formas hidrodinámicas arriba citadas.

**R1.2:** A efectos hidrostáticos:

- Únicamente se tendrá en cuenta la presencia del CR y de los TLP, despreciando la contribución de cualquier otro elemento: espacios de libre circulación, etc.
- Se supondrá a los TLP aislados del exterior durante cualquier movimiento de escora (hipótesis razonable según la experiencia del autor)

**R1.3:** Se definirá la condición de superficie como aquella en que los TLP se encuentren completamente vacíos (sin agua residual) y la de inmersión como aquella en que dichos TLP estén completamente llenos (sin burbujas de aire), asumiéndose además que esta última se alcanzará cuando la relación  $t/d$  se haga igual a uno.

**R1.4:** El submarino se asumirá bajo condiciones hidrostáticas en todo momento, despreciándose cualquier efecto tanto inercial como hidrodinámico que pueda originarse al pasar de inmersión a superficie (y viceversa).

Por último, y a pesar de que el documento resulta auto contenido en su mayor parte, se remite al lector a cualquiera de los tratados existentes sobre arquitectura naval para una definición rigurosa de los términos y conceptos usados a lo largo del mismo.

## 2.- Aproximación dimensional previa al tratamiento analítico del problema

En este punto se definirá el problema en base a un conjunto de parámetros que permita alcanzar un equilibrio razonable entre sencillez y capacidad de predicción, dedicándose los puntos 3 y 4 a modelar dichos parámetros mediante aproximaciones analíticas.

### 2.1.- Curva de brazos de adrizamiento

Empezando por la curva de brazos de adrizamiento, su forma podría hacerse depender en una primera aproximación de las siguientes variables:

- Diámetro máximo del CR
- Calado (Distancia entre la superficie del mar y el punto más bajo del CR)
- Ángulo de escora

Usando ahora teoría dimensional es fácil llegar al resultado siguiente:

$$P = F(T, \theta) \quad (2.1)$$

En donde  $F$  será una función de tipo genérico.

Y si se desarrolla en serie de FOURIER la expresión anterior (respecto al ángulo de escora) conservando únicamente los dos primeros términos, se obtiene lo siguiente:

$$P = A_I(T)\text{sen}\theta + A_{II}(T)\text{sen}2\theta \quad (2.2)$$

En donde los parámetros no dimensionales  $A_I$  y  $A_{II}$  incluirían los efectos de primer y segundo orden respectivamente.

Nótese que:

- Tanto  $A_I$  como  $A_{II}$  serán funciones de  $T$  que cambiarán (aunque sea ligeramente) para adaptarse a las peculiaridades de cada caso de estudio.
- En general, los efectos de primer orden van a ser los más importantes al tratar con submarinos mientras que los de segundo orden constituirán la parte dominante en el caso de los buques de superficie.

### 2.2.- Pérdida de altura metacéntrica máxima al moverse el agua en los TLP

A continuación se establecerá una expresión que permita valorar la pérdida de altura metacéntrica máxima inducida por el movimiento del agua de mar en el interior de los TLP durante las maniobras de inmersión y salida a superficie, lo cual se hará en base a las variables en principio más significativas:

- Masa del submarino en superficie
- Diámetro máximo del CR
- Suma de las capacidades máximas de todos los TLP
- Valor medio de las mangas máximas de todos los TLP



Usando nuevamente teoría dimensional, es fácil llegar al resultado siguiente:

$$\Delta S_{max} = G(C, B) \quad (2.3)$$

En donde  $G$  será otra función de tipo genérico cuyo valor indicaría la pérdida de altura metacéntrica (no dimensional) arriba citada.

Y para reducir la función  $G$  a un formato que permita su ajuste mediante un conjunto finito de constantes, se usará una aproximación de tipo potencial:

$$\Delta S_{max} = \omega C^\alpha B^\beta \quad (2.4)$$

En donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\omega$  serán tres constantes no dimensionales a determinar.

Una vez en este punto, solo quedaría identificar la forma de los parámetros  $A_I$  y  $A_{II}$  (ver punto 3) y asignar un valor concreto a las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\omega$  (ver punto 4).

### 3.- Análisis de la estabilidad transversal

Empezando por analizar la forma en que el movimiento del líquido contenido en los tanques del submarino afecta al centro de gravedad de este último, bastará con imponer el equilibrio de fuerzas y momentos. De esta manera es fácil llegar a las siguientes expresiones:

$$\Delta x = \frac{m_m}{m} \Delta x_m \quad (3.1)$$

$$\Delta y = \frac{m_m}{m} \Delta y_m \quad (3.2)$$

Usando ahora consideraciones puramente geométricas (ver figura 1), es fácil llegar al siguiente resultado:

$$p = (\Delta x_B - \Delta x) \cos \theta - (y + \Delta y - y_B - \Delta y_B) \sin \theta \quad (3.3)$$

Reordenando esta última expresión e introduciendo las igualdades 3.1 y 3.2 se obtiene lo siguiente:

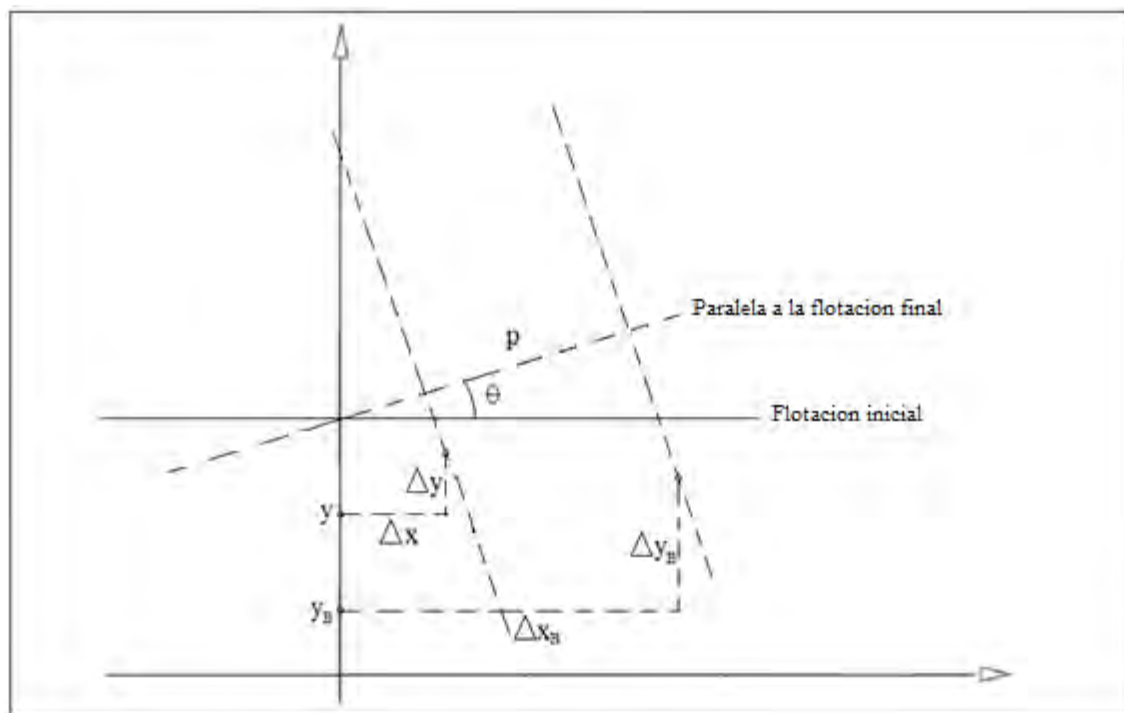
$$p = p_P + p_F - \Delta p \quad (3.4)$$

En donde:

$$p_P = (y_B - y) \sin \theta \quad (3.5)$$

$$p_F = \Delta x_B \cos\theta + \Delta y_B \sin\theta \quad (3.6)$$

$$\Delta p = \frac{m_m}{m} \Delta x_m \cos\theta + \frac{m_m}{m} \Delta y_m \sin\theta \quad (3.7)$$



**Figura 1.-** Brazo de adrizamiento ( $p$ ) para un ángulo de escora ( $\vartheta$ ) dado, referido a un sistema de referencia que rota con el submarino (Distancia transversal en el eje de abscisas y vertical en el de ordenadas).

Nótese que la expresión 3.5 describe lo que se conoce como estabilidad de pesos, la expresión 3.6 describe lo que se conoce como estabilidad de formas y la 3.7 describe la corrección debida al movimiento de líquido en los tanques.

Hasta ahora, todas las expresiones obtenidas son exactas. A partir de aquí se usarán las cuatro aproximaciones abajo indicadas para modelar el movimiento del CCH del submarino y del líquido en los diferentes tanques, las cuales no darán lugar a errores excesivos siempre que estos últimos no adopten geometrías muy irregulares:

$$\Delta x_m = \frac{1}{2} k_x \sin\theta \quad (3.8)$$

$$\Delta y_m = \frac{1}{2} k_y (1 - \cos\theta) \quad (3.9)$$

$$\Delta x_B = \frac{1}{2} q_x \text{sen}\theta \quad (3.10)$$

$$\Delta y_B = \frac{1}{2} q_y (1 - \text{cos}\theta) \quad (3.11)$$

Sustituyendo las expresiones 3.8 y 3.9 en la 3.7 y las expresiones 3.10 y 3.11 en la 3.6 se llega al resultado siguiente:

$$p_F = \frac{1}{2} [q_x \text{sen}\theta \text{cos}\theta + q_y \text{sen}\theta (1 - \text{cos}\theta)] \quad (3.12)$$

$$\Delta p = \frac{m_m}{2m} [k_x \text{sen}\theta \text{cos}\theta + k_y \text{sen}\theta (1 - \text{cos}\theta)] \quad (3.13)$$

Reordenando los componentes trigonométricos, estas dos últimas expresiones se pueden transformar del siguiente modo:

$$p_F = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} q_x \text{sen}2\theta + q_y \left( \text{sen}\theta - \frac{1}{2} \text{sen}2\theta \right) \right] \quad (3.14)$$

$$\Delta p = \frac{m_m}{2m} \left[ \frac{1}{2} k_x \text{sen}2\theta + k_y \left( \text{sen}\theta - \frac{1}{2} \text{sen}2\theta \right) \right] \quad (3.15)$$

E introduciendo las expresiones 3.5, 3.14 y 3.15 en la 3.4 se obtendría finalmente un brazo de adrizamiento cuya versión no dimensional permite identificar la forma de los parámetros  $A_I$  y  $A_{II}$  que aparecen en la igualdad 2.2:

$$A_I = Y + \frac{1}{2} Q_y - \frac{1}{2} \frac{m_m}{m} K_y \quad (3.16)$$

$$A_{II} = \frac{1}{4} \left[ Q_x - Q_y - \frac{m_m}{m} (K_x - K_y) \right] \quad (3.17)$$

A partir de las expresiones 3.16, 3.17 y 2.2 es fácil ver que la altura metacéntrica del submarino (S) podrá describirse en forma no dimensional tal como sigue:

$$S = \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right]_{\theta=0} = Y + \frac{1}{2} Q_x - \frac{1}{2} \frac{m_m}{m} K_x \quad (3.18)$$

En cuanto a los dos primeros sumandos de la expresión 3.18, es fácil ver que forman la altura metacéntrica (no dimensional) sin corregir, la cual constituye una función del calado que normalmente podrá asumirse proporcional a este último sin que ello conlleve errores excesivos.

No obstante, y en aras de la simplicidad, se adoptará una postura conservadora fijando para dicha altura metacéntrica un valor constante e igual al menor de los correspondientes a las condiciones de inmersión y superficie, lo que permite transformar la expresión 3.18 en esta otra:

$$S = S_0 - \frac{1}{2} \frac{m_m}{m} K_x \quad (3.19)$$

En donde se ha supuesto (a falta de confirmación en cada caso concreto) que el valor más bajo se produce en superficie.

Una vez en este punto, cabe hacer algunas observaciones sobre la importancia relativa entre efectos de primer y segundo orden:

- Teniendo en cuenta la restricción R1.1 (ver punto 1), se ve fácilmente que los parámetros  $Q_x$  y  $Q_y$  adoptarán en todo momento valores similares.
- En la condición de inmersión, cada uno de los dos parámetros  $Q_x$  y  $Q_y$  adoptará un valor exactamente igual a cero.
- Salvo en algunos casos especiales, es de esperar que la diferencia existente entre los valores de  $K_x$  y  $K_y$  tenga una contribución poco relevante en la estabilidad cuando se excluyen los TLP.

Así pues, el parámetro  $A_{ii}$  resultará a menudo despreciable tanto en superficie como en inmersión, lo que concuerda bien con lo dicho al final del punto 2.1: que los efectos de primer orden suelen ser los más importantes cuando se trata de submarinos. No obstante, se hace notar que la ecuación 3.19 se ha deducido sin tener en cuenta ninguna de las tres observaciones arriba mencionadas.

#### 4.- Análisis de la altura metacéntrica en las transiciones inmersión/superficie

##### 4.1.- Pérdida de altura metacéntrica al moverse el líquido en los tanques

Imponiendo el equilibrio de momentos transversales es fácil llegar a la expresión abajo indicada:

$$K_x = \sum_i \frac{m_{mi}}{m_m} K_{xi} \quad (4.1)$$

En donde  $m_{mi}$  es la masa de líquido contenida en el tanque  $i$ -ésimo y  $K_{xi}$  el movimiento transversal máximo (no dimensional) del centro de gravedad de dicha masa.

Dividiendo ahora los tanques en dos grupos separados, constituido el primero por los TLP y el segundo por el resto, la expresión 4.1 se transformará como sigue:

$$K_x = \sum_j \frac{m_{mj}}{m_m} K_{xj} + \sum_k \frac{m_{mk}}{m_m} K_{xk} \quad (4.2)$$

En donde el primer sumatorio abarca los TLP y el segundo el resto de tanques.

En todo lo que sigue se dará por válida la restricción siguiente:

**R4.1.**- El proceso de ventilación/soplado (llenado/vaciado) de todos los TLP se asumirá simultáneo y proporcional al cambio que sufre el calado del submarino.

Bajo esta última restricción, resulta inmediato llegar a las expresiones siguientes:

$$m_{mj} = c_j \frac{T - T_0}{1 - T_0} \quad (4.3)$$

$$K_{xj} = B_j \frac{1 - T}{1 - T_0} \quad (4.4)$$

En donde  $c_j$  y  $B_j$  serán respectivamente la capacidad máxima (de masa) y la manga máxima (no dimensional) del TLP  $j$ -ésimo.

Introduciendo estas dos últimas igualdades en la 4.2 se obtiene lo siguiente:

$$K_x = \frac{(T - T_0)(1 - T)}{(1 - T_0)^2} \sum_j \frac{c_j}{m_m} B_j + \sum_k \frac{m_{mk}}{m_m} K_{xk} \quad (4.5)$$

Multiplicando y dividiendo 4.5 por la suma de las capacidades máximas de todos los TLP ( $c$ ) se llega al resultado presentado a continuación:

$$K_x = \frac{c}{m_m} \frac{(T - T_0)(1 - T)}{(1 - T_0)^2} B + \sum_k \frac{m_{mk}}{m_m} K_{xk} \quad (4.6)$$

En donde:

$$B = \sum_j \frac{c_j}{c} B_j \quad (4.7)$$

Y tras introducir la igualdad 4.6 en la 3.19 se puede hacer  $m = m_0$  (otra vez en aras de la simplicidad) para obtener la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} \frac{m_m}{m_0} K_x = \frac{1}{2} \frac{(T - T_0)(1 - T)}{(1 - T_0)^2} CB + \frac{1}{2} \sum_k \frac{m_{mk}}{m_0} K_{xk} \quad (4.8)$$

Aunque en este caso no ha hecho falta, para el movimiento vertical del líquido en los tanques podría hacerse un desarrollo totalmente análogo al que se acaba de presentar.

#### 4.2.- Condición crítica de seguridad

Observando que el último de los dos sumandos a la derecha de 4.8 mantiene un valor constante (que se llamará  $\Delta S_0$ ), resulta fácil alcanzar el siguiente resultado aproximado:

$$S = S_0 - \Delta S_0 - \frac{1}{2} \frac{(T - T_0)(1 - T)}{(1 - T_0)^2} CB \quad (4.9)$$

Nótese que  $\Delta S_0$  coincide con la pérdida de altura metacéntrica (no dimensional) en superficie debida al movimiento de líquido en los tanques exceptuando los TLP.

Y a partir de esta última expresión es fácil establecer una condición crítica de seguridad exigiendo que el mínimo respecto de  $T$  sea siempre superior a un cierto valor  $S_{cr}$ , lo que lleva a la desigualdad siguiente:

$$S_0 - \Delta S_0 - \frac{1}{8} CB > S_{cr} \quad (4.10)$$

En donde el parámetro  $S_{cr}$  constituye una variable aleatoria que vendría a cubrir las siguientes incertidumbres:

- Aproximaciones/simplificaciones usadas en el desarrollo matemático.
- Influencia de las condiciones meteorológicas (olas, viento, etc.)
- Efectos inducidos por la presencia de agua en el interior del CR (solo durante las maniobras de salida a superficie en emergencia).

Finalmente, hay que poner de relieve dos hechos importantes:

El primero es que, a la vista de la expresión 4.10, resulta inmediato obtener la pérdida de altura metacéntrica máxima (no dimensional) indicada en el punto 2.2:

$$\Delta S_{max} = \frac{1}{8} CB \quad (4.11)$$

Este resultado permite adoptar un valor igual a  $1/8$  para la constante  $\omega$  e igual a 1 para las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  (ver expresión 2.4).

El segundo es que, según el enfoque implícito en el esquema iterativo del punto 1, la expresión 4.10 constituye una condición de seguridad necesaria pero no suficiente, pues también debe exigirse que la estabilidad transversal del submarino tanto en superficie como en inmersión (por separado) cumpla los criterios de aceptabilidad establecidos.

## 5.- Conclusiones y comentarios finales

En este documento se han hecho dos aportaciones de interés:

La primera ha sido analizar la relación existente entre brazos de adrizamiento y efectos de primer y segundo orden así como entre dichos efectos y los tres conceptos tradicionales en arquitectura naval: estabilidad de pesos, estabilidad de formas y corrección debida al movimiento de líquido en los tanques.

La segunda ha sido definir una condición aplicable a submarinos de casco sencillo para que el margen de seguridad durante las maniobras de inmersión y salida a superficie resulte aceptable, todo ello mediante un modelo matemático simplificado al máximo para facilitar su uso desde las etapas más tempranas de diseño (ver expresión 4.10).

La condición arriba citada incluye una variable aleatoria  $S_{cr}$  cuya distribución de probabilidades deberá fijarse a partir de datos estadísticos, pudiendo obtenerse estos últimos combinando la experiencia acumulada en submarinos que hayan prestado servicio con técnicas de simulación numérica (aunque hay otras, esta vía de actuación es la mejor de entre todas las conocidas por el autor).

Una vez establecida la distribución arriba mencionada, el valor de  $S_{cr}$  se elegiría para mantener la probabilidad de que ocurra un perforce grave por debajo del máximo que se haya fijado como criterio de aceptabilidad.

Por último, conviene llamar la atención sobre algunos temas importantes:

El primero se refiere a que el uso combinado de modelos basados en principios físicos y planteamientos de tipo estadístico podría haberse enfocado de muchas formas distintas, de entre las cuales hay dos que merece la pena mencionar (dejando para mejor ocasión el estudio detallado de las mismas):

- Ajustar el valor de  $S_{cr}$  y el de las tres constantes que aparecen en la expresión 2.4 ( $\omega$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) directamente a partir de los datos estadísticos disponibles, reduciendo al mínimo el esfuerzo de modelado analítico.
- Calcular la estabilidad transversal del submarino incluyendo de forma explícita los efectos de la presencia transitoria de agua en los espacios de libre circulación al salir a superficie, reduciendo así la incertidumbre a cubrir por  $S_{cr}$ .

El segundo tiene que ver con el hecho de que los resultados obtenidos en el presente trabajo puedan considerarse válidos a pesar de que los efectos arriba citados no se hayan tenido en cuenta de forma explícita. Esto se entiende con facilidad observando que la falta de exactitud asociada a cualquier simplificación siempre podrá gestionarse (con mayor o menor fortuna según sea su naturaleza) mediante la introducción del concepto de incertidumbre, y por lo tanto, de variables aleatorias.

Otro tema importante estaría relacionado con los dos grandes grupos en que podrían clasificarse las medidas correctivas citadas al final del esquema iterativo presentado en el punto 1:

- Aquellas que exigen un rediseño de la plataforma
- Aquellas otras de tipo puramente operacional

En efecto, la experiencia disponible indica que las medidas correctivas incluidas en este último grupo permiten solventar la mayoría de los problemas encontrados en la práctica sin necesidad de rediseñar la plataforma ni, en consecuencia, de hacer cambios muchas veces inoportunos en la misma.

El cuarto y último tema se refiere a la rapidez con que se van a ejecutar las transiciones inmersión/superficie, concepto sobre el que cabe hacer varias reflexiones (al margen de que su análisis se haya dejado para mejor ocasión):

- Guarda una relación directa con las medidas correctivas de tipo operacional que se acaban de citar.
- Constituye una condición de contorno fundamental en la ejecución de cualquier maniobra de salida a superficie en emergencia.
- Influye de manera decisiva en la acumulación temporal de agua que se origina en los espacios de libre circulación al salir a superficie.

## 6.- Referencias bibliográficas

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

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



## CONSTRUCCIÓN INTEGRADA, PRE-ARMAMENTO Y ESTRATEGIA CONSTRUCTIVA EN BUQUES

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

Los hitos principales del proceso de la construcción de un buque comienzan con la elaboración del casco, continúan con la puesta de quilla y el montaje en grada, y finalizan con la botadura y el armamento a flote. Este proceso remata con las pruebas de mar y la entrega del buque.

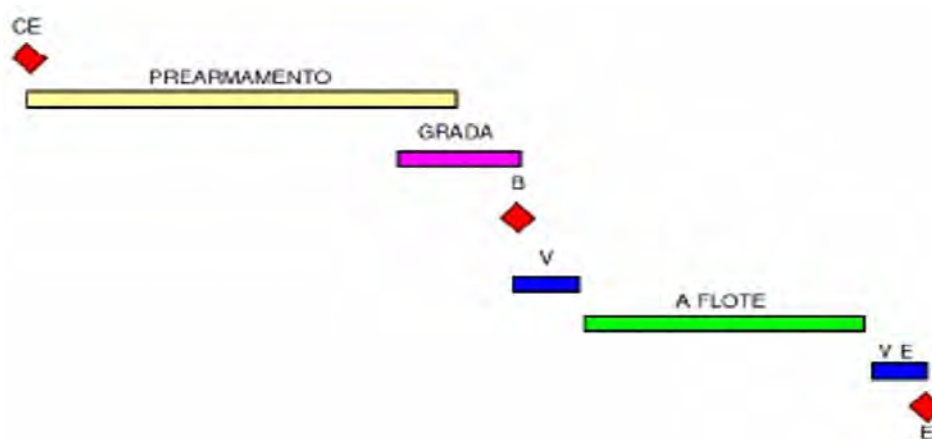


Figura 1: Diagrama del avance de la construcción de un buque

La construcción del buque se inicia con la elaboración de previas, chapas y perfiles en los talleres, para ir formando los bloques. La unión de los bloques forma el buque, y este se bota cuando se alcanza el porcentaje de avance de construcción necesario en la grada.

La construcción de un buque requiere que todos los trabajadores implicados se organicen en grupos ordenados y eficientes. De lo contrario se producirían gastos no necesarios y aumentaría el riesgo de accidentes en la construcción. Por todo esto, los conceptos de construcción integrada, pre-armamento y estrategia constructiva, son muy importantes mientras se vayan elaborando los bloques. Es de vital importancia que, durante la construcción, los bloques lleven montados todos aquellos elementos que sería muy costoso colocar a posteriori.

### 2.- Construcción integrada

La implantación en la construcción naval de un sistema de construcción integrada se basa en dos principios fundamentales. Por un lado, destaca el diseño de los productos intermedios, y por otro, el montaje por módulos de los bloques. Del resultado de utilizar este sistema surge la obtención de un gran avance del buque en el grado de armamento final en grada.

Un bloque se define como el producto intermedio principal, originado por la división del buque en estructuras. A su vez, estas estructuras están basadas en la estrategia constructiva del astillero, y la configuración del bloque vendrá determinada por el diseño del buque, las instalaciones del astillero y el procedimiento de construcción. La descomposición de un bloque en otros elementos más pequeños dará lugar a los sub-bloques, y la unión de bloques en otros más grandes, a los mega-bloques.

El módulo es la parte del buque que incorpora materiales y accesorios, y además puede incluir equipos montados sobre un polín común. Los módulos se clasifican por su fabricación y por el contenido del trabajo que incorporan. Existen cinco tipos: taller, equipo, tubería, habilitación y módulo electrónico.

Entre los objetivos que se persiguen con esta filosofía, destaca la reducción de los plazos de ejecución y entrega, la reducción de costes, la mejora de las condiciones de trabajo, la optimización de los sistemas dentro del buque, y la integración del diseño en las distintas disciplinas de fabricación.



**Figura 2:** Puesta de quilla del BAM Furor (Fuente propia. Año 2016)

### 3.- Pre-armamento

El pre-armamento, o armamento anticipado, se basa en instalar equipos y servicios en la parte de la estructura donde deben estar situados una vez que dicha parte esté fabricada. Con este procedimiento se consigue una mayor eficiencia gracias a que los grupos de trabajo se establecen de forma independiente del resto, es decir, se reducen tanto las interferencias existentes entre ellos, como las faltas de espacio. El pre-armamento presenta las ventajas de: trabajo abrigado y cubierto; ahorro de tiempo en manipulaciones, traslados y maniobras; menor uso de andamios; y mejor programación de los trabajos.

Este método se puede llevar a cabo teniendo en cuenta la división del buque en bloques y módulos. Por ello es importante que la finalización de los trabajos se lleve a cabo completando los módulos por zonas, lo que nos indica que en el anteproyecto del buque ya se deben tener en cuenta las agrupaciones de aquellos elementos que se puedan fabricar en serie, para poder aplicar sobre ellos el factor escala, y así conseguir un aumento de la productividad. Este efecto de escala se define de la siguiente forma: cuando se comienza a realizar una tarea, ésta puede resultar difícil y gravosa, pero conforme se obtenga más práctica, y se realice más veces, dicha tarea resultará menos costosa, traduciéndose en un aumento de la productividad y en una reducción de los tiempos de fabricación. Destacar que la fase del pre-armamento abarca todos los trabajos que se realicen en bloques desde el inicio de esta fase, hasta el final.



**Figura 3:** Colocación en grada de bloque de buque LPD en Ferrol (Fuente propia. Año 1996)

#### **4.- Estrategia constructiva**

La estrategia constructiva es un método común de organización y coordinación de los distintos departamentos involucrados en la construcción de un buque. Dicho método debe incluir las secuencias e instrucciones necesarias, perfectamente planificadas, al objeto de evitar interferencias y contratiempos indeseables durante la ejecución del proyecto. Por lo tanto, la estrategia constructiva se define como un grupo de actuaciones realizadas de forma coordinada por los gremios de un astillero, con el objetivo de reducir los contenidos de los trabajos y mejorar su eficiencia. Con estas mejoras se obtendrá una reducción global de los costes y plazos, todo ello proporcionando la calidad exigida en las especificaciones del contrato. El secreto de esta estrategia supone anticiparse a los errores, para evitar que se produzcan, consiguiendo de esta forma eliminar posibles retrasos que se pudieran producir en el desarrollo del proyecto. Por ello será muy importante disponer de información exacta y de experiencia en la construcción de otros buques similares.

Para que los proyectos puedan ser competitivos es necesario que la ingeniería de fabricación juegue un papel importante, por lo que se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Los proyectos de construcción naval deben ser diseñados pensando en la mayor rentabilidad posible.
- La ingeniería necesaria para su ejecución, debe abarcar planos de despiece, planos de detalle, bloques del buque, plan de montaje, plan de armamento, etcétera.
- Se deben utilizar los medios del astillero con la máxima rentabilidad, teniendo muy en cuenta, por su experiencia, las recomendaciones de los talleres.

Por todo lo citado con anterioridad, se desprende que la estrategia constructiva debe contener los conceptos de «qué» hay que hacer, «con qué» hay que hacerlo, «dónde, cuándo y cómo» hay que hacerlo, y finalmente «con qué» recursos se debe llevar a cabo. Destacar que el secreto de esta estrategia no radica en realizar grandes inversiones, sino más bien radica en que se efectúe un cambio de mentalidad en todos los actores involucrados en el proceso de construcción de un buque.

Una condición fundamental para implantar y desarrollar la estrategia constructiva radica en aplicar una metodología denominada «ingeniería concurrente», sistema mediante el cual todos los talleres del astillero deben trabajar de forma coordinada y conjunta. Para lograr esta coordinación es necesario que exista un control metódico del proceso de producción.

Dicho proceso no será correcto si en la fabricación de los componentes del casco se producen errores en las dimensiones que provoquen correcciones en trabajos ya efectuados, por lo tanto, cuanto mayor sea el avance del porcentaje de armamento efectuado en módulos y en bloques, mayor deberá ser el control que se lleve a cabo. Se trata en definitiva de hacer el montaje de los elementos de armamento, en tierra, y no cuando el buque esté en la grada, o en posición más inaccesible. La estrategia constructiva permite al astillero planificar y diseñar el armamento por zonas.



**Figura 4:** Colocación bloque de proa del BAM Furor (Fuente propia. Año 2017)

La estrategia constructiva debe abarcar aspectos generales y temas más específicos. Por ello, entre la documentación que se debe tener en cuenta para fijar la estrategia, se podría destacar la siguiente:

- Documentación contractual: El contrato, especificación de contrato, especificaciones técnicas de compra, etcétera.
- Disposición general del buque.
- Plano de la cuaderna maestra: ya que contiene gran cantidad de información constructiva (espesores de planchas, tipos de refuerzos, materiales, etcétera).
- Disposición general de la sala de máquinas.
- Disposición de zonas y sub-zonas.
- Plano de despiece de en bloques.
- División modular del buque.
- División de la estructura en productos intermedios.
- Unidades productivas directas: centros básicos de producción existentes.

## 5.- Conclusiones

En el pre-armamento o armamento anticipado se divide el buque en bloques y módulos, por lo que es necesario que para llegar a buen puerto este fin se desarrolle un «plan de armamento». Este plan deberá ser llevado a cabo por: la oficina técnica, producción, aprovisionamiento y control de calidad. Gracias a esta división en la construcción se obtendrán muchos beneficios como pueden ser los siguientes:

- Posibilidad de construir buques de grandes dimensiones en astilleros no preparados para ello en sus inicios.
- Disposición de mayor seguridad para los trabajadores.
- Existencia de mayor eficiencia y comodidad en los trabajadores.
- Existencia de una especialización de los grupos de trabajo.
- Capacidad de planificación por parte de cada grupo de trabajo.

Por otro lado, como beneficios específicos de la construcción integrada, se podrían destacar los siguientes:

- Mejora de la funcionalidad, operatividad y calidad.
- Reducción de coste y plazo de entrega.
- Mejora de las condiciones de trabajo.

Para finalizar destacar que tanto la construcción integrada como la estrategia constructiva suponen un proceso de reingeniería, que abarca a toda la organización del astillero, y que se debe complementar con la aplicación de la tecnología de grupos y productos intermedios, técnicas fundamentales en todo proceso productivo.

## 6.- Referencias bibliográficas

- [1] **MARTINEZ DE CASTRO, F.** *Construcción Naval: estrategia, planificación, fabricación y control.* 2019.
- [2] **GONZÁLEZ LÓPEZ, P.** *Técnicas de Construcción Naval.* 2005.
- [3] **VILLA CARO, R.** *Armamento anticipado y la estrategia constructiva de los buques. Proa a la mar* núm. 178 (págs. 94 a 99). 2020.

## LA SUPERVIVENCIA DEL BUQUE Y SU RELACIÓN CON LOS CONCEPTOS DE SUSCEPTIBILIDAD Y VULNERABILIDAD

AN (CIA – MILCOM EOF) D. JOSÉ MARÍA TORRES DO REGO  
JEMANCART – Sección Técnica (Arsenal Militar de Cartagena)  
Dirección correo: [jtordor@mde.es](mailto:jtordor@mde.es)

### Resumen

En el siguiente artículo se expone la necesidad de explicar el concepto de supervivencia en el ámbito de los buques de guerra. Para ello es necesario desglosarlo en una serie de términos para tener una visión en conjunto.

A su vez al realizar esta división de la supervivencia e introducir los conceptos de los cuales se nutre, nos lleva a explicar por qué estas definiciones nos ayudan a entender la supervivencia.

Para ello se explicará la susceptibilidad como la capacidad de no ser detectado, lo que introduciría la definición de detectabilidad del buque pudiendo desglosar las firmas que deben minimizar los buques de guerra.

Otro apartado sería la vulnerabilidad, la capacidad que tiene el barco de resistir un daño, cualquiera que sea la situación del impacto o cualquier situación que pueda derivar en un problema en la realización de la misión del buque, como puede ser un incendio, inundación o varada, ampliando el concepto de vulnerabilidad y no solo centrado en el impacto de un proyectil. Para ello se debe hacer un estudio en la redundancia de equipos, la seguridad interior, la estanqueidad, empleando el cálculo de esloras inundables, y los materiales empleados para su construcción y la diferencia en usar unos u otros.

Respecto a la recuperabilidad o factor de recuperación hay autores que no la introducen dentro de la supervivencia ya que es un factor difícilmente definible ya que vienen implícito en el la formación de la tripulación y en su capacidad de mantener operativo el buque una vez que ha sido alcanzado, o haya sufrido un accidente, incendio, varada o inundación.

Además de la explicación de los tres conceptos de los que parte la supervivencia, se debe ampliar el campo hacia la actuación una vez que el buque deja de ser operativo, para ello se introducirá en el trabajo la explicación del abandono del buque y la evacuación.

**Palabras clave:** Supervivencia, vulnerabilidad, susceptibilidad, buques de guerra, seguridad interior, factor de recuperación

---

## 1.- Explicación de los conceptos

Según la RAE, la definición de supervivencia es «la acción y efecto de sobrevivir», por ello la importancia de la supervivencia en los buques se basa en la capacidad de mantenerse operativo o funcional durante la misión que esté llevando a cabo hasta su finalización. Es una medida fundamental para ver el rendimiento del buque ante cualquier posible daño.

Actualmente debido a la variedad de amenazas que sufren los buques habría que establecer una relación entre la supervivencia y la amenaza, todo ello con el fin de lograr una mejor adaptación, poniendo como ejemplo los casos de la guerra asimétrica o el terrorismo.



**Figura 1:** Capas de la supervivencia

Consiguiendo esta adaptación en una etapa previa de diseño, se puede lograr una reducción en el coste de la plataforma, además de realizar un buque con las capacidades adecuadas para la finalización de la misión.

Aun así, no solo podemos ver la supervivencia como una capacidad relacionada en el acto de guerra o los entornos hostiles, sino que también tenemos que ampliar la visión y llevar el concepto a los tiempos de paz, hechos que pueden ocurrir como las colisiones, varadas, incendios o mal funcionamiento de la plataforma debido a un mantenimiento negligente, también son motivos que afectan a la supervivencia.

Dentro del amplio concepto de la supervivencia podemos desglosar los términos de susceptibilidad, vulnerabilidad y el factor de recuperación o recuperabilidad. Como se puede observar en la Figura 1 se puede extrapolar el concepto a una serie de capas que van surgiendo a medida que la amenaza se aleja al buque, siendo la susceptibilidad el punto más alejado a la plataforma y la recuperabilidad la capa ya interna en el propio buque.

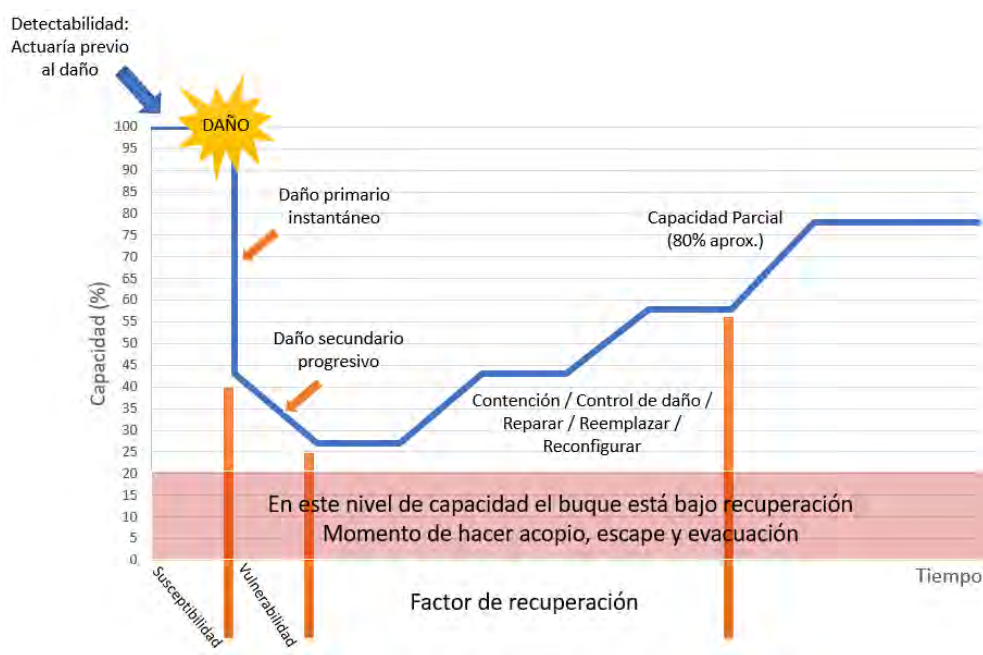
El gráfico que se muestra a continuación representa como va cambiando la operatividad del buque a medida que avanza el tiempo una vez que se ha producido un daño en el mismo. Se puede observar como todos los conceptos estudiados en este trabajo se encuentran relacionados entre sí.



En el primer momento actuarían los sistemas del buque que disminuyen la detectabilidad, siendo una actuación previa al daño, estaríamos en este momento en la capa de la susceptibilidad. Si finalmente el buque es detectado y se produce el daño, comenzaríamos otra etapa en la cual se produce un primer daño instantáneo producido por el impacto, disminuyendo gravemente la capacidad de nuestra plataforma. Acto seguido se ocasionaría un daño secundario progresivo, como consecuencia directa del primer impacto instantáneo, esto seguiría mermando las capacidades hasta llegar al punto mínimo de la gráfica. Estos daños afectarán más o menos al buque dependiendo de la vulnerabilidad de la plataforma, enlazando con la segunda capa de la supervivencia que muestra la capacidad de no ser penetrado.

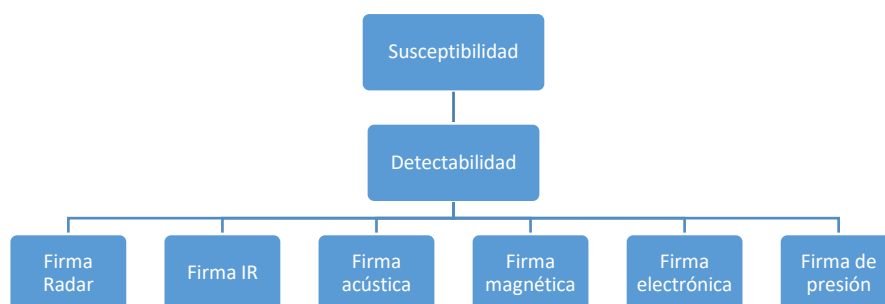
Una vez controlados los daños que tiene el buque se procederá a lo que se denomina el factor de recuperación, periodo en el cual a través de acciones de la tripulación se contiene, se repara, se reemplaza y se reconfiguran los equipos y sistemas para ir aumentando progresivamente la capacidad operativa del buque. Una vez surgido un daño es imposible alcanzar una capacidad total del 100% y por eso una vez pasado el factor de recuperación se hablará de capacidad parcial, que suele ser aproximadamente un 80% de la total.

Si la capacidad del buque es inferior al 20% (dato que puede ser variable dependiendo de tipo de embarcación y capacidad en la misión) se procederá al momento de escape y evacuación ya que se dará la plataforma como perdida y se priorizará la capacidad de salvar a la tripulación.



**Figura 2:** Esquema de la supervivencia respecto a la capacidad operativa y el tiempo

La susceptibilidad se podría definir como la capacidad para evitar ser alcanzado, rige la probabilidad de impacto. Para ello hay que tener en cuenta una serie de factores operativos como pueden ser la misión a la que se somete el buque, la doctrina y táctica, las condiciones medioambientales, el propio diseño que afectaría las diferentes firmas (detectabilidad), la maniobrabilidad y la autodefensa.

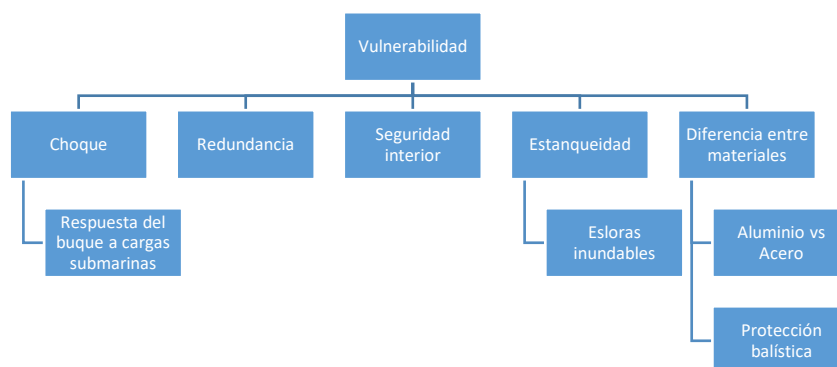


**Figura 3:** Esquema de la susceptibilidad

Todo ello siempre teniendo en cuenta que el buque siempre será visible y la finalidad de los equipos que minorizan la huella de la plataforma es no ser visto, no ser captado y no ser alcanzado.

El siguiente concepto es la vulnerabilidad como la capacidad de resistir un daño, rige la probabilidad de éste después de recibir un impacto. Determinaría como afecta en el buque el problema de ser alcanzado y la extensión de ese daño. Para ello se requiere un estudio de los refuerzos de la estructura, de los equipos y del motivo de que en los buques de guerra sea obligatoria la redundancia.

Además, se tendría en cuenta la capacidad de estanqueidad del buque, así como todo lo relacionado con seguridad interior, referente a la seguridad interior se podría introducir este concepto tanto en la recuperabilidad como en la vulnerabilidad ya que dependiendo del momento de actuación podría englobarse en una u otra capa.



**Figura 4:** Esquema de la vulnerabilidad

Teniendo en cuenta que el buque impenetrable no existe hay que tener en cuenta los efectos del daño primario, mayormente considerados la explosión y la fragmentación y del daño progresivo secundario antes de efectuar las acciones de recuperación.

La vulnerabilidad engloba los conceptos de la respuesta frente al choque, la redundancia de los equipos vitales, seguridad interior como ampliación de la definición de supervivencia incluyendo los incendios u otras incidencias internas del buque, la estanqueidad necesaria para la lucha frente a las inundaciones y la construcción en diferentes tipos de materiales.

Por último, el factor de recuperación sería la fase posterior a la vulnerabilidad ya que es la capacidad de un sistema y del personal de mantener la capacidad operativa una vez sufrido el impacto.

Para un correcto estudio se debe tener en cuenta el rendimiento post-incidente en el cual se pueden suceder detonaciones, explosiones internas y fuego. En este momento el papel de la tripulación cobra especial importancia para mantener controlado todos estos incidentes, además de estos incidentes también la tripulación tiene que hacer un estudio de los daños en equipos y sistemas esenciales para el funcionamiento de la plataforma como pueden ser todo lo relacionado con sistemas eléctricos y bombas.

Una vez realizado el control de daños se procederá al remplazamiento, reconfiguración e intentar restaurar la capacidad del buque, dicha capacidad nunca regresaría al 100% pero sí a una parcial suficiente para continuar siendo operativo en la misión.

En la Figura 2 se muestra que a partir de un porcentaje (aproximadamente el 20% de la capacidad, aunque este dato es variable dependiendo del tipo y misión del buque) habría que empezar a realizar las acciones de acopio o destrucción de enseres, de escape y de evacuación del buque debido a la posibilidad de hundimiento de la plataforma.

## **2.- Relación entre la supervivencia, vulnerabilidad y siniestralidad.**

La capacidad de un buque de superficie de continuar la misión por la cual ha sido designado es la supervivencia, la cual como hemos visto anteriormente está influenciada por dos aspectos que influyen en la probabilidad de sobrevivir al ataque, la susceptibilidad y la vulnerabilidad.

Ambos conceptos están relacionados directamente con la siniestralidad, que es la probabilidad que tiene el buque de ser destruido una vez que ha recibido los impactos. Debido a esto, para maximizar la supervivencia del buque, tendríamos que minimizar su vulnerabilidad.

$$\textit{Siniestralidad} = \textit{Susceptibilidad} \times \textit{Vulnerabilidad}$$

El producto de la susceptibilidad con la vulnerabilidad describe matemáticamente la siniestralidad, por lo tanto, la supervivencia se podría expresar de la siguiente forma como complementario de la siniestralidad.

$$\textit{Supervivencia} = 1 - \textit{Siniestralidad}$$

Después de que Ball introdujera en 1994 la función de siniestralidad, las investigaciones fueron evolucionando para incluir la definición de recuperabilidad o factor de recuperación en la fórmula matemática pero no pudo ser debido a la dificultad de desarrollar un modelo que describa la adecuación de la preparación del personal del buque, la cual es muy importante en la función de recuperabilidad.

Sin embargo, se debería tener en cuenta que estas medidas son tomadas por el equipo de diseño, decisiones que son producto del proceso de montaje de los sistemas de control de daños.

Si el método de la reducción de riesgos es aplicado a través de un método holístico, es decir, viendo todo el conjunto integrado, como un todo, se considera que la relación matemática entre susceptibilidad, vulnerabilidad y recuperabilidad dentro del ámbito de la posibilidad de la supervivencia total del buque se puede expresar del siguiente modo:

$$\text{Siniestralidad} = \text{Susceptibilidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times (1 - \text{Recuperabilidad})$$

$$\text{Supervivencia} = 1 - [\text{Susceptibilidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times (1 - \text{Recuperabilidad})]$$

Consiguiendo una relación entre todos los conceptos explicados en este artículo.

### 3.- Referencias bibliográficas

- [1] CASANOVA RIVAS, E. (2009). *El buque de guerra como aplicación más avanzada de la tecnología naval*. MADRID: F.E.I.N.
- [2] US Department of Defense Terminology (USDDT). <<https://www.militaryfactory.com/dictionary/military-dictionary.asp>> (accessed febrero 2020).
- [3] *Charla sobre Supervivencia*. Roope Kopiranta. SURMA Software. ETSIAN febrero 2020.
- [4] E. BOULOUGOURIS, A. PAPANIKOLAU, S. WINNIE. *Assessment of Survivability of Surface Combatants after Damage in the Sea Environment*. Journal of Ship Production and Design. Julio 2016.

## LAS TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 QUE MEJORARÁN LAS ETAPAS DEL DISEÑO NAVAL

**D. RODRIGO PÉREZ FERNÁNDEZ**

Responsable del Sector Naval Militar en SENER, Ingeniería y Sistemas.

Dirección: C/ Severo Ochoa, 4 - 28760 Tres Cantos - Madrid (España).

Teléfono: +34 918078748.

Mail: rodrigo.perez@sener.es

### Resumen

Para que la Armada pueda afrontar los retos del futuro, debe de implementar las tecnologías que componen la Industria 4.0 a sus procesos, comenzando por la etapa del diseño del buque. El ciclo de vida de un buque de guerra está formado por cuatro fases bien definidas: la de diseño, la de construcción, la de mantenimiento u operación y la de retirada del servicio. La transformación digital de la Armada, y la de sus astilleros y arsenales, pasa por la mejora de sus procesos y herramientas de producción, e incluirlos plenamente en un nuevo entorno digital, que es lo que ha venido a llamarse la cuarta revolución industrial, y que ha de aplicarse al sector naval.

El objetivo de este artículo es dar a conocer al lector estas nuevas tecnologías, y explicar cada uno de los elementos que forman parte de este nuevo ecosistema inteligente. Los puntos que por tanto se verán a lo largo de las próximas páginas son: Internet de las Cosas, Simulación, Big Data, Robótica, Inteligencia Artificial, Realidad Virtual y Aumentada y Gemelo Digital, discutiéndose además los retos que la Industria 4.0 planteará a la Armada.

**Palabras clave:** Buque de guerra, IoT, Industria 4.0, plataformas navales, Armada

### 1.- Introducción

La transformación de la *Industria 4.0* implica una enorme relación de tecnologías interrelacionadas y concurrentes, que pueden analizarse de forma independiente, pero deben aplicarse como una implementación completa en cada ámbito industrial, a través de las herramientas de Diseño, Fabricación e Ingeniería, conocidas por sus siglas en inglés (CAD/CAM/CAE), que a partir de ahora se referirá a ellas simplemente como CAD. Cada tecnología tiene un conjunto de límites que no se pueden diferenciar evidentemente de su vecina. En la [figura 1](#) se exponen las tecnologías que se consideran más importantes para el diseño y construcción naval. Por ejemplo, la *Realidad Virtual* (RV), la *Realidad Aumentada* (RA) y la *Realidad Mixta* (RM) están estrechamente asociadas al concepto de Digital Twin (*Gemelo Digital*) e interconectadas con el *Big Data*, que es generado por las herramientas CAD y todas aquellas soluciones circundantes, utilizando el concepto de la *Nube* que gestiona los datos en una tecnología combinada que a través máquinas y procesos cognitivos de *Inteligencia Artificial* (IA) (Benayas-Ayuso y Pérez, 2019).



Figura 1. Tecnologías relacionadas de la industria 4.0 en un entorno CAD de diseño naval (Pérez, 2019).

Para analizar de forma ágil toda esta informática, se requiere una red que admita diferentes formas de conexión para poder agregar dispositivos especiales como por ejemplo el *Internet de las Cosas*, conocido por sus siglas en inglés (IoT), que puedan acceder a los datos, creándolos y modificándolos, en una capa diferente que afecte a la información básica creada por el Sistema CAD en el astillero. Esta red debe estar protegida, concepto de *ciberseguridad*, pero abierta para permitir el trabajo distribuido, que debe ser controlado de una manera que registre cualquier modificación, en cada estadio de trabajo, realizada en un modo de trabajo abierto, transparente, fiable y no modificable para todos los actores involucrados en el proceso, como son el astillero, las oficinas de ingeniería, las *Sociedades de Clasificación* y el armador o Armada (es el caso que se trata en este artículo). A esto es a lo que se conoce como *blockchain*.

Los resultados del diseño deben integrarse fácilmente con futuras formas de construcción como la impresión 3D, generando pedidos de impresión directamente desde el modelo CAD. Las fases de ingeniería naval implican el diseño y la producción, pero un sistema CAD integrado en la *Industria 4.0* también debe participar en la operación y el mantenimiento. Cuando un barco se vara para una reparación, a veces el modelo no está disponible para esta operación de mantenimiento.

En las etapas de reparación y mantenimiento, replicar con detalle la Cámara de Máquinas, o cualquier otro local o compartimento, en el sistema CAD podría ser una pesadilla, a menos que la herramienta CAD tenga un conjunto de herramientas de procesamiento de IA que, desde una nube de puntos, puede recrear elementos equivalentes a los del CAD, que se pueden convertir con una intervención mínima del usuario en un diseño integrado CAD y totalmente modificable.

## 2.- Breve historia de las Revoluciones Industriales y la Inteligencia Artificial

Para poder entender cómo la *Industria 4.0* se ha convertido en una palabra de moda, es necesario una mirada a sus predecesores, para de esta manera dar una perspectiva de cómo esta revolución en particular está cambiando los procesos productivos. La *Primera Revolución Industrial* nació en Reino Unido con la introducción de las primeras máquinas a finales del siglo XVIII (1760-1840). Esto provocó que se pasara de la producción manual, al uso de máquinas de vapor y agua como fuente de energía. Esto ayudó a aumentar la producción y el término fábrica se hizo popular. La *Segunda Revolución Industrial* ocurrió entre 1870 y 1914, aunque algunas de sus características se remontan a 1850. La característica definitoria de ese período fue la introducción de la producción en masa como medio primario para la producción en general. La *Tercera Revolución Industrial* resulta mucho más familiar que el resto, ya que la mayoría de las personas que viven hoy en día están familiarizadas con las industrias que se apoyan en las tecnologías digitales. A menudo se conoce como la *Revolución Digital*, y se produjo con el cambio de sistemas analógicos y mecánicos a sistemas digitales. La *Cuarta Revolución Industrial* lleva la automatización de los procesos de fabricación a un nuevo nivel mediante la introducción de tecnologías personalizadas y flexibles de producción en masa. Esto significa que las máquinas operarán de forma independiente, o cooperarán con los seres humanos en la creación de un campo de producción orientado al cliente, y que trabaja constantemente en mantenerse actualizado a sí mismo. Los fabricantes podrán comunicarse con los ordenadores en lugar de operarlos. Todo esto será posible a través de IA por ejemplo.

Por lo que se refiere a la IA, se puede decir que no existe un único origen de este concepto y, por lo tanto, no hay consenso para definirlo. En 1920, el escritor checo Karel Aapek ([Capek, 2017](#)), publicó una obra de ciencia ficción llamada *Rossum's Universal Robots*. El juego trata sobre una empresa que construye humanos artificiales con el fin de aligerar la carga de trabajo de otras personas. Aunque en la obra estos hombres artificiales se llaman *robots*, tienen más que ver con el concepto moderno de *Android* o clon. Son criaturas capaces de pensar. El matemático inglés Turing publica un artículo titulado *Computing Machinery and Intelligence* que abre las puertas a la IA ([Turing, 1950](#)). El artículo en sí comenzó con la pregunta simple: ¿pueden las máquinas pensar? Más tarde Turing propuso un método para evaluar si las máquinas pueden pensar, que llegó a conocerse a sí misma como *la prueba de Turing*. La prueba, o juego de imitación, como se llamaba en el documento, se presentó como un simple experimento para juzgar si las máquinas podían pensar. En 1956, en la *Conferencia Dartmouth*, fue donde se acuñó el término IA.

## 3.- Internet de las Cosas

*IoT* es el elemento central de la *Industria 4.0*. Se podría decir que la transformación digital está siendo impulsada por el *IoT*. Se prevé que la inversión en *IoT* en todo el mundo alcanzará los 745.000 US\$ este 2019, frente a los 646.000 US\$ gastados el pasado 2018, lo que significa un aumento del 15,4% según los datos de la empresa consultora IDC, que también prevé que la inversión en *IoT* crecerá anualmente a la dentro del período 2017-2022 y, por lo tanto, superará la barrera de 1.000 millones US\$ para 2022. A nivel nacional, el uso de *IoT* está experimentando un fuerte empuje, y esta es la tecnología en la que el crecimiento es más significativo. Esto significa que el *IoT* no sólo es absorbido por el área industrial, sino que día a día está más presente, en lo que respecta a la automatización del hogar y el control de los procesos domésticos con fines de confort, y también a las nuevas posibilidades que esta tecnología ofrece cuando se aplica en los vehículos ([Muñoz y Pérez, 2017](#)).

Con estas cifras, se puede observar la importancia de la *IoT* y la evolución que esta tecnología tendrá durante los próximos años. Otro indicio a destacar es que esta tecnología está progresando de manera homogénea en el sentido de que tanto la industria como los usuarios están adoptando y abrazando las bondades de la misma. Esto es fundamental, ya que las nuevas generaciones habrán de ir incorporando estas tecnologías y esto facilitará enormemente su uso en el entorno industrial. Actualmente jóvenes conviven de manera natural con las últimas tecnologías, mientras que las generaciones anteriores tardan más tiempo en adaptarse a éstas, o simplemente las rechazan; esto es parte de la naturaleza humana y debe ser considerado. Esto también sucedió cuando otras tecnologías como los ordenadores e Internet comenzaron su existencia y alteraron las vidas de las personas.

#### 4.- Simulación

Uno de los aspectos más fáciles de implementar para la Armada en este proceso de la *Industria 4.0* es el de la simulación, ya que, durante las fases de diseño, las herramientas de simulación y las pruebas de modelos se utilizan de forma intensiva. La simulación también tiene su razón de ser en la etapa de la operación de los buques de la armada. Como se verá en la sección dedicada a *Gemelo Digital*, la simulación puede ser un aliado importante en un astillero, contribuyendo decisivamente en la optimización de los recursos, tanto a nivel de personas e infraestructuras, como de la rápida adaptación a nuevos proyectos. Un *Astillero 4.0* que implemente tecnologías como el uso de vehículos autónomos, requiere un análisis particularmente detallado de los espacios, las interacciones de los trabajadores, la ubicación de los activos y los caminos de los vehículos autónomos. Para ello, las herramientas de simulación se convierten en fundamentales para analizar, y aportar, soluciones a las dificultades que podrían entrañarse, debido a la coexistencia de vehículos autónomos y trabajadores en el mismo espacio de trabajo.

#### 5.- Big Data

Otro factor de gran importancia para la Armada es el del *Big Data*. La Armada y los astilleros han estado almacenando grandes volúmenes de datos durante años. Este volumen de información aumentará drásticamente en el futuro conectando cada componente del buque o del astillero a una Nube de datos donde toda esta información pueda ser analizada y explotada. Este análisis se puede hacer desde diferentes perspectivas y también con propósitos diferentes:

- **Descriptivo:** la Armada puede obtener una estimación mucho mejor del comportamiento del buque más allá de la capacidad de reacción humana y, además, poder compararse inmediatamente con la información histórica para que un comportamiento anormal pueda ser identificado y notificado adecuadamente.
- **Predictivo:** las capacidades analíticas modernas permiten definir patrones de comportamiento basados en datos históricos. Al trabajar de esta manera, podría simplemente predecirse si, sobre la base de los datos que se están recopilando, el comportamiento de un componente en particular del buque se desviará de lo previsto, y por lo tanto se podría prevenir.
- **Prescriptivo:** mediante la realización de un análisis adecuado de datos se podría sugerir cuáles serán las acciones más adecuadas, y también cuándo se deben realizar éstas, con el fin de minimizar el impacto de las acciones a realizar.



Mediante la combinación de estas tres capacidades analíticas es factible encontrar diferentes áreas de mejora como: calidad predictiva, mantenimiento predictivo, mantenimiento prescriptivo, etc.

## 6.- Robótica

La robótica tiene como objetivo el diseño, la construcción y el funcionamiento de robots en su sentido más amplio. Muchas tecnologías están involucradas en el desarrollo de máquinas diseñadas con el objetivo de reemplazar a los seres humanos en algunas de sus actividades, y los avances tecnológicos que se están experimentando significan que cada vez más actividades llevadas a cabo por los seres humanos pueden ser ejecutadas por robots. Esta rápida evolución hace cada vez más frecuente debatir la presencia de este tipo de máquinas o sistemas, y la sustitución de la acción humana por la acción del robot, más eficiente, más rápido, libre de errores, sin necesidad de descansar... Los robots han existido durante mucho tiempo y son especialmente susceptibles a ser utilizados en procesos repetitivos, o siguiendo algún tipo de patrón más o menos complejo. Especialmente útiles son aquellas que permiten al ser humano ser liberado de tareas peligrosas, como llevar a cabo trabajos en ambientes o situaciones comprometidas. Las actividades en entornos industriales, como un astillero, a menudo son peligrosas y el uso de robots para llevar a cabo tales operaciones es muy deseable. Con la llegada de la IA se ha hecho un fuerte cambio en la robótica, lo que le permite extender su campo de acción también a situaciones en las que las decisiones deben tomarse en base a las condiciones de contorno que el robot es capaz de detectar con sus sensores, y elaborar una respuesta a esas situaciones por sí sola. Las aplicaciones de los robots son enormes y están creciendo a medida que avanzan la tecnología y los materiales, pero algunas de las principales aplicaciones son:

- Robots para aplicaciones militares: es en el campo militar donde se pueden encontrar grandes avances, con robots bípedos, cuadrúpedos, etc. como los desarrollados por la *Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA)* (Pérez and Peter, 2019).
- Robots para aplicaciones industriales: Dentro de la industria, el sector de la automoción es el que más a menudo utiliza robots en sus plantas de producción, alcanzando en algunos casos niveles tan altos de automatización que la mano de obra apenas participa.

En el caso de la Armada, o en la fabricación de sus buques en un astillero, como en cualquier otro campo industrializado, existen un número infinito de actividades que actualmente están llevando a cabo los seres humanos y que, debido a su carácter repetitivo y 100% paramétrico, son perfectamente capaces de ser realizadas por bots. La tecnología existe, y está en constante evolución, a la espera de que se analicen todos los procesos y determine cuál de ellos se puede llevar a cabo de forma automatizada.

## 7.- Inteligencia Artificial

El sistema de control en un buque de guerra puede incluir algunos procesos predictivos de IA integrados en el sistema de control general del puente, lo que ayuda a deducir las consecuencias de las operaciones de mantenimiento, de hacer en el momento correcto, así como retrasarlas o evitarlas. Este procedimiento aplicado incluye los métodos de computación de *edge/fog*, debido a que sólo implica la red de comunicación interna del buque, retrasando la descarga masiva de datos de operación a su llegada al puerto. Por ejemplo, durante la navegación, la transferencia de datos únicamente se debe emplear en operaciones críticas. Los datos de navegación también pueden ser útiles en las fases de diseño y producción, para corregir algunos

procesos con el fin de obtener sistemas más eficaces y diseños más eficientes. Esto sólo es posible aplicar algún proceso de *IA* a estos datos, clasificar, procesar y obtener algunos resultados. Esta metodología de trabajo, para ser realmente efectiva, requiere que la Armada y el astillero trabajen conjuntamente. Los procesos de *IA* basados en datos de navegación, en el paradigma de construcción de series de buques, pueden obtener información para mejorar los procesos de diseño y producción, que se pueden aplicar a la serie actual, o a una variante evolucionada de este tipo de buque, u otros. La fase de operación del buque no es la única que produce un conjunto de *Big Data* para ser procesado por un sistema de *IA*. En la fase de producción se puede utilizar la *IA* en los talleres o incluso delegar en un sistema en la nube, para poder ser distribuido. Estos datos, en herramientas incluidas en los *CAD*, se pueden clasificar generando secuencias de trabajo, comprobaciones automáticas de diseño y procesos.

La *IA* aplicada a un sistema *CAD* debe basarse en las maneras de controlar un diseño naval: diseño basado en reglas, lecciones aprendidas y reglas cognitivas. En primer lugar, para el diseño basado en reglas, se tiene el libro de normas y reglas de los astilleros. Estas reglas son la base de cualquier diseño, y son las primeras que aprenderán los sistemas de *IA*. Para mejorarlo, se pueden aplicar otras tecnologías, como la *IA cognitiva*, que es la base del procesamiento del lenguaje natural en una solución de *IA*. Esta *IA cognitiva* se puede ejecutar sobre el libro de normas de los estándares, y con un poco de ayuda del usuario, tratar de mejorar la comprensión en la aplicación de las reglas de la herramienta de *IA*. Toda solución de *IA* requiere un tiempo específico para aprender las formas correctas de aplicar el conjunto de reglas. El siguiente paso, también basado en la ortografía del lenguaje natural, es el de agregar las lecciones aprendidas a la solución de *IA*, creando un ecosistema mixto de reglas que se aplicarán al proceso de diseño actual. Y el último paso, pero no menos importante, las reglas cognitivas. Estas reglas se deducen del diseño actual y también de la entrada de errores de producción en el sistema *CAD*, como las incidencias de diseño.

## 8.- El Gemelo Digital

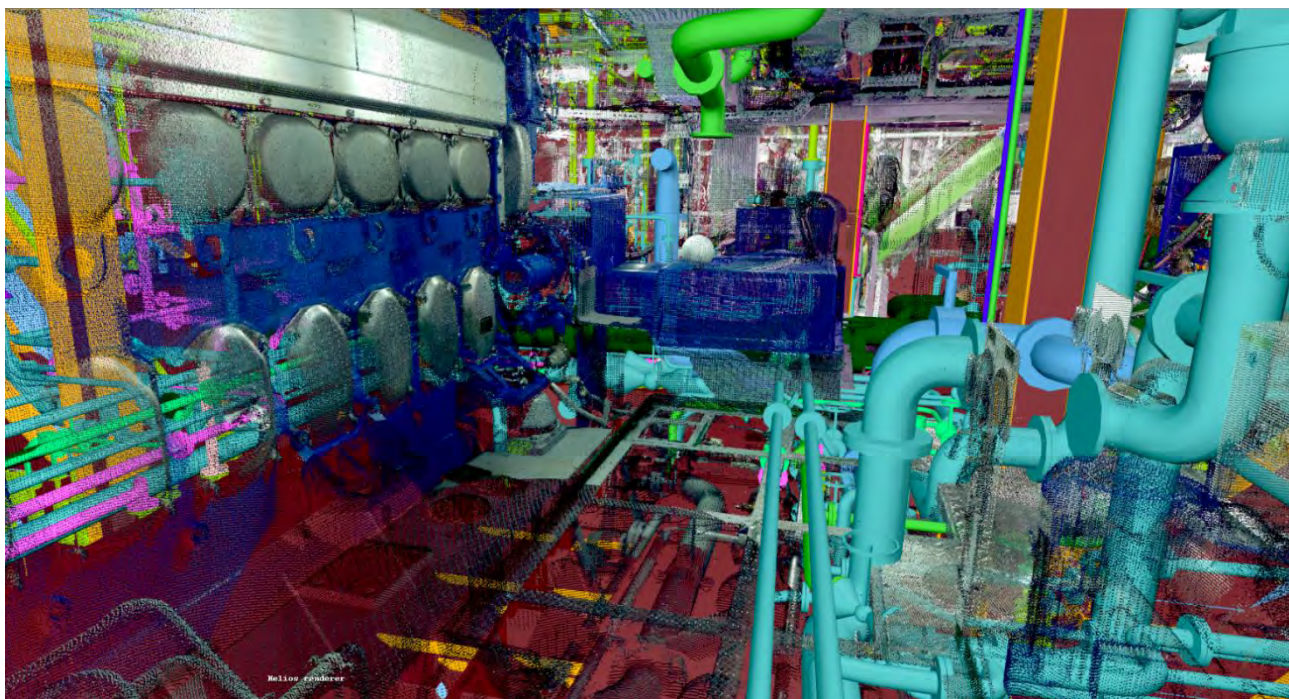
Este concepto significa la conexión entre el activo real y el diseño en el mundo virtual. Hay industrias en las que este concepto se aplica ampliamente, pero la industria naval se encuentra en las primeras fases de su implementación. Aerogeneradores, plataformas de energía y turbinas de gas son hoy en día los casos más comunes donde se puede encontrar el *Gemelo Digital* aplicado. Los procesos manuales (por seres humanos) o automáticos, si el activo virtual incluye *IA* o algún programa automático que simplemente tiene una salida dependiendo de algunos parámetros de entrada, pueden gestionar ambos flujos de comunicación. En la base del *Gemelo Digital*, el modelo es imprescindible. Hay diferentes maneras de realizarlo: fotografías esféricas, escaneado 3D y modelo *CAD* 3D. Ésta última es la mejor opción para una nueva infraestructura, o para un buque del que ya se tiene el modelo 3D, y que se puede actualizar fácilmente.

La combinación de un modelo *CAD* 3D y del escaneo 3D es posiblemente la más interesante. Con ambas tecnologías es posible medir, y esta es una ventaja muy importante. El buque no es un escenario estático, es por eso que la mejor opción es un *Gemelo Digital* basado en modelos 3D generados con un sistema *CAD*, y cuando sea necesario, con modelos generados mediante el uso de tecnologías de escaneo 3D por medio de la transformación de las nubes de puntos en volúmenes y superficies. Este *Gemelo Digital* hecho de geometrías independientes, será el mejor entorno virtual para simular y optimizar procesos, pero también la mejor manera de sincronizar la realidad y el mundo virtual. El modelo 3D incluirá propiedades, parámetros, enlaces

directos a la información proporcionada por sus sensores, e incluirá información operativa y modelos predictivos que estarán funcionando durante su vida útil con el fin de realizar una detección temprana de problemas. Para llegar a este ecosistema del *Gemelo Digital* el factor clave es la definición de estándares, un lenguaje común para hacer posible una integración fácil y rápida de los activos reales y virtuales en un *Gemelo Digital* más complejo. Es importante suponer que un *Gemelo Digital* totalmente integrado no siempre es accesible, y será frecuente encontrar implementaciones parciales que consisten, sólo, en la adquisición de datos de las máquinas con el fin de analizarlos y utilizarlos para diferentes fines, pero una vez alcanzado este primer paso, será más fácil moverse en la dirección del *Gemelo Digital*.

## 9.- Realidad Virtual y Aumentada

Tanto la *RA* como la *RV* son tecnologías que no pueden considerarse nuevas, especialmente la *RV*, cuyos orígenes se remontan a la *Segunda Guerra Mundial*. Hasta no hace mucho tiempo, el uso de la *RV* en el área industrial era algo muy raro, debido entre otros, al alto costo de esta tecnología, pero ahora, y gracias a los recientes avances en ciencias de la computación, miniaturización, almacenamiento, procesamiento gráfico y las nuevas pantallas de alta resolución, la tecnología es más barata, y por tanto la *RV* y la *RA* han revivido. La aplicación de la *RA* en la industria podría ser extensa, y en parte también ofrece muchas de las posibilidades que propone la *RV*, pero es necesario distinguir en cada caso cuál es la mejor opción. La *RA* tiene un fuerte vínculo con la realidad lo cual no sucede de la misma manera con la *RV*. Pero si esta *RV* se utiliza a través del *Gemelo Digital*, el enlace será más fuerte. Este vínculo con la realidad consiste en la explotación y visualización de la información generada por el *IoT*.



**Figura 2.** RA de una Cámara de Máquinas integrada con un Modelo Virtual (*Muñoz y Ramírez, 2019*)

La *RA* también permite superponer la información generada por la infraestructura del *IoT* directamente, ver historial, tendencias, previsiones, advertencias... Posibilidades interminables que el *Gemelo Digital*, a través de la *RV*, también podría ofrecer de forma remota, pudiendo en un futuro, quién sabe, alcanzar una gestión completamente remota de una infraestructura compleja que interactúa con el *Gemelo Digital*. Los trabajos de reparación y mantenimiento, junto con el diseño y el montaje, son las principales actividades donde este tipo de tecnologías pueden proporcionar un valor añadido. Aunque la *RA* requiere una implementación más compleja dentro de los protocolos productivos de la Armada, se ha demostrado que los resultados obtenidos son más rentables, ya que el caso es más complejo. La *RV* ha sido la más utilizada a lo largo del tiempo, especialmente en entornos de entrenamiento, controles de diseño, comerciales, etc.

## 10.- Conclusiones

Después de lo visto en este artículo, es posible tener una idea de la magnitud y complejidad de los cambios que la *Industria 4.0* está demandando a la Armada. En la mayoría de los casos, es un paso inevitable que debe darse para seguir siendo competitivo, pero con la adopción de sólo una parte de lo expuesto, podría significar un paso demasiado arriesgado y complejo que debe ser estudiado cuidadosamente antes de tomar cualquier decisión. Algunas de estas tecnologías se encuentran en etapas tempranas para la implementación industrial, pero es importante analizar lo que puede ofrecer y ser útil para cada caso. Por ejemplo, los *smartphones* pronto serán dispositivos obsoletos, todas las posibilidades de conexión estarán disponibles a través de otro tipo de dispositivos, más naturales e integrados, algo así como *google glass* y por supuesto, *RA* y *RM* serán las tecnologías que mejorarán el vínculo con datos superpuestos a la realidad y a los datos. *DARPA*, por ejemplo, está interesado en una nueva lente de contacto conectada de forma inalámbrica recientemente desvelada en Francia. En abril del año pasado, investigadores de la ingeniería francesa *IMT Atlantique* ([imt-atlantique.fr](http://imt-atlantique.fr)) anunciaron la primera lente de contacto autónoma que incorpora una batería flexible. Estas lentes de contacto proporcionan una asistencia de visión aumentada al transferir información visual de forma inalámbrica.

Las tareas repetitivas y las actividades peligrosas que hoy en día se llevan a cabo por la mano de obra, pueden ser sustituidas o apoyadas por robots, lo que significa un cambio importante para las empresas y las personas que trabajan allí, pero esta transformación es imparable. Se crearán nuevos puestos de trabajo y se necesitarán nuevos perfiles, pero los trabajos que podrían ser reemplazados total o parcialmente con robots desaparecerán. La implantación de robots y vehículos autónomos en la Industria Naval también supondrá la presencia de nuevas herramientas que mejorarán las condiciones de trabajo de los trabajadores, pero es necesaria una adaptación a todas estas nuevas tecnologías y a veces no será fácil. La construcción naval es una industria que podría aprovecharse utilizándolas, pero dependiendo de las particularidades de cada astillero, esta tecnología será más o menos fácil de implementar e incluso si es factible, la decisión debe tomarse con perspectiva, porque robots físicos y vehículos autónomos necesitan condiciones especiales para funcionar. En medio de este ecosistema se encuentra un modelo 3D, creado principalmente con herramientas *CAD*, con lo que la importancia de *CAD* será aún más capital que hoy. La interfaz entre el modelo 3D y el resto de la *Industria 4.0* es el *Gemelo Digital*, el vínculo entre la realidad y el mundo virtual, viviendo simultáneamente durante la evolución de la construcción y extendiendo este mundo de posibilidades a todo el ciclo de vida del producto.

Las herramientas están aquí, y ahora es necesario estudiar y analizar cada caso en particular. No existe una solución global para todas las industrias, ni siquiera una solución global para una industria en particular, pero la digitalización es lo suficientemente madura como para comenzar la implementación y ser parte de la estrategia de la Armada para el futuro.

#### 11. - Referencias bibliográficas

1. Benayas-Ayuso, A. y Pérez Fernández, R. *What should shipbuilding expect from the CAD/CAM systems of the future?* The Naval Architect magazine. Abril. **2019**. pp. 28-31.
2. Capek, K. *R.U.R. (Robots Universales Rossum)*. Books Mablaz. **2017**.
3. IDC. *Worldwide Semiannual Internet of Things Spending Guide 2018H1*. **2018**.
4. IMT Atlantique. imt-atlantique.fr (página visitada por última vez: junio **2019**).
5. Muñoz, J.A. y Pérez Fernandez, R. *CAD tools for designing smart ships in the world of the Internet of Things*. SMART SHIP 2017, 24 y 25 enero. Londres (Reino Unido) **2017**.
6. Muñoz J.A. y Ramírez A. *Achieving the digital Ship: From design to operation*. ICCAS 2019, 25, 26 y 27 septiembre. Róterdam (Holanda) **2019**.
7. Pérez Fernández, R. *Aplicación de la Industria 4.0 al proceso de diseño, construcción y mantenimiento de los buques de la Armada*. DESEI+D 19, 20 y 21 de noviembre. San Fernando (España) **2019**.
8. Pérez Fernandez, R. y Péter Cosma, E. *The use of CAD systems to manage modularity in multi-role warships*. Warship 2019, 26 y 27 junio. Bristol (Reino Unido) **2019**.
9. Turing, A.M. *Computing Machinery and Intelligence*. Mind 49, **1950**. pp. 433-460.

**RECUPERACIÓN DE PIEZAS OBSOLETAS MEDIANTE TÉCNICAS DE ESCANEADO LÁSER.  
APLICACIÓN A LA CULATA DEL MOSQUETÓN MÁUSER 7,92  
MODELO CORUÑA 1943 DE LA GUARDIA REAL**

**D. ENRIQUE MOLINELLI FERNÁNDEZ<sup>1</sup>,**

**D<sup>a</sup>. CRISTINA SORIANO GÓMEZ<sup>1</sup>**

**D. MANUEL GONZÁLEZ GALLEG<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ingeniero Naval y Oceánico

<sup>2</sup> Ingeniero Industrial en Mecánica

INTA Subdirección General de Sistemas Navales

Junio 2018

## **Resumen**

Ocurre con cierta frecuencia que determinadas piezas que forman parte de un conjunto se deterioran y necesitan ser reemplazadas por otras nuevas. No obstante, cuando el equipo tiene cierta edad, puede que no se disponga de piezas de repuesto, que el proveedor o fabricante ya no exista o que se haya descatalogado el producto, no siendo posible reparar el equipo.

En la actualidad existen tecnologías que hacen posible recuperar estas piezas y poder seguir disponiendo del equipo en funcionamiento. En este artículo se presentan las técnicas de escaneo de objetos que nos permiten recuperar estas piezas obsoletas y los procesos a seguir, tomando como ejemplo la recuperación del mosquetón Máuser modelo Coruña 1943 de la Guardia Real.

## **1.- Introducción**

La nueva organización del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas» (INTA) cuenta con la recién incorporada Subdirección General de Sistemas Navales (SGSN) ubicada en el Campus de El Pardo (Madrid). Esta subdirección corresponde al Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR), centro de investigación hidrodinámica con más de 80 años de existencia, que actualmente forma parte del selecto grupo de Infraestructuras Científico Técnicas Singulares (ICTS) del recién creado Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades formando parte de la infraestructura distribuida MARHIS (Maritime Aggregated Research Hydraulic Infrastructures).

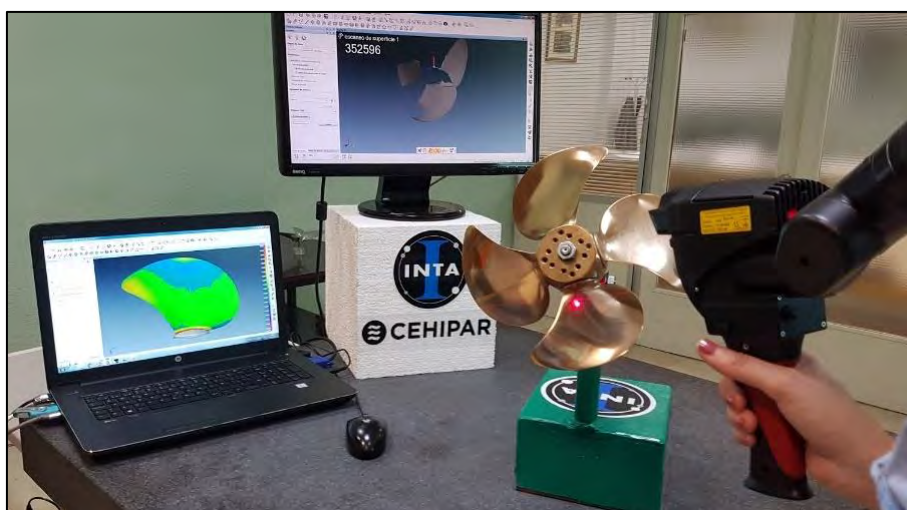
La actividad principal del CEHIPAR es la investigación y la realización de ensayos experimentales en el campo de la hidrodinámica. Para ello, cuenta con tres grandes instalaciones dedicadas a los ensayos hidrodinámicos, que son (por orden de creación):

- Canal de aguas tranquilas
- Túnel de cavitación
- Laboratorio de dinámica del buque

Estas instalaciones se complementan con talleres para la construcción e instrumentación de los modelos a escala, así como un departamento de cálculo numérico de fluidos (CFD).

La fabricación de los modelos a escala y otras piezas necesarias para el ensamblaje de instrumentación u otros componentes, requieren un alto grado de calidad que debe ser controlado. El CEHIPAR cuenta con un área de metrología que, entre otras funciones, se encarga de verificar el cumplimiento de los estándares de fabricación. Una de las herramientas más modernas de las que se dispone es un brazo articulado de medición de coordenadas con cabezal láser.

El brazo se engloba dentro del grupo MMC (máquinas de medición de coordenadas) que son equipos capaces de medir las coordenadas en 3 dimensiones de puntos en superficies. El brazo articulado dispone de 7 grados de libertad, lo que facilita enormemente el acceso a cualquier parte del volumen de una geometría. El equipo tiene dos métodos de medida de coordenadas, uno por contacto mediante el uso de un palpador y otro sin contacto mediante un cabezal láser dispuesto en el extremo del brazo (Figura 1).



**Figura 1.** Proceso de escaneado con láser de un modelo a escala de una hélice

El uso de palpador implica la obtención de coordenadas en un único punto (el contacto entre la punta esférica del palpador y la superficie del objeto). Esto resulta muy útil para geometrías sencillas, como planos, cilindros, o mediciones básicas como distancias entre puntos, empleado habitualmente en procesos de control dimensional.

Para la medición de superficies complejas se emplea el cabezal láser, que es capaz de medir miles de puntos por segundo de una superficie sin necesidad de tener contacto con la misma. Está especialmente indicado para superficies delicadas en las que es importante la ausencia de contacto para evitar su deterioro.

El escaneado de geometrías mediante el escáner láser tiene diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería inversa y el control dimensional. El CEHIPAR lo emplea principalmente para el control de calidad de la fabricación de piezas (hélices y modelos de barcos a escala), pero también lo aplica para otras finalidades como la digitalización de objetos (creación de archivos CAD) o la recuperación de piezas obsoletas. Precisamente,

de este último caso, se presenta en este artículo la recuperación de la culata del mosquetón Máuser 7,92 modelo Coruña 1943.

Este mosquetón, cuyo origen se remonta a finales del S. XIX, es empleado por la Guardia Real en múltiples desfiles y exhibiciones en su versión de 1943. Este modelo se encuentra actualmente descatalogado y no hay soporte de mantenimiento ni de piezas de repuesto. Con el paso del tiempo, muchas de las unidades disponibles se fueron deteriorando o quedando directamente inservibles por roturas de diversas piezas.

Esta problemática planteada, junto con la escasez de proveedores actuales, lleva a la búsqueda de nuevas técnicas para la reproducción de estas piezas obsoletas.

En la referencia [1] se define el concepto de pieza obsoleta como aquella que ya no se fabrica o no se encuentra en el mercado, bien sea porque la empresa fabricante ha dejado de existir o porque no comercializa esa pieza en cuestión. A esto se añade que no existe información asociada a la pieza, es decir, no hay planos de diseño, descripción de materiales ni proceso o técnica de construcción.

La recuperación de una pieza obsoleta requiere un proceso que aporte toda la información necesaria para que quede perfectamente definida, esto es la definición geométrica, características técnicas (estructural, dureza, materiales de fabricación, etc.) y una descripción completa del proceso de fabricación, ya que es probable que la técnica empleada en la pieza original ya no se pueda reproducir por existir nuevas técnicas y herramientas más modernas.

La técnica de escaneo láser permite la obtención de la geometría en forma de nube de puntos, pero se necesita un trabajo posterior para la definición completa de la geometría a través de herramientas CAD y finalmente la definición de materiales y tecnología constructiva (fundición, tallado, etc.).

## **2.- Tecnologías de escaneo**

Existen en el mercado diferentes soluciones tecnológicas para el escaneo de piezas de todos los tamaños y geometrías. La tecnología más adecuada en cada caso dependerá por un lado del tamaño del objeto y la distancia desde el objeto al equipo, y por otro lado, dependerá también de la finalidad para la que se requiere la medición (Figura 2).

La combinación de estas tres variables nos indica la mejor tecnología de escaneo, de modo que para objetos grandes y lejanos (por ejemplo, un edificio o un buque) las tecnologías más adecuadas serían una estación total para obtener puntos discretos o un escáner láser para obtener una nube de puntos completa. En entornos más reducidos, con objetos de tamaño medio (un compartimento de un buque como la cámara de máquinas o un modelo de buque a escala como los que se ensayan en el CEHIPAR), se puede emplear también el escáner láser, pero además existen otras opciones como el láser *tracker*, que dispone de dos modalidades de medida, según el objetivo de la medición, una con palpador para la medición de puntos discretos y la otra con un láser escáner que permite obtener una nube de puntos de toda la superficie escaneada.



Para objetos más pequeños y a una distancia corta, la técnica más adecuada podría ser la que emplea luz estructurada junto con cámaras digitales de alta resolución. Estos equipos ofrecen alta precisión funcionando muy bien con cualquier tipo de superficie.



**Figura 2.** Instrumentos de medición: (a) Estación Total; (b) Láser tracker con palpador y escáner láser; (c) Láser escáner; (d) Escáner de luz blanca y (e) Brazo articulado con palpador y escáner láser. (Fuente: <[www.hexagonmi.com](http://www.hexagonmi.com) y [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com)>)

Finalmente, una de las herramientas más versátiles para la medición de objetos de tamaño pequeño y mediano es el brazo articulado de medición de coordenadas. El tamaño del brazo limita la distancia al objeto, existiendo diversos tamaños en el mercado, desde 1 m hasta los 4,5 m. En el CEHIPAR se dispone de un brazo articulado 3,5 m y 7 grados de libertad con la opción de medir indistintamente con palpador o cabezal láser. Con este equipo se realizan principalmente trabajos de control dimensional de los modelos a escala de carenas y hélices que se fabrican en el CEHIPAR.

La medición de objetos mediante el escaneado tiene otras aplicaciones de interés, además de las mencionadas de control dimensional. Una de estas aplicaciones es la ingeniería inversa, en la que, a partir de la digitalización de la misma y aplicando técnicas de CAD se puede generar la geometría completa de esta pieza. La información necesaria para iniciar el proceso de ingeniería inversa se obtiene de la nube de puntos escaneada mediante cualquiera de las técnicas descritas anteriormente.

El CEHIPAR recibe, cada vez más, solicitudes de trabajos tanto de control dimensional como de ingeniería inversa, aprovechando la disponibilidad del brazo de medición de coordenadas. Uno de los últimos encargos proviene de la Guardia Real, quienes solicitaron evaluar la posibilidad de reproducir uno de los mosquetones que se emplea en desfiles y exhibiciones, lo que causa en determinadas unidades fracturas en la culata. Se debe remarcar que este mosquetón es un modelo antiguo, por lo que su fabricante desde hace décadas ni lo comercializa ni lo fabrica ni lo mantiene, labor que recae en los maestros armeros de la unidad.

Después de estudiar la solicitud recibida de la Guardia Real y teniendo en cuenta la dificultad, unida a la poca experiencia en ingeniería inversa de piezas tan complejas y reproducción de objetos, se decide evaluar y validar el uso del escáner láser del brazo, junto con las capacidades de fabricación mediante técnicas de control numérico, para determinar la viabilidad de la reproducción de esta pieza, de modo que los demás componentes metálicos ensamblen perfectamente con la culata y sea viable su uso.

En el apartado siguiente se exponen con detalle todos los pasos seguidos desde la digitalización de la culata del mosquetón Máuser hasta la fabricación en madera, pasando por todas las fases intermedias necesarias.

### 3.- Proceso de recuperación del mosquetón

La culata del mosquetón es de madera de nogal español y se fabrica de una sola pieza (Figura 3). El objetivo es definir el proceso para reproducir exactamente la pieza partiendo de una original que se encuentre operativa. Con la experiencia en la medición de geometrías complejas con el brazo articulado con cabezal láser, las capacidades de construcción por eliminación de material en talladoras de control numérico y los programas de diseño y fabricación asistida por ordenador (CAD/CAM) disponibles, se desarrolla el procedimiento que se describe a continuación.



Figura 3. Culata original empleada para el escaneado láser

#### Digitalización con escáner láser

El primer paso del proceso es obtener la información de la geometría de la pieza en formato digital, esto se realiza mediante el escaneado con láser empleando el brazo articulado. Como el escaneado se debe hacer del volumen completo hay que tener especial cuidado en cómo se coloca la pieza con respecto al brazo para alcanzar toda la superficie incluyendo hendiduras y taladros.

Para ello, se diseña una pieza que permita sostener la culata en una posición adecuada de tal manera que todas las partes de la pieza puedan ser escaneadas, es decir, sin dejar ninguna parte oculta al alcance del escáner. Se aprovechan los taladros cilíndricos del Máuser para posicionarlo sobre un soporte específico.

La madera es un material que no da ningún problema con el láser del brazo en cuanto a reflejos y/o brillos, así que no se requiere ningún tratamiento específico para mejorar la calidad de los puntos escaneados.

Se debe tener especial cuidado en captar correctamente toda la geometría del Máuser, evitando dejar zonas con rebajes o taladros sin escanear, ya que podrían crear dificultades en las posteriores partes del proceso.

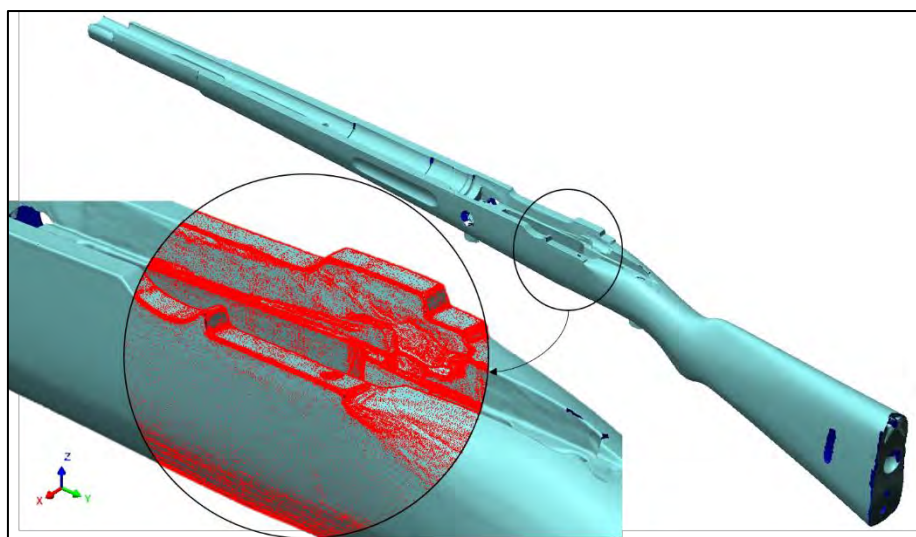
En este caso, no se dispone de información ni del sistema de referencia (planos y ejes que definen la posición de la pieza) ni de posibles simetrías, así que la pieza se mide en la posición que mejor convenga para su escaneado, no siendo necesario definir un origen de coordenadas (esto se hará más adelante desde un programa específico).

La precisión de la medición está relacionada con la distancia desde la que se mide el Máuser respecto a la base del brazo. La mejor precisión se encuentra en una extensión intermedia del brazo, por lo que la posición relativa entre ambos es la que sitúa a la pieza entre el 20 % y 80% de la extensión del brazo, alcanzando todos los puntos de la superficie con el menor movimiento del mismo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se realiza el escaneado procurando que la nube de puntos sea lo más limpia posible, evitando zonas densas o libres de puntos.

Existen determinadas partes de la nube de puntos que se deben eliminar ya que forman parte de la pieza soporte o que son ruido (puntos que se encuentran fuera de la superficie o que tienen un vector de dirección claramente desviado).

La figura siguiente muestra la nube de puntos filtrada, suavizada y sin ruidos, con un total de 1 235 196 puntos. Esta nube de puntos está reducida de modo que en zonas planas la densidad de puntos es menor y aumenta en las zonas con curvatura, de este modo se puede trabajar con archivos de menor tamaño pero sin perder precisión.



**Figura 4.** Nube de puntos en formato STL y detalle de los puntos (en rojo) en una zona determinada

El siguiente paso es realizar las operaciones necesarias con esta nube de puntos para facilitar la creación de las superficies en el programa CAD y posteriormente el sólido.

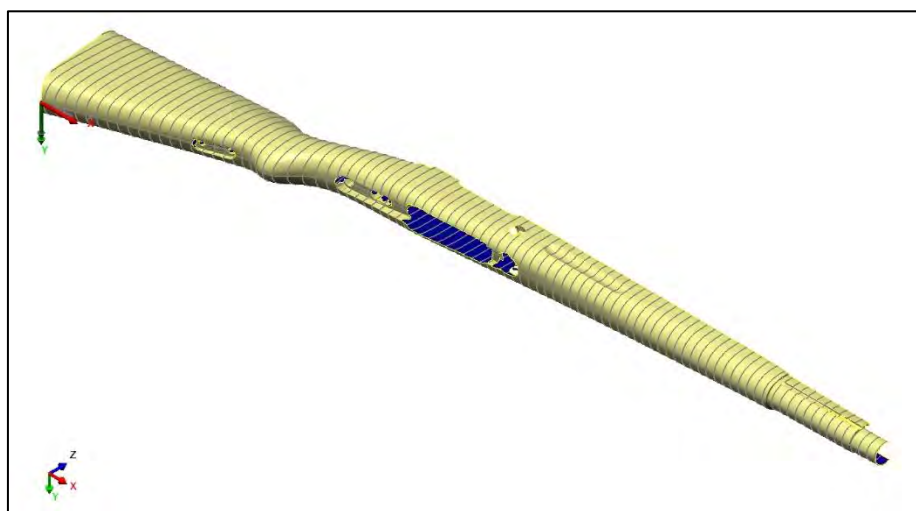
### Procesado de nube de puntos

El objetivo de este proceso es preparar la nube de puntos para facilitar la generación de superficies en un programa de CAD de la pieza escaneada.

Esta preparación requiere como primer paso una limpieza de puntos para aislar la pieza de todo lo demás (soporte, superficies ajenas cercanas, ruido en caso de superficies complejas y/o brillantes, etc.), este proceso se lleva a cabo directamente con un programa de adquisición de puntos, siendo el PolyWorks el utilizado en el CEHIPAR.

Con la nube de puntos limpia, el siguiente paso es definir el sistema de coordenadas. La definición del sistema de coordenadas no es un paso obligatorio en un proceso de ingeniería inversa, pero en este caso particular el método de creación de superficies se basará en secciones transversales (perpendiculares al plano principal), siguiendo el procedimiento estándar de la SGSN de generación de superficies para carenas de buques, es por ello por lo que se necesita disponer de un sistema de referencia.

El sistema de referencia se obtiene a partir de la información de la propia pieza escaneada, generalmente planos, simetrías, ejes, aristas, etc. En este caso, el mosquetón no tiene planos de referencia claros ni simetrías, por lo que se busca la que mejor se adapte. Se toma el eje del alojamiento del ánima del cañón como eje principal y a partir de ahí se define el resto del sistema de coordenadas, definiendo el origen en el extremo inferior de la culata (Figura 5).



**Figura 5.** Generación de secciones transversales y sistema de referencia

Por último, en esta fase de preparación para la creación de superficies, se emplea una herramienta disponible en PolyWorks®, que es capaz de detectar, a través de la nube de puntos, una serie de geometrías básicas como planos, cilindros, conos, esferas o ranuras. En cada caso, el programa indica la desviación entre la nube de puntos y la geometría detectada, rechazando la misma si se supera un valor determinado. Se definen por este método, las hendiduras de alojamientos de distintas piezas metálicas, los taladros (como cilindros) y los planos existentes en la zona superior (Figura 6).

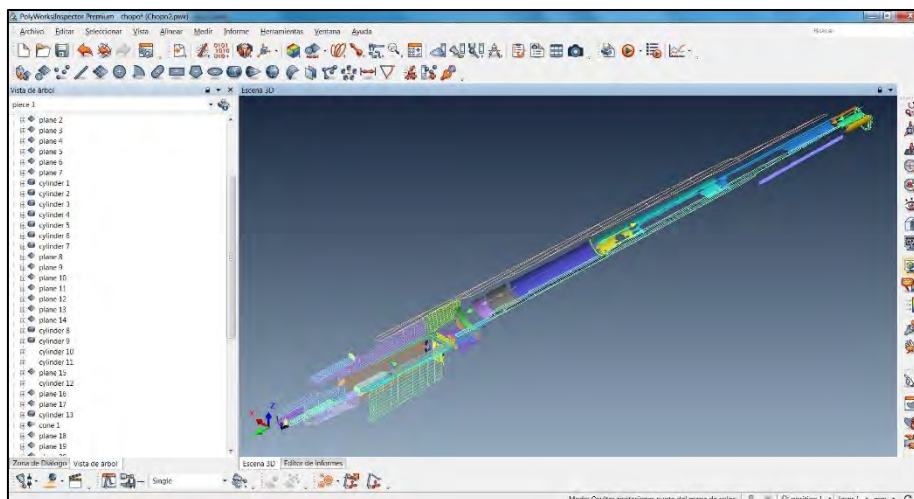


Figura 6. Detección de geometrías sencillas (planos, cilindros y hendiduras)

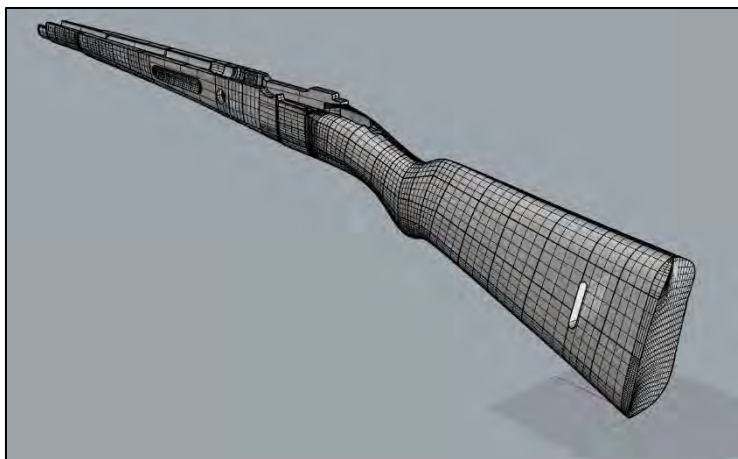
### **CAD (Diseño Asistido por Ordenador)**

El objetivo de esta fase es, con la información obtenida hasta ahora, generar un sólido formado por superficies suavizadas, generalmente NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Las uniones entre superficies son de especial importancia para el cumplimiento del requisito de derivabilidad y continuidad, de tal manera que no se produzcan discontinuidades o desniveles en la unión de las mismas. Por lo tanto el sólido resultante no debe presentar ningún espacio susceptible de crear incompatibilidades entre CAD y CAM (Fabricación Asistida por Ordenador), por lo que todas las uniones de superficies suavizadas deben estar perfectamente cerradas y ensambladas.

Las secciones generadas en la fase anterior deben ser exportadas en el formato adecuado, por ejemplo IGES, para trabajar desde un programa CAD, siendo el programa Rhinoceros® el empleado en la SGSN. Este programa dispone de diversas herramientas de generación de superficies a través de curvas, empleando la más adecuada para cada caso en función del tipo de superficie de cada zona de la pieza.

Para el caso de la zona superior del Máuser, donde se alojan las partes metálicas (cañón, gatillo, etc.) se emplean las superficies generadas en la fase anterior. Lo importante en este caso es el proceso de unión de las superficies entre sí, es decir las aristas. De tal manera que se extienden las superficies más allá de la intersección recortando las zonas sobrantes, prestando siempre especial atención en que el volumen generado esté completamente cerrado (condición necesaria para la generación de un sólido 3D).

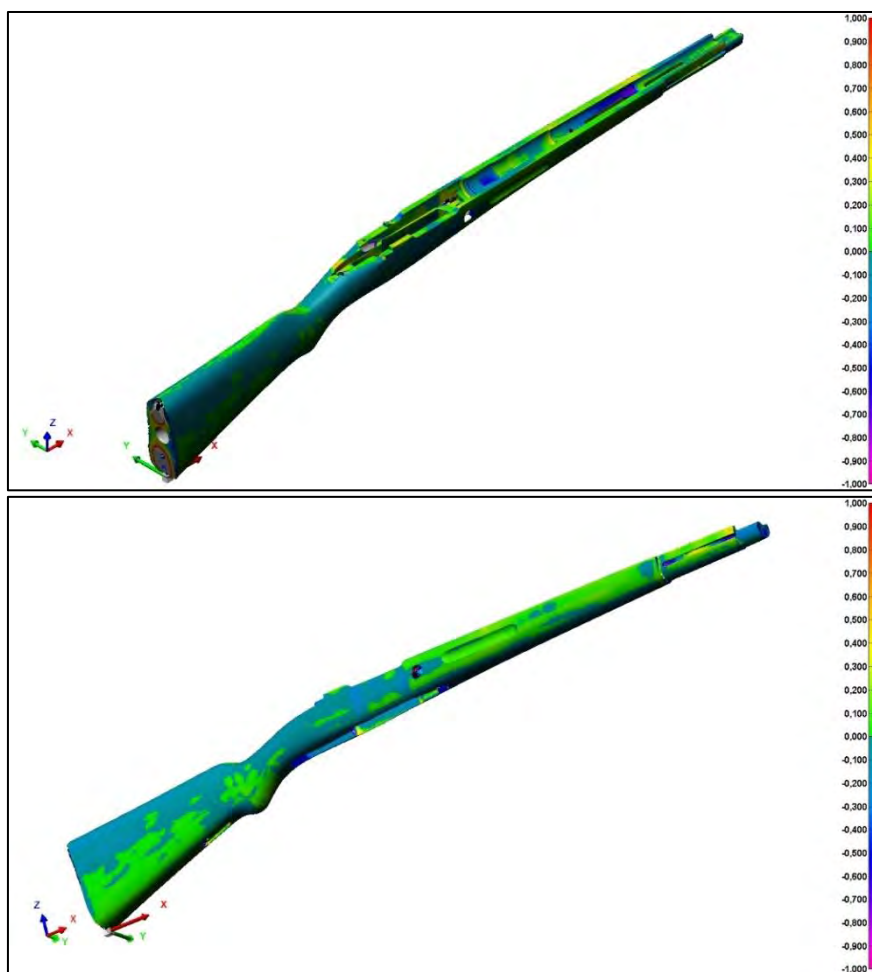
Llegados a este punto, con las superficies generadas con las secciones y las generadas con las geometrías sencillas, se debe crear un sólido perfectamente cerrado (Figura 7). Esto se hace con la operación booleana unión de todas las superficies creadas, si esta operación no presenta ningún error el proceso es válido y se ha conseguido un sólido 3D correcto para pasar a la fase de fabricación por control numérico.



**Figura 7.** Modelo CAD del volumen completo de la pieza

Una vez generado el sólido 3D se verifica que es igual a la pieza escaneada con los márgenes de error establecidos ( $\pm 1$  mm). Para ello se exporta el sólido al módulo de inspección contenido en PolyWorks<sup>®</sup>. El proceso que se realiza es el de superposición de la nube de puntos escaneada inicialmente y la geometría del sólido. Para determinados casos es necesario realizar esta superposición mediante un proceso iterativo de ajuste por mínimos cuadrados.

Este módulo de inspección calcula la mínima distancia entre cada uno de los puntos escaneados y la superficie del sólido mostrando el resultado en una escala de colores. La Figura 8 muestra el resultado obtenido.



**Figura 8.** Mapa de colores de desviaciones entre la nube de puntos y el CAD generado. (Escala a la derecha)

Como se puede apreciar, prácticamente el total de la pieza está dentro de la horquilla establecida como aceptable. Únicamente en algunos casos y de manera consciente se deja un sobre espesor que permita realizar ajustes manuales dependiendo de la parte metálica que se tenga que acoplar.

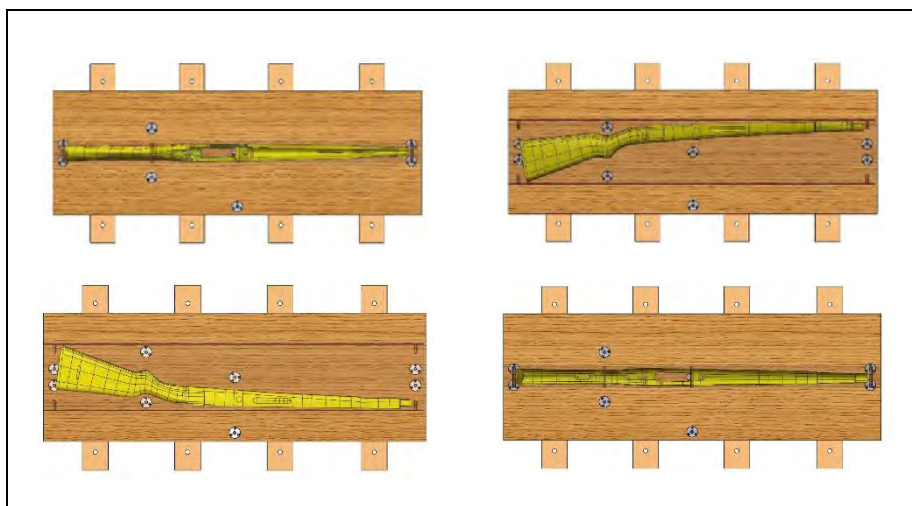
### **CAM/CNC (Fabricación asistida por ordenador / Control numérico)**

En esta fase se importa el archivo de CAD generado a un programa de fabricación asistida por ordenador (CAM) con el fin de definir las instrucciones necesarias para que una máquina de control numérico sea capaz de mecanizar la pieza partiendo de un bloque sólido de madera.

El archivo CAD se importa al programa Mastercam<sup>®</sup> para desarrollar el proceso de fabricación del mosquetón. En este paso es habitual tener que reparar determinadas superficies del modelo de estudio que han sido dañadas en su importación.

El siguiente paso es definir la estrategia de fabricación, para lo que se necesita saber la máquina a emplear, en este caso las dimensiones de la pieza obligan a elegir una fresadora de 3 ejes que disponga de una carrera mínima para albergar la pieza, seleccionando por su disponibilidad y características la fresadora modelo MAZAK *Vertical Quality Center VQC-20/40B*. Una vez elegida la máquina, se han ideado y pensado las distintas

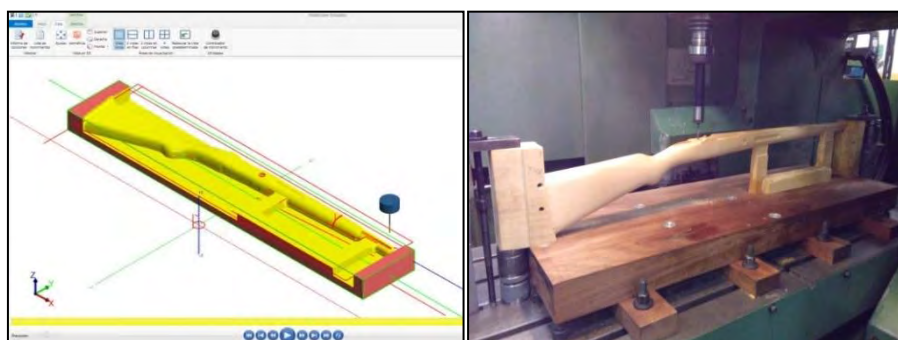
formas y técnicas para la mecanización de la pieza, siendo necesario para este caso particular, el diseño de varios útiles y una bancada a medida, según sus distintas posiciones de mecanizado. En la Figura 9 se muestran las cuatro posiciones elegidas sobre la bancada, de modo que entre una posición y la siguiente tan sólo haya que rotar la pieza 90 grados sobre el eje longitudinal. Para fijar el material en bruto sobre la bancada, se fabricaron varias espigas que facilitan la operación de rotación manteniendo el sistema de referencia.



**Figura 9.** Diferentes posiciones de mecanizado del modelo, así como bancada y útiles de fijación.

Otro punto importante a tener en cuenta es la elección de las herramientas de corte del material para los procesos de desbaste y acabado, para ello se deben considerar las propiedades físicas del material, dimensiones, geometrías y características de la máquina CNC, así como las distintas trayectorias de las herramientas para conseguir la calidad y acabado requerido.

Por último, para verificar que el proceso definido es correcto y viable se realiza una simulación en el programa CAM, que permite detectar posibles errores o conflictos en el proceso de fresado antes de empezar a fabricar la pieza. Si todo es correcto se inicia el proceso de mecanizado (Figura 10).



**Figura 10.** Verificación en Mastercam (izquierda) y mecanizado (derecha).

Es necesario mantener fijada la pieza durante las diferentes posiciones del proceso, por ello se dejan unos trozos de material sin mecanizar denominados garras y que serán retiradas una vez finalizado el fresado. Por último se procede al lijado manual de toda la pieza.



Para completar la reproducción de la pieza se realiza el taladro de la baqueta. Como paso previo es necesario fabricar un útil de fijación del mosquetón en el torno, ya que el taladro tiene casi 300 mm de profundidad y un error en la posición produciría una desviación excesiva.

### **Optimización**

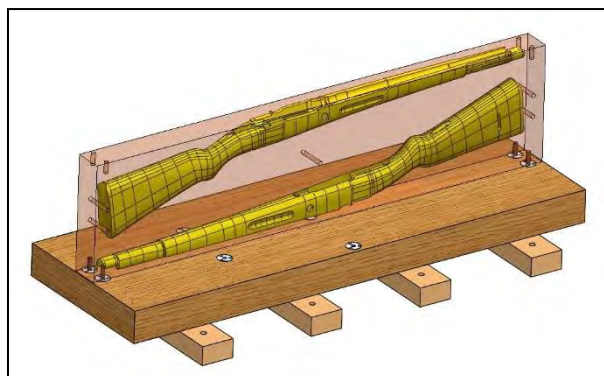
Partiendo de la tecnología que actualmente posee el CEHIPAR, se han estudiado y analizado posibles alternativas con el objetivo de minimizar el material empleado (en este caso madera de nogal español) y tiempos de ejecución, derivando en una reducción de costes.

Para ello, se desarrolla una nueva técnica de mecanizado en la que se incluyen dos unidades en el mismo bloque de material bruto y que sea factible con la metodología aplicada, cumpliendo con las medidas límites de máquina (Figura 11). Esta nueva técnica permite minimizar en:

- a) **Material:** Con la configuración de doble mecanizado, se consigue un ahorro de material del 31,67 % en volumen por cada dos unidades fabricadas.
- b) **Tiempos de ejecución:** En esta parte, cabe subrayar que el ahorro en los tiempos de mecanizado vienen marcados por dos factores: la cantidad de material a desbastar y el número de posiciones del bloque (movimientos del macizo de madera para que la fresa mecanice toda la superficie de la pieza). Con respecto a este último factor, se puede afirmar que se reduce en dos posiciones con respecto al mecanizado individual. Las posiciones son las siguientes:
  1. Vertical 1: Mecanizado del interior de una unidad.
  2. Vertical 2: Mecanizado del interior de la otra unidad. Para ello hay que girar el material en bruto 180°.
  3. Horizontal 1: En esta posición, se mecaniza un lateral de las dos unidades. Se podría estimar un ahorro en el tiempo del 10 %.
  4. Horizontal 2: Similar a la posición «Horizontal 1».

Cortes separación de unidades: Se trata de un mecanizado de contorneado para separar ambas piezas, para poder mecanizar las zonas inferiores.

  5. Vertical 3: Mecanizado de la zona inferior de una unidad.
  6. Vertical 4: Similar al proceso de mecanizado de la posición «Vertical 3».



**Figura 11.** Configuración de doble mecanizado

En la actualidad se está estudiando la posibilidad de realizar los procesos de mecanizado incorporando el módulo divisor (4° grado de libertad formado por un eje de giro) a la máquina herramienta del Centro de modo automatizado, para evitar que los giros sean realizados por el personal o en máquinas CNC de nueva tecnología que permitan minimizar tiempos y costes, así como maximizar en calidad del producto.

#### 4.- Resultados y Conclusiones

La pieza finalizada se verifica colocando el resto de componentes que completan el mosquetón. El éxito del proceso implica que todos los componentes encajan perfectamente y el mosquetón es operativo. En la imagen siguiente se muestra el mosquetón finalizado y montado con todos los componentes. Actualmente se está empleando junto con el resto de unidades existentes (Figura 12).



**Figura 12.** Máuser montado y listo para su uso.

Como conclusiones finales a este trabajo se destaca la versatilidad que ofrece el brazo de la SGSN del INTA para la realización de trabajos de ingeniería inversa. Capacidad mejorada con la reciente incorporación de la última versión del escáner láser (RS4) incrementando notablemente sus prestaciones especialmente en superficies complejas y de materiales brillantes.

El uso principal de este brazo es el de inspección de los modelos de hélices y carenas que se fabrican en nuestros talleres, pero eventualmente, según el proyecto se realizan determinados trabajos de control dimensional, ingeniería inversa o reproducción de piezas.

El empleo de las técnicas de ingeniería inversa permite la recuperación de determinados objetos obsoletos o deteriorados de los que no se dispone de información suficiente.

En este artículo se ha expuesto el procedimiento de trabajo de las técnicas de escaneado y fabricación de objetos de una geometría compleja, sin hacer un análisis de contenidos demasiado científico, para divulgar uno de los servicios de ingeniería e investigación que se realizan en las instalaciones del CEHIPAR, así como las conclusiones que se obtienen:

- Consolidación de la dotación de un nuevo servicio de ingeniería «escaneado o digitalización de objetos» en el CEHIPAR para cualquier tipo de geometrías en el ámbito de la Defensa.
- Análisis de optimización de costes y calidad en fabricación.
- Mejoras de diseño en las piezas digitalizadas por razones funcionales, ergonómicas, costes, calidad, etc.
- Reconstrucción y reproducción de modelos obsoletos o que presenten estados avanzados de deterioro.
- Como Organismo Público de Investigación referente del sector naval, estar a la vanguardia de la «Industria 4.0» y en permanente búsqueda de nuevas técnicas y soluciones de las investigaciones realizadas para dar respuesta a los problemas de la sociedad del hoy y mañana.

### Agradecimientos

La realización de este proyecto se llevó a cabo con los recursos propios, técnicos y humanos del CEHIPAR. Queremos reconocer el esfuerzo y dedicación del personal implicado en el proyecto, además de los autores, a Julio Oria en las tareas de escaneado y generación de CAD, José Manuel Cuesta en la gestión de CAD/CAM, Constancio González en el proceso de fresado, Salvador Pérez en el acabado de la pieza, Javier Meneses en el diseño y fabricación de utillajes y torno. Por la especial dedicación y apoyo incondicional a Eloy Carrillo, Jefe del Departamento de Tecnologías y Ensayos, y finalmente, al Dr. Antonio Baquero por la revisión del texto.

Por parte de la Guardia Real, la continua atención y soporte del Stte. José Fco. Carneros para aclaraciones y verificación final de la pieza.

Por último, el apoyo a la realización de este proyecto, al CNI Emilio Fajardo, Subdirector General de Sistemas Navales y al Coronel Jefe de la Guardia Real, Eduardo Diz.

### Referencias

- [1] Violante, Patrick and Storms, Scott and Robinson, Michael. *Application of laser metrology for reverse engineering of US Navy obsolete parts*. Naval Engineers Journal, 2015. <<http://www.ingentaconnect.com/content/asne/nej/2015/00000127/00000003/art00021>>

## BIOGRAFÍA<sup>1</sup>



### *Mariano Roca de Togores y Carrasco*

*Marqués de Molins (I) y vizconde de Rocamora.  
Albacete, 17/08/1812 – Lequeito (Vizcaya), 04/09/1889.  
Aristócrata, literato y político*

Ocupó por dos veces la cartera de Marina. La primera, durante el largo gobierno de Narváez (1847- 1851) en que realizó importantes mejoras que las completó durante el gabinete del conde de San Luis (1853-1854). Adoptó medidas para rehacer y modernizar las fuerzas navales, con el fin de sacarlas de su atraso, planes que fueron continuados por sus sucesores.

Trató de adaptar el personal de la Marina a las nuevas necesidades derivadas del material naval al pasar de la marina de vela a la de vapor. Con visión certera se dio cuenta de que la propulsión de vapor al haber aparecido la hélice, cambiaba los factores estratégicos y tácticos de la marina.

Consiguió un incremento significativo del presupuesto para la Marina tan necesaria en la defensa de las colonias, pasando de dedicarse 40 millones a 66 millones de reales. Se modernizaron los estudios y la preparación de los alumnos del Colegio Naval de San Fernando, reorganizó el cuerpo de sanidad de la armada con facultad propia en Cádiz, así como sus hospitales que estaban sin servicio ni asistencia. Dotó a los arsenales de modernos talleres de maquinaria y artillería. Fundó en San Fernando el Panteón de Marinos Ilustres, para memoria de las nuevas generaciones, construyéndose un edificio neoclásico junto a la Escuela Naval, donde reposan los marinos destacados.



Fundó en Ferrol la Escuela Especial de Maquinistas (1850) con el fin de que los buques de vapor fuesen atendidos por personal del país.

La Escuela de Maquinistas se establece en Ferrol, por Real Decreto de 22 de mayo de 1850, para que forme al personal del Cuerpo de Maquinistas y del Cuerpo de Ingenieros Maquinistas de la Armada. El Cuerpo de

<sup>1</sup> <http://dbe.rah.es/biografias/4533/mariano-roca-de-togores-y-carrasco>

Ingenieros Maquinistas desaparece por Real Orden de 3 de noviembre de 1855, pues las funciones que estarían llamado a ejercer pueden desempeñarse por los Oficiales Ingenieros de la Armada.

Su intención era conseguir nacionalizar la construcción de las máquinas de los barcos y formar personal con suficientes conocimientos para manejarlas. Con ello respondía al gran reto planteado desde el punto de vista técnico por la revolución industrial a la marina.

Se realizaron dos innovaciones trascendentes para la Marina de guerra. La aplicación de la hélice en la propulsión de los buques, que le daba mayor autonomía y rapidez y la aparición de los primeros blindados.

Pensó, llegado el momento, en crear un grupo de fragatas rápidas y bien armadas con propulsión mixta de vela y hélice que, apoyándose en la magnífica posición geoestratégica, facultara tomar parte en las decisiones internacionales. Siguiendo estas directrices, sus sucesores construyeron nuevos barcos en los astilleros de Ferrol, Cartagena y Cádiz, nacionalizándose la construcción naval.



 **CUERPO DE INGENIEROS DE LA ARMADA**

CON LA COLABORACIÓN DE:



