



# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Junio 2021  
Número 20



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



**MINISTERIO DE DEFENSA**



**Catálogo de Publicaciones de Defensa**  
<https://publicaciones.defensa.gob.es>



**Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado**  
<https://cpage.mpr.gob.es>

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

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2021

NIPO 083-17-203-7 (edición impresa)

Fecha de edición: junio de 2021

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)  
ISBN 2659-6458 (edición en línea)

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

En esta edición se ha utilizado papel 100% libre de cloro procedente de bosques gestionados de forma sostenible.

**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>DIMENSIONAMIENTO EN UN WATER-JET SUMINISTRANDO TIRO A PUNTO FIJO</b>	Pág. 3
CF (CIA) Dr. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
<b>ANÁLISIS «SAFETY» DE LAS MANIOBRAS DE AMARRE DE LOS BUQUES</b>	Pág. 18
CC (CIA) Dr. D. Raúl Villa Caro	
<b>EL SeaHake™ mod4: LA ÚLTIMA GENERACIÓN EN TORPEDOS PESADOS</b>	Pág. 24
D. Benigno Castro Bellón	
<b>BIOGRAFÍA</b>	Pág. 31

Foto portada: F-84 «Reina Sofía»

Autor: D<sup>a</sup> María Elena Fernández del Campo Carreño



**EDITORIAL**

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

Quiero aprovechar la ocasión que me brinda este nuevo número de nuestro Boletín Técnico de Ingeniería para despedirme de vosotros una vez concluida esta etapa como Director y dar la bienvenida al CN (CIA) D. Jesús Ibarz Fernández. Ingeniero Aeronáutico y Doctor, la ETSIAN no puede mejor profesional para su dirección que él y le deseo lo mejor en su mando.

Este boletín coincide también con el final del curso académico y la graduación de la primera promoción del Máster en Ingeniería de Armas Navales tras el cambio en el plan de estudios consecuencia del Proceso de Bolonia. No ha sido un curso sencillo debido a la pandemia de COVID-19 pero gracias al excelente trabajo de los profesores, alumnos y dotación de la ETSIAN ha sido posible, incluso en los momentos más complicados del confinamiento, y también aumentar, la actividad académica sin interrupciones.

El proceso de verificación del nuevo título de máster, iniciado por el CN (CIA) Gustavo Almarza, concluirá este mes de junio con la inclusión el Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Esto hace que la ETSIAN sea la única escuela de la Armada, de forma independiente y sin estar incluida en alguna Universidad, que otorga un título del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) que permite ejercer una profesión regulada: Ingeniero de Armas Navales. Junto con el programa de Doctorado, que ya se encuentra en una fase avanzada de verificación por parte de ANECA, hace que la oferta académica de la ETSIAN sea la de mayor nivel en el ámbito de la Enseñanza Naval y una gran oportunidad para potenciar la Escuela.

El nuevo formato de máster es la oportunidad que tiene la ETSIAN y la profesión de Ingeniero de Armas Navales para incorporarse a una industria de defensa nacional que aspira a ser fuerte e independiente. Es necesario abandonar entorno de confort que supone impartir la Ingeniería de Armas Navales solo para oficiales que ejercerán solo en el ámbito del Cuerpo de Ingenieros de la Armada y abrir el máster a graduados civiles que trabajarán en la industria de defensa. Al igual que sucede en otras áreas de la ingeniería, la exigencia de firma facultativa para proyectos de armamento, sería un elemento clave para que la profesión de Ingeniero de Armas Navales tuviese un mayor desarrollo.

Saludos

CN (CIA) Francisco Javier Pérez Villalonga

## DIMENSIONAMIENTO DE UN WATER-JET SUMINISTRANDO TIRO A PUNTO FIJO

CF (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

**Resumen.-** En este documento se desarrolla un modelo matemático sencillo para llevar a cabo el dimensionamiento inicial de un sistema de propulsión WATER-JET en aplicaciones donde se exige un empuje elevado a baja velocidad, habiéndose dividido el trabajo en dos partes claramente diferenciadas: definición de las ecuaciones que forman el modelo y análisis de dos opciones posibles para ajustar el valor de las constantes incluidas en el mismo.

### 1.- Introducción

La mayor parte de las aplicaciones conocidas por el autor en relación con el uso de propulsores WATER-JET se centran en embarcaciones de alta velocidad. No obstante, hay ciertas aplicaciones a baja velocidad donde la propulsión a chorro puede resultar interesante, siendo una de ellas el empleo de embarcaciones de pequeñas dimensiones para auxiliar durante las maniobras de entrada en puerto, aproximación al muelle y amarre de submarinos.

Dada la misión de dichas embarcaciones, está claro que deberán suministrar empujes elevados a velocidades prácticamente nulas, y a pesar de que la propulsión a chorro tiene un rendimiento inferior a otras opciones bajo estas circunstancias (hélices en tobera, propulsores cicloidales, etc.), presenta ciertas características que la hacen atractiva.

En primer lugar, la propulsión WATER-JET proporciona una maniobrabilidad excelente, pues permite disponer constantemente de toda la potencia de los motores (incluso a velocidad de avance nula) para producir de forma casi instantánea fuertes componentes tanto de empuje lateral como de frenada gracias al uso de deflectores que controlan el ángulo de salida del chorro de agua.

Por otro lado, la propulsión a chorro suele llevar asociados unos costes de adquisición inferiores a otras opciones. En este sentido, nótese que un propulsor WATER-JET es un sistema extremadamente simple (compuesto esencialmente por un conducto de entrada, una bomba centrífuga y una tobera de descarga), lo cual contrasta fuertemente con la complejidad mecánica de otras alternativas tales como los propulsores cicloidales o las hélices en tobera con capacidad de giro acimutal.

Este trabajo recoge parte de los desarrollos efectuados por el autor hace unos años en relación con el dimensionamiento inicial de las embarcaciones previstas para auxiliar a los submarinos de la serie 80 durante las maniobras de entrada/salida de la base, concretamente los relativos a la definición básica del sistema de propulsión.

Tabla 1.- Nomenclatura

<b><i>d</i></b>	Diámetro del rotor de la bomba (m)
<b><i>ρ</i></b>	Densidad del agua de mar (kg/m <sup>3</sup> )
<b><i>c</i></b>	Caudal volumétrico de la bomba (m <sup>3</sup> /s)
<b><i>a</i></b>	Velocidad de giro de la bomba (1/s)
<b><i>w</i></b>	Potencia absorbida por la bomba (Nm/s)
<b><i>t</i></b>	Empuje suministrado por el WATER-JET (N)
<b><i>v</i></b>	Velocidad (m/s)
<b><i>p</i></b>	Presión (N/m <sup>2</sup> )
<b><i>s</i></b>	Área (m <sup>2</sup> )
<b>Subíndice 0</b>	Succión de la bomba
<b>Subíndice 1</b>	Punto de máxima depresión de la bomba
<b>Subíndice 2</b>	Descarga de la bomba
<b>Subíndice 3</b>	Descarga al exterior de la tobera del WATER-JET
<b>Subíndice v</b>	Indicativo de la presión de vapor del agua salada
<b>Subíndice n</b>	Indicativo de condiciones atmosféricas
<b>Mayúscula</b>	Cantidad NO DIMENSIONAL
<b>Minúscula</b>	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

Dichos desarrollos, que fueron llevados a cabo mediante un enfoque dimensional como el descrito en la referencia [2], consisten básicamente en una caracterización inicial del comportamiento de la bomba del WATER-JET (ver punto 3) y una estimación sencilla de los dos conceptos siguientes asumiendo velocidades de avance cercanas a cero:

- La condición límite que debe respetarse para evitar la cavitación de la bomba del WATER-JET (ver punto 4).
- La potencia necesaria para suministrar el empuje/tiro máximo obtenible de un WATER-JET sin producir cavitación en la bomba del mismo (ver punto 5).

En relación con lo anterior, conviene llamar la atención del lector sobre dos puntos importantes:

- Los resultados presentados en este trabajo se han obtenido mediante un proceso de naturaleza heurística, constituyendo una primera aproximación útil en el proceso de dimensionamiento inicial aunque quizá insuficiente para acometer el diseño detallado del sistema.
- Las expresiones desarrolladas incluyen una serie de constantes cuyo valor se establecerá normalmente de forma empírica, en base a los datos disponibles sobre proyectos similares (ver punto 6).

## 2.- Hipótesis simplificadoras

Todos los desarrollos incluidos en este documento se han llevado a cabo partiendo de las hipótesis simplificadoras que aparecen a continuación:

**H2.1.-** Los efectos asociados a la viscosidad del agua de mar (tanto en la bomba como en los diferentes conductos) no se tomarán en consideración.

Según se indica en la referencia [1], esta hipótesis constituye un punto de partida habitual en el desarrollo de modelos simplificados, resultando bastante razonable cuando el número de REYNOLDS es alto (tal y como ocurre en el ámbito de este trabajo).

**H2.2.-** El conducto de entrada de agua de mar se supondrá bien diseñado, de forma que no inducirá perturbaciones significativas en el flujo que le llega a la bomba.

Lo anterior significa que todos los fenómenos relacionados con la cavitación se supondrán concentrados en la bomba del WATER-JET.

**H2.3.-** Todos los WATER-JET considerados en este trabajo (entendiéndose incluidos en este concepto el conducto de entrada de agua, la bomba centrífuga y la tobera de descarga al exterior) se supondrán geométricamente semejantes.

**H2.4.-** Se supondrá que la velocidad de traslación de la embarcación será nula a efectos práctico, y que tanto la bomba centrífuga como la tobera de descarga al exterior estarán situadas aproximadamente a la altura de la línea de flotación.

Esto último es lo habitual en la mayoría de las configuraciones físicas conocidas por el autor.

**H2.5.-** Se asume que tanto el área de la succión como de la descarga de la bomba tienen aproximadamente el mismo valor.

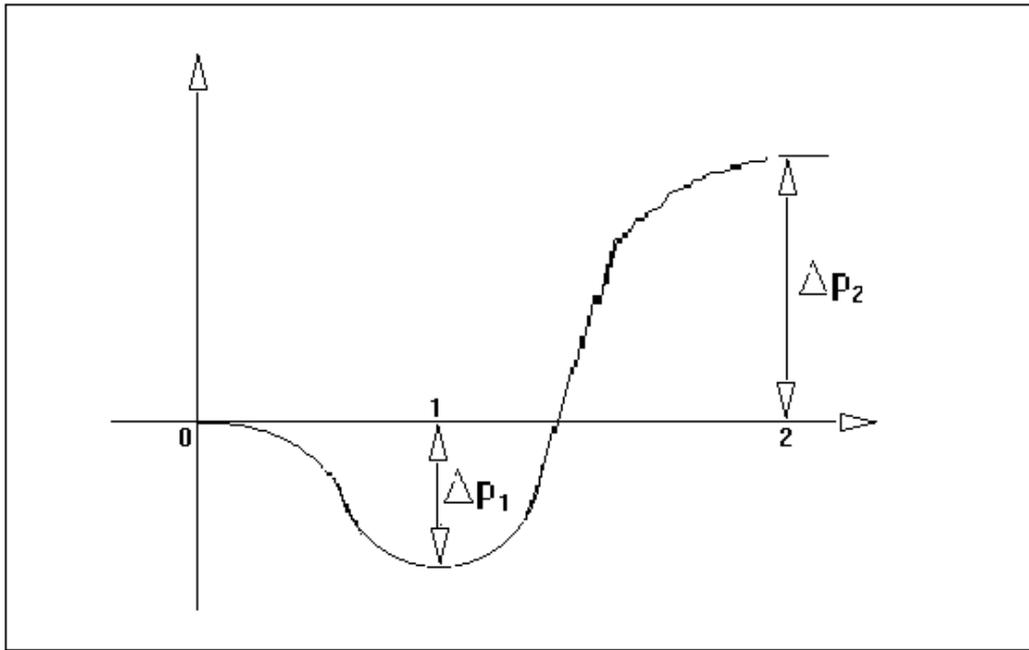
Dada la naturaleza incompresible del agua, esta hipótesis implicará que la velocidad del fluido en ambos puntos tendrá igualmente el mismo valor.

**H2.6.-** La presión de vapor del agua de mar se supondrá despreciable en relación con la presión atmosférica al nivel del mar.

Esta simplificación es bastante razonable dado el rango en el que normalmente se mueve el valor de la temperatura del agua en los diferentes océanos.

## 3.- Caracterización del comportamiento de la bomba centrífuga

El perfil de presiones que ve una partícula de agua desde que entra por la succión de una bomba centrífuga hasta que sale por la descarga de la misma tendrá la forma típica de la figura 1.



**Figura 1.-** Evolución de la presión (eje de ordenadas) a la que se ve sometida una partícula de agua conforme avanza por el interior de una bomba centrífuga (el eje de abscisas indica la coordenada curvilínea a lo largo de la trayectoria de la partícula desde el punto de entrada (0) hasta el de salida (2), pasando por el de máxima depresión (1)).

Teniendo ahora en cuenta las hipótesis H2.1, H2.2 y H2.3, es razonable suponer que la diferencia de presiones  $\Delta p_1$  entre los puntos 0 y 1 ( $p_0 - p_1$ ), la diferencia de presiones  $\Delta p_2$  entre los puntos 2 y 0 ( $p_2 - p_0$ ) y la potencia absorbida puedan describirse en función de las siguientes variables:

- Diámetro del rotor de la bomba
- Velocidad de giro de la bomba
- Caudal volumétrico de la bomba
- Densidad del agua de mar

Y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta inmediato alcanzar las siguientes expresiones:

$$\frac{\Delta p_1}{\rho a^2 d^2} = M \left( \frac{c}{ad^3} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta p_2}{\rho a^2 d^2} = N \left( \frac{c}{ad^3} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{w}{\rho a^3 d^5} = G \left( \frac{c}{ad^3} \right) \quad (3.3)$$

En donde  $M$ ,  $N$  y  $G$  son tres funciones de tipo genérico que dependen de un mismo parámetro no dimensional.

Estas tres ecuaciones constituyen el modelo más básico posible de cualquier bomba centrífuga. A continuación se procederá a transformarlas para su aplicación al caso concreto de sistemas de propulsión WATER-JET suministrando tiro a punto fijo.

Si se aplica la ecuación de BERNOULLI entre la superficie del mar y la entrada de la bomba, se obtiene el siguiente resultado:

$$p_0 = p_n - \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3.4)$$

En donde se ha supuesto que la bomba está situada a la misma altura que la superficie del mar (ver hipótesis H2.4) y que la velocidad en la descarga de la bomba es igual a la velocidad en la succión de la misma (ver hipótesis H2.5).

Aplicando de nuevo la ecuación de BERNOULLI entre la descarga de la bomba y la descarga de la tobera del WATER-JET, se obtiene el siguiente resultado:

$$\Delta p_2 = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{c}{s_3} \right)^2 \quad (3.5)$$

En donde se ha tomado  $p_3 = p_n$  en una primera aproximación (ver hipótesis H2.4) y se ha hecho uso de la expresión 3.4.

Y recordando la condición de semejanza geométrica exigida en la hipótesis H2.3, la igualdad 3.5 podrá transformarse en la siguiente:

$$\Delta p_2 = K \rho \frac{c^2}{d^4} \quad (3.6)$$

En donde  $K$  será una constante no dimensional.

Introduciendo ahora la expresión anterior en la 3.2 resultará un valor constante para el parámetro no dimensional situado a la derecha de esta última, lo que a su vez implicará un valor igualmente constante para las funciones genéricas  $M$  y  $G$  situadas a la derecha de las ecuaciones 3.1 y 3.3:

$$\frac{c}{ad^3} = Z \quad (3.7)$$

$$\frac{\Delta p_1}{\rho a^2 d^2} = M(Z) \quad (3.8)$$

$$\frac{w}{\rho a^3 d^5} = G(Z) \quad (3.9)$$

Estas tres ecuaciones definen el comportamiento (al nivel de detalle mínimo necesario a los efectos del presente trabajo) de una bomba centrífuga cuando se integra en un sistema de propulsión a chorro funcionando bajo las hipótesis del punto 2. Nótese que en estas circunstancias, ha sido posible convertir las tres funciones de tipo genérico  $M$ ,  $N$  y  $G$  en tres constantes no dimensionales (ver expresiones 3.7, 3.8 y 3.9).

Antes de finalizar este punto, conviene advertir que la depresión máxima respecto del punto de entrada ( $\Delta p_1$ ) variará en mayor o menor medida según la partícula de agua considerada y que, sin embargo, la expresión 3.1 se ha deducido asumiendo que todas las partículas van a presentar las mismas depresiones a lo largo de su recorrido por el interior de la bomba.

Lo anterior puede solucionarse muy fácilmente construyendo la expresión 3.1 como la envolvente de las depresiones máximas encontradas en las trayectorias fluidas más desfavorables, siendo esto precisamente lo que ocurre cuando se llega a dicha expresión empleando los datos de los ensayos de cavitación usuales.

#### 4.- Condición límite para prevenir el inicio de la cavitación

Teniendo en cuenta la condición físicamente necesaria para mantener a la bomba libre de cavitación ( $p_1 > p_v$ ) se puede convertir la ecuación 3.8 en una desigualdad:

$$\frac{p_0 - p_v}{\rho a^2 d^2} > M \quad (4.1)$$

Introduciendo la expresión 3.4 en esta última y suponiendo despreciable el valor de la presión de vapor del agua de mar (ver hipótesis H2.6) se llega al siguiente resultado:

$$\frac{p_n}{\rho} > M a^2 d^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{c}{s_2} \right)^2 \quad (4.2)$$

Y recordando una vez más la condición de semejanza geométrica de la hipótesis H2.3, la expresión anterior se transformará en la siguiente:

$$\frac{p_n}{\rho a^2 d^2} > M + QZ^2 \quad (4.3)$$

Dado que  $M$ ,  $Q$  y  $Z$  son tres constantes no dimensionales, todo el término situado a la derecha será igualmente una constante no dimensional, cuyo valor podría establecerse de forma empírica en base a los datos experimentales disponibles en un momento dado.

Por último, si se tiene en cuenta que tanto la presión atmosférica como la densidad del agua de mar pueden tomarse constantes en una primera aproximación, de la expresión 4.3 se deduce la siguiente condición límite para prevenir el inicio de la cavitación en la bomba del WATER-JET:

$$ad < k \quad (4.4)$$

En donde la constante  $k$  tiene las dimensiones de una velocidad (m/s).

Nótese que el término a la derecha de la expresión 4.3 ( $M + QZ^2$ ) es justamente la versión no dimensional de lo que se conoce como altura neta de succión de una bomba centrífuga, o NPSH según las referencias anglosajonas (ver por ejemplo la [1]).

### 5.- Potencia necesaria funcionando justo por debajo del límite de cavitación

Teniendo en cuenta las hipótesis del punto 2 así como la ecuación 3.7 (según esta última ecuación, existe una relación de dependencia entre el caudal, la velocidad de giro y el diámetro del rotor de la bomba), es razonable suponer que el tiro suministrado por un WATER-JET pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Diámetro del rotor de la bomba
- Velocidad de giro de la bomba
- Densidad del agua de mar

Y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta inmediato alcanzar la siguiente expresión:

$$\frac{t}{\rho d^4 a^2} = F \quad (5.1)$$

En donde  $F$  será una constante no dimensional, a determinar en principio mediante procedimientos empíricos. Combinando las expresiones 3.9 y 5.1 se obtendrá lo siguiente:

$$\frac{tda}{w} = R \quad (5.2)$$

En donde  $R$  será evidentemente otra constante no dimensional (igual a  $F/G$ ).

Introduciendo ahora la expresión 4.4 en la 5.1 se llegará al siguiente resultado:

$$\frac{t}{d^2} < b \quad (5.3)$$

En donde la constante  $b$  (igual a  $\rho k^2 F$ ) tiene las dimensiones de una presión ( $N/m^2$ ). Recuérdese que la densidad del agua de mar se ha supuesto constante.

Esta última expresión impone un límite superior al valor del empuje obtenible de un WATER-JET. Justo en dicho límite, el producto de la velocidad de giro de la bomba y del diámetro de su rotor será una constante (igual a  $k$ ), y bajo estas circunstancias, la expresión 5.2 se transformará del siguiente modo:

$$\frac{W_{LCB}}{t_{LCB}} = r \quad (5.4)$$

En donde la constante  $r$  (igual a  $k/R$ ) tiene las dimensiones de una velocidad (m/s).

Según esta última expresión, la potencia requerida por un WATER-JET resulta proporcional al empuje suministrado por el mismo cuando funciona justo por debajo del límite de cavitación de la bomba (LCB).

Conviene advertir que:

- Se ha optado por un criterio de dimensionamiento basado en alcanzar el límite fijado por la entrada en cavitación de los propulsores (algo usual en embarcaciones tipo remolcador como las que aquí se contemplan) y cuyo objetivo es conseguir el tiro a punto fijo que se haya especificado con el sistema de propulsión más pequeño posible.
- Alcanzar el objetivo arriba citado en combinación con el resto de requisitos del proyecto (maniobrabilidad, etc.) podría conducir al uso de más de un propulsor, y si este fuera el caso, el tiro especificado para la embarcación tendría que repartirse entre todos los WATER-JET, obteniéndose de dicho reparto el valor a usar en el proceso de dimensionamiento de cada uno de ellos.

Por otro lado, también conviene hacer una observación importante en relación con la constante no dimensional  $K$  incluida en la ecuación 3.6. Como es fácil demostrar, dicha constante responde a la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{2} \left( \frac{d^2}{s_3} \right)^2 \quad (5.5)$$

A partir de esta igualdad puede verse que, una vez fijado el valor del diámetro del rotor de la bomba mediante la expresión 5.3 (el tiro en el WATER-JET se asume un dato de entrada conocido), resulta posible elegir a voluntad el valor de  $K$  simplemente variando el del área de la descarga al exterior de la tobera correspondiente ( $s_3$ ).

La capacidad de elegir a voluntad el valor de  $K$  es muy importante, pues implica que lo mismo puede hacerse con el valor de la constante no dimensional  $Z$  (ver expresión 3.7) y, por tanto, que es factible fijar esta última de manera que el rendimiento de la bomba sea máximo. La experiencia del autor indica que básicamente así sucede para los valores de  $Z$  encontrados en la práctica.

## 6.- Ajuste de las constantes que aparecen en la formulación desarrollada

Para llevar a cabo el ajuste de las cuatro constantes incluidas en las expresiones que forman el núcleo del modelo matemático desarrollado (3.7, 4.4, 5.3 y 5.4) hay varios enfoques posibles, de entre los cuales cabría destacar los tres siguientes:

- El primero constituye la opción más simple y directa, según la cual no resulta necesario un conocimiento previo de los detalles de diseño de la bomba empleada en el WATER-JET.
- El segundo constituye una versión alternativa del anterior en donde puede reducirse de forma significativa la incertidumbre asociada al incumplimiento de la hipótesis H2.3 a cambio de usar como datos de entrada ciertas características no dimensionales de la bomba.
- El tercero pasaría por establecer una correlación estadística entre la velocidad específica de la bomba (ver referencia [1]) y cada una de las cuatro constantes arriba citadas, lo cual también ayudaría a reducir la incertidumbre asociada al incumplimiento de la hipótesis H2.3.

Aquí se van a describir únicamente los dos primeros, dejándose para trabajos futuros el estudio detallado del tercero de ellos.

### 6.1.- Enfoque simplificado sin considerar el tipo de bomba

Se establece una serie (cuanto más grande mejor) de proyectos a usar como referencia, y de cada uno de ellos se extraen los siguientes datos:

- Potencia máxima absorbida por la bomba ( $w_{max}$ )
- Empuje suministrado por el WATER-JET a plena potencia ( $t_{max}$ )
- Velocidad de giro de la bomba a plena potencia ( $a_{max}$ )
- Caudal de la bomba a plena potencia ( $c_{max}$ )
- Diámetro del rotor de la bomba ( $d$ )

Tomando directamente las constantes  $Z$ ,  $k$ ,  $b$  y  $r$  como variables aleatorias, se procede a establecer sus distribuciones de probabilidad en base a los datos arriba mencionados.

Como puede verse, este enfoque permite usar las expresiones 3.7, 4.4, 5.3 y 5.4 para dimensionar el sistema propulsivo sin conocer a priori el tipo de bomba más adecuado, lo cual resulta atractivo pero conduce a un dilema incómodo:

- Si la dispersión en las características no dimensionales de las bombas usadas en los proyectos de referencia fuese elevada (y la hipótesis H2.3 no se cumpliera), el rango de validez de las expresiones arriba citadas aumentará, pero lo mismo ocurrirá con los márgenes de diseño.
- Si la dispersión en las características no dimensionales de dichas bombas fuese irrelevante (y la hipótesis H2.3 correcta), el rango de validez de las expresiones arriba citadas se reducirá, pero en este caso los márgenes de diseño también podrán reducirse.

## 6.2.- Cambio de variables aleatorias al tener en cuenta el diseño de la bomba

Aplicando a la embarcación (parada en el agua) las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, y asumiendo un valor de la velocidad en la toma de mar despreciable frente al de la velocidad en la descarga al exterior del WATER-JET, es fácil llegar a la expresión siguiente:

$$t = \rho s_3 \left( \frac{c}{s_3} \right)^2 \quad (6.1)$$

Usando la ecuación 5.5 puede transformarse la expresión anterior en esta otra:

$$t = \rho (2K)^{1/2} \left( \frac{c}{d} \right)^2 \quad (6.2)$$

Usando ahora las ecuaciones 3.2 y 3.6 puede transformarse esta última expresión en la que aparece a continuación:

$$t = \rho \frac{(2N)^{1/2}}{Z} \left( \frac{c}{d} \right)^2 \quad (6.3)$$

Y mediante una manipulación algebraica sencilla de la expresión 6.3 resulta posible llegar al resultado siguiente:

$$F = Z(2N)^{1/2} \quad (6.4)$$

Nótese que bajo las hipótesis presentadas a lo largo del trabajo ha sido posible hacer que la constante  $F$  dependa únicamente del coeficiente manométrico de la bomba ( $N$ ) y del punto de funcionamiento que se haya establecido para la misma ( $Z$ ).

Usando ahora la expresión 6.4 y la información que aparece en los puntos 3, 4 y 5, resulta fácil establecer las igualdades siguientes:

$$Z = X_Z Z_{PMR} \quad (6.5)$$

$$k = X_K \left( \frac{p_n}{\rho [M + QZ^2]_{PMR}} \right)^{1/2} \quad (6.6)$$

$$b = X_B \frac{Z_{PMR} (2N_{PMR})^{1/2}}{[M + QZ^2]_{PMR}} p_n \quad (6.7)$$

$$r = X_R \frac{G_{PMR}}{Z_{PMR} (2N_{PMR})^{1/2}} \left( \frac{p_n}{\rho [M + QZ^2]_{PMR}} \right)^{1/2} \quad (6.8)$$

En donde:

- Los parámetros no dimensionales  $X_Z$ ,  $X_K$ ,  $X_B$  y  $X_R$  constituyen cuatro variables aleatorias que vendrían a sustituir a las usadas en el punto 6.1.
- Se han seleccionado como referencia las características de la bomba en el punto de máximo rendimiento (PMR).

Nótese que:

- Si todas las hipótesis usadas (salvo la H2.3) se cumplieren de forma rigurosa, los proyectos de referencia se hubiesen llevado hasta sus respectivos límites de cavitación y sus bombas funcionasen justo en el PMR, las cuatro variables aleatorias arriba citadas tendrían que adoptar un valor igual a la unidad.
- Dejando al margen dichas variables aleatorias, la densidad del agua de mar y la presión atmosférica, el resto de parámetros que aparecen en las cuatro últimas expresiones dependen exclusivamente del diseño de la bomba.
- El punto de funcionamiento de la bomba usado como referencia (el PMR) no es el único posible, existiendo otras alternativas que podrían resultar interesantes en algunos casos (ver anexo).
- Los coeficientes de depresión máxima ( $M$ ) y de altura neta de succión ( $M + QZ^2$ ) son dos formas alternativas de expresar un mismo concepto: el margen mínimo exigido por un diseño concreto de bomba para evitar fenómenos de cavitación.

### 6.3.- Enfoque alternativo considerando el tipo de bomba

Se establece una serie (cuanto más grande mejor) de proyectos de referencia, y de cada uno de ellos se extraen los mismos datos indicados en el punto 6.1 junto con los cuatro siguientes:

- Coeficiente de caudal de la bomba en el PMR ( $Z_{PMR}$ )
- Coeficiente manométrico de la bomba en el PMR ( $N_{PMR}$ )
- Coeficiente de potencia de la bomba en el PMR ( $G_{PMR}$ )
- Coeficiente de altura neta de succión de la bomba en el PMR ( $[M + QZ^2]_{PMR}$ )

Tomando ahora los parámetros  $X_Z$ ,  $X_K$ ,  $X_B$  y  $X_R$  como variables aleatorias, se procede a establecer sus distribuciones de probabilidad en base a los datos arriba mencionados.

En este caso, para poder usar las expresiones 3.7, 4.4, 5.3 y 5.4 habría que seleccionar previamente un tipo de bomba y emplear algunas de sus propiedades no dimensionales (los cuatro últimos coeficientes) para establecer el valor de las constantes  $Z$ ,  $k$ ,  $b$  y  $r$ , lo cual permite solucionar el dilema planteado en el punto 6.1 y, en definitiva, mejorar la capacidad de predicción del modelo manteniendo un equilibrio coste/eficacia razonable.

### 7.- Conclusiones y comentarios finales

En este documento se ha desarrollado un modelo matemático sencillo para llevar a cabo el dimensionamiento inicial de un sistema de propulsión WATER-JET suministrando tiro/empuje a punto fijo, usando al efecto el esquema procedimental de la referencia [2].

De entre todos los resultados obtenidos, hay cuatro que el autor considera especialmente destacables:

- Según la expresión 3.7, el rendimiento de la bomba va a mantener un valor constante (y por tanto independiente de su velocidad de giro) al menos mientras no se alcance el límite de cavitación.
- El inicio de la cavitación impone un límite superior al valor que puede alcanzar el producto de la velocidad de giro de la bomba y del diámetro de su rotor (ver expresión 4.4)
- El empuje máximo obtenible de un WATER-JET es proporcional al cuadrado del diámetro del rotor de la bomba (ver expresión 5.3)
- Suministrando el empuje máximo permitido por el límite de cavitación de la bomba, la potencia absorbida por el WATER-JET será proporcional al valor de dicho empuje (ver expresión 5.4).

Cada una de las cuatro expresiones arriba indicadas incluye una constante cuyo valor se establecerá normalmente a partir de los datos disponibles sobre proyectos similares, y en este sentido, se han analizado dos opciones:

- Ajustar las constantes  $Z$ ,  $k$ ,  $b$  y  $r$  sin necesidad de conocer a priori ningún detalle de diseño de la bomba empleada en el WATER-JET (ver punto 6.1).
- Ajustar dichas constantes usando como datos de entrada los valores de ciertas características no dimensionales de la bomba (ver punto 6.3).

En relación con el punto de funcionamiento de la bomba a usar como referencia, se incluye como anexo al final del documento un análisis comparativo preliminar entre las tres alternativas identificadas:

- El punto de máximo rendimiento (PMR)
- El punto de mínimo tamaño (PMT)
- El punto de mínima potencia (PMP)

Por último, conviene poner de relieve que los resultados obtenidos en este trabajo son aplicables a cualquier tipo de bomba (ya sea de flujo radial, axial o mixto), lo cual se debe a que no ha sido necesario imponer restricción alguna a la forma de las tres funciones usadas para caracterizar su comportamiento:  $N$ ,  $G$  y  $[M + QZ^2]$ . Esto es precisamente lo que permite acudir a las dos opciones de ajuste arriba mencionadas sin necesidad de que los proyectos de referencia tengan que cumplir la hipótesis H2.3.

## 8.- Referencias bibliográficas

[1] **White F.M.**, 1979, *Mecánica de fluidos*, Editorial McGraw-Hill.

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

## ANEXO

**A.- Punto de funcionamiento de la bomba a usar como referencia**

Según la información contenida en la referencia [1], el rendimiento energético de una bomba centrífuga (el cual se denominará  $E_{EB}$ ) puede definirse mediante la siguiente expresión:

$$E_{EB} = \frac{ZN}{G} \quad (A.1)$$

Por otro lado, a partir de las expresiones 6.7 y 6.8 resulta fácil definir dos coeficientes no dimensionales nuevos, a saber:

$$C_{TA} = \frac{Z(2N)^{1/2}}{[M + QZ^2]} \quad (A.2)$$

$$C_{TP} = \frac{Z(2N)^{1/2}}{G} [M + QZ^2]^{1/2} \quad (A.3)$$

En donde:

- $C_{TA}$  vendría a ser un indicador de la relación existente entre el tiro inducido por el WATER-JET y el área del rotor de la bomba.
- $C_{TP}$  vendría a ser un indicador de la relación existente entre el tiro inducido por el WATER-JET y la potencia absorbida por la bomba.

Nótese la diferencia existente en la naturaleza intrínseca de los tres conceptos que se acaban de introducir: mientras que el primero ( $E_{EB}$ ) puede usarse bajo cualquier circunstancia, los dos últimos ( $C_{TA}$  y  $C_{TP}$ ) solo serán válidos bajo las hipótesis presentadas a lo largo del trabajo.

Como puede verse, las expresiones A.2 y A.3 van a presentar unos valores máximos respecto de  $Z$  que podrían utilizarse como puntos de referencia alternativos al PMR (correspondiente al valor máximo de la expresión A.1) durante el diseño del sistema propulsivo, y dado que estos tres máximos no coincidirán en general, convendría hacer algunas reflexiones sobre las ventajas asociadas al uso de cada uno de ellos.

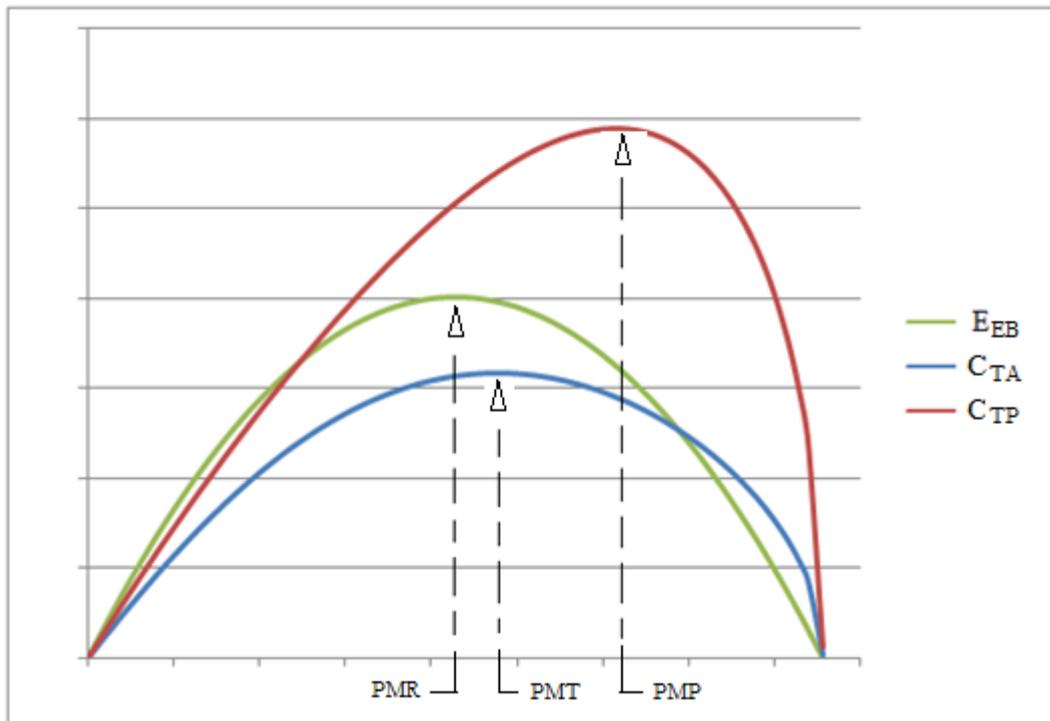
En primer lugar, la experiencia disponible indica que el máximo de  $E_{EB}$  respecto de  $Z$  (el PMR arriba citado) coincide con el punto de funcionamiento en el que la fiabilidad de una bomba alcanza su nivel máximo, siendo la opción a elegir cuando se buscan disponibilidades altas y/o exigencias de mantenimiento bajas.

Por otro lado, y según se deduce de su propia definición, el máximo de  $C_{TA}$  coincide con el punto de funcionamiento en el que el tamaño de la bomba se hace mínimo para un empuje dado (el cual se llamará PMT), siendo la opción más interesante cuando se busquen sistemas propulsivos de dimensiones reducidas en la mayor medida posible.

En tercer lugar, y según se deduce también de su propia definición, el máximo de  $C_{TP}$  coincide con el punto de funcionamiento en donde la potencia absorbida por la bomba se minimiza para un empuje dado (el cual se llamará PMP), siendo la opción a elegir cuando las consideraciones energéticas sean importantes.

Otro tema sobre el que conviene reflexionar tiene que ver con la relevancia a nivel cuantitativo de las diferencias existentes entre los tres máximos citados, la cual podría valorarse acudiendo al tratamiento estadístico de bases de datos capaces de cubrir un rango de diseño de bombas adecuado.

No obstante, en este anexo el autor se limitará a estudiar un ejemplo típico en el ámbito de la propulsión a chorro (ver figura A.1), al objeto de ilustrar los aspectos más básicos a tener en cuenta y establecer algunas conclusiones preliminares.



**Figura A.1.-** Forma que adopta el rendimiento EEB y los coeficientes C<sub>TA</sub> y C<sub>TP</sub> (eje de ordenadas) en función de Z (eje de abscisas) para un diseño de bomba típico.

Usando como referencia el PMR, los valores de  $C_{TA}$  y  $C_{TP}$  se verán reducidos en un 3% y un 16% respecto de sus correspondientes máximos, lo que implica llevar la fiabilidad de la bomba hasta el mayor valor posible a cambio de incrementos en tamaño y potencia asumibles sin demasiados problemas.

Usando ahora como referencia el PMT, los valores de  $E_{EB}$  y  $C_{TP}$  se verán reducidos en un 2% y un 11% respecto de sus correspondientes máximos, lo cual implica minimizar el tamaño de la bomba a cambio de reducciones en fiabilidad y aumentos de potencia también asumibles sin demasiados problemas.

Y usando como referencia el PMP, los valores de  $E_{EB}$  y  $C_{TA}$  se verán reducidos en un 18% y un 12% respecto de sus correspondientes máximos, lo cual lleva a una situación distinta a la encontrada en los dos casos anteriores. En efecto, la potencia de la bomba alcanzará su valor mínimo sin incrementos de tamaño excesivos

pero con reducciones de fiabilidad que podrían ser problemáticas, dado que el punto de funcionamiento se desplaza casi un 50% respecto del PMR (ver eje de abscisas de la figura A.1).

Finalmente, conviene poner de relieve que el punto de funcionamiento usado como referencia en todos los diseños conocidos por el autor es justamente el PMR de la bomba (valor de  $Z$  para el que  $E_{EB}$  se hace máximo), lo cual podría deberse a una serie de motivos cuyo análisis se deja para mejor ocasión.

## ANÁLISIS «SAFETY» DE LAS MANIOBRAS DE AMARRE DE LOS 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 (Arsenal Militar de Ferrol)

### 1.- Introducción

El término «safety» está relacionado con la seguridad de las personas, y el daño a los sistemas y al medioambiente. Por ello, obviamente, está estrechamente ligado a la normativa de «prevención de riesgos laborales (PRL)», y a la doctrina de «seguridad operativa (SEGOP)» de la Armada.

Pero se podría decir que el «safety» aún va más allá, y tras una vuelta de tuerca trata de evidenciar que el buque es un lugar totalmente seguro. No se debe olvidar que en materia de seguridad todo se reduce al riesgo, a su análisis, a la evaluación del mismo y, de forma primordial, a su gestión. Además, esta gestión de riesgos safety debe ser muy dinámica para que se puedan obtener exitosos resultados.

En el caso específico del amarre de un buque, el análisis de los riesgos se debe llevar a cabo en todos aquellos lugares del barco susceptibles de que se puedan realizar en ellos maniobras relacionadas con el amarre. Para realizar este estudio «safety» será necesario llevar a cabo un análisis de las diferentes operaciones y tareas que se realizan durante las operaciones de amarre, descomponiéndolas en acciones y evaluando los riesgos que conllevan cada una de ellas.

### 2.- Diferencias entre riesgos y peligros

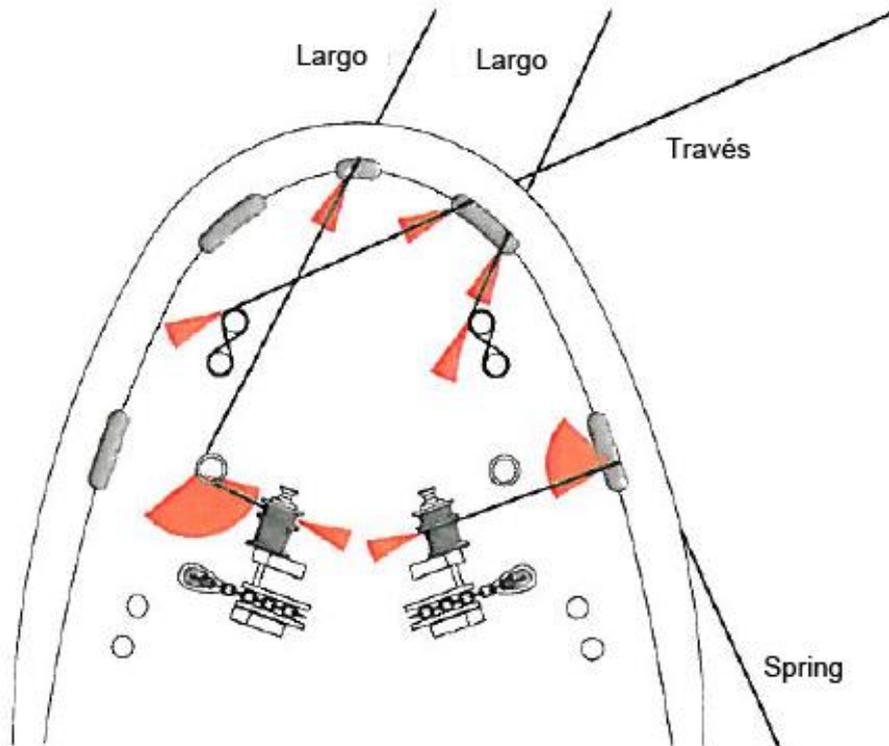
En el caso de buques, se podría definir al «peligro (hazard)», como una situación física o estado del sistema, que generalmente siga a un evento iniciador, y que además pueda desembocar en un accidente. Un peligro es una situación de tal potencial que podría causar la muerte, lesiones o enfermedades en los tripulantes.

Por su lado el «riesgo (safety risk)», se podría definir como la probabilidad existente de que ocurra un daño con una determinada severidad, en un periodo determinado, o bajo unas circunstancias específicas. Se debe destacar que la «seguridad tradicional» no identificaba niveles de riesgo, ni se anticipaba a los mismos, ni estudiaba cómo reducirlos. Simplemente, basándose en criterios de experiencia y datos históricos, buscaba la manera de reaccionar ante ellos.

Un claro ejemplo de las definiciones anteriores sería el siguiente: la posible entrada de agua en un buque o submarino tras una colisión, podría encuadrarse dentro de la categoría de peligro, mientras que la probabilidad de que la vía de agua provocara un daño con una severidad determinada, podría entenderse como un riesgo. Por lo tanto, para que aparezca un riesgo, tiene que existir alguna causa que lo provoque.

En el caso de amarre de buques, las marcas de aviso o de peligro son muy importantes para la seguridad de la tripulación. El resaltar y remarcar las marcas de peligro puede ser muy efectivo, sobre todo si se comparan dos estaciones, una con marcas, y otra sin ellas. En la mayoría de los accidentes graves se comprueba que en

las zonas de amarre estaban implicadas líneas de amarre que fallaban y rompían. Todos los marinos implicados en estas maniobras son conscientes de que existe una zona de trabajo peligrosa cuando existe una línea de amarre con tensión. Pero, sin embargo, a menudo algunos tripulantes se olvidan de estos peligros cuando trabajan en cubierta en las estaciones de amarre.



**Figura 1:** Sectores de peligro en estación de amarre de proa marcados en rojo

El «safety» tratará de buscar soluciones para controlar y reducir estos peligros. Por ejemplo, si las zonas de peligro son pintadas sobre cubierta, la tripulación podrá estar en alerta ante el peligro cuando observen que están invadiendo con sus pies las áreas pintadas como peligrosas. Este pintado de amarillo también auxiliará a los oficiales que supervisen la maniobra para que ordenen a la tripulación que se mantenga en todo momento alejada de las líneas que estén trabajando bajo tensión, ya que, si se produce la rotura de alguna de ellas, actuarán como un látigo sobre el punto que esté soportando la tensión, con todo el peligro que ello conlleva.



*Figura 2: Zonas de peligro marcadas en amarillo*

### 3.- Tablas de análisis de las operaciones de amarre de los buques

A continuación, se va a evaluar el caso de una maniobra de amarre de un buque a un muelle. La mayoría de los accidentes relacionados con los equipos de amarre, ocurridos en los últimos veinticinco años, han desembocado en graves daños, tanto materiales como personales, que se han traducido en gran cantidad de profesionales del mar heridos.

Pero curiosamente, sólo un cinco por ciento de los accidentes ocurridos se producen por fallos de los equipos de amarre. Por ello, si se analizan todas las tareas asociadas a las maniobras de amarre, se detectarán muchas situaciones que podrían derivar en accidentes, tanto con daños personales como materiales. No obstante, este número se podría acotar si se eliminaran aquellas acciones en las que se presente como algo «improbable» el que se pueda producir un accidente. Esto último se debe a que existen tareas en las que, debido al gran adiestramiento existente en la dotación, el riesgo existente asociado de que se produzca un accidente, es casi inexistente. Por lo tanto, el safety debe buscar la probabilidad de que se reúnan las condiciones necesarias para que se produzca el riesgo de accidente, y por lo tanto debe fijar la categorización del mismo en función de las consecuencias, es decir, de la gravedad de los daños personales o materiales que pudieran suceder.

En una maniobra de amarre los materiales y equipos afectados abarcan a las estachas de amarre, la hélice de maniobra, las maquinillas de amarre (chigres), los cabrestantes de amarre, los carreteles, las bitas, las cornamusas, y el resto de elementos auxiliares implicados en estas operaciones. Si se estudia la operación de la maniobra de atraque del buque, es decir, la fijación del costado del buque contra el muelle, se podrían destacar los apartados siguientes:

- Tarea asociada: en esta operación, y de la manera indicada, se debe abozar la estacha de amarre, lascarla sobre el chigre, quitarle las vueltas, afirmarla sobre la bita, y finalmente quitarle la boza o bozas.
- Riesgo asociado: existen líneas de amarre en tensión, manejo manual de las mismas, y partes móviles peligrosas en las maquinillas.

- Descripción: el trabajo en torno a las estachas con tensión conlleva el riesgo de que falten (rompan) ante un repentino aumento de la tracción en las mismas. A este riesgo se une la existencia de trabajo en cubierta con maquinaria móvil.
- Potencial accidente (Peligros): daños personales de diversa consideración, lesiones muy graves por rotura de estachas, y posibilidad de que se produzcan situaciones de hombre al agua.
- Causa: equipos de protección y seguridad inadecuados, y mal reparto de tensiones en el amarre efectuado.
- Posible prevención: equipo personal de trabajo y de seguridad, dotado con arnés y línea de recuperación incluidos; y supervisión del reparto de tensiones en el amarre antes de realizar la maniobra.

Para un estudio inicial de las tareas analizadas en una maniobra de amarre se han detectado hasta diecisiete posibles accidentes, que se dividen en tres categorías (leve, grave y muy grave), a los que se les asigna tres tipos de probabilidad (muy probable, probable y poco probable):

	Muy probable A	Probable B	Poco probable. C
Accidente muy grave 1	2	1	1
Accidente Grave 2	3	1	6
Accidente Leve 3			3

**Tabla 1.** Matriz de accidentes (Fuente: elaboración propia)

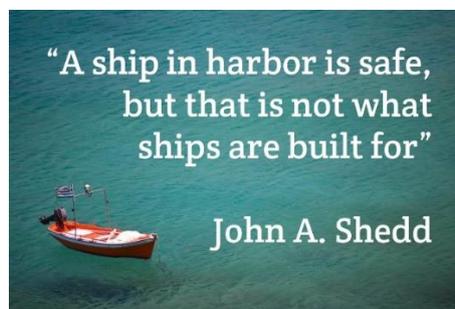
De las tareas analizadas que se exponen en la Tabla 1, se observa que existen dos tareas en las que un accidente muy grave es muy probable que pueda ocurrir en las condiciones especificadas, una tarea en la que un accidente muy grave es probable que ocurra, tres tareas en las que un accidente grave es muy probable que se produzca, una tarea en la que un accidente grave es poco probable que pueda darse bajo las condiciones especificadas, seis tareas en las que un accidente grave es poco probable que aparezca, y finalmente tres tareas en las que un accidente leve es poco probable que se produzca bajo unas condiciones especificadas.

## 5.- Conclusiones

En la actualidad se producen numerosos accidentes durante las operaciones de amarre de los buques. El diseño de las estaciones de amarre, así como de los propios chigres y cabrestantes de las mismas, juega un papel importante a la hora de reducir estos accidentes, pero la situación del personal sobre las cubiertas de los buques, supone un factor crucial al objeto de reducir los accidentes que se producen a bordo. Obviamente el mantenimiento del material involucrado también jugará un papel importante a la hora de reducir los accidentes, por lo que las líneas de amarre deben ser inspeccionadas con frecuencia al objeto de poder mantener su eficacia a lo largo del tiempo.

El objetivo principal del «safety» es el de garantizar que se tomen todas las precauciones adecuadas para evitar daños al personal y proteger el medio ambiente. Por ello se debe disponer de manuales que contengan una serie de procedimientos diseñados para ayudar a gestionar los riesgos y a poder aplicar medidas de mitigación apropiadas cuando sean necesarias. Esta disciplina, aplicada a buques, pretende poder planificar y dirigir todas las maniobras existentes, para poder dotar a la tripulación de toda aquella documentación que sirva para que los equipos y sistemas de los barcos puedan ser probados, operados, mantenidos y dados de baja de manera eficaz y eficiente, y todo esto asegurando la total protección de la misma, así como de las capacidades operativas de los productos y del medioambiente.

Tras la realización de este trabajo, se puede concluir que existen muchos accidentes relacionados con los sistemas de amarre de los buques que tal vez podrían ser evitados mediante el uso adecuado de los mismos. Para finalizar, no se debe olvidar que, aunque los barcos pueden ser muy seguros estando en puerto, se debe recordar que cuando realmente deben serlo es cuando navegan, momentos en los que generalmente se multiplican los riesgos y peligros existentes.



*Figura 3: «Los buques son seguros en puerto, pero no nacieron para eso»*

## 6.- Referencia bibliográfica

- [1] Effective mooring 2010, Witherby Seaman, (OCIMF)
- [2] IMO MSC/Cir.1175, 2005. Guidance on Shipboard Towing and Mooring Equipment
- [3] Mooring and Anchoring Ships 2009 (Nautical Institute)
- [4] Mooring Equipment Guidelines-Third Edition 2008 (OCIMF)

- [5] Norma Internacional ISO 3730:2019. Shipbuilding and marine structures-Mooring winches
- [6] Paredes Portas N., 2019. TFM UDC: Estudio de viabilidad de nuevos sistemas automáticos de amarre de buques en puerto
- [7] Villa Caro Raúl, 2014. Revolución en los sistemas de amarre de los buques, Revista General de Marina num. Abril pp. 475-490.
- [8] Villa Caro Raúl, 2014. Innovaciones en el amarre y fondeo. BTI, pp. 67-71
- [9] Villa Caro Raúl, 2016. Posibles melloras nos sistemas de amarre dos buques para reducir os accidentes a bordo, Anuario da Facultade de Ciencias do Traballo da Universidade da Coruña, pp 259 - 278
- [10] Villa Caro Raúl. 2018. Sistemas de amarre en buques: Situación actual y Evolución Futura. Edit.A.E. ISBN: 978-620-2-23385-9
- [11] Villa Caro, Raúl, 2019. La «seguridad» de las «personas» a bordo de los buques y el concepto de «safety», Revista Ingeniería Naval, pp 73 - 76

## EL SeaHake™ mod4: LA ÚLTIMA GENERACIÓN EN TORPEDOS PESADOS

**Eur Ing Benigno Castro Bellón CEng MRINA**

Director Product Sales

Naval Weapons Division

ATLAS ELEKTRONIK GmbH

*Dedicado al Teniente de Navío D. Isaac Peral y Caballero, patriota y visionario que marcó el rumbo del submarino convencional moderno y el empleo del torpedo pesado en el mismo.*

### 1.- Introducción

ATLAS ELEKTRONIK GmbH es una empresa alemana líder en el campo de la electrónica naval, sistemas y equipos especializados para las fuerzas navales. Con su sede en Bremen, presencia internacional en 13 países y con casi 120 años de historia, ATLAS ELEKTRONIK ofrece una amplia cartera de productos y soluciones para plataformas navales, buques de superficie y submarinos, que cubren desde el sensor hasta el efector.

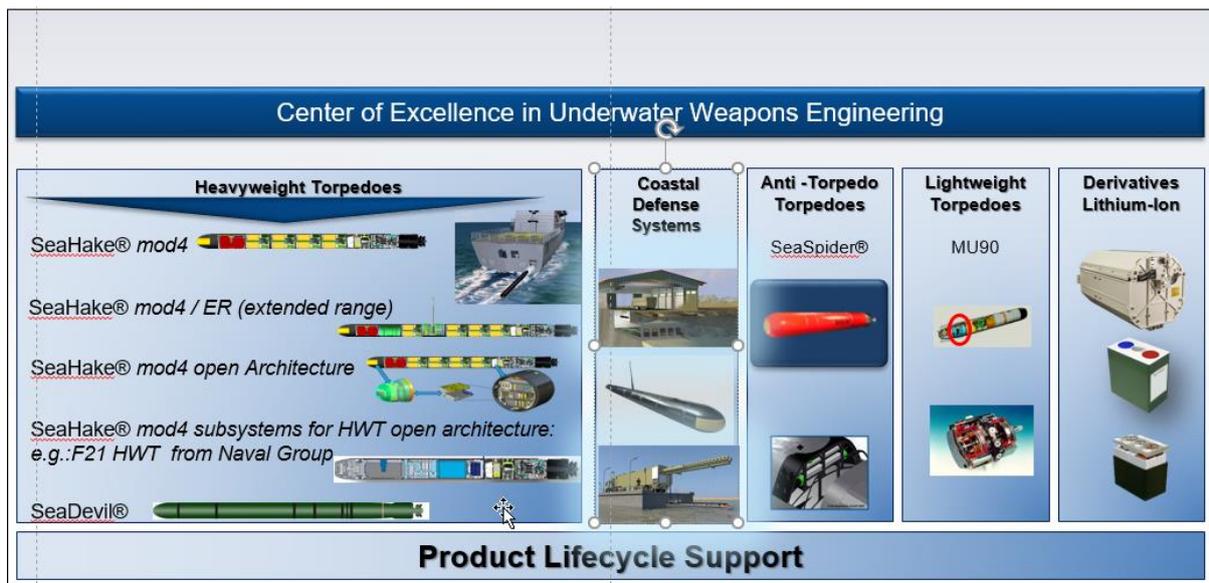


**Foto 1.** Productos de ATLAS ELEKTRONIK; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

La pasión por la tecnología forma parte del ADN de ATLAS ELEKTRONIK y sus más de 5.000 patentes registradas son buena prueba de ello.

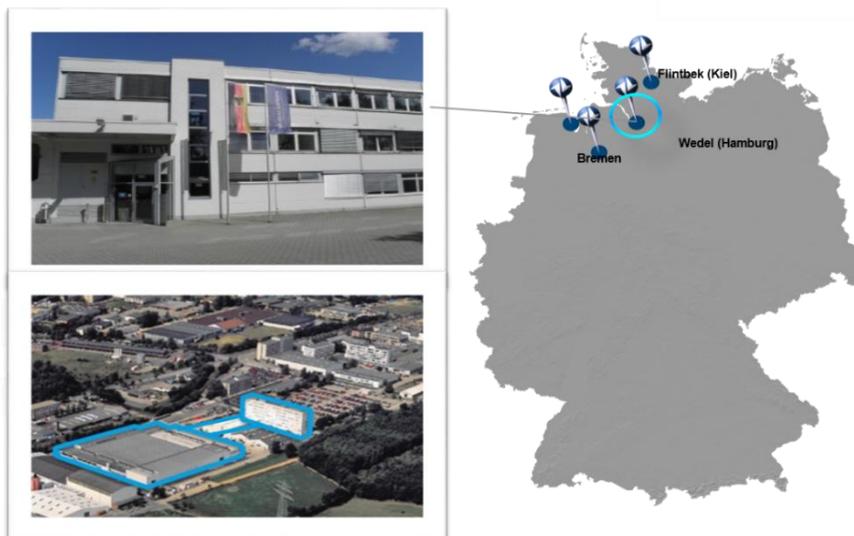
ATLAS ELEKTRONIK está especialmente orgullosa de tener entre sus productos el torpedo pesado, (torpedo en adelante), diseñados, desarrollados y fabricados en la División de Armas Navales de Wedel, en las inmediaciones de Hamburgo.

La División de Armas Navales también lidera el desarrollo de la sofisticada tecnología de baterías para aplicaciones navales, el desarrollo del SeaSpider™ Torpedo Anti Torpedo que conducirá a un cambio de paradigma en la Guerra Anti-Submarina y fabrica, entre otros, el motor de alto rendimiento para el torpedo ligero MU90 del consorcio Eurotorp.



**Foto 2.-** ATLAS ELEKTRONIK productos de la División de Armas Navales; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

Este artículo tiene como objetivo proporcionar una breve descripción general de la contribución de ATLAS ELEKTRONIK al desarrollo del torpedo.



**Foto 3.-** Instalaciones de ATLAS ELEKTRONIK en Alemania y vista aérea de la División de Armas Navales situada en Wedel en las inmediaciones de Hamburgo; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

## 2.- Un poco de historia con algunos hitos

Desde su concepción original a mediados del siglo XIX hasta el actual torpedo SeaHake™ *mod4* de última generación desarrollado y fabricado por ATLAS ELEKTRONIK, ha habido un largo camino lleno de desafíos que superar, con profesionales altamente motivados y expertos en todos los campos de la ciencia, siempre escuchando al operador y en algunos casos anticipándose a sus necesidades y en algunas ocasiones «empujados» por la necesidad. Se dice que a veces, la necesidad es la madre de todos los inventos. Hoy, como en el momento de su concepción original, el torpedo sigue siendo un sistema de armas letal y la primera opción sin igual para los submarinistas.

La evolución del torpedo no se puede entender de una manera aislada, sino como parte de la evolución de la plataforma en la que opera y de los sistemas circundantes en los que se debe integrar, así como los escenarios cambiantes.

Muchos hitos clave en la historia del torpedo, han sido logrados por ATLAS ELEKTRONIK y por la herencia alemana del torpedo, algunos de los cuales son:

- Primer torpedo pesado con propulsión eléctrica (G7e TII y TIII).
- Primer torpedo pesado guiado, para defensa costera (G7e TX Spinne).
- Primer torpedo pesado con seguimiento de estela basado en detección activa de la misma.
- DM1 SEESCHLANGE primer torpedo pesado alemán desarrollado después de la segunda guerra mundial. Propulsión eléctrica, filoguiado, búsqueda activa y pasiva, espoleta de impacto y magnética de proximidad.
- DM2 A1 SEAL torpedo estándar para blancos de superficie en los submarinos del tipo U205/U206 de la Marina alemana.
- SST4 versión para la exportación del DM2 A1.
- SUT versión para la exportación, primer torpedo alemán multipropósito con sonar panorámico de búsqueda.
- DM2 A3 SEEHECHT con un nuevo sistema de búsqueda analógico.
- DM2 A4 SEEHECHT incorporando un nuevo sistema de búsqueda y guía digital, con un sonar con array de múltiples transductores con cobertura en horizontal y en vertical, sistema de detección de estela, batería modular de alta potencia, propulsión eléctrica de alto rendimiento, giróscopo de fibra óptica y filoguía de fibra óptica.

ATLAS ELEKTRONIK GmbH es el único fabricante y proveedor mundial de cable de guía de fibra óptica ultraligero para filoguía de torpedos modernos.

- SeaHake™ versión para la exportación del DM2 A4.
- SeaHake™ *mod4* ER (extended range, registrando un alcance superior a los 140 Km puede ser operado desde buques de superficie, submarinos, sistemas de defensa de costa móviles y estacionarios).

## 3.- El SeaHake™ *mod4*

Cuando se habla del torpedo como un sistema, se debe considerar el torpedo en sus variantes de combate o ejercicio, todo el equipo de pruebas del taller de torpedos, la integración del torpedo en la plataforma y otros sistemas desde los que se operará y con los que trabajará, el adiestramiento para el operador a bordo y el

personal del taller de torpedos, así como el apoyo logístico integrado y las posibles actualizaciones durante el ciclo de vida del mismo.

Siempre escuchando y teniendo en cuenta las necesidades de los operadores, ATLAS ELEKTRONIK apoya a sus clientes durante todo el ciclo de vida.

Las principales tareas de un torpedo, en las fases de tránsito, búsqueda y ataque se pueden resumir como sigue:

- Registrar el blanco.
- Confirmar la detección del blanco.
- Seguir el blanco.
- Activar la explosión de la cabeza de combate en el momento preciso.

Para cumplir con las tareas mencionadas anteriormente, el torpedo necesita:

- Un sistema de propulsión.
- Almacenamiento de energía.
- Sensores.
- Actuadores.
- Capacidad de procesamiento.
- Capacidad de comunicación interna y externa.

Teniendo siempre presente el requerimiento de tener a bordo un torpedo seguro, listo para el combate y letal para el objetivo, el desarrollo de ATLAS ELEKTRONIK se basa en un concepto de arquitectura modular y abierta, considerando los escenarios operativos actuales y potenciales. Esto permite la continua evolución del SeaHake™.

Para los torpedos SST4 y SUT exportados con gran éxito y aún operativos, ATLAS ELEKTRONIK ha desarrollado el concepto SeaDevil™, para eliminar los desafíos causados por la obsolescencia y proporcionar actualizaciones operativas basadas en la última tecnología del SeaHake™ mod4.

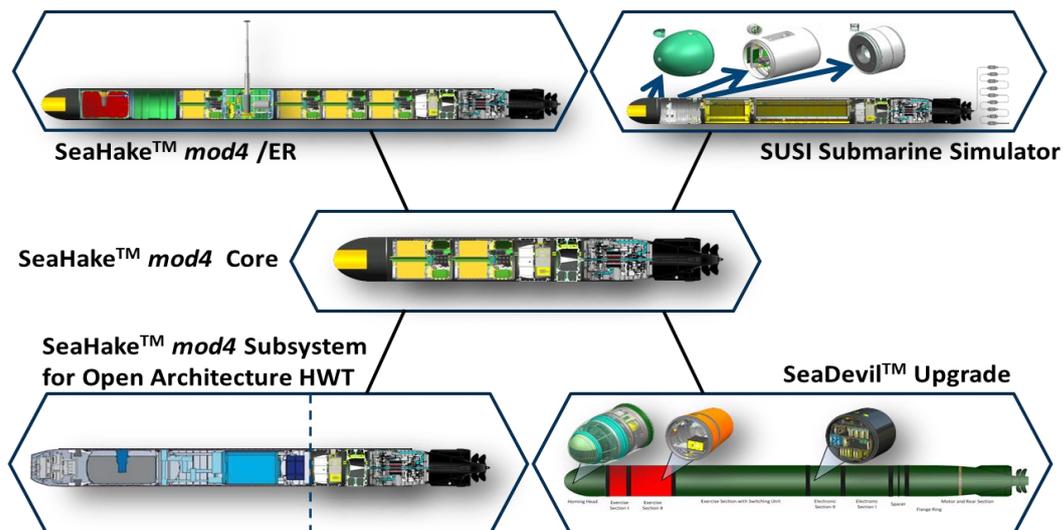
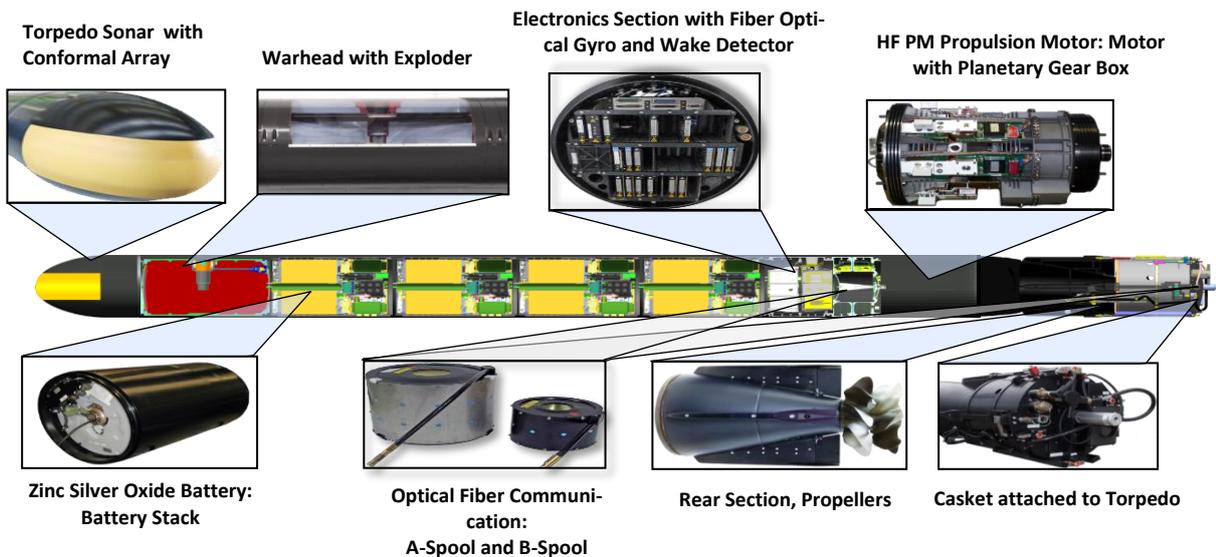


Foto 4.- SeaHake™ mod4 Open Architecture; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

El SeaHake™ *mod4* es un torpedo de última generación, multipropósito, con filoguía de fibra óptica, que en sus distintas configuraciones puede operar en aguas someras y profundas. La arquitectura abierta del SeaHake™ *mod4* permite que sus subsistemas puedan ser incorporados en otros torpedos (Como ejemplo, el torpedo F21 de Naval Group, que incorpora los subsistemas y secciones de Electrónica, Comunicación y filoguía, Propulsión, cola de torpedo y Casete del SeaHake™ *mod4*)

A continuación, una breve descripción de algunas características principales de las diferentes secciones SeaHake™ *mod4*.



**Foto 5.-** SeaHake™ *mod4* torpedo de última generación; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

- **Cabeza buscadora:** Aquí se encuentra el sonar con array de múltiples transductores con cobertura en horizontal y en vertical.
- **Cabeza de combate con espoleta:** con explosivo insensible, espoleta de impacto y de influencia magnética.
- **Sección Electrónica:** en esta sección están los módulos electrónicos de última generación, la giroscópica de fibra óptica libre de mantenimiento y el sistema de detección de estela.
- **Sección de comunicación:** en esta sección se encuentra parte del sistema de guiado con la bobina que contiene la filoguía de fibra óptica. La filoguía de fibra óptica permite aprovechar al máximo las capacidades del torpedo como sistema y el empleo del sonar del torpedo como sensor de la plataforma.
- **Sección de baterías:** las baterías de combate, encapsuladas y modulares, son de ZnAgO. Entre sus características destacan su alta densidad energética, gran duración y tiempo de activación rápido. El sistema de baterías modular es escalable, permitiendo al operador diferentes configuraciones según los requisitos operativos.
- **Baterías de ejercicio:** Advanced Lithium Systems Europe – Defense Applications S.A. (ALSE), joint venture formada por ATLAS ELEKTRONIK GmbH y Systems Sunlight S.A., ha desarrollado baterías de Lithium-Ion con gran éxito. Las baterías de Lithium-Ion suponen una mejora en seguridad, aumentan la flexibilidad operativa, facilitan el manejo y reducen los costos del ciclo de vida para el operador.



**Foto 6.-** Batería de ejercicio de Lithium-Ion; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

- Sección de Propulsión: en esta sección se encuentra el motor de imanes permanentes de alta frecuencia, con un control de velocidad continuo, de enfriamiento independiente de circuito cerrado, desacoplado del casco del torpedo para reducir la transmisión del sonido.
- Cola de Torpedo: su forma hidrodinámica está optimizada. En la cola se encuentran cuatro timones y dos hélices contrarrotatorias de alto rendimiento y de fibra, optimizadas para cada configuración del torpedo.

El SeaHake™ mod4 puede ser lanzado desde buques de superficie, submarinos y plataformas en tierra, utilizando todos los sistemas de lanzamiento existentes (swim-out, push out, water steam, ram). Ha sido integrado con éxito en una variedad de plataformas modernas, buques de superficie y submarinos de diferentes diseñadores y con diferentes sistemas de combate.

#### 4.- El futuro

Los desarrollos actuales y futuros en todos los principales campos de la tecnología, que comprenden el torpedo como sistema de armas: electrónica, tecnología sonar, propulsión, almacenamiento de energía, comunicación, nuevos materiales... están todavía lejos de alcanzar sus límites. ATLAS ELEKTRONIK continuará escuchando a los operadores y trabajando para implementar los nuevos desarrollos tecnológicos de la manera más eficiente y comercialmente atractiva, apoyando al torpedo durante todo su ciclo de vida.



**Foto 7.-** SeaHake™ mod4; Fuente: ATLAS ELEKTRONIK GmbH

En un mundo en continuo cambio, el torpedo continuará su evolución y se adaptará a las nuevas necesidades y escenarios.

Ayer, al igual que hoy, así como en cualquier nuevo escenario, prevalecerá lo que todo submarinista y especialmente el Comandante de submarinos requiere del torpedo:

- Que sea seguro a bordo,
- Que esté siempre listo para ser lanzado y
- Que sea letal para el blanco.

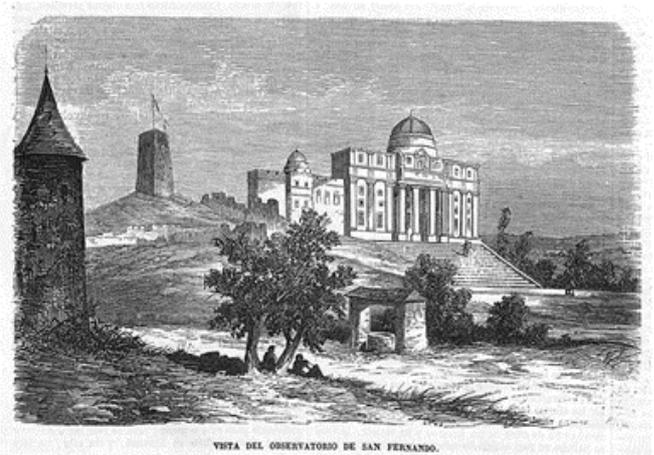
#### **5.- Referencias bibliográficas**

- ATLAS ELEKTRONIK GmbH: Publicaciones internas y catálogos.
- ATLAS ELEKTRONIK GmbH website: <https://www.atlas-elektronik.com/>
- Eberhard Rössler „Die Torpedos der deutschen U-Boote: Entwicklung, Herstellung und Eigenschaften der deutschen Marine-Torpedos“ Koehler Verlag

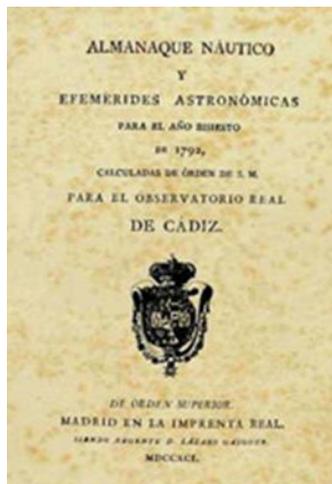
BIOGRAFÍA<sup>1</sup>*Sánchez Cerquero, José*

*La Carraca (Cádiz), 1784 – Cádiz, 21.XI.1850.  
Marino, astrónomo y matemático.*

Procedente del Ejército, ingresó en ella a fines de 1805, siendo destinado por algunos años en el Arsenal de La Carraca, con el grado de alférez de navío y el empleo de ayudante de Ingenieros. Durante la Guerra de la Independencia, a partir de 1809, embarcó y participó en algunas acciones bélicas. En 1813 pasó a dirigir la Academia de Guardias Marinas de Cartagena y en 1816 fue destinado como oficial fijo al Observatorio de San Fernando, donde desarrolló su labor como director a partir de 1825, tras la muerte de su antecesor Julián Ortiz Canelas; si bien ya desempeñaba este cargo interinamente desde mayo del año anterior por enfermedad de éste.



VISTA DEL OBSERVATORIO DE SAN FERNANDO.



Su labor como astrónomo se desarrolló a lo largo de unas décadas penosas para la ciencia española. El impulso que cobró ésta en la última parte del siglo XVIII se vio bruscamente interrumpido por la Guerra de la Independencia y la posterior política regresiva de Fernando VII. El Observatorio, para el que se había construido un nuevo edificio en San Fernando, finalizado en 1798, había asumido durante la última parte de la Ilustración funciones de apoyo al programa hidrográfico que, desde 1783, había emprendido la Marina. Se había convertido en un centro de instrucción avanzada para oficiales escogidos, albergaba un Obrador de Relojería, se había constituido en un importante depósito de los instrumentos empleados por las distintas expediciones, y desde 1791 publicaba unas efemerides, el *Almanaque Náutico*, destinadas a facilitar a los marinos españoles la aplicación de las nuevas técnicas

<sup>1</sup> <http://dbe.rah.es/biografias/6333/jose-sanchez-cerquero>

de navegación surgidas en la segunda mitad del siglo XVIII, y para cuya confección se había creado una Oficina de Calculadores. Pero, al abrirse el siglo siguiente, el programa hidrográfico se vio interrumpido, y el Observatorio quedó —salvo por la publicación del *Almanaque Náutico*— sin objetivos claros.

El predecesor de Sánchez Cerquero en la dirección de la institución, Ortiz Canelas, buscó, tras una estancia en el extranjero en la que había visitado los Observatorios de París y Greenwich, reorientar las tareas hacia una práctica de la astronomía observacional consonante con la efectuada en ellos. Para ello juzgaba preciso liberar al Observatorio de antiguas funciones, desembarazándolo de su función de depósito de instrumentos y del Obrador de Relojería, destinado a la reparación y mantenimiento de los cronómetros de longitud de la Marina. Era precisa, además, la adquisición de un nuevo conjunto de instrumentos, que deseaba similares a los de Greenwich, pues los existentes tenían ya más de medio siglo de antigüedad. Sánchez Cerquero fue destinado al Observatorio en el momento en que Ortiz Canelas elevaba estas propuestas, cuya puesta en práctica requería una importante inversión de fondos que en ese momento las tornaba bastante ilusorias. Cuando en 1825 ocupó el cargo de director, las cosas no habían cambiado: todavía Cerquero constituía, desde hacía un lustro, el único oficial fijo destinado al Observatorio, siendo cubierto entonces el puesto por Saturnino Montojo, quien a su tiempo le sucedería en la dirección.

Recién ascendido, Cerquero insistió sobre la necesidad de un cambio institucional en la línea sugerida por su antecesor, elaborando una historia del Observatorio y un detallado inventario de sus fondos, que ponía de manifiesto sus carencias. El proceso culminó con la redacción de un *Reglamento* promulgado en 1831. En cuanto a los nuevos instrumentos, Cerquero retomó las gestiones realizadas por Ortiz Canelas, viajando a Londres para ultimar los detalles de la construcción de un círculo mural, un anteojo meridiano y un péndulo. Los dos últimos entraron en servicio en 1833, y el círculo, de seis pies ingleses de diámetro, en 1835. Además, Cerquero gestionó con éxito la adquisición de un anteojo con montura ecuatorial. Con ellos se abría una nueva etapa en las tareas observacionales.



No obstante la nueva orientación que se pretendía dar al Observatorio, éste no pudo eludir sus obligaciones con la Marina desde el momento en que ésta comenzó a resurgir, debiendo asumir nuevamente una función de apoyo a las investigaciones hidrográficas y a la cronometría de longitudes. Además, desde el Ministerio se buscó restablecer el antiguo Curso de Estudios Mayores, establecido a partir de 1783 para formar de manera especial a un grupo de oficiales destinados a desempeñar tareas de índole científica y tecnológica. En 1834, se le comunicaron a Sánchez Cerquero las disposiciones para el restablecimiento de dichos estudios. Temiendo que esta nueva obligación fuese en detrimento de las tareas más específicamente astronómicas del Observatorio, éste se opuso, contraponiendo un plan general para mejorar la formación elemental de los oficiales de Marina como paso previo indispensable

a la introducción a estudios superiores, de cuya responsabilidad debía quedar exento el Observatorio. Pese a ello, en 1836 se dispuso el establecimiento del curso, puesto bajo la supervisión del director del Observatorio. Los años en que Sánchez Cerquero ocupó la dirección del Observatorio constituyeron, así, una etapa de indefinición de objetivos dentro de un período penoso, pese a lo cual la institución, convertida por entonces en el único Observatorio astronómico español, logró seguir publicando regularmente el *Almanaque* y llevar a cabo un programa de observaciones.

De entre las numerosas publicaciones de Sánchez Cerquero destacan la relativa a la determinación de la latitud por observaciones extrameridianas, que alcanzó repercusión internacional, y sus “Elementos de cronología analítica”, posiblemente su último trabajo, publicado en 1853. A partir de febrero de 1845 tuvo que ser sustituido por Saturnino Montojo por motivos de salud, retirándose del servicio activo en 1846 y falleciendo cuatro años después. Fue miembro, entre otras, de la Royal Astronomical Society y de la Royal Meteorological Society.

Bibl.: J. Vernet Ginés, *Historia de la ciencia española*, Madrid, Instituto de España, 1975, págs. 234-236; A. Lafuente y M. A. Sellés, *El Observatorio de Cádiz (1753-1831)*, Madrid, Ministerio de Defensa e Instituto de Historia y Cultura Naval, 1988, págs. 425-440; F. J. González González, *El Observatorio de San Fernando (1831-1924)*, Madrid, Ministerio de Defensa e Instituto de Historia y Cultura Naval, 1992, págs. 83-138.

Manuel Sellés García



 **CUERPO DE INGENIEROS DE LA ARMADA**

CON LA COLABORACIÓN DE:



