



BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Junio 2025
Número 28



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



MINISTERIO
DE DEFENSA



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



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

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

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2025

NIPO 083-17-202-1 (edición en línea)

ISSN 2659-6458 (edición en línea)

Fecha de edición: julio 2025

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

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

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

A NUESTROS COLABORADORES

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

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

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

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

Se citará la bibliografía consultada.

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

Maquetación:

M^a José Pizarro García



Índice

EDITORIAL	Pág. 2
REDUCCIÓN DEL TIRO EN REMOLCADORES CON HÉLICES DE PASO FIJO EN FUNCIÓN DE SU VELOCIDAD DE AVANCE	Pág. 4
CN (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
SELECCIÓN DE LA PLANTA PROPULSORA DE UN BUQUE DE GUERRA	Pág. 15
D. Alfonso Alba Maestre	
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
PECAL 2110: ELEMENTOS CRÍTICOS DE SEGURIDAD, «SAFETY»	Pág. 24
DR ^a . D ^a María Penedo Baeza	
D ^a Sonia Bellón Pose	
TN (CEA-EEO-EPO) D. Roberto David Guerrero Espinosa	
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro	
LA RAZONABILIDAD TÉCNICA Y LA NORMALIZACIÓN DE COSTES EN LOS CONTRATOS DE DEFENSA	Pág. 32
AF (RV) D. Antonio Moreno-Torres Gálvez	
BIBLIOGRAFÍA:	Pág. 39
Sarah P. Mather	

Foto portada: Submarino «Galerna»

Autora: D^a Paulina Cieszyńska



EDITORIAL

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

Estimados compañeros

Finalizamos el curso académico tanto de la Enseñanza de Formación y Adscripción al Cuerpo de Ingenieros como, en esta ocasión, la de perfeccionamiento con la III Edición del Máster de Ingeniería de Armas Navales, que anteriormente fue la titulación de Ingeniería Superior de Armas Navales y que se imparte en esta Escuela desde 1964.

Desde que finalicé la especialidad de Armas Navales en la ETSIAN, allá por el año 1998, hasta la actualidad quiero destacar el salto tecnológico que ha tenido lugar y cómo está cambiando los sistemas de armas y el conocimiento del entorno operativo.

Vivimos en lo que se denomina la cuarta revolución industrial en la que sistemas virtuales y sistemas físicos cooperan entre sí. Según los expertos, la transformación que generará será completamente distinta a las experimentadas anteriormente, y se caracterizará por la velocidad de los cambios, el alcance y su impacto. Entre las tecnologías asociadas a esta revolución industrial están la inteligencia artificial, el internet de las cosas, el big data, la realidad virtual y la realidad aumentada y la impresión 3D y 4D.

En el viaje de fin de curso del Máster de Ingeniería de Armas Navales que hicimos a principios de mayo, visitamos el Arsenal de Cartagena y las instalaciones asociadas al submarino S-80, entre otras, la Flotilla y Escuela de Submarinos y hemos podido comprobar cómo parte de estas tecnologías están ya integradas en la construcción, mantenimiento y adiestramiento del nuevo armamento. Asimismo, en la visita a FEINDEF 2025, la Feria Internacional de Defensa y Seguridad de España que tuvo lugar en Madrid los días 12, 13 y 14 de mayo, pudimos apreciar las nuevas capacidades de proyección naval y conocimiento del entorno que nos permite el despliegue de vehículos no tripulados, la interoperabilidad entre unidades y el multidominio.

En Armada 2050, el AJEMA nos habla de la necesidad de tener una Armada que sea relevante y referente en el ámbito marítimo, que impulse la industria nacional y el desarrollo tecnológico, ágil y moderna, con capacidad de anticiparse a los acontecimientos, pero siempre vinculada a nuestra historia y tradiciones. Y quiero destacar ágil y moderna: la velocidad con la que avanza la tecnología nos obliga a estar en constante formación, pendientes de los avances tecnológicos y sus aplicaciones en el ámbito militar.

Pero el uso de las tecnologías emergentes no sólo ha llegado al campo de operaciones, sino también a nuestro día a día modernizando nuestra forma de trabajo. Es por todo ello, por lo que cualquier persona que trabaje en y con las fuerzas armadas debe adaptarse a estos cambios, y nosotros como ingenieros, debemos liderar, motivar y facilitar el uso de las nuevas tecnologías. Facilitar «al usuario» la ejecución de su trabajo

diario, automatizar tareas y crear entornos amigables, con realidad virtual o aumentada, en los que simular, aprender y adiestrarnos, requerirá conocer el grado de madurez de las tecnologías emergentes para una implantación eficiente en nuestras unidades y mayores conocimientos interdisciplinares.

En esta edición del boletín encontramos un artículo que analiza la pérdida de tiro con la velocidad de avance de un remolcador de hélices de paso fijo; el uso del motor eléctrico en las plantas motrices de los buques militares es ya una realidad que contribuye a la sostenibilidad y protección del medio ambiente; la gestión (y control) de elementos críticos en la programas de armamento naval conforme a la norma militar PECAL 2110 y la normalización de costes en los contratos de defensa, estos dos últimos dan una idea de los aspectos a considerar a la hora de integrar las nuevas tecnologías en los sistemas de armamento. Espero y deseo que sea de vuestro agrado.

El 2 de septiembre, comenzaremos con la IV Edición del Máster de Ingeniería de Armas Navales, así como la Enseñanza de Formación (que ya mencioné en el boletín anterior) y continuaremos con el Doctorado en Ingeniería.

Agradeceros vuestra atención y participación tanto en la formación y enseñanza como en la divulgación del conocimiento, y deseáros un feliz verano.

REDUCCION DEL TIRO EN REMOLCADORES CON HELICES DE PASO FIJO EN FUNCION DE SU VELOCIDAD DE AVANCE

CN (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE

Doctor Ingeniero Naval por la UPM

Resumen. - Este documento tiene por objeto desarrollar un modelo matemático sencillo para estimar la reducción que sufre la capacidad de tiro de un remolcador dotado de hélices de paso fijo en función de su velocidad de avance, y para ello, se analizará el efecto que tiene la cavitación en el diseño del remolcador, se establecerá la resistencia al avance de su carena y se estudiará la influencia que ejerce la velocidad en el empuje generado por los propulsores.

1.- Introducción

Las aplicaciones que puede tener un remolcador son múltiples y variadas, aunque la mayoría de ellas caerá en alguno de estos dos grupos:

- Auxilio en operaciones portuarias (maniobras de entrada en canales de acceso, aproximación al muelle y amarre, etc.)
- Remolques en mar abierto (buques averiados, plataformas navales sin propulsión propia, etc.)

En el primer grupo suele primar la capacidad de maniobra en espacios restringidos, lo que lleva en muchos casos al uso de:

- Propulsores cicloidales (tipo VOITH)
- Hélices con capacidad de giro acimutal (tanto de paso fijo como variable)
- Propulsión tipo WATER-JET (ver referencia [1])

Sin embargo, en el segundo de estos dos grupos suele primar la eficiencia propulsiva (relación tiro/potencia), lo que lleva en muchos casos al uso de hélices en tobera, tanto de paso fijo como variable.

En este trabajo se va a desarrollar un modelo matemático simplificado para estimar la reducción que sufre la capacidad de tiro de un remolcador (dotado de hélices en tobera de paso fijo) en función de su velocidad de avance, lo cual pasa por analizar:

- El efecto que produce la cavitación en el diseño del remolcador.
- La resistencia al avance de la carena
- La influencia que tiene la velocidad en el empuje suministrado por las hélices

Se hace notar que los resultados aquí obtenidos:

- Serán de aplicación directa al caso de hélices sin tobera (aunque siempre de paso fijo), ya que en el desarrollo matemático efectuado no ha sido necesario imponer restricción alguna en este sentido.

- Constituyen una primera aproximación útil en el proceso de dimensionamiento inicial, aunque quizá insuficiente en fases posteriores

Tabla 1.- Nomenclatura

<i>d</i>	Densidad del agua de mar (kg/m^3)
<i>e</i>	Empuje suministrado por los propulsores (N)
<i>f</i>	Resistencia al avance del remolcador (N)
<i>g</i>	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
<i>l</i>	Eslora de la carena (m)
<i>p</i>	Presión (N/m^2)
<i>r</i>	Velocidad de giro de los propulsores (ciclos/s)
<i>t</i>	Tiro del remolcador (N)
<i>v</i>	Velocidad de avance del remolcador (m/s)
<i>w</i>	Potencia absorbida por los propulsores (Nm/s)
Δp	Depresión máxima que sufre el agua al circular por las hélices (N/m^2)
Subíndice 0	Denota velocidad de avance nula
Subíndice m	Denota valor máximo
Subíndice n	Indicativo de condiciones atmosféricas
LCH	Límite de cavitación de las hélices
RAR	Resistencia al avance del remolcador
TPF	Tiro a punto fijo
VAM	Velocidad de avance máxima

Por último, comentar que el modelo matemático presentado en este documento ha sido desarrollado bajo las restricciones siguientes:

R1.- Los efectos asociados a la viscosidad del agua no se tomarán en consideración (lo cual resulta aceptable para números de REYNOLDS altos)

R2.- Todas las carenas consideradas en este trabajo (incluyendo los propulsores) serán:

- Geométricamente semejantes
- Simétricas respecto al plano de crujía

R3.- La presión de vapor del agua de mar se supondrá despreciable en relación con la presión atmosférica al nivel del mar (lo cual es razonable dada la temperatura del agua en los diferentes océanos).

R4.- Cuando el remolcador disponga de dos o más propulsores, todos ellos funcionarán exactamente a la misma velocidad de giro.

2.- Efectos básicos de la cavitación en el diseño del remolcador

Teniendo en cuenta las restricciones R1, R2 y R4, así como una velocidad de avance nula, es razonable suponer que la depresión máxima que sufre el agua al circular por las hélices, la potencia absorbida por las mismas, y el TPF suministrado por el remolcador, puedan describirse en función de las siguientes variables:

- Eslora de la carena del remolcador
- Velocidad de giro de los propulsores
- Densidad del agua de mar

Y aplicando el esquema procedimental descrito en la referencia [2], resulta inmediato alcanzar las siguientes expresiones:

$$\frac{\Delta p_0}{dr^2 l^2} = M \quad (2.1)$$

$$\frac{t_0}{dr^2 l^4} = N \quad (2.2)$$

$$\frac{w_0}{dr^3 l^5} = G \quad (2.3)$$

En donde M , N y G son tres constantes no dimensionales que van a depender de la configuración geométrica que adopte la carena (incluyendo los propulsores).

Introduciendo ahora la condición físicamente necesaria para evitar la cavitación en los propulsores ($p_n > \Delta p_0$) se puede convertir la ecuación 2.1 en una desigualdad:

$$\frac{p_n}{dr^2 l^2} > M \quad (2.4)$$

En donde:

- Se ha hecho uso de la restricción R3.
- Se ha despreciado el efecto beneficioso de la inmersión de las hélices.

Y 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 2.4 se deduce un primer efecto:

$$rl < \left(\frac{p_n}{dM} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Para una eslora dada, la expresión 2.5 impone un límite superior a la velocidad de giro de los propulsores si se quiere evitar la entrada en cavitación.

Por otro lado, combinando las expresiones 2.2 y 2.3 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{t_0}{w_0} rl = N/G \quad (2.6)$$

Y empleando ahora el LCH implícito en la expresión 2.5 resulta posible transformar la anterior en esta otra:

$$\frac{t_0}{w_0} > \frac{NM^{1/2}}{G} \left(\frac{d}{p_n} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Así pues, un segundo efecto sería que la eficiencia propulsiva en la condición de TPF va a presentar un límite inferior que viene marcado por el citado LCH.

Un tercer efecto se puede deducir combinando las expresiones 2.2 y 2.5 para llegar al siguiente resultado:

$$\frac{t_0}{l^2} < N \frac{p_n}{M} \quad (2.8)$$

Para un TPF dado, esta expresión impone un límite inferior a la eslora del remolcador si no se quiere rebasar el LCH arriba indicado.

Las desigualdades 2.5, 2.7 y 2.8 han permitido establecer regiones de diseño libres de cavitación, y justo en la frontera de estas regiones, dichas desigualdades se convierten en ecuaciones que pueden usarse como reglas de dimensionamiento, a saber:

$$r_m l = \left(\frac{p_n}{dM} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

$$w_m = \frac{G}{NM^{1/2}} \left(\frac{p_n}{d} \right)^{1/2} t_m \quad (2.10)$$

$$\frac{t_m}{l^2} = \frac{N}{M} p_n \quad (2.11)$$

Por último, comentar que un aumento de la velocidad de avance manteniendo constante la velocidad de giro de los propulsores conllevará siempre una disminución tanto del empuje como de la potencia (es decir, que las hélices funcionarán siempre más descargadas dando avance que en la condición de TPF).

Lo anterior (que puede corroborarse en cualquier tratado sobre diseño de propulsores navales) permite asumir que, a efectos prácticos, no se alcanzará el LCH en ninguna condición de navegación mientras dicho límite no se alcance en la condición de TPF con las hélices girando a tope de revoluciones.

3.- Reducción de la capacidad de tiro en función de la velocidad de avance

Para estimar la reducción que sufre la capacidad de tiro del remolcador dando avance a velocidad no nula, se dividirá el trabajo en tres fases:

- En primer lugar, se llevará a cabo un análisis simplificado de la RAR
- A continuación, se estudiará la influencia de la velocidad de avance en el empuje que se puede generar con los propulsores
- Finalmente, se combinarán los resultados obtenidos para llegar a una expresión sencilla del tiro efectivo (empuje menos RAR) en función de la velocidad.

3.1.- Resistencia al avance del propio remolcador

Teniendo en cuenta las restricciones R1 y R2, es razonable suponer que la RAR pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Eslora de la carena del remolcador
- Velocidad de avance del remolcador
- Aceleración de la gravedad
- Densidad del agua de mar

Y aplicando el esquema procedimental descrito en la referencia [2], resulta inmediato alcanzar la siguiente expresión:

$$\frac{f}{dv^2 l^2} = F\left(\frac{v^2}{gl}\right) \quad (3.1)$$

El término entre paréntesis del segundo miembro de esta ecuación es el cuadrado del número de FROUDE, y asumiendo que su influencia pueda despreciarse (lo cual resulta perfectamente aceptable a los efectos del presente trabajo), la función F se convierte en una constante no dimensional.

3.2.- Influencia de la velocidad en el empuje suministrado por las hélices

Teniendo en cuenta las restricciones R1, R2 y R4, y dando por sentado que nunca se alcanza el LCH (ver lo indicado al final del punto 2), es razonable suponer que el empuje suministrado por los propulsores pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Eslora de la carena del remolcador
- Velocidad de avance del remolcador
- Velocidad de giro de los propulsores
- Densidad del agua de mar

Y aplicando una vez más el esquema procedimental descrito en la referencia [2], resulta inmediato alcanzar la siguiente expresión:

$$\frac{e}{dr^2 l^4} = E\left(\frac{v}{rl}\right) \quad (3.2)$$

En donde E será una función genérica (de naturaleza no dimensional).

Conservando ahora la parte lineal de la expansión en serie de TAYLOR de esta última función, es posible transformar la expresión 3.2 en esta otra:

$$\frac{e}{dr^2 l^4} = A - B \frac{v}{rl} \quad (3.3)$$

En donde:

- A y B serán dos constantes no dimensionales (nótese que A deberá coincidir con la constante no dimensional N de la ecuación 2.2)
- El signo negativo se debe a la disminución del empuje conforme aumenta la velocidad de avance (ver lo indicado al final del punto 2)

En la condición de TPF, la expresión 3.3 puede convertirse en esta otra:

$$\frac{t_m}{dr_m^2 l^4} = A \quad (3.4)$$

Combinando las igualdades 3.3 y 3.4 es inmediato llegar al siguiente resultado:

$$e = t_m \frac{r}{r_m} \left(\frac{r}{r_m} - \frac{B}{A} \frac{v_m}{r_m l} \frac{v}{v_m} \right) \quad (3.5)$$

Y finalmente, llamando K a la constante no dimensional incluida dentro del paréntesis, la igualdad anterior quedaría tal como sigue:

$$e = t_m \frac{r}{r_m} \left(\frac{r}{r_m} - K \frac{v}{v_m} \right) \quad (3.6)$$

El valor de la constante no dimensional K va a depender de la configuración geométrica que adopte la carena incluyendo los propulsores (ver anexo A), y tal como se mostrará a continuación, es posible establecer una relación entre dicha constante y la constante F de la ecuación 3.1.

3.3.- Tiro efectivo del remolcador en función de su velocidad de avance

Navegando a la VAM, las expresiones 3.1 y 3.6 se transformarán respectivamente en estas otras (según puede verse en el anexo A, esta velocidad se alcanzará con las hélices funcionando a su velocidad de giro máxima):

$$\frac{f}{dv_m^2 l^2} = F \quad (3.7)$$

$$e = t_m(1 - K) \quad (3.8)$$

Como en estas condiciones, la RAR debe igualarse con el empuje de los propulsores, de estas dos últimas expresiones se deriva este resultado:

$$Fdv_m^2 l^2 = t_m(1 - K) \quad (3.9)$$

Nótese que esta última expresión permite relacionar la constante F con la K y, por tanto, transformar la igualdad 3.1 en esta otra:

$$f = t_m(1 - K) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \quad (3.10)$$

Restando este último resultado del empuje que suministran las hélices (ver ecuación 3.6), se obtendría el tiro efectivo del remolcador:

$$t = t_m \left[\frac{r}{r_m} \left(\frac{r}{r_m} - K \frac{v}{v_m} \right) - (1 - K) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

Y finalmente, con los propulsores funcionando a sus máximas revoluciones (lo que, según se vio al final del punto 2, no implica la capacidad de aprovechar toda la potencia instalada a bordo cuando se trabaja fuera de la condición de TPF), esta igualdad quedaría tal como sigue:

$$t = t_m \left[1 - K \frac{v}{v_m} - (1 - K) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

En relación con esta última ecuación, resulta interesante llamar la atención sobre las propiedades que exhibe:

- A velocidad de avance nula, el tiro efectivo se hace máximo
- A la VAM, el tiro efectivo se anula por completo
- Para K igual a cero, se tendría un sistema propulsivo ideal cuyo empuje no cae con la velocidad de avance.
- Para K igual a la unidad, se tendría una carena ideal que no ofrece resistencia alguna al avance

Por último, y según la experiencia del autor, cabe indicar que pueden obtener resultados razonablemente buenos para valores de la constante K alrededor de 0,5.

4.- Conclusiones y comentarios finales

En este trabajo se ha desarrollado un modelo matemático simplificado para estimar la pérdida de tiro de un remolcador (dotado de hélices en tobera de paso fijo) en función de su velocidad de avance, habiendo usado a tales efectos el esquema procedimental de la referencia [2].

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

- Para una eslora dada del remolcador, el inicio de la cavitación impone un límite superior a la velocidad de giro de los propulsores
- Para un TPF dado, el inicio de la cavitación impone un límite inferior al valor de la eslora del remolcador (o, dicho de otro modo, al tamaño del mismo)
- Funcionando justo en el LCH, la potencia absorbida por el sistema de propulsión será directamente proporcional al valor del TPF.
- La VAM mantendrá un valor constante para cada configuración geométrica que adopte la carena, incluyendo en la misma los propulsores (ver anexo A).
- El tiro efectivo del remolcador en función de la velocidad puede expresarse mediante un polinomio de segundo grado cuya forma dependerá de una sola constante no dimensional.

Por otro lado, las expresiones obtenidas incluyen una serie de constantes cuyo valor se establecerá normalmente a partir de los datos disponibles sobre proyectos similares, lo que imprimirá en dichas expresiones un carácter claramente empírico.

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

El primero es que el modelo matemático aquí obtenido resulta aplicable a carenas con disposiciones geométricas muy diferentes, ya que no ha sido necesario imponer restricción alguna en este sentido. Sin embargo, la mezcla de todas ellas en el proceso de ajuste de las constantes arriba indicadas violaría la restricción R2, ante lo cual caben dos vías de acción:

- Aceptar el aumento en el nivel de incertidumbre que inevitablemente conllevará la falta de semejanza geométrica.
- Incluir en el modelo matemático variables adicionales (diámetro de las hélices, etc.) para eliminar la necesidad de semejanza geométrica.

El segundo tema se refiere al hecho de haber despreciado la dependencia del número de FROUDE que exhibe la función F , lo cual ha permitido llegar a estas dos conclusiones (ver anexo A):

- En navegación libre, la velocidad de avance aumentará linealmente con las revoluciones de las hélices.
- La VAM se mantiene constante una vez fijada la geometría de la carena.

Estudiar el efecto que puede tener la dependencia arriba citada en estos dos resultados conduce a una problemática que se ha dejado para mejor ocasión.

El último tema tiene que ver con la estrategia de diseño implícitamente adoptada en este trabajo, la cual se compone de dos etapas claramente diferenciadas:

- En una primera, se ha seleccionado el tipo de propulsión más adecuado (en este caso, tratando de lograr eficiencias propulsivas altas)
- En la segunda, se busca el remolcador más pequeño posible para un TPF dado (en este caso, usando las tres reglas de dimensionamiento del punto 2)

Aunque ciertamente hay otras estrategias posibles, la aquí adoptada constituye una opción razonable cuando lo único que se busca es una primera aproximación de carácter orientativo, sin entrar en las peculiaridades de cada proyecto concreto.

5.- Referencias bibliográficas

[1] **Casas P.A.**, 2021, Dimensionamiento de un WATER-JET suministrando tiro a punto fijo, *Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada* nº20.

[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.- Invariancia del parámetro no dimensional K

Aquí se va a demostrar que el parámetro K (ver expresión A.1) mantendrá un valor constante una vez fijada la configuración geométrica de la carena.

$$K = \frac{B}{A} \frac{v_m}{r_m l} \quad (\text{A.1})$$

Dado que las constantes A y B se derivan de la expansión en serie de TAYLOR de la función no dimensional E (ver expresión 3.2), está claro que su valor solo dependerá de la configuración geométrica de la carena.

En segundo lugar, y a la vista de la expresión 2.9, es evidente que el denominador del segundo de los cocientes que aparecen en la ecuación A.1 será una constante cuyo valor dependerá tan solo de la configuración geométrica de la carena.

Por último, para ver que la VAM es una constante, se hará uso de las ecuaciones 3.1 y 3.2, a saber:

$$\frac{f}{dv^2 l^2} = F \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{e}{dr^2 l^4} = E \left(\frac{v}{rl} \right) \quad (\text{A.3})$$

Nótese que en la ecuación A.2 se ha despreciado la dependencia que presenta la función no dimensional F del número de FROUDE.

Como la RAR debe compensarse con el empuje de las hélices en navegación libre, es posible combinar estas dos últimas expresiones para obtener lo siguiente:

$$F \frac{v^2}{r^2 l^2} = E \left(\frac{v}{rl} \right) \quad (\text{A.4})$$

Usando ahora esta última ecuación, es inmediato llegar al siguiente resultado:

$$\frac{v}{rl} = Q \quad (\text{A.5})$$

En donde Q será una constante no dimensional.

Según la expresión A.5, la velocidad de avance del remolcador aumentará linealmente con las revoluciones de los propulsores, llegando al máximo para el valor límite que se haya decidido imponer a estas últimas.

Y justo en el límite elegido en este trabajo (ver ecuación 2.9), la VAM tomará un valor constante que solo dependerá de la configuración geométrica de la carena, a saber:

$$v_m = Qr_m l = Q \left(\frac{p_n}{dM} \right)^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

Así pues, de todo lo anterior cabe concluir que el parámetro no dimensional K será un invariante característico de cada configuración geométrica que adopte la carena.

SELECCIÓN DE LA PLANTA PROPULSORA DE UN BUQUE DE GUERRA

D. ALFONSO ALBA MAESTRE

Grado en Ingeniería Naval y Oceánica / Universidad de A Coruña

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Doctor en Ingeniería Naval y Oceánica / Capitán de la Marina Mercante

Jefe de Ingeniería de Plataforma de ICOFER (Arsenal Militar Ferrol)

INTRODUCCIÓN:

Los buques militares normalmente están exentos de cumplir la normativa marítima nacional e internacional, aunque lo más habitual es seguir las medidas de seguridad establecidas. Esto hace que el diseño de este tipo de embarcaciones este mayormente enfocado en el cumplimiento de las necesidades específicas de las Fuerzas Armadas y permite desarrollar soluciones tecnológicas más avanzadas.

A diferencia de los buques mercantes, los buques de guerra deben cumplir su misión en cualquier situación. Por lo que deben estar preparados para tal efecto. Por este motivo y con la flexibilidad de la normativa existente, el diseño de los buques militares busca soluciones que doten a la embarcación de ciertas características como una gran maniobrabilidad, mayor potencia y velocidad que los buques convencionales, una disposición y redundancia que permita mantener la operatividad del buque en condiciones de avería, así como, la capacidad de sigilo.

Esos requerimientos se deben tener en cuenta a la hora de definir la planta propulsora, pues es una de las partes fundamentales en el diseño de un buque para conseguir que destaque por encima de otras embarcaciones militares.

La selección de la planta propulsora no solo influye en el rendimiento del buque, sino también en su autonomía, eficiencia energética y capacidad de respuesta en situaciones de combate. En este sentido, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de distintos tipos de sistemas de propulsión, desde los tradicionales motores diésel y turbinas de gas hasta sistemas híbridos y eléctricos que optimizan el consumo de combustible y reducen la firma acústica del buque.

CONFIGURACIONES DE LA PLANTA:

Para propulsar el buque podemos utilizar motores diésel de 2 ó 4 tiempos, turbinas de vapor, turbinas de gas, propulsión eléctrica o plantas combinadas. Antes de decantarse por una de estas tecnologías es importante tener en cuenta una característica que diferencia a los buques militares de otro tipo de buques y es que estos barcos (pensando principalmente en corbetas, fragatas o destructores) tienen dos modos de operación; el primero a la velocidad de servicio, que es el modo habitual al que trabaja y está diseñado para ser más eficiente y tener un menor gasto de combustible, y el segundo es el modo de máxima potencia, en este modo la velocidad de operación será mucho mayor, así como, el gasto de combustible. Será el modo empleado en condiciones de emergencia.

Claramente, esto es algo para tener en cuenta al diseñar la planta propulsora, pues se requiere una configuración flexible que pueda cumplir con ambas demandas permitiendo trabajar a los motores o turbinas siempre en su punto óptimo. Si, por ejemplo, se escogieran dos motores diésel directamente acoplados a la hélice, deberían de ser dimensionados para que a la velocidad de emergencia (segundo modo de operación

y el más exigente) trabajasen en su punto óptimo, esto haría que, en su funcionamiento diario, a la velocidad de servicio, los motores estuviesen trabajando fuera de su punto de trabajo siendo muy poco eficientes y consumiendo una gran cantidad de combustible. Por ello, la planta escogida debe considerar las dos situaciones permitiendo trabajar de la forma más eficiente y eficaz posible en cualquiera de los modos de operación. Esto habitualmente se consigue mediante plantas combinadas. A continuación, se presentan diferentes configuraciones que permiten dicha operación:

CODAD: COMbined Diesel And Diesel

- Para velocidad de servicio funciona con un único motor diésel
- Para velocidad máxima, se acopla un segundo motor diésel en la misma línea
- Muy eficiente en consumo de combustible
- No alcanza potencias tan altas como sistemas con turbinas de gas y supone una mayor demanda de espacio

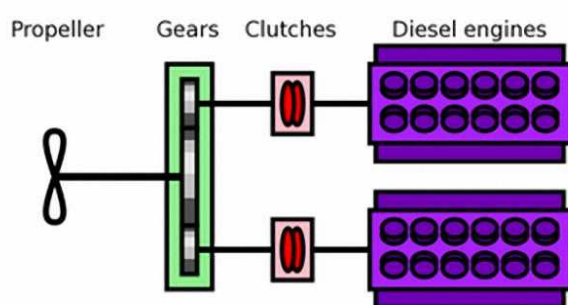


Ilustración 1. Planta de propulsión CODAD (Fuente: WIKIWAND)

Diesel-Eléctrica

- Usa motores diésel para alimentar motores eléctricos que mueven las hélices
- El número de generadores encendidos se ajusta a la demanda
- Siempre trabajan en el punto óptimo de trabajo y permiten gran flexibilidad
- Aunque es una configuración más pesada y voluminosa, permite una distribución más flexible del peso y del espacio
- Menor firma acústica
- Puede tener menos eficiencia a altas velocidades
- Planta eléctrica más compleja

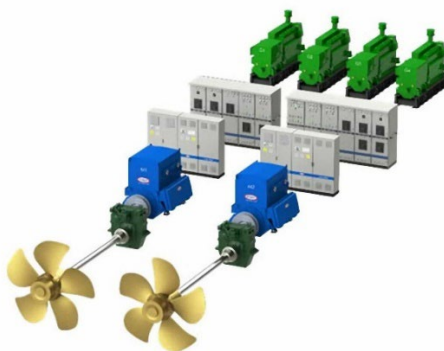


Ilustración 2. Planta de propulsión Diesel-Eléctrica (Fuente: Naval Technology)

CODOG: COmbined Diesel Or Gas turbine

- Se disponen dos máquinas para accionar el eje, siempre independientes
- Opera con motor diésel a baja/media velocidad
- Opera con turbina de gas a alta velocidad
- Bajo consumo a bajas velocidades
- Redundancia en potencia propulsora en caso de avería

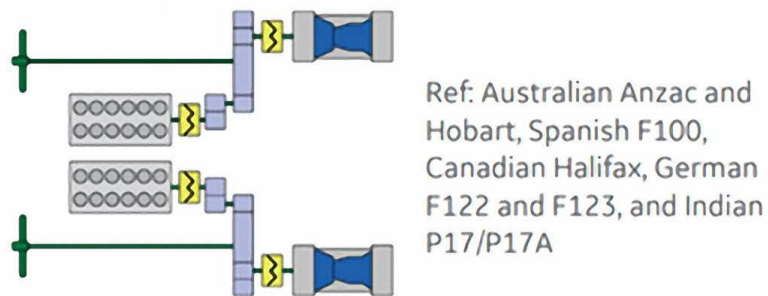


Ilustración 3. Planta de propulsión CODOG (Fuente: GE)

CODAG: COmbined Diesel And Gas turbine

- Se disponen dos máquinas para accionar el eje, tanto independientes como conjuntamente
- Opera con motor diésel a baja/media velocidad
- Opera con ambas máquinas a alta velocidad
- Permite utilizar toda la potencia instalada de forma simultánea
- Permite diseñar la planta con una única turbina de gas
- Bajo consumo a bajas velocidades
- Redundancia en potencia propulsora en caso de avería

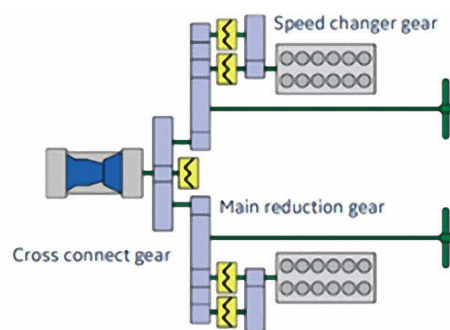
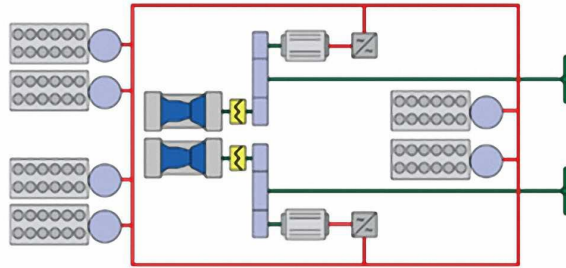


Ilustración 4. Planta de propulsión CODAG (Fuente: GE)

CODLOG: Combined Diesel- Electric Or Gas Turbine

- Proporciona propulsión diésel eléctrica a baja/media velocidad
- Se opera con turbina de gas a alta velocidad
- Bajo consumo a bajas velocidades y poca firma acústica
- Planta eléctrica de alta capacidad y motores eléctricos grandes y pesados
- Requiere una turbina de gas de gran potencia o instalar 2
- Redundancia en potencia propulsora en caso de avería

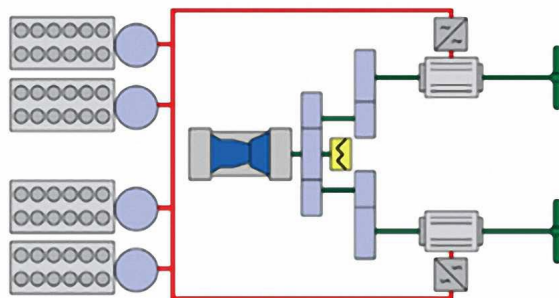


Ref: U.S. Navy LHD 8 and LHA 6 America

Ilustración 5. Planta propulsora CODLOG (Fuente: GE)

CODLAG: Combined Diesel-electric And Gas turbine

- Proporciona propulsión diésel eléctrica a baja/media velocidad
- Se opera con turbina de gas a alta velocidad y con el motor eléctrico
- Bajo consumo a bajas velocidades y poca firma acústica
- Planta eléctrica de alta capacidad y motores eléctricos grandes y pesados
- No requiere una turbina de gran potencia, normalmente una es suficiente
- Redundancia en potencia propulsora en caso de avería



Ref: FFG 62, Italian FREMM, Finnish SQ2020, Spanish F110 and German F125

Ilustración 6. Planta propulsora CODLAG (Fuente: GE)

COGAG: Combined Gas turbine And Gas turbine

- Se dispone de dos turbinas de gas por eje de propulsión.
- Permite operar con una turbina de gas a velocidades bajas y medias
- Se opera con las dos turbinas de gas a alta velocidad
- Proporciona máxima eficiencia del espacio y peso a bordo
- Consumos elevados, especialmente a bajas velocidades
- Redundancia en potencia propulsora en caso de avería

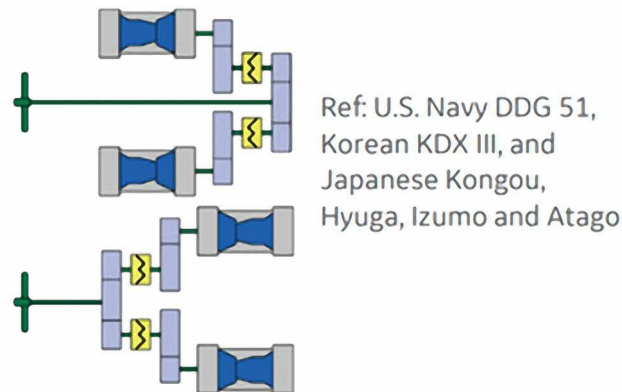


Ilustración 7. Planta propulsora COGAG (Fuente: GE)

IPS: Integrated Electric Propulsion

- Propulsión eléctrica, generada por una combinación de máquinas primarias
- Usa pods azimutales aumentando la maniobrabilidad
- Maximiza el espacio abordo
- Reduce ruido y vibraciones
- No muy eficiente a altas velocidades
- Planta eléctrica cara y compleja

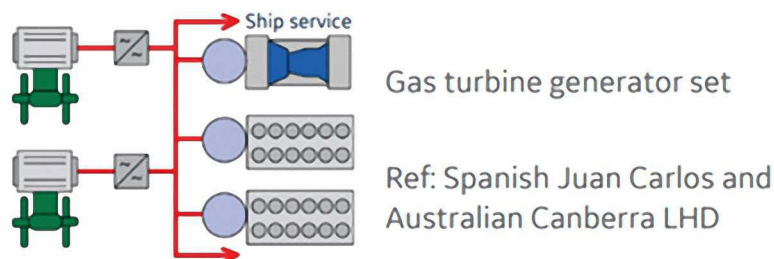


Ilustración 8. Planta propulsora IPS (Fuente: GE)

EJEMPLOS DE BUQUES:

En este apartado se presentan varios ejemplos de buques militares existentes con su respectiva configuración de la planta propulsora, publicados por GE Aerospace en 2021. Se puede observar que la opción más habitual es la configuración CODOG, seguida de la COGAG. Siendo la CODLOG y la CODLAG una alternativa cada vez más utilizada.

Country	Class	Type	# Ships	# GT's per ship	# GT's in Class	GT Model	Propulsion Cycle
Algeria	Erradii	Frigate (MEKO A200)	2	1	2	LM2500	CODOG
	Anzac	Frigate	8	1	8	LM2500	CODOG
Australia	Adelaide	Frigate	6	2	12	LM2500	COGAG
	Canberra AHLD (***)	Amphibious Helicopter	2	1	2	LM2500	IPS
	Hobart AWD	Destroyer	3	2	6	LM2500	CODOG
Bahrain	Sabha	Frigate	1*	2		LM2500	COGAG
Brazil	Inhauma	Corvette	5	1	5	LM2500	CODOG
Canada	Halifax	Frigate	12	2	24	LM2500	CODOG
Chile	Adelaide (Australia)	Frigate	2*	2		LM2500	COGAG
China (PRC)	Luhu	Destroyer	2	2	4	LM2500	CODOG
Colombia	Narino	Corvette (Donghae)	1*	1		LM2500	CODLAG
	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	1		LM2500	CODOG
Denmark	Niels Juel	Corvette	3	1	3	LM2500	CODOG
Egypt	Sharm El Sheikh	Frigate (FFG-7)	4*	2		LM2500	CODOG
	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	1		LM2500	CODOG
	Tahya Misr	Frigate (DCNS FREMM)	1	1	1	LM2500+G4	CODLOG
	MEKO	Frigate	4	1	4	LM2500	CODAG WARP
Finland	Pohjanmaa (SQ2020)	Corvette	4	1	4	LM2500	CODLAG
France	Forbin	Frigate (Horizon)	2	2	4	LM2500	CODOG
	Aquitaine	Frigate (DCNS FREMM)	8	1	8	LM2500+G4	CODLOG
Germany	Bremen	Frigate (122)	8	2	16	LM2500	CODOG
	Brandenburg	Frigate (123)	4	2	8	LM2500	CODOG
	Sachsen	Frigate (124)	3	1	3	LM2500	CODAG
	Baden-Wuerttemberg	Frigate (125)	4	1	4	LM2500	CODLAG

Tabla 1. Plantas propulsoras en buques militares I (Fuente: GE Aerospace)

Country	Class	Type	# Ships	# GT's per ship	# GT's in Class	GT Model	Propulsion Cycle
Greece	Hydra	Frigate	4	2	8	LM2500	CODOG
	Shivalik	Frigate (P-17)	3	2	6	LM2500	CODOG
India	Unnamed	Frigate (P-17A)	7	2	14	LM2500	CODOG
	Vikrant	Aircraft Carrier (P-71)	1	4	4	LM2500	COGAG
Indonesia	Mandau	Fast Attack	4	1	4	LM2500	CODOG
Israel	Eilat	Corvette (Sa'ar 5)	3	1	3	LM2500	CODOG
Italy	Artigliere	Frigate	4	2	8	LM2500	CODOG
	Maestrale	Frigate	8	2	16	LM2500	CODOG
	Durand de la Penne	Destroyer	2	2	4	LM2500	CODOG
	Garibaldi	Aircraft Carrier	1	4	4	LM2500	COGAG
	Andrea Doria	Destroyer (Horizon)	2	2	4	LM2500	CODOG
	Cavour	Aircraft Carrier	1	4	4	LM2500	COGAG
	Bergamini	Frigate (FNC FREMM)	10	1	10	LM2500+G4	CODLAG
	PPA	Offshore Multi-purpose Patrol	7	1	7	LM2500+G4	CODLAG
Japan	Asuka (***)	Experimental	1	2	2	LM2500	COGLAG
	Murasame	Destroyer	9	2	18	LM2500	COGAG
	Takanami	Destroyer	5	2	10	LM2500	COGAG
	Kongou	Destroyer	4	4	16	LM2500	COGAG
	Hyuga	Helio Destroyer (DDH)	2	4	8	LM2500	COGAG
	Izumo	Helio Destroyer (DDH)	2	4	8	LM2500	COGAG
	Atago	Destroyer (DDGDM)	2	4	8	LM2500	COGAG
	Asahi	Destroyer	2	2	4	LM2500	COGLAG
Morocco	Maya (27DD)	Destroyer	2	2	4	LM2500	COGLAG
	Mohammed VI	Frigate (DCNS FREMM)	1	1	1	LM2500+G4	CODLOG
New Zealand	Te Kaha	Frigate (Anzac)	2	1	2	LM2500	CODOG
Norway	Fridtjof Nansen	Frigate	5	1	5	LM2500	CODAG
Pakistan	PNS Alamgir	Frigate	1*	2		LM2500	COGAG
	MILGEM	Corvette	4	1	4	LM2500	CODAG

Tabla 2 Plantas propulsoras en buques militares II (Fuente: GE Aerospace)

Country	Class	Type	# Ships	# GT's per ship	# GT's in Class	GT Model	Propulsion Cycle
Peru	Caravajal	Frigate - Mod Lupo	4	2	8	LM2500	CODOG
	Aguirre	Frigate - Lupo	4	2	8	LM2500	CODOG
	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	2		LM2500	CODOG
Philippines	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	2		LM2500	CODOG
Poland	ORP Slazak	Offshore Patrol Vessel	1	1	1	LM2500	CODOG
	Gen. K. Pulaski	Frigate (FFG-7)	2*	2		LM2500	COGAG
Portugal	Vasco Da Gama	Frigate (MEKO 200)	3	2	6	LM2500	CODOG
Saudi Arabia	Al Siddiq	Patrol Combatant	9	1	9	LM2500	CODOG
	Badr	Corvette	4	1	4	LM2500	CODOG
S. Africa	Amatola	Frigate (MEKO A200)	4	1	4	LM2500	CODAG WARP
	Donghae	Corvette	4	1	4	LM2500	CODOG
	Pohang	Corvette	24	1	24	LM2500	CODOG
S. Korea	Ulsan	Frigate	9	2	18	LM2500	CODOG
	KDX-1	Destroyer	3	2	6	LM2500	CODOG
	KDX-2	Destroyer	6	2	12	LM2500	CODOG
	KDX-3 B1	Destroyer	3	4	12	LM2500	COGAG
	KDX-3 B2	Destroyer	1	4	4	LM2500	COGLAG
	FFX I (**)	Frigate	6	2	6	LM2500	CODOG
	Hansando (ATX)	Aux Training Ship	1	1	1	LM2500	CODOG
	Santa Maria	Frigate	6	2	12	LM2500	COGAG
Spain	Alvaro de Bazan	Frigate (F100)	5	2	10	LM2500	CODOG
	Principe De Asturias	Aircraft Carrier	1	2	2	LM2500	CODOG
	Juan Carlos (***)	Amphibious Assault (LHD)	1	1	1	LM2500	IPS
	Bonifaz (F110)	Frigate	5	1	5	LM2500	CODLAG
	Cheng Kung	Frigate	8	2	16	LM2500	COGAG
Taiwan	Ming Chuan	Frigate (FFG-7)	4*	2		LM2500	COGAG
	Kee Lung	Destroyer (Kidd)	4*	4		LM2500	COGAG
	Naresuan	Frigate	2	2	4	LM2500	CODOG
Thailand	Chakri Naruebet	Helo Carrier	1	2	2	LM2500	CODOG
	HTMS Bhumibol Adulyadej	Frigate	1	1	1	LM2500	CODOG
	Naresuan	Frigate	2	2	4	LM2500	CODOG
Thailand	Chakri Naruebet	Helo Carrier	1	2	2	LM2500	CODOG
	HTMS Bhumibol Adulyadej	Frigate	1	1	1	LM2500	CODOG

Tabla 3. Plantas propulsoras en buques militares III (Fuente: GE Aerospace)

Country	Class	Type	# Ships	# GT's per ship	# GT's in Class	GT Model	Propulsion Cycle
Peru	Caravajal	Frigate - Mod Lupo	4	2	8	LM2500	CODOG
	Aguirre	Frigate - Lupo	4	2	8	LM2500	CODOG
	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	2		LM2500	CODOG
Philippines	Pohang Class (S. Korean)	Corvette	1*	2		LM2500	CODOG
Poland	ORP Slazak	Offshore Patrol Vessel	1	1	1	LM2500	CODOG
	Gen. K. Pulaski	Frigate (FFG-7)	2*	2		LM2500	COGAG
Portugal	Vasco Da Gama	Frigate (MEKO 200)	3	2	6	LM2500	CODOG
Saudi Arabia	Al Siddiq	Patrol Combatant	9	1	9	LM2500	CODOG
	Badr	Corvette	4	1	4	LM2500	CODOG
S. Africa	Amatola	Frigate (MEKO A200)	4	1	4	LM2500	CODAG WARP
	Donghae	Corvette	4	1	4	LM2500	CODOG
	Pohang	Corvette	24	1	24	LM2500	CODOG
S. Korea	Ulsan	Frigate	9	2	18	LM2500	CODOG
	KDX-1	Destroyer	3	2	6	LM2500	CODOG
	KDX-2	Destroyer	6	2	12	LM2500	CODOG
	KDX-3 B1	Destroyer	3	4	12	LM2500	COGAG
	KDX-3 B2	Destroyer	1	4	4	LM2500	COGLAG
	FFX I (**)	Frigate	6	2	6	LM2500	CODOG
	Hansando (ATX)	Aux Training Ship	1	1	1	LM2500	CODOG
	Santa Maria	Frigate	6	2	12	LM2500	COGAG
Spain	Alvaro de Bazan	Frigate (F100)	5	2	10	LM2500	CODOG
	Principe De Asturias	Aircraft Carrier	1	2	2	LM2500	CODOG
	Juan Carlos (***)	Amphibious Assault (LHD)	1	1	1	LM2500	IPS
	Bonifaz (F110)	Frigate	5	1	5	LM2500	CODLAG
	Cheng Kung	Frigate	8	2	16	LM2500	COGAG
Taiwan	Ming Chuan	Frigate (FFG-7)	4*	2		LM2500	COGAG
	Kee Lung	Destroyer (Kidd)	4*	4		LM2500	COGAG
	Naresuan	Frigate	2	2	4	LM2500	CODOG
Thailand	Chakri Naruebet	Helo Carrier	1	2	2	LM2500	CODOG
	HTMS Bhumibol Adulyadej	Frigate	1	1	1	LM2500	CODOG
	Naresuan	Frigate	2	2	4	LM2500	CODOG

Tabla 4. Plantas propulsoras en buques militares IV (Fuente: GE Aerospace)

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CONFIGURACIONES MÁS UTILIZADAS:

Realmente, la combinación ideal para una planta propulsora dependerá de las condiciones o modos de trabajos a las que se vaya a someter la embarcación. Esto requiere un estudio detallado para cada buque.

En términos generales, se sabe que la planta tipo CODOG es una de las alternativas más utilizadas en fragatas o corbetas. Esto es debido a que es una configuración bastante sencilla que permite obtener bajos consumos en la condición de servicio y contar con la potencia de las turbinas de gas para el otro modo de operación. El hecho de no poder utilizar ambas máquinas de forma simultánea implica la implantación de turbinas más grandes y pesadas, a expensas de una transmisión algo más sencilla.

Una planta combinada tipo CODAG permitiría aprovechar las ventajas de la planta CODOG y además toda la potencia instalada de forma simultánea (Motores diésel + Turbinas de gas). Sin embargo, como se mostró en las tablas del apartado anterior no es una alternativa muy escogida, debido a que la transmisión es más compleja y el ruido y vibraciones producidas mayor.

En cuanto a las COGAG es una alternativa más habitual en buques grandes que requieran grandes potencias en cualquiera de sus modos de operación. Esta configuración supone grandes gastos de combustible, sobre todo a bajas velocidades donde este tipo de turbinas son muy ineficientes. Por lo que es más frecuente en armadas dispuestas a asumir dichos costes de operación, como la armada estadounidense o la japonesa.

Por otro lado, tenemos la planta CODLOG. Esta reúne las ventajas de la CODOG y de los motores eléctricos. Y es que mantiene los bajos consumos a bajas velocidades y permite trabajar de forma flexible ante diferentes condiciones de carga manteniendo una menor firma acústica. Además, para condiciones más exigentes cuenta con la posibilidad de operar con turbinas de gas. Esta flexibilidad hace que cada vez sea una opción más común y este empezando a reemplazar a las CODOG. Por contra, la planta eléctrica es más compleja y costosa.

La configuración CODLAG también tiene una tendencia creciente. Permite aprovechar toda la potencia instalada de forma simultánea (a diferencia de la CODLOG) solucionando en cierta medida la complejidad de la transmisión en las plantas CODAG al emplear motores eléctricos. Aunque, nuevamente supone una planta eléctrica más compleja y costosa.

Por último, cabe mencionar que la tecnología IPS es flexible, permite una gran maniobrabilidad y la distribución de energía entre los sistemas de propulsión y sistemas de armas. Sin embargo, aún se encuentra en fase de adaptación en buques militares y supone una planta eléctrica muy costosa y compleja.

CONCLUSIONES:

La selección de la planta propulsora no debe abordarse como una decisión única y cerrada, sino como una evaluación flexible de las distintas opciones disponibles, en función del tipo de buque, su perfil operativo y las prioridades del proyecto. Cada tecnología presenta ventajas particulares que pueden resultar más o menos adecuadas según las condiciones específicas de operación, y es precisamente en ese equilibrio donde reside la clave del diseño.

El uso de las turbinas de gas se debe a que son muy compactas, pesan menos que una planta convencional y desarrollan mucha potencia. Por ello han sido y seguirán siendo una buena alternativa a la hora de seleccionar la planta propulsora de un buque militar y la tendencia es hacia su combinación con motores eléctricos que permitan una operación flexible y mucho más económica.

De esta forma, en los próximos años las plantas tipo CODLOG y CODLAG irán ganando terreno a las cada vez más obsoletas CODOG y COGAG. A su vez, las plantas IPS resultan cada vez más interesantes debido a su flexibilidad y propulsión azimutal.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GE. (2021). *Building on a marine power legacy*. <<https://www.geaerospace.com/sites/default/files/ge-experience.pdf>>
- [2] GE. (2018). *GE Marine Gas Turbines for Frigates*. <<https://www.geaerospace.com/sites/default/files/ge-marine-gas-turbines-for-frigates-2018-march.pdf>>
- [3] L. Thomson; *STADT to design New-Generation Naval Ships for NATO-Allied Country*; Naval Technology; 2019 <<https://www.naval-technology.com/contractors/propulsion/stadt-as/pressreleases/naval-ships-nato-allied-country/>>

PECAL 2110: ELEMENTOS CRITICOS DE SEGURIDAD, «SAFETY»

D^a. MARÍA PENEDO BAEZA

Ingeniera Naval y Oceánica

Doctora por la Universidad de la Coruña

Responsable de Materiales y Procesos. Innovación e Ingeniería, Navantia Madrid / Autoridad Técnica Safety de Buques de Superficie Navantia

D^a. SONIA BELLÓN POSE

Ingeniera Naval y Oceánica

Responsable de Seguridad de los Sistemas Astillero Ferrol (Navantia)

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

Doctorando de la Universidad de la Coruña

Jefe del Servicio de Prevención COMANDES-31

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante

Doctor por la Universidad de la Coruña

Jefe de Ingeniería de Plataforma de JICOFR (Arsenal Militar Ferrol)

NORMATIVA PECAL 2110

La norma PECAL 2110 es un documento importante para la Armada y para las empresas y organismos que trabajan en la construcción y mantenimiento de los buques de guerra. En la norma PECAL 2110 (Ed 4 julio 2016) se establece que *es el suministrador, en el caso de ser el responsable del diseño, quien debe identificar los requisitos y funciones del producto que están relacionados con características críticas, tales como la salud, seguridad («safety»), prestaciones y garantía de funcionamiento*. Esto viene de la UNE EN 9100:2018 que nos dice que *la organización debe planificar, implementar y controlar los procesos necesarios para asegurar la seguridad del producto durante todo su ciclo de vida, según sea apropiado para la organización y el producto*.

En la UNE EN 9100:2018 se definen los elementos críticos como *aquellos elementos (por ejemplo, funciones, piezas, software, características, procesos) que tienen un efecto significativo en la provisión y el uso de los productos y servicios, incluyendo la seguridad, el desempeño, la forma, el ajuste, la función, la productividad, la vida en servicio etc.* Estos elementos requieren acciones específicas para asegurar que se gestionan adecuadamente. Serían ejemplos de elementos críticos los siguientes: **elementos críticos de seguridad**, elementos críticos de fractura, elementos críticos de misión, características clave, etcétera.

Por lo tanto, un elemento crítico de seguridad (ECS) lo definiremos como un elemento de hardware o software o cualquier parte, conjunto o equipo que se ha determinado a través del análisis safety funcional y físico. Este elemento contribuye potencialmente a un riesgo con consecuencia catastrófica o crítica que se puede implementar para mitigar dicho riesgo catastrófico o crítico. Por lo tanto, se trata de una situación que puede desembocar en la pérdida del buque o en daños importantes al mismo, o en un riesgo inaceptable de lesiones graves o muerte del personal y daños medioambientales graves e irreparables.

La identificación de los ECS se hace en base a los criterios establecidos en MIL-STD-882E y sus matrices de severidad. Los índices de severidad catastrófica y crítico son los que traccionan la identificación de ECS. Para poder explicar esto vamos a resumir las actividades de safety de identificación de riesgos y controles críticos, y por lo tanto de sus elementos críticos Safety asociados.

ACTIVIDADES DE SAFETY PARA IDENTIFICAR ELEMENTOS CRÍTICOS DE SEGURIDAD EN UN PROGRAMA NAVAL DE DEFENSA

De acuerdo con la PECAL 2110, para cumplir con esta norma debemos identificar y gestionar todos los elementos críticos de seguridad, y para ellos los pasos a seguir son los siguientes:

- IDENTIFICAR PELIGROS Y ANALIZAR RIESGOS

En primer lugar, hay que identificar los peligros y analizar los riesgos asociados con cada una de las operaciones, equipos y sistemas específicos instalados a bordo. El plan de gestión de riesgos deberá incluir el alcance de definiciones, los criterios de análisis, los tipos de unidades, sus capacidades, y sus equipos y entorno estratégico. También se deberá detallar la manera en que se vayan a evaluar los riesgos.



Figura 1: Peligro VS Riesgo

- EVALUAR RIESGOS

Para evaluar riesgos utilizaremos una serie de herramientas, análisis de modos de fallos, HAZOP, HAZIP, CHECKLIST etc., y una serie de técnicas de análisis de riesgos en función de lo determinado en los planes de seguridad de los sistemas de los distintos programas.

Es fundamental identificar cuáles son los eventos de riesgos «significativos» (con mayor impacto) para priorizar estos riesgos respecto a los de los de menor impacto y que, aunque los gestionemos, no los trataremos de igual modo. Por lo tanto, una vez identificados los riesgos, debemos determinar:

- La probabilidad de que se materialicen en accidentes no deseados.
- Evaluar sus posibles consecuencias en personas, equipos o medio ambiente.

La probabilidad y severidad se establece en el plan de Safety de cada programa, siguiendo la normativa aplicable. En el caso de los buques de la ARMADA construidos por Navantia se utiliza como guía la MIL-STD-882E y las siguientes matrices de referencia:

DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA DE LA SEVERIDAD	DAÑOS A LAS PERSONAS	DAÑOS O PÉRDIDA EQUIPO O PROPIEDAD	DAÑOS MEDIO AMBIENTALES
CATASTRÓFICO	1	Podría causar la muerte o incapacidad permanente total.	Pérdidas iguales o superiores a 10.000.000 euros.	Daños medioambientales graves e irreparables.
CRÍTICO	2	Podría causar incapacidad permanente parcial, heridas o enfermedades profesionales que pudiesen requerir de hospitalización de al menos tres miembros del personal.	Pérdidas iguales o superiores a 1.000.000 euros, pero inferiores a 10.000.000 euros.	Daños medioambientales significativos reversibles.
MARGINAL	3	Podría ocasionar heridas o enfermedades profesionales que causen la pérdida de una o más jornadas de trabajo.	Pérdidas iguales o superiores a 100.000 euros, pero inferiores a 1.000.000 euros.	Daños medioambientales moderados reversibles.
DESPRECIABLE	4	Podría ocasionar heridas o enfermedades que no den como resultado la pérdida de jornadas de trabajo.	Pérdidas inferiores a 100.000 euros.	Daños medioambientales mínimos.

Tabla 1: Categorías de gravedad

DESCRIPCIÓN	NIVEL	ELEMENTO ESPECÍFICO	FLOTA / INVENTARIO
FRECUENTE	A	Posible que ocurra a menudo durante el ciclo vital del elemento, con una probabilidad superior a 10^{-1} en dicho ciclo.	Sucede continuamente.
PROBABLE	B	Posible que ocurra varias veces en el ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a 10^{-1} pero superior a 10^{-2} en dicho ciclo.	Sucederá con frecuencia.
OCASIONAL	C	Posible que ocurra en algún momento del ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a 10^{-2} pero superior a 10^{-3} en dicho ciclo.	Sucederá varias veces.
REMOTA	D	Poco probable que ocurra, pero posible, a lo largo del ciclo vital del elemento, con una probabilidad inferior a 10^{-3} pero por encima de 10^{-6} en dicho ciclo.	Poco probable, pero es razonable esperar que suceda.
IMPROBABLE	E	La probabilidad es tan mínima que se puede suponer que no se va a experimentar, siendo su probabilidad inferior a 10^{-6} en su ciclo vital.	Es improbable que ocurra, aunque posible.
ELIMINADO	F	Imposible que ocurra. Este nivel se usa cuando peligros potenciales son identificados y posteriormente eliminados.	Imposible que ocurra.

Tabla 2: Niveles de probabilidad

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

Tabla 3: Matriz de evaluación de riesgos

- IDENTIFICACIÓN DE CONTROLES

A continuación, necesitamos establecer qué controles son necesarios para minimizar estos riesgos ya identificados. Para ello se puede elaborar un diagrama “Bow Tie (BT)” como herramienta útil para visibilizar todos los controles existentes y nuevos, y así poder estudiarlos mejor.

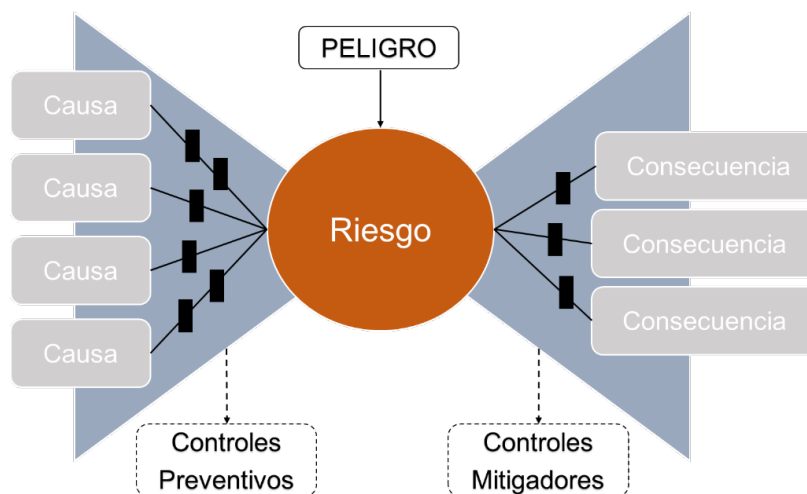


Figura 2: Diagrama Análisis Bow Tie

Estos controles pueden ser:

- Controles preventivos: aquellos que previenen que ocurra el evento.
- Controles mitigadores: aquellos que mitigan los efectos de las consecuencias, o permiten una recuperación rápida después de que la consecuencia haya ocurrido.

Como solución a la duda de si existen unos controles más importantes que otros, las normativas de seguridad (ISO 45001) establecen la jerarquización de controles. Los niveles de la jerarquía de controles, desde el más efectivo hasta el menos efectivo, son:

1. Controles de eliminación: eliminar completamente el peligro. Esto puede implicar el cambiar cómo se realiza una tarea o incluso el abandonar la tarea por completo.
2. Controles de sustitución: reemplazar un material o proceso peligroso por otro menos peligroso.

3. Controles de ingeniería: estos controles están diseñados para proteger a los operadores separándolos del peligro. Bien a través de una barrera física, o mediante cambio en el sistema o equipo. También puede ser un control de protección del propio equipo/sistema o medio ambiente.
4. Controles administrativos: son cambios en el comportamiento de los operadores o en la forma en que operan. Incluyen formación, rotación de los operadores, exámenes médicos periódicos, etc.
5. Equipos de protección Personal (EPP/EPI): esta es la última línea de defensa y sólo debe usarse cuando otras medidas son impracticables o cuando proporcionan una protección adicional.

Se debe tratar de usar los controles más altos de la jerarquía para cada peligro identificado. Si no se pueden eliminar o sustituir los peligros, se deben considerar los controles de ingeniería o administrativos.



Figura 3: Jerarquía de controles y niveles efectividad de acuerdo con ISO 45001

Esta jerarquía de controles determina el orden de preferencia en el que un control debe ser aplicado en aras de reducir las consecuencias de los peligros identificados. Cada nivel de este sistema es importante y, dónde sea posible se deben aplicar múltiples niveles de controles.

El siguiente diagrama de flujo permite filtrar y clasificar actividades para determinar si son controles, o no.

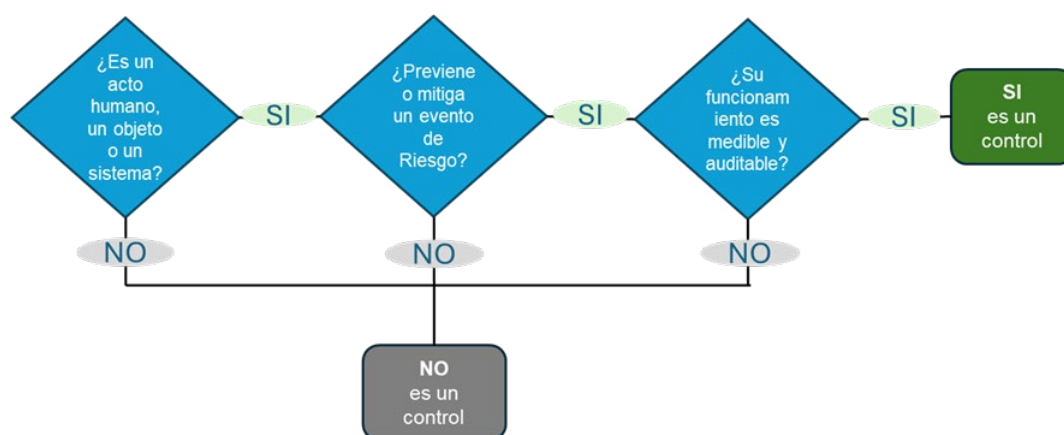


Figura 4: Diagrama de flujo de identificación de controles

• SELECCIÓN DE CONTROLES CRÍTICOS

En este punto, debemos establecer si los riesgos identificados requieren, o no, controles críticos. Si un peligro es evaluado y se trata de un riesgo crítico/catastrófico, entonces debemos identificar al menos un control crítico.

En la figura 5 se presenta un árbol de decisión como herramienta utilizada para hacer una serie de preguntas que nos permitirán hacer la selección de los controles críticos (CCs). Esto se lleva a cabo a partir de todos los controles identificados que van a estar dispersos en la pirámide invertida de la jerarquía de controles, controles de procedimiento, controles de sistema, y controles de ingeniería.

- ✓ ¿Resulta crucial el control para prevenir un accidente o minimizar sus consecuencias?
- ✓ ¿Es el único control, o está respaldado por otro en el caso de que el primero falle?
- ✓ ¿Implicaría su ausencia o fallo un aumento del riesgo pese a la existencia de otros controles? ¿Aborda múltiples causas o mitiga múltiples consecuencias del evento de riesgo?

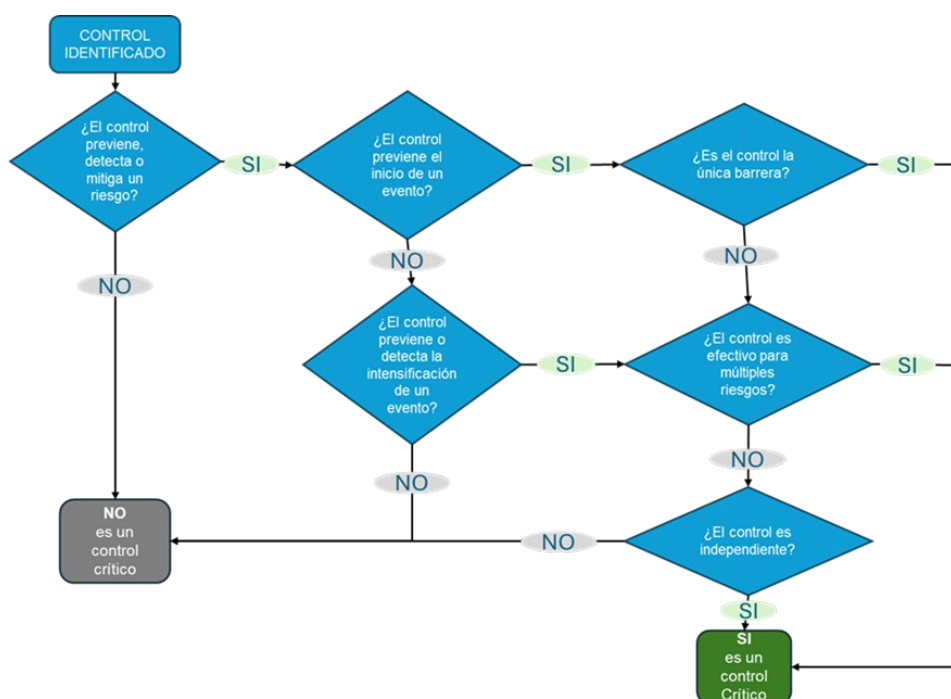


Figura 5: Árbol de control de decisiones de controles críticos

• GESTIÓN DE LOS CONTROLES CRÍTICOS Y SEGUIMIENTO

Una vez que determinamos los controles críticos, es necesario definir las actividades de apoyo necesarias para garantizar que los controles se aplican, supervisan y mantienen. Esto garantiza que siguen siendo eficaces y que el riesgo sigue en un nivel ALARP de reducción de riesgo. Para ello necesitamos definir:

- La metodología de seguimiento.
- La periodicidad de los respectivos seguimientos.

El concepto ALARP (AS LOW AS REASONABLY PRACTICABLE, «Tan bajo como sea razonablemente factible») de acuerdo con la DSA02-DMR, presenta una condición equilibrada. En ella el grado de riesgo de resultar herido o de sufrir un efecto desfavorable se considera equilibrado con el coste en términos de dinero, tiempo y dificultad física y técnica, a la hora de tomar medidas para reducir dicho riesgo. Si el riesgo de lesión o efecto adverso es insignificante comparado con las medidas necesarias para mitigar dicho riesgo, no hay que tomar ninguna acción. Sólo personas autorizadas pueden evaluar ALARP, y lo harán sólo dentro de los límites de su competencia y autorización.

- ASIGNAR RESPONSABILIDADES EN LA APLICACIÓN DE CONTROLES

En el Registro de peligros (RP) se identifica la responsabilidad del control. La responsabilidad del control la debe definir el responsable del riesgo. El responsable del control puede ser:

- Responsabilidad del operador y mantenedor.
- Responsabilidad del diseñador.

El responsable del control debe gestionar el control decidiendo la evolución de su estado hasta su implementación, identificando el requisito asociado al control, y gestionando y participando en el proceso de V&V asociado. Además, debe participar en la verificación de la efectividad de la implementación del control, llevando a cabo la autoevaluación de la implementación de dicho control crítico.

- IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS CRÍTICOS DE SAFETY (ECS)

De acuerdo con la definición de elemento crítico de safety que indicábamos al principio, un ECS puede ser un elemento de hardware o software o cualquier parte, conjunto o equipo que se caracteriza por:

- Ser motivo potencial de un riesgo con consecuencia catastrófica o crítica (RIESGO CRÍTICO/CATASTRÓFICO).
- Poder ser implementado para mitigar dicho riesgo catastrófico o crítico (CONTROL CRÍTICO).

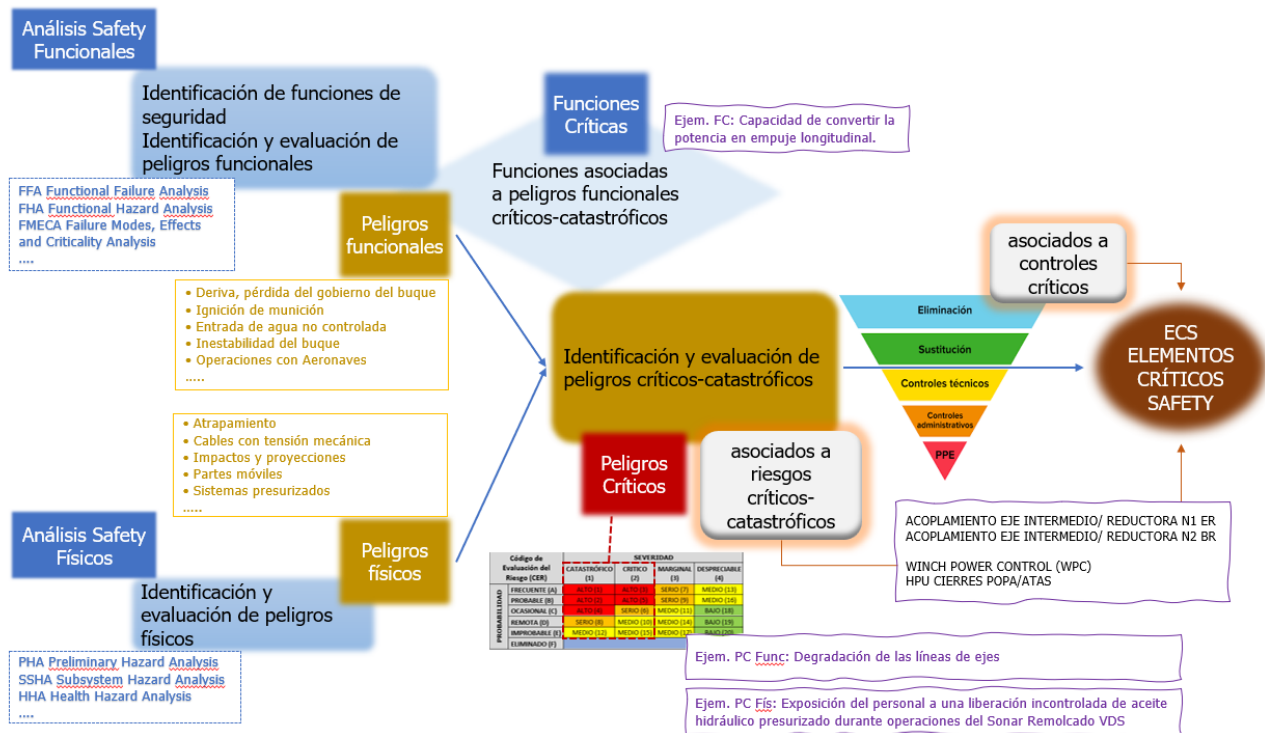


Figura 6: Fuentes de identificación de ECS

La identificación y gestión adecuada de los ECS en un buque de superficie es crucial para garantizar la seguridad de la dotación, la integridad del buque y la capacidad para cumplir con las misiones y objetivos operativos.

CONCLUSIONES

Para cumplir con los requisitos Safety de la PECAL 2110 se requiere la identificación de ECS en cada buque de superficie, la evaluación de riesgos para cada ECS identificado, la implementación de medidas de control para mitigar los riesgos asociados a los ECS y la supervisión y revisión de la gestión de los ECS para que se mantengan actualizados y efectivos.

Para realizar de manera efectiva la identificación de ECS, su implementación y tratamiento; es imprescindible que safety sea parte de la ingeniería de sistemas de los programas y esté integrado con los análisis logísticos y la verificación & validación (V&V) de los requisitos del programa.

Por lo tanto, la gestión adecuada de ECS mejora la seguridad del buque y su dotación, reduce los riesgos asociados con la operación del buque, y mejora su eficacia operativa y su capacidad para cumplir con las misiones asignadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PECAL 2110, REQUISITOS OTAN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD PARA EL DISEÑO, EL DESARROLLO Y LA PRODUCCIÓN. Ed. 4. Julio 2016. Versión española de la AQAP - 2110 (Edition D, Version 1, June 2016).
- [2] UNE-EN 9100, Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos para las organizaciones de aviación, espaciales y de defensa. UNE 2018.
- [3] ISO 31000, Risk management – Guidelines, ed. 2, Ginebra, ISO, 2018.
- [4] ISO 45001:2018 Guía de implementación de sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo
- [5] AS/NZS 4360:2004 Risk management, Australian/New Zealand Standard, 3rd Ed 2004.
- [6] M. Hassall, J. Joy, C. Doran and M. Punch, Selection and Optimisation of Risk Controls. ACARP report noC23007, 2015. Disponible en www.acarp.com.au/reports.aspx
- [7] Guía de Implementación Gestión de controles críticos ICMM - International Council on Mining & Metals
- [8] Department of Defence Standard Practice. MIL-STD-882 System Safety. Versión E. 2012.
- [9] DSA02-DMR: Defence Maritime Regulations. For Health, Safety and Environmental Protection 2025 Edition
- [10] GUÍA GENERAL DE GESTIÓN DEL ALI, Nº DIC: 08011-020
- [11] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE APOYO LOGÍSTICO DE ALTO NIVEL (CALAN), Nº DIC: 08011-021
- [12] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL CONCEPTO DE APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO (CALI), Nº DIC: 08011-022
- [13] GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO (PALI), Nº DIC: 08011-025
- [14] GUÍA PARA EL DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS DE ARMT, Nº DIC: 08011-023
- [15] GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE APOYO LOGISTICO (AAL), Nº DIC: 08011-024
- [16] NORMA PERMANENTE DE LOGÍSTICA 3/2023 DE JULIO, DEL ALMIRANTE JEFE DE APOYO LOGÍSTICO, SOBRE EL APOYO LOGÍSTICO INTEGRADO EN LA ARMADA

LA RAZONABILIDAD TÉCNICA Y LA NORMALIZACIÓN DE COSTES EN LOS CONTRATOS DE DEFENSA

AF (RV) D. ANTONIO MORENO-TORRES GÁLVEZ

Ingeniero Industrial del Estado

Profesor *Ad Honorem* de la Universidad Politécnica de Madrid

Resumen. - En el contexto actual de necesidad de aumento del gasto en defensa, resulta más crucial que nunca la cuestión de un control de costes sustentado en una adecuada arquitectura de gobernanza y, en última instancia, en unos criterios de eficiencia y razonabilidad técnica para los cuales, en el caso de los programas, la Ingeniería de Sistemas proporciona numerosas referencias. Todo ello constituye el núcleo último de la normalización de costes en los contratos de defensa, a cuya más reciente regulación se dedica este artículo.

1. Introducción

La contratación pública en el ámbito de la defensa, ya sea por especificidades del producto/servicio o por condicionantes de seguridad, presenta como particularidad un recurso frecuente a la concurrencia restringida y, con ello, una inferioridad con respecto a la competencia abierta en términos de eficiencia. Siendo esta irrenunciable, resulta imprescindible una herramienta de ayuda a la negociación que supla la disciplina de los mercados, cual es una contabilidad analítica especificada en unas Normas de Costes -NODECOs en adelante- que objetiven su cálculo en evitación de extracostes/sobrecostes. Con estas normas, que obligan en su cumplimiento a los contratistas y conllevan un derecho a la auditoría de la parte contratante, se trata de solucionar un problema de información asimétrica –ausencia de referencias de mercado- mediante controles en diferentes momentos de evaluación, tanto a priori como a posteriori: antes del inicio de un expediente de contratación -estimación y análisis de cotizaciones-, durante la negociación -auditoría de ofertas y de tarifas- o después de la ejecución del contrato -auditoría de costes incurridos-.

Con antecedentes inmediatos en la *Orden 283/1998, de 15 de octubre, sobre presentación y auditoría de ofertas y normas sobre los criterios a emplear en el cálculo de costes en determinados contratos de suministro, de consultoría y asistencia y de los servicios del Ministerio de Defensa que se adjudiquen por el procedimiento negociado*, y recogiendo la satisfactoria experiencia práctica de la *Instrucción 128/2007, de 16 de octubre, del Secretario de Estado de Defensa, procedimiento para la prestación de los servicios de análisis de costes y precios en el ámbito del Ministerio de Defensa*, se publicó a comienzos de 2024 la *Orden DEF/60/2024, de 17 de enero, por la que se establecen normas para la determinación y el cálculo de los costes admisibles y la recomendación del cálculo de los precios de los contratos, acuerdos técnicos y demás negocios jurídicos onerosos de obtención de recursos que se hayan celebrado o se vayan a celebrar con concurrencia restringida en el ámbito del Ministerio de Defensa*, a la que se dedican las siguientes líneas.

2. Principios de orientación de precios a costes y gestión eficiente

El **objeto** del procedimiento de evaluación de costes es el control de los contratos, acuerdos técnicos y demás negocios jurídicos onerosos -contratos en adelante-, obligatorio para aquellos de valor -estimado, presupuestado, ofertado o contratado- igual o superior a 1,5 M euros, y potestativo en el caso de los de inferior valor y cuando así se decida en el pliego contractual o documento equivalente. El **ámbito objetivo** de este control se refiere a los precios, ofertas -costes y tasas de beneficio-, costes incurridos y tarifas o costes unitarios de los contratos de obtención de recursos materiales específicamente militares en concurrencia restringida, así como de los proyectos colaborativos internacionales y los contratos solicitados por otros Gobiernos al amparo de acuerdos o tratados internacionales. Por su parte, y en cuanto a su **ámbito subjetivo**,

involucra a los órganos de contratación y también a la Dirección General de Asuntos Económicos del Ministerio de Defensa, en los términos que se explican más adelante en el epígrafe con título «Gobernanza».

Relevantemente, las NODECOs contemplan, de acuerdo al *Plan General de Contabilidad* y la *Resolución del Instituto de Contabilidad y Auditoría de Cuentas de 14 de abril de 2015*, un cálculo según un modelo contable de **coste completo** («full costing»), de forma que el precio de un contrato, toda vez incorporado el pertinente beneficio industrial, resulta ser

$$\text{PRECIO} = \text{COSTES SOPORTADOS ADMISIBLES (DIRECTOS E INDIRECTOS) IMPUTABLES} + \text{COSTES ADMISIBLES} + \text{BENEFICIO INDUSTRIAL}$$

donde la admisibilidad económica de los diferentes conceptos de costes exige el cumplimiento simultáneo de, por un lado, criterios de causalidad y trazabilidad en la asignación y, por otro, de eficiencia técnico-económica –consumo racional de recursos productivos- como baremo de razonabilidad, para cuya evaluación se contempla el recurso a diversas metodologías de estimación, planificación, seguimiento y control de costes que tienen en cuenta el estado del arte, las mejores prácticas y las lecciones aprendidas.

Admisibilidad, razonabilidad y asignación se constituyen en elementos clave de la normalización de costes, puesto que el origen último de los ahorros que resulten de la detección de desconformidades se referirá a costes no admisibles, costes no razonables o costes incorrectamente asignados. Como gran novedad en la nueva Orden Ministerial –estructurada en una exposición de motivos, un cuerpo principal y cuatro anexos numerados en romanos-, se incluyen sendos anexos dedicados a la cuestión de la admisibilidad –asignación y razonabilidad- (Anexo II) y a la determinación de un beneficio industrial ajustado al riesgo (Anexo III), estando los restantes anexos respectivamente dedicados a un glosario terminológico (Anexo IV) y a las NODECOs propiamente dichas (Anexo I) que se sintetizan a continuación (ver tabla 1).

TABLA 1: NORMAS SOBRE LOS CRITERIOS A EMPLEAR EN EL CÁLCULO DE COSTES EN LOS CONTRATOS (ANEXO I)

NORMA 1. Coste de los contratos: $\text{COSTE} = \text{COSTES SOPORTADOS ADMISIBLES (DIRECTOS E INDIRECTOS) IMPUTABLES} + \text{COSTES INCIERTOS ADMISIBLES}$. Factores de admisibilidad : adecuación a la Orden Ministerial y principios de contabilidad de gestión generalmente aceptados; costes efectivamente incurridos y con su correspondiente registro contable, con aplicación del principio de analogía en el caso de costes presupuestados; asignación y razonabilidad (según Anexo II); concordancia con las disposiciones del contrato.
NORMA 2. Obligatoriedad de llevanza y derecho de acceso a la contabilidad analítica con desglose por contrato.
NORMA 3. Principio de consistencia en los criterios de asignación de costes incurridos con un mismo propósito: asignación única y uniformidad del criterio –en el tiempo y para objetos de coste similares-.
NORMA 4. Utilización de costes estándar supeditada al análisis de desviaciones –en materiales/materia prima MP y mano de obra directa MOD- y tratamiento de las mismas según su importancia relativa respecto al objeto de coste o contrato.
NORMA 5. Coste de producción conforme a normativa contable de uso general –que incluye MP, MOD y GGF, siendo estos últimos los gastos generales de fabricación de naturaleza indirecta- y admisibilidad de los gastos generales –aquellos que sin ser de producción son necesarios para el funcionamiento del operador económico-.
NORMA 6. Amortización del inmovilizado: imputación objetiva y proporcional a su uso por cada contrato; prohibición de sobreimputación por bajo nivel de producción o capacidad ociosa (ver Norma 11); tratamiento de activos específicos no entregables.
NORMA 7. I+D+i (tecnologías y productos del ámbito de la defensa o de uso dual): debidamente acreditados –en cuanto a su coste, propósito, duración y resultados- y netos de subvenciones.
NORMA 8. Incorporación de costes de preparación y licitación de ofertas y gestión de contratos adjudicados; imputación a gastos generales con criterios de causalidad o utilidad en el caso de ofertas fallidas.
NORMA 9. Costes financieros de proyectos de más de un año de duración: admisibilidad del coste de capital propio –coste de oportunidad-, por aplicación del interés legal del dinero como tipo sobre el valor contable neto medio del inmovilizado material e inmaterial afecto a la actividad productiva.
NORMA 10. Minoración de costes en los ingresos específicos, descuentos o subvenciones asociados.
NORMA 11. Capacidad productiva (horas-hombre): tasación de incidencias técnicas admisibles y conceptos no admisibles a efectos de su cálculo como $\text{CAPACIDAD PRODUCTIVA} = [\text{CAPACIDAD TEÓRICA SEGÚN CONVENIO} \times \text{PERSONAS EQUIVALENTES}] + \text{HORAS EXTRAS DEL PERIODO} - \text{ABSENTISMO ADMISIBLE} - \text{INCIDENCIAS TÉCNICAS ADMISIBLES}$
NORMA 12. Costes específicos no admisibles: publicidad y relaciones públicas; pérdidas de créditos comerciales incobrables por operaciones de tráfico; fondo de comercio; propiedad industrial no directamente relacionada con los contratos; donaciones; formación ajena al contrato; becas y subvenciones concedidas por el operador ajenas al mismo; obsolescencias y sobrantes en almacenes no entregables; mermas; obsolescencias imputables al operador; dividendos; indemnizaciones por despido, bajas incentivadas y jubilaciones anticipadas; tributos no vinculados a la actividad normal; impuesto de sociedades; multas y sanciones; pérdidas procedentes del inmovilizado y gastos excepcionales; provisiones; y otros gastos financieros no contemplados en Norma 9 –típicamente, gastos financieros de la contabilidad general-.

Fuente: elaboración propia en base a lo establecido en la *Orden DEF/60/2024*.

3. Criterios para determinar la admisibilidad de un coste: asignación y razonabilidad técnica y económica

El apartado primero del anexo II de la *Orden DEF/60/2024* trata la **asignación** de los costes, supeditando la afectabilidad/imputabilidad a un criterio de causalidad en términos de necesidad y adición de valor, e imponiendo una obligación de llevanza y custodia de un registro contable y soporte documental -trazable con la oferta inicial en caso de adjudicación con precios provisionales-. En función de la naturaleza del coste se precisan los siguientes requisitos de asignación:

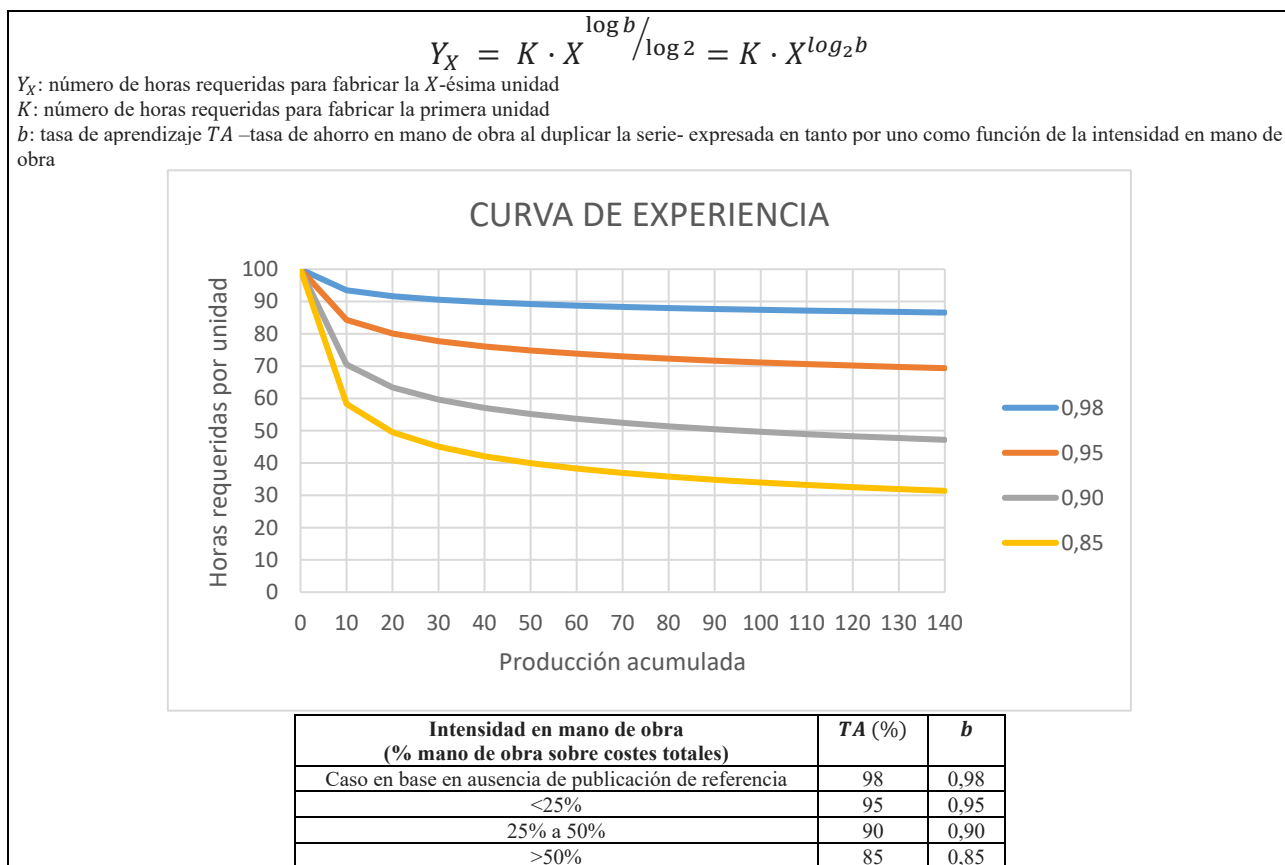
- Para la mano de mano de obra, su correspondencia con las tareas de la **línea base del proyecto** («*baseline*»), que establece la planificación de costes, calendario y alcance para su control de acuerdo a estándares como *PMBOK*, *PRINCE2*, *DoD EVMIG*, *EIA-748 EVMES* u otros equivalentes.
- Para los materiales y subcontrataciones externas de producción, su relación con el **árbol de configuración** -descomposición jerárquica del producto o sistema con identificación unívoca de los elementos que lo componen-, con detalle de posibles suministradores, cantidades, coste estimado y base de cálculo para el caso de las ofertas.
- Para las subcontrataciones de mano de obra, su soporte en un **plan de gestión del contrato** y un **plan de recursos** que incluya un análisis de la conveniencia de la subcontratación frente a la utilización de medios propios -decisión *BUY vs MAKE*-.

Adicionalmente, como criterios generales a respetar en la asignación, se especifican: la debida justificación de la asignación de recursos a tareas no previstas en la línea base; la cuantificación de costes incurridos a valores históricos contablemente registrados conforme a tarifa; la planificación y trazabilidad en la línea base del consumo de recursos en otras actividades distintas a la fabricación -ingeniería, desarrollo de *software*, verificación y pruebas-; y el registro de desviaciones por conceptos de no calidad con cargo a la correspondiente tarea y por medio de órdenes de trabajo adicionales.

Por su parte, el apartado segundo del anexo II de la *Orden DEF/60/2024* trata la **razonabilidad** de los costes, precisando los siguientes requerimientos técnico-económicos que obligan al contratante:

- Verificación del cumplimiento del **principio de gestión eficiente** mediante una definición y documentación de procesos que incluya la utilización de sistemas para el control de tareas, la medición de la eficiencia, el establecimiento de objetivos de coste y plazo, el seguimiento de indicadores de cumplimiento y, en su caso, la adopción de medidas correctoras.
- Justificación de la optimalidad de las **decisiones técnicas relevantes** en respuesta a la existencia de alternativas para implantación de requisitos, demandas adicionales, discrepancia en la interpretación de los pliegos, o alternativas para la implantación de soluciones técnicas.
- Aplicación de **estándares de producción generalmente aceptados**, como los disponibles para el desarrollo de *software* o las **curvas de aprendizaje** (ver figura) para las estimaciones de costes de mano de obra o descuentos por volumen aplicados sobre el número de unidades compradas.

FIGURA: CURVA DE EXPERIENCIA



Fuente: elaboración propia en base a lo establecido en la *Orden DEF/60/2024*.

- Recurso a **buenas prácticas metodológicas** para la estimación en la elaboración de ofertas, como los enfoques de ingeniería, analogía y extrapolación de costes reales de un prototipo o preserie, o, supletoriamente y para tareas o paquetes de trabajos concretos, las herramientas paramétricas -como *PRICE* y *SEER*- y el juicio de expertos en casos de falta de experiencia previa.

4. Riesgos técnicos, costes inciertos y beneficio industrial

La cuestión de la incertidumbre se aborda con profusión en la *Orden DEF/60/2024*, que establece como regla general la incorporación de los riesgos técnicos específicos como mayores costes de producción y de los riesgos generales del operador económico como prima en su beneficio industrial.

El punto 2 del apartado segundo del anexo II se dedica a la **gestión de riesgos en proyectos complejos**, estableciendo que las desviaciones significativas respecto a la línea base se considerarán razonables y admisibles cuando se enmarquen en una política de gestión de riesgos que incluya la existencia de un comité de riesgos que lleve a cabo el análisis cuantitativo de riesgos e incertidumbres, el diseño de un catálogo de medidas de mitigación, y el desarrollo de planes de contingencia. Asimismo, se contempla la obligatoriedad de un análisis inicial de riesgos -evaluación *ex ante* de probabilidades e impactos de cada riesgo relacionado con los elementos de la línea base- y un registro de resoluciones del comité de riesgos -evaluación *ex post* de contratos con precios provisionales-, reservando un papel relevante a las oficinas de programa en tanto que responsables de la fijación de criterios técnicos de la línea base de los proyectos y miembros del comité de riesgos.

Por su parte, el punto 6 del apartado segundo del anexo II establece **criterios objetivos para cuantificación de la incertidumbre en el ámbito de la auditoría de las ofertas**. Evaluándose la admisibilidad de un coste estimado con los criterios de asignación y razonabilidad del anexo II ya expuestos, y precisando que coste incierto es aquel con asignación demostrada pero razonabilidad indeterminada, se establece en estos casos la exigencia de un análisis estadístico basado en intervalos de confianza con admisibilidad en la horquilla del 80%, así como una recomendación de aplicación de precios provisionales con revisión de costes incurridos para la determinación de precios ciertos cuando los costes inciertos superen el umbral del 30% del total de los estimados.

Finalmente, un novedoso anexo III incluye **recomendaciones para la determinación del beneficio a aplicar a los contratos**, concibiendo este como una ganancia ajustada al riesgo general del operador económico que, de forma no exhaustiva, incluye los asociados a: demanda, financiación, características del producto o servicio, proveedores críticos, coyuntura macroeconómica, políticas de geo-retornos de organismos internacionales, o sistemas críticos importados desde terceros países no UE. Así, se establece su homogeneización en una tipificación como bajo, medio o alto según la caracterización del contrato en función de su riesgo (ver tabla 2), contemplándose también una prima adicional por riesgos excepcionales de un máximo del 2% en contratos con precio fijo y firme sin revisión en que concurren más de dos de las cuatro circunstancias siguientes: más de cinco años de duración; alta volatilidad e incertidumbre en las estimaciones de costes; consorcios complejos o redes complejas de proveedores; u otras motivadas a juicio del órgano de contratación.

TABLA 2: BENEFICIO INDUSTRIAL RECOMENDADO

TIPO	CARACTERIZACIÓN	BENEFICIO
Bajo	1º Contratos de suministro de equipos o repuestos. Especialmente si hay una cantidad significativa de <i>COTS (Commercial Off-The-Shelf)</i> 2º Contrato recurrente de mantenimiento preventivo y/o correctivo de equipos o sistemas. 3º Fabricación de equipos sin o con muy pocas modificaciones respecto a series anteriores.	6-8 %
Medio	1º Contratos de fabricación de nuevos equipos. Puede incluir diseño, pero no supone una modificación muy significativa respecto de diseños anteriores del mismo fabricante. 2º Contratos de mantenimiento de sistemas complejos. Deben incluir la modernización o actualización de un conjunto de sistemas o de equipamiento. 3º Contratos de diseño y fabricación de sistemas no muy complejos, o que no supongan una innovación o mejora relevante respecto a otros productos o diseños existentes. 4º Contratos financiados o prefinanciados en un porcentaje significativo por organismos públicos. 5º Contratos con alto grado de innovación, pero que no incluyen prototipos.	8-10 %
Alto	1º Contratos con un alto grado de innovación. Deben incluir prototipo. 2º Contratos de diseño y fabricación con innovaciones o mejoras significativas respecto a sistemas existentes. 3º Contratos que incluyan diseño, fabricación y mantenimiento, o con condiciones especiales de garantía. 4º Requisitos de integrar sistemas complejos en los que no hay experiencia previa demostrable.	10-12 %

Fuente: elaboración propia en base a lo establecido en la *Orden DEF/60/2024*.

5. Gobernanza

El esquema de evaluación de costes descrito reserva un papel relevante a los órganos de contratación u oficinas de programa, a quienes corresponde la solicitud de análisis técnico-económico -de ofertas o de declaraciones de costes incurridos-, así como la inclusión en los pliegos de los contratos de cláusulas referidas al obligatorio cumplimiento de las NODECOs por los contratistas, su deber de colaboración -extensible a subcontrataciones-, y el derecho de comprobación.

Por su parte, la Dirección General de Asuntos Económicos (DIGENECO) del Ministerio de Defensa (MINISDEF) se constituye en autoridad de precios para la firma de acuerdos de costes unitarios aplicables/tarifas y órgano técnico garante del cumplimiento de las NODECOs a través de informes técnicos, preceptivos de carácter informativo y no vinculante, emitidos de oficio o a petición del órgano de contratación. Para ello, la

DIGENECO cuenta en su Subdirección General de Contratación con un área denominada **Grupo de Evaluación de Costes (GEC)** que se encarga del desarrollo del servicio técnico de análisis de costes y precios mediante técnicas de auditoría, estimación y análisis económico, para cuyas actividades de carácter material y técnico se apoya en una encomienda a ISDEFE.

De los servicios prestados por el GEC, y además de aquellos en apoyo al planeamiento de recursos, a la presupuestación, a la programación económica y a la gestión de los programas del MINISDEF, y de aquellos en apoyo a la gestión de los órganos directivos y ejecutivos del departamento, los de apoyo a la negociación directamente relacionados con la valoración de la adecuación a las NODECOs son los siguientes:

- **Auditoría de ofertas:** revisión de sus aspectos económicos, comprobando la correspondencia de los precios ofertados con los entregables, los criterios de cálculo del beneficio, y la valoración de los riesgos y de las contingencias que tratan de cubrirlos.
- **Auditoría de tarifas, ratios o coeficientes para la valoración homogénea de costes directos e indirectos** (coste horario de mano de obra, coste de utilización de maquinaria por unidad de tiempo o unidad de producto, recargos para la imputación de GGF, ...): valores a incorporar en los acuerdos con las empresas sobre precios y costes unitarios de líneas de actividad o procesos a aplicar, con carácter general, en cotizaciones, ofertas y costes incurridos.
- **Auditoría de costes incurridos en la ejecución de contratos:** revisión de costes declarados incurridos por un contratista o subcontratista.
- **Análisis de los costes de ejecución de los contratos y de los márgenes de beneficio** (bases de datos de costes y precios para la estimación de precios de futuros contratos o para evaluar nuevas cotizaciones y ofertas): tipificación, análisis, parametrización y tratamiento estadístico de los datos correspondientes a los costes estimados, y al beneficio propuesto por las empresas en sus cotizaciones y ofertas, así como de los costes incurridos y el margen realmente obtenido.

La antes citada *Instrucción 128/2007* detalla en su anexo I cada servicio prestado por el GEC delimitándolo en cuanto a su concepto, finalidad, plazo, condiciones de ejecución del trabajo y criterios para su selección y priorización. Asimismo, y en su anexo II, especifica el procedimiento para solicitar cada servicio en cuanto a su solicitante, datos a comunicar y documentación anexa requerida. Finalmente, establece un formato normalizado de presentación de costes en sendos anexos para la recopilación de datos contables, económicos y técnicos que, respectivamente, resultan de aplicación a la evaluación de cotizaciones y auditoría de ofertas (anexo III) y a la auditoría de costes incurridos (anexo IV), obligando a la declaración responsable de conformidad y a la descomposición en sus diferentes conceptos de los precios y costes de cada elemento del contrato (objetivos de coste, paquetes de trabajo, unidades de obra, etc...), al detallado del consumo de factores directos (horas de MOD y cantidad de MP) e indirectos (GGF), y a la agregación para todos los elementos de los costes asignados. En buena lógica, la promulgación de las nuevas NODECOs obligará a la revisión de estos formatos de presentación de la información en todo aquello que se oponga a estas.

Para finalizar este apartado sobre la gobernanza de las auditorías de ofertas y costes incurridos indicar que, en lo que se refiere a la Armada, y en dependencia funcional del GEC, existen en la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) una **Sección de Evaluación y Costes (SEC)** en la Dirección de Ingeniería y Construcciones Navales (DIC) y una **Sección de Apoyo a Programas de Sosténimiento (SAPS)** en la Dirección de Sosténimiento (DISOS). La SEC tiene una función principal de análisis y estimación de costes en apoyo a los Ramos Técnicos y a la Oficina de Seguimiento y Coordinación de Programas (OSCP) de la DIC. Por su parte, y entre otros cometidos de la SAPS, se encuentra el de análisis de los costes incurridos en la ejecución de aquellos contratos de la DISOS que se determinen, así como el apoyo a la Subdirección de Mantenimiento (SUBDEM) en la evaluación de los costes de mantenimiento de las unidades y sistemas de su competencia. SEC y SAPS mantienen relaciones de coordinación entre sí y, además, la primera también con la Subdirección de Gestión Económica (SUBDIGEC) de la Dirección de Gestión Económica (DIGEC) de la JAL.

6. Conclusiones

En el ámbito de lo público son numerosos los ejemplos en los que para velar por el principio de orientación de precios a costes en sectores regulados –energético, telecomunicaciones, transporte ferroviario, transporte aéreo, postal, ...- se especifican unos criterios a seguir por un Sistema de Contabilidad de Costes (SCC) regulatorio [Moreno-Torres, 2022], referidos tanto a unos principios generales o informadores como a aspectos concretos del modelo de costes.

En el caso de la Defensa, la contabilidad de costes se constituye en herramienta fundamental para la gestión eficiente del recurso en condiciones de competencia restringida. Con un origen histórico en España asociado a la exigencia de auditoría de costes de programas internacionales de armamento, y con una clara inspiración –salvo en la cuestión de gobernanza referente a la separación e independencia del supervisor de costes- en el modelo norteamericano auspiciado por la *Defense Contract Audit Agency-DCAA* y el *Cost Accounting Standards Board-CASB*, tras más de 25 años de vigencia se ha promulgado una nueva Orden Ministerial que aquilata la experiencia acumulada en la práctica, focalizando en la cuestión de la eficiencia técnica por medio de un recurso intensivo a herramientas de la disciplina de Ingeniería de Sistemas y Gestión de Proyectos -lo que claramente distingue a las NODECOs de otros SCC sectoriales- e incluyendo, como gran novedad, la recomendación sobre el beneficio industrial.

El cálculo del coste –con énfasis en la razonabilidad técnica-, la homogenización del beneficio entre contratos similares –en función del riesgo-, y el derecho a la auditoría –con la contrapartida de la obligación de colaboración del contratista- y su procedimentación en garantía de su cumplimiento, considerando no solo contratos domésticos sino también el caso de los vinculados a programas internacionales en los que participa España o de otros Gobiernos bajo el amparo de acuerdos o tratados internacionales, son objeto de la nueva *Orden DEF/60/2024* que sitúa a España en una posición vanguardista en la cuestión de la normalización de costes en los contratos de Defensa.

7. Referencias bibliográficas

- Ministerio de Defensa (2024). *Orden DEF/60/2024, de 17 de enero, por la que se establecen normas para la determinación y el cálculo de los costes admisibles y la recomendación del cálculo de los precios de los contratos, acuerdos técnicos y demás negocios jurídicos onerosos de obtención de recursos que se hayan celebrado o se vayan a celebrar con concurrencia restringida en el ámbito del Ministerio de Defensa*. <https://www.boe.es/eli/es/o/2024/01/17/def60>
- Ministerio de Defensa (1998). *Orden 283/1998, de 15 de octubre, sobre presentación y auditoría de ofertas y normas sobre los criterios a emplear en el cálculo de costes en determinados contratos de suministro, de consultoría y asistencia y de los servicios del Ministerio de Defensa que se adjudiquen por el procedimiento negociado*. <https://www.boe.es/eli/es/o/1998/10/15/283>
- Ministerio de Defensa (2007). *Instrucción 128/2007, de 16 de octubre, del Secretario de Estado de Defensa, procedimiento para la prestación de los servicios de análisis de costes y precios en el ámbito del Ministerio de Defensa*. BOD 212/07, de 30 de octubre de 2007
- Moreno-Torres Gálvez, Antonio (2022). *Aplicaciones regulatorias de la contabilidad analítica*. Boletín Económico de ICE, (3145). <https://doi.org/10.32796/bice.2022.3145.7365>

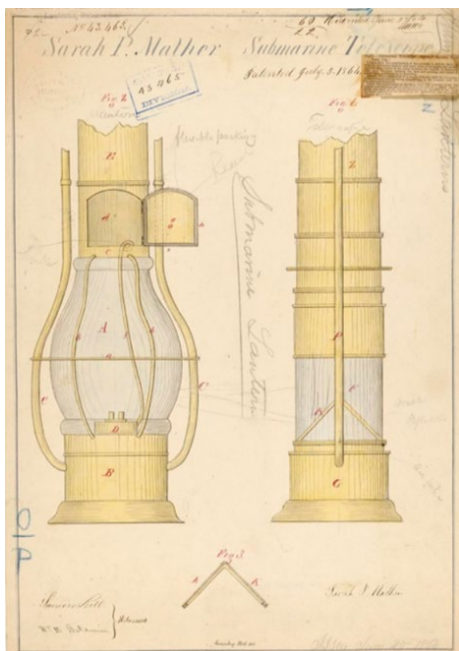
BIOGRAFÍA¹

SARAH P. MATHER

Sarah P. Mather fue una inventora estadounidense conocida por su trabajo como una de las primeras pioneras de la tecnología submarina. Se hizo famosa por inventar un dispositivo de señales submarinas.

La patente de Sarah de 1845 rezaba: *“La naturaleza de mi invención consiste en la construcción de un tubo con una lámpara unida a un extremo del mismo que puede ser hundido en el agua para iluminar objetos con el mismo, y un telescopio para ver dichos objetos y hacer exámenes bajo el agua...”*.

En el registro de su invención, la propia Mather explicaba la utilidad del artilugio: *“La lámpara y el telescopio se pueden usar para diversos fines, tales como el examen de los cascos de los buques, para examinar o descubrir los objetos bajo el agua, para la pesca, la voladura de rocas para despejar los canales y otros usos”*.



Una patente posterior (patente Nº 43465 por la «Mejora en los telescopios submarinos») le fue concedida a Sarah el 5 de julio de 1864. Entre estas mejoras se encontraban, en primer lugar, un cambio en el sistema de iluminación que evitaba que la lámpara se apagara por las fuertes presiones subacuáticas, y, por otro lado, un juego de espejos dobles permitía mayor amplitud de visión sin tener que mover la lámpara o el telescopio.

Este instrumento óptico con forma de tubo permite, gracias a la utilización de prismas o espejos y basándose en la ley de la reflexión de la luz, la observación de una zona inaccesible a la visión directa. A través de su particular diseño, el periscopio posibilita que alguien que está oculto en una trinchera, un submarino u otro espacio diferente, vea sin ponerse al descubierto. Generalmente, mediante un volante en su extremo inferior el periscopio puede girar y así ampliar la observación a un campo de 360°. Si además se le añaden lentes con aumento, es posible observar a gran distancia. De ahí que su utilización sea frecuente en los submarinos, con el fin de ver sobre la superficie del agua mientras el vehículo se desplaza subacuáticamente.

Mather fue una de las pocas inventoras de su tiempo, y su trabajo en el campo de la tecnología naval fue significativo, aunque no obtuvo un amplio reconocimiento durante su vida. A pesar de los desafíos de ser mujer en un campo dominado por hombres, perseveró y contribuyó a los avances en seguridad y tecnología marítima.

¹<https://vadebarcos.net/2020/02/08/sarah-mather-lo-oculto-a-la-vista/>
[Sarah Mather, la desconocida inventora del periscopio](https://www.rarenewspapers.com/view/219395?imagelist=1#full-images)
<https://www.rarenewspapers.com/view/219395?imagelist=1#full-images>

