



# BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Diciembre 2017  
Número 13



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

Edita:



NIPO en línea 083-17-202-1

NIPO IBD 083-17-203-7

Los números editados se pueden consultar en formato electrónico en:

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

App Revistas Defensa: disponible en tienda

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

## A NUESTROS COLABORADORES

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

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

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

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

Se citará la bibliografía consultada.

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

Maquetación:

M<sup>a</sup> José Pizarro García



## Índice:

|  |         |
|--|---------|
| <b>EDITORIAL</b>   | Pág. 3  |
| <b>20 PRINCIPIOS VIGENTES EN LA INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN NAVAL MILITAR</b>   | Pág. 4  |
| CF (CIA) D. Luis de la Puente del Pozo   |         |
| <b>CONSIDERACIONES SAFETY SOBRE APESANTAMIENTO DE SUBMARINOS EN INMERSIÓN</b>  | Pág. 10 |
| CF (CIA) DR. D. Pedro Antonio Casas Alcaide  |         |
| CF (CGA) D. Carlos Gárate Pasquín  |         |
| <b>EL NEUTRÓN. INTERACCIÓN DE LOS NEUTRONES CON LA MATERIA</b>   | Pág. 19 |
| CF (CIA) D. Joaquín Ortega García  |         |
| <b>“COLD IRONING”: TOMAS DE TIERRA EN LOS PUERTOS PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE LOS BUQUES</b>                         | Pág. 24 |
| CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro  |         |
| <b>CONSIDERACIONES SOBRE LA PROBABILIDAD DE SUPERVIVENCIA DEL BUQUE Y MEDIDAS REACTIVAS ANTE EL ATAQUE DE MISILES ASCM</b> | Pág. 28 |
| TN (CIA) D. Juan Manuel de Santiago Collada  |         |
| <b>RIESGO DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES EN EL ENTORNO MILITAR</b>   | Pág. 44 |
| TN (CIA) D. Luis Francisco Sánchez Álvarez   |         |
| D. Tomás Fernández Ibáñez  |         |
| <b>RESISTENCIA DEL ESLABÓN OTAN Y EL GUARDABOS TIPO “D” DURANTE LA MANIOBRA DE REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES</b>   | Pág. 50 |
| TN (CIA) D. Jesús Manuel Cillero Ares  |         |
| <b>NUEVOS VIENTOS PARA LA SOSTENIBILIDAD. VIENTO EN POPA. EÓLICA OFFSHORE</b>  | Pág. 68 |
| AN (CIA) D. Fernando Abad Barral   |         |
| <b>LA FRAGATA NUMANCIA, DE LA MADERA AL ACERO</b>  | Pág. 77 |
| AN (CIA) D. Alfonso Rojo Lahuerta  |         |
| <b>FENÓMENO “WHIPPING” DERIVADO DE UNA EXPLOSIÓN SUBMARINA SIN CONTACTO</b>  | Pág. 82 |
| AN (CIA) D. Borja Nava Carús   |         |
| <b>SISTEMA CODELAG PARA LA FRAGATA F110</b>  | Pág. 86 |
| AN (CIA) D. Antonio Inocencio Catalán  |         |
| <b>EVOLUCIÓN DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DEL BUQUE</b>   | Pág. 94 |
| AN (CIA) D. Benito Ignacio Rodríguez-Pastoriza Alías   |         |
| <b>BIOGRAFÍA</b>   | Pág. 99 |
| D. GASPAR SALCEDO Y ANGUIANO   |         |

**EDITORIAL**

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

Estimados amigos y compañeros:

He aquí el segundo BTI del año 2017. Lo habréis recibido con retraso puesto que lo hemos tenido que enviar al Servicio de Publicaciones para que le dieran las bendiciones y le completaran con los requisitos legales. Pero, nunca es tarde... si la dicha llega.

En este número, siguiendo la estela del anterior hemos completado los artículos que hemos recibido, con la publicación de los Trabajos Fin de Formación de los alumnos de la última promoción de Ingenieros. Espero que los alumnos vean recompensada de esta forma su esfuerzo durante su paso por la Escuela.

Tal y como se recogió en el último proceso selectivo para el ingreso en el Cuerpo de Ingenieros de la Armada, en enero tendremos 24 nuevos alumnos. Una barbaridad. No tengo recuerdo de una promoción tan abundante. Bienvenidos sean, aunque ello represente más trabajo para los que estamos aquí (que somos más bien poquitos).

Parece ser que el Departamento de Personal quiere «llenar el depósito» puesto que llevamos dos años en los que ingresan muchos más Oficiales de los que pasan a la Reserva.

Seguimos estando a la espera de que salga la Orden Ministerial por el que se regulen las Especialidades Complementarias de la Escala de Oficiales y de la Escala Técnica de Oficiales.

Como siempre, agradecer a todos vuestra inestimable colaboración, que hacen posible la publicación del Boletín.

Antes finalizar y para todos aquellos que no lo sepan, el BTI es visible a través de la dirección de internet <[http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigital\\_revistas/prefLang\\_es/09\\_boletin\\_etsian](http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigital_revistas/prefLang_es/09_boletin_etsian)>. También se puede acceder a través de la dirección intranet <[http://www.fn.mdef.es/intranet/page/intranet/armada/Documentacion/Documentacion--14\\_1\\_Revistas\\_Publicaciones](http://www.fn.mdef.es/intranet/page/intranet/armada/Documentacion/Documentacion--14_1_Revistas_Publicaciones)> y pulsar a continuación el enlace sobre «Revistas y Boletines de la Armada», que lleva, en una nueva ventana, a la primera de las direcciones. Por publicidad que no quede.

Como siempre, si alguien no recibe el Boletín que lo comunique para subsanar el error. De la misma forma, se admiten sugerencias, críticas y demás.

Señores, el fin de año se encuentra ya a la vuelta de la esquina. Desearos a todos que paséis una feliz Navidad junto con vuestras familias y amigos y que el año que viene nos depare todo lo mejor a todos nosotros.

A la espera de vuestras noticias, un fuerte abrazo para todos.

## 20 PRINCIPIOS VIGENTES EN LA INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN NAVAL MILITAR

CF (CIA-EOF) D. LUIS DE LA PUENTE DEL POZO  
JAL-DIC

### 1.- Introducción

En el «Naval Engineering Journal» del marzo de 1985 el CAPT. Robert C. Baker, de INSURV (Board of Inspection and Survey), y el CDR. Michael R. Reed, ingeniero de proyecto de sistemas de maquinaria e ingeniería de sistemas del DDG 51, publicaron, fruto de sus respectivas experiencias en pruebas y diseño, un interesante artículo que resumo con alguna aportación propia.

Los DDG-51 son la plataforma naval más exitosa de los tiempos modernos, la adjudicación del primer contrato fue precisamente en 1985 y el primer buque de la Clase entró en servicio el 4 de julio de 1991, hoy en día, la construcción de la Serie Flight III está prevista para más allá de 2030 y se llegarán a cifras no alejadas de los 100 buques en servicio.

Su capacidad de supervivencia está ratificada por el atentado al USS Cole o, fallos humanos aparte, las recientes colisiones del USS Fitzgerald y el USS John S. McCain, embestidos por buques mayores. Los procedimientos de diseño de los DDG-51 han servido de base, a partir de sus requisitos y capacidades, de otros diseños exitosos que incluyen nuestras Fragatas F100 o las Fragatas noruegas.



(DDG-51 y F100)

Diseños posteriores de la Marina de los EEUU no han tenido éxito: El DDG-1000 «Zumwalt» ha visto reducida su producción a sólo 3 unidades y el LCS va a ser reemplazado por un nuevo diseño de Fragatas FFG(X) a partir de 2022.

Estos diseños vinieron tras la decisión de la Marina de los EEUU, por lo costoso que resultaba el mantenimiento de la documentación, de dejar de usar las GENSPEC (última edición 1995) y pasar a usar las Naval Vessel Rules (NVR) desarrolladas por la Sociedad de Clasificación ABS y a la vez empezar a usar Normativa civil donde se pudiera, incluyendo ésta como normativa militar o simplemente con elementos reforzados/«rugged» de tipo comercial.

Tras las imperfectas prestaciones de los DDG-1000 se restauró la producción de los DDG-51. En el año 2012 NAVSEA abandonó las NVR y está desarrollando una nuevas «Naval Combatant Design Specifications» que se basan las viejas GENSPEC.

La Armada, que no cuenta con las capacidades técnicas de la Marina americana, no puede prescindir hoy de una Sociedad de Clasificación (SSCC), como una tercera parte que aporte sus conocimientos al diseño, pero no debe ignorar que sus funciones están limitadas: Establecer normas y requisitos técnicos mínimos que aborden la seguridad marítima y la protección del medio ambiente y garantice su aplicación. Para ello las SSCC colaboran en el diseño y construcción en tres aspectos fundamentales:

- Revisión de los planos para asegurar que los detalles mecánicos y estructurales se ajustan a las reglas.
- Inspección durante la construcción, en las que se comprueba que se ejecutan los planos aprobados, se utilizan métodos de fabricación adecuados y se cumplan las reglas, incluyendo la comprobación de los materiales, equipos y accesorios.
- Certificación de los normas estatutarias, normas del estado, que afectan al medio ambiente y la seguridad: Solas, Marpol...

Debe entenderse que las Reglas de las SSCC no son un Manual de Diseño de buques.

Por otro lado, los resultados del DDG-51 frente a otros diseños parecen justificar que los ingenieros de las Armadas continúen involucrados en los futuros diseños. Para apoyar ese esfuerzo, las Armadas requerirán ingenieros: **No gerentes que sean ingenieros, no ingenieros que gestionen, no gerentes que entienden la ingeniería, sino ingenieros que hacen ingeniería día a día.**

Y al contratar, considerar la «lección aprendida»: La industria no mejorará sus productos hasta que las Armadas definan sus deseos con especificaciones bien diseñadas. **Los contratistas rara vez superan el nivel de excelencia de la ingeniería inherente a una Especificación del Contrato.**

## 2.- Comentarios propios para la ingeniería de la Armada

Por nuestra parte, cuando la Armada obtenía los diseños de sus buques mediante contratos con la Marina americana había importantes aspectos técnicos que quedaban cubiertos; al pasar a diseños propios debemos cambiar y diversificar nuestra fuentes para la obtención de requisitos: SSCC, Normativa civil, Normativa OTAN...

En mi opinión, hay 3 aspectos que debemos autogestionar, no desde luego con la profundidad de los EEUU pero sí con coherencia:

- Necesidad de Guías de Diseño de buques.
- Necesidad de identificación de requisitos propios basándonos en nuestras propias Especificaciones desarrolladas a partir de tres documentaciones imprescindibles: Las antiguas Genspec, el Nomenclator del material y las lecciones aprendidas, que debemos empezar a gestionar.
- Además, conveniencia de crear la figura de los “ingenieros garantes de la técnica”, ingenieros responsables de diversos Grupos de Coste (GC) del Nomenclator, que son los que entienden y actualizan los requisitos de sus GC. No podemos mantener una estructura jerárquica del conocimiento como si fuera operativa.

Como ejemplo la respuesta nº 15 a la Industria del Navsea sobre el RFI de la nueva Fragata FFG(X), disponible en Internet.

|    |  |   |
|----|--|---|
| 15 | Who is/are the technical lead for the Power systems, Warrant Holder, in NAVSEA 05? | <p>There is not a single warrant holder. They are broken up into 3 functions. The responsible specification section are listed as well by warrant names.</p> <p>1. Machinery - Electrical Systems Architecture, Control and Interface - Ships (300)</p> <p>2. Machinery - Electrical System Power Generation, Conversion and Propulsion - Ships (302, 310, 314)</p> <p>3. Machinery - Electrical System Protection, Safety, Distribution and Instrumentation - Ships- (303, 304, 305, 320, 324, 331, 332)</p> |
|----|--|---|

### 3.- Los 20 principios de ingeniería públicos en 1985 sirven hoy

NO ABANDONAR LAS GENSPEC COMO LA CLAVE DEL PROCESO DE INGENIERÍA DE LAS ARMADAS: frente a otros buques con requisitos más alejados de las GENSPECS, se comprobó que los diseños basados en las GENSPECS como las FFG7, fueron exitosos. Para el diseño del DDG-51, además de una estrecha adhesión a GENSPECS se incorporaron lecciones aprendidas en diseños recientes de otras clases de buques.

**1: El diseño de contrato del buque de Guerra se debe efectuar utilizando las GENSPECS como base para las especificaciones del buque.**

FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS EN EL DISEÑO DE LOS BUQUES DE GUERRA: Los estudios de posibles equipos (tradeoff) gravitan a selecciones basadas en atributos más fácilmente cuantificables: costes, peso, volumen y la dotación. La supervivencia, la fiabilidad operacional, el margen de crecimiento, el apoyo logístico o el riesgo son más subjetivos y parecen tener menos prioridad. **Esta tendencia se ve favorecida por los requisitos de alto nivel que se centran en características más mensurables, como el desplazamiento del buque, los costes de adquisición y la dotación.** La selección de sistemas o equipos debe basarse en la contribución del sistema/equipo al apoyo a la misión y a la capacidad de supervivencia del buque de la manera más fiable con un mínimo de mantenimiento.

**2: Los equipos y sistemas de buques deberían seleccionarse teniendo en cuenta la eficacia y la fiabilidad; luego diseñado el buque de manera que no se comprometa la fiabilidad; finalmente probando para validar la existencia de dicha fiabilidad.**

La ingeniería del sistema eléctrico es crucial para la operación del buque, su flexibilidad operativa y su potencial de crecimiento. La ingeniería del sistema eléctrico es crucial para la disponibilidad operacional de cualquier buque de guerra. La práctica actual exige que, con un generador inoperativo, los generadores restantes sean capaces de suministrar la carga funcional máxima.

**3: La ingeniería del sistema eléctrico es clave en la fiabilidad operacional del buque. La cantidad de generadores de servicio en un buque debería ser compatible con los requisitos de fiabilidad operacional y de margen de crecimiento.**

Otra característica clave del sistema eléctrico que afecta la fiabilidad operacional es la cantidad de cuadros de distribución cuando se opera una planta dividida.

**4: Los cuadros de distribución, diseñados adecuadamente para la operación de planta dividida, no deben permitir que la fuente de alimentación primaria y alternativa para cargas vitales proceda de la misma fuente.**

Si ocurre una falla eléctrica dentro de un sistema de 400 Hertzios, los convertidores estáticos entrarán en un modo de autoprotección de limitación de corriente que causará la interrupción de toda la potencia de 400 Hz. Cuando esto sucede, la mayoría de los sistemas servidos por el sistema de 400 Hz caerán. El aislamiento de fallas para evitar que el sistema de 400 Hz se desconecte es obligatorio. Podríamos extenderlo a todas las corrientes a bordo, especialmente en propulsión eléctrica.

**5: El diseño del sistema de distribución eléctrica de 400 Hz debe incluir dispositivos de aislamiento de fallas satisfactorios y pruebas adecuadas de disparo selectivo. En general se debe estudiar esta problemática para todos los tipos de corriente a bordo.**

SISTEMAS DE CONTROL: No se puede permitir que la complejidad de los sistemas de control afecte a los requisitos de mantenimiento ni afecte negativamente la fiabilidad del sistema. Todos los accesorios, incluido el sistema de control, deben mantenerse lo más simple posible para satisfacer los requisitos de fiabilidad del sistema.

**6: El control de la plataforma debe ejercerse con componentes simples, robustos y de operación fiable.**

VENTILACIÓN: Una adecuada ventilación mejora la fiabilidad de los equipos, la habitabilidad de los alojamientos y reduce el estrés por calor en espacios operativos. Una buena ventilación parece ser una de las claves para un buque bien mantenido y fiable. Diseños recientes del sistema de ventilación no han logrado ubicar las aberturas en posiciones protegidas y altas para evitar la entrada de lluvia y agua de mar en las tormentas y marejadas. Los gases de escape de generadores o incineradores se introducen en los sistemas de suministro de ventilación. Aunque las guías correctas están en las GENSPECS; se requieren acciones de seguimiento para garantizar que se implementan.

**7: Se debe proporcionar un sistema de ventilación a bordo bien diseñado (con un amplio acceso para la limpieza) para respaldar la fiabilidad operativa.**

SISTEMAS DE VAPOR: Con la desaparición de los sistemas de propulsión a vapor deben evitarse los numerosos problemas de mantenimiento por escapes, humedades e incrustaciones asociados con el vapor. La producción de agua dulce o técnica se puede hacer por ósmosis o evitar las calderas de las exhaustaciones.

**8: Para mejorar la fiabilidad, el vapor debe ser completamente eliminado de los modernos diseños de buques sin propulsión a vapor.**

LUCHA CONTRA INCENDIOS: La lucha contra incendios se ha visto mermada con la prohibición del halón. Los buques con capacidad de vuelo requieren una mejor capacidad de extinción de incendios en la cubierta de vuelo. Otro tema que merece atención es el uso a bordo de materiales compuestos.

**9: La capacidad de lucha CI es la clave para la supervivencia de un buque de guerra. Los buques deben tener una capacidad de extinción de incendios activa y pasiva eficaz contra todas las amenazas en tiempo de paz y de guerra.**

PROTECCIÓN CONTRA CHOQUE: Deben analizarse las ventajas de los explosivos y proyectiles insensibles. Los pañoles pueden explotar de forma catastrófica con un impacto.

**10: El uso de explosivos y propulsores insensibles es una opción de futuro para todas las Armadas.**

La prueba de choque y las correcciones de las deficiencias relacionadas con las pruebas es un tema significativo de las Armadas. Las Armadas deben mantener documentadas las deficiencias relacionadas con los impactos en pruebas.

**11: Las disposiciones para pruebas de choque y la corrección de las deficiencias de las pruebas deben formar parte de todos los programas de adquisición de buques.**

LA NUEVA AMENAZA: Se ha hecho prioritaria la supervivencia frente al ataque químico, biológico, radiológico y el pulso electromagnético. Para esto se ha desarrollado la Ciudadela que se basa en una presión positiva interna al buque. Se deduce que garantizar la integridad estanca al agua y al aire es vital.

**12: La integridad probada de la estanqueidad al aire y al agua debe ser una característica de todos los buques de guerra.**

Los efectos del pulso electromagnético (EMP) son potencialmente devastadores. La calidad y la cantidad de las especificaciones dedicadas a la protección pulso electromagnético (EMP) varían porque no existe una capacidad real de prueba para validar las especificaciones de protección EMP.

**13: Una protección EMP realista debe definirse en las nuevas clases de buques, su eficacia debería ser comprobada mediante la definición de pruebas.**

En vista de la amenaza terrorista mundial, la capacidad de las Armadas para llevar a cabo su misión está en riesgo si un buque no es capaz de realizar una defensa propia.

**14: Los buques de la Armada deben tener una capacidad de autodefensa efectiva.**

ESTÁNDARES COMERCIALES: Las Armadas deberían preocuparse por la supervivencia de los buques. Los buques adquiridos según "estándares comerciales" son una preocupación especial porque carecen de características que reducen las consecuencias del daño. Por lo tanto, se debe considerar mejorar su capacidad de supervivencia.

**15: Los buques construidos según los estándares comerciales deberían tener una capacidad de autodefensa así como características mejoradas de extinción de incendios más allá de los «estándares comerciales» típicos.**

OPERACIONES IMPREVISTAS Y SOSTENIDAS EN LA MAR Y SEGURIDAD Y SALUD (NAVOSH): Es vital para las Armadas la preocupación por la salud a largo plazo de sus marineros para llevar a cabo sus operaciones con éxito. La buena moral se deriva, al menos en parte, de la tranquilidad y confianza por parte del navegante de que su equipamiento funciona cuando lo necesita y no le causará daños ni ahora ni el futuro. Debe haber soluciones permanentes para los problemas de seguridad y salud. Los estándares de radiación electromagnética, los niveles de ruido aéreo, la ergonomía...

**16: La seguridad personal y la salud ocupacional deben observarse en el diseño de los buques.**

OPERACIONES IMPREVISTAS Y SOSTENIDAS EN LA MAR Y CAPACIDAD DE MANTENIMIENTO: Las deficiencias logísticas en el equipamiento constituyen uno de los principales problemas en los buques nuevos. Las discrepancias han incluido manuales técnicos, equipos o herramientas especiales faltos o incorrectos y errores en la documentación del sistema de mantenimiento. Carencias en la ingeniería de factores humanos para garantizar el uso eficiente del espacio...Más y mejor ingeniería de capacidad de mantenimiento debería ser una característica de los diseños.

**17: Los requisitos de capacidad de mantenimiento (es decir, la accesibilidad, la estiba del equipo de prueba, la disponibilidad del circuito de CI, la documentación de alineación, prueba, operaciones y mantenimiento) deben estar claramente visibles en las especificaciones.**

**18: Las reservas de espacio para acceso en mantenimientos, así como el equipo de prueba y las estibas de herramientas especiales, deben delimitarse en los planos del contrato.**

Los equipos del sistema de combate moderno requieren los esfuerzos coordinados de una «troika de diseño» para ser funcionalmente efectivos cuando se instalan en un buque, ya que el rendimiento de los programas debe respaldar y ser respaldado por el rendimiento del equipo que se ve afectado tanto por el Toppide como por la disposición de los espacios de mando y control.

**19: El diseño de los programas informáticos, así como el diseño del Toppide y el diseño de los espacios de Mando y Control deben estar coordinados por un requisito de Misión de alto nivel común.**

Probablemente el problema más complejo y específico del diseño del sistema de combate es la compatibilidad electromagnética. La dificultad del problema EMI aumenta cada día.

La meta es una capacidad de ingeniería electromagnética que pueda cuantificar y analizar las densidades de potencia EM y los efectos resultantes sobre los componentes del equipo y el rendimiento a nivel del buque, y que también puede sintetizar alternativas de diseño desde las primeras fases del proceso de diseño.

**20: La compatibilidad electromagnética debe abordarse durante todas las fases del diseño y alistamiento del buque. El Diseño de Detalle no debe comenzar hasta que se haya logrado la compatibilidad electromagnética.**

#### **4.- Conclusiones**

La Armada debe actualizar su enfoque del diseño de sus buques para ser capaz de interactuar más con el Contratista, especialmente manteniendo una documentación de lecciones aprendidas, de requisitos propios y equipamiento fiable.

El diseño de los buques de guerra se sigue basando en aspectos complicados pero básicos de ingeniería y los ingenieros no los deben obviar ante otros elementos que se centran en atributos más subjetivos (coste, habitabilidad...).

#### **Referencias**

CAPT. Robert C. Baker & CDR. Michael R. Reed. *"Twenty steps to a better fleet"*. Naval Engineering Journal, marzo 1985.

## CONSIDERACIONES SAFETY SOBRE APESANTAMIENTO DE SUBMARINOS EN INMERSIÓN

**CF (CIA-EOF) D. Pedro Antonio Casas Alcaide**  
Doctor Ingeniero Naval por la UPM  
**CF (CGA-EOF) D. Carlos Gárate Pasquín**

**Resumen.-** En este documento se presenta una serie de consideraciones sobre apesantamiento de submarinos en inmersión desde un punto de vista SAFETY, incluyendo una estimación de los valores límite recomendados (en función de la cota) así como de la probabilidad de pérdida catastrófica teniendo en cuenta la posibilidad de haber superado dichos valores límite.

### 1.- Introducción

La pérdida de flotabilidad voluntaria (apesantamiento) de un submarino en inmersión es una situación intrínsecamente peligrosa cuyo tratamiento, desde un punto de vista SAFETY, puede abordarse mediante distintos planteamientos: por ejemplo según se llegue a dicha situación de manera gradual o bruscamente.

Un apesantamiento gradual se podría presentar, por ejemplo, cuando el embarque de agua requerido para contrarrestar la succión de las olas en situación de SNORKEL empezase a cotas cercanas a la máxima operativa. En estas circunstancias, parece razonable (al menos en principio) evitar cualquier pérdida de flotabilidad durante el ascenso a cota SNORKEL que redujese la capacidad del sistema de soplado de tanques de lastre para cumplir su función.

Por otro lado, se podría llegar a un apesantamiento brusco si, por ejemplo, fuera necesario romper rápidamente la condición de SNORKEL y alcanzar cotas profundas en el menor tiempo posible. En este caso, el sistema de soplado podría ver totalmente anuladas sus capacidades durante lapsos de tiempo considerables, lo que obligaría a analizar si la probabilidad de perder el buque en estas circunstancias puede mantenerse bajo niveles aceptables.

Con este documento se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Definir los conceptos de límite de seguridad y límite de sustentación dinámica, y calcular el valor que pueden tomar en función de la cota a la que se encuentre el submarino.
- Estimar la probabilidad de perder el buque teniendo en cuenta la posibilidad de haber excedido los dos límites arriba citados.
- Desarrollar un ejercicio numérico sencillo que permita poner de manifiesto las implicaciones SAFETY esperables en submarinos de diseño estándar.

Tabla 1.- Nomenclatura

|                  |   |
|------------------|---|
| $p_1$            | Límite de seguridad (N)   |
| $p_2$            | Límite de sustentación dinámica (N)                                   |
| $g$              | Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )                                |
| $h$              | Cota (m)  |
| $h_0$            | Cota máxima operativa (m)   |
| $m$              | Altura hidrostática correspondiente a la presión atmosférica (m)      |
| $\rho$           | Densidad del agua de mar ( $kg/m^3$ )                                 |
| $v_0$            | Volumen nominal de soplado ( $m^3$ )                                  |
| $t_2$            | Tiempo pasado por encima del límite de sustentación dinámica (h)      |
| $t_T$            | Duración total de una inmersión incluyendo periodos de SNORKEL (h)    |
| $f_G$            | Tasa de fallos del sistema de contención (1/h)                        |
| $f_V$            | Tasa de ocurrencia de vías de agua (1/h)                              |
| $f_R$            | Tasa de fallos del sistema de sustentación dinámica (1/h)             |
| $f_3$            | Tasa de fallos del sistema de soplado (1/h)                           |
| $\Delta t$       | Umbral de recuperación (h)  |
| $Q$              | Probabilidad de pérdida catastrófica en cada inmersión                |
| $Q_0$            | Probabilidad $Q$ sin superar nunca ninguno de los límites del punto 2 |
| <b>Mayúscula</b> | Cantidad NO DIMENSIONAL   |
| <b>Minúscula</b> | Cantidad con DIMENSIONES FISICAS                                      |

En el ámbito de este trabajo se hará uso de las definiciones que aparecen a continuación:

- Tiempo de soplado: tiempo que transcurre desde que se activa el sistema de soplado hasta que finaliza la descarga efectiva de aire en los tanques de lastre.
- Tiempo de reacción: tiempo que transcurre desde el inicio de la vía de agua hasta que se asegura la misma mediante el cierre de las correspondientes válvulas de casco.
- Vía de agua asegurable: vía de agua que se produce en una conducción dotada de medios capaces de cerrar las correspondientes válvulas de casco en el tiempo establecido al efecto.
- Volumen nominal de soplado: volumen de aire en los tanques de lastre tras efectuar un soplado a cota máxima operativa.
- Sistema de sustentación dinámica: conjunto formado por los sistemas de gobierno y propulsión dispuestos en serie (el fallo de uno cualquiera de ellos impedirá al conjunto cumplir su función).
- Sistema de contención: conjunto formado por los sistemas de accionamiento de cierres de emergencia y de alarmas por inundación dispuestos en serie (el fallo de uno cualquiera de ellos impedirá al conjunto cumplir su función).
- Umbral de recuperación: tiempo máximo dentro del cual todos los eventos aparentes que intervienen en la pérdida del buque podrían tomarse como simultáneos (a efectos prácticos se supondrá siempre varios órdenes de magnitud inferior a la duración total de cada inmersión).

Antes de finalizarla introducción se hace notar que, al objeto de simplificar al máximo el desarrollo matemático:

- No se han considerado inundaciones ni apesantamientos cuya pérdida de flotabilidad asociada (ya sea por separado o en combinación) no pueda compensarse mediante el uso exclusivo del sistema de sustentación dinámica.
- No se han considerado vías de agua no asegurables, ya sea en conducciones cuyo diámetro caiga por debajo del exigido para instalar medios de cierre de emergencia o en cualquier otro elemento susceptible de provocar una inundación.

## 2.- Límites de seguridad y de sustentación dinámica

### 2.1.- Límite de seguridad

Se define como límite de seguridad al sobrepeso mínimo necesario (respecto a la condición de flotabilidad nula) para impedir al sistema de soplado de emergencia neutralizar la pérdida de flotabilidad inducida por una vía de agua asegurable.

Para establecer la expresión matemática del concepto arriba definido se hará uso de las siguientes hipótesis simplificadoras:

**H2.1.-** La caída de presión en la vía de agua es una función cuadrática del caudal correspondiente (ver por ejemplo lo indicado en [1] sobre flujos confinados, con disipación viscosa y en régimen subsónico).

**H2.2.-** El volumen nominal de soplado permite neutralizar exactamente el sobrepeso inducido por una vía de agua asegurable que se produzca a la cota máxima operativa.

**H2.3.-** La masa y la temperatura del aire descargado en los lastres durante el tiempo de soplado se mantienen constantes (independientes de la cota a la que se produce dicha descarga).

**H2.4.-** El tiempo de reacción se mantiene constante (independiente de la cota a la que se produce la vía de agua).

Partiendo de estas hipótesis resulta fácil llegar al siguiente resultado:

$$p_1 = \rho g v_0 \left( \frac{h_0 + m}{h + m} - \sqrt{\frac{h}{h_0}} \right) \quad (1)$$

Se hace notar que la expresión anterior es una función de la cota ( $h$ ) de tipo decreciente que se anula al alcanzar la cota máxima operativa ( $h_0$ ), lo que implica que cualquier embarque de agua a dicha cota (por pequeño que sea) incapacitará al sistema de soplado para cumplir su función, en total consonancia con la hipótesis H2.2.

### 2.2.- Límite de sustentación dinámica

Se define como límite de sustentación dinámica al sobrepeso mínimo necesario (respecto a la condición de flotabilidad nula) para impedir al sistema de soplado de emergencia compensar dicho sobrepeso sin el auxilio del sistema de sustentación dinámica.

A partir de la ecuación (1) resulta inmediato alcanzar el siguiente resultado:

$$p_2 = \rho g v_0 \frac{h_0 + m}{h + m} \quad (2)$$

Se hace notar que:

- La expresión anterior es una función de la cota ( $h$ ) de tipo decreciente que toma su valor mínimo al alcanzar la cota máxima operativa ( $h_0$ ), aunque en este caso no se iguala nunca a cero.
- Navegar en inmersión por encima del límite de sustentación dinámica implica confiar exclusivamente en el sistema de sustentación dinámica para retornar a superficie, con independencia de que se produzca o no una vía de agua.

### 3.- Probabilidad de perder el submarino en cada inmersión

En base al diagrama de fallos correspondiente al escenario nº2 de la referencia [2] y a lo indicado al final de la introducción es posible establecer el diagrama de fallos asociado a la pérdida del buque teniendo en cuenta la posibilidad de superar los límites presentados en el punto 2, el cual se ha dividido en dos sub-diagramas (ver figuras 1 y 2) para facilitar su representación gráfica.

Los eventos de inicio que aparecen en dichas figuras son los siguientes:

|    |   |
|----|---|
| V  | Vía de agua   |
| A1 | Sobrepeso situado entre los límites de seguridad y de sustentación dinámica |
| A2 | Sobrepeso superior al límite de sustentación dinámica                       |
| F1 | Fallo del sistema de accionamiento de cierres de emergencia                 |
| F2 | Fallo del sistema de alarmas por inundación                                 |
| F3 | Fallo del sistema de soplado  |
| F4 | Fallo del sistema de propulsión   |
| F5 | Fallo del sistema de gobierno   |
| F6 | Fallo del sistema de achique/regulación                                     |

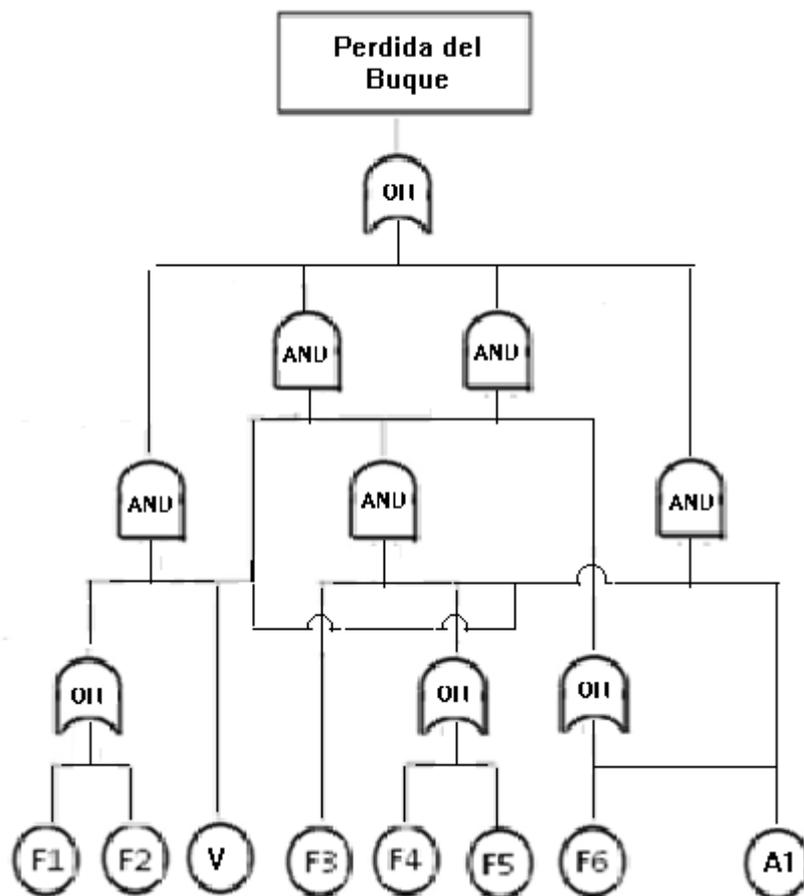


Figura 1.- Subdiagrama de fallos asociado a la pérdida del submarino contemplando únicamente sobrepesos comprendidos entre los límites de seguridad y sustentación dinámica (A1).

Al objeto de reducir al mínimo la dificultad del tratamiento probabilístico de los subdiagramas arriba citados se darán por ciertas las hipótesis de cálculo que aparecen a continuación:

**H3.1.-** A nivel operativo se supone que:

- Antes de iniciar cada inmersión se verifica el correcto funcionamiento de aquellos sistemas susceptibles de dar lugar a eventos ocultos (F1, F2 y F3).
- La ocurrencia de uno cualquiera de los eventos aparentes considerados (F4, F5, F6 y V) da lugar siempre al abandono inmediato de la inmersión.

Esta hipótesis, aunque no siempre cierta en la realidad, refleja una manera de proceder básicamente aceptable como punto de partida para el cálculo.

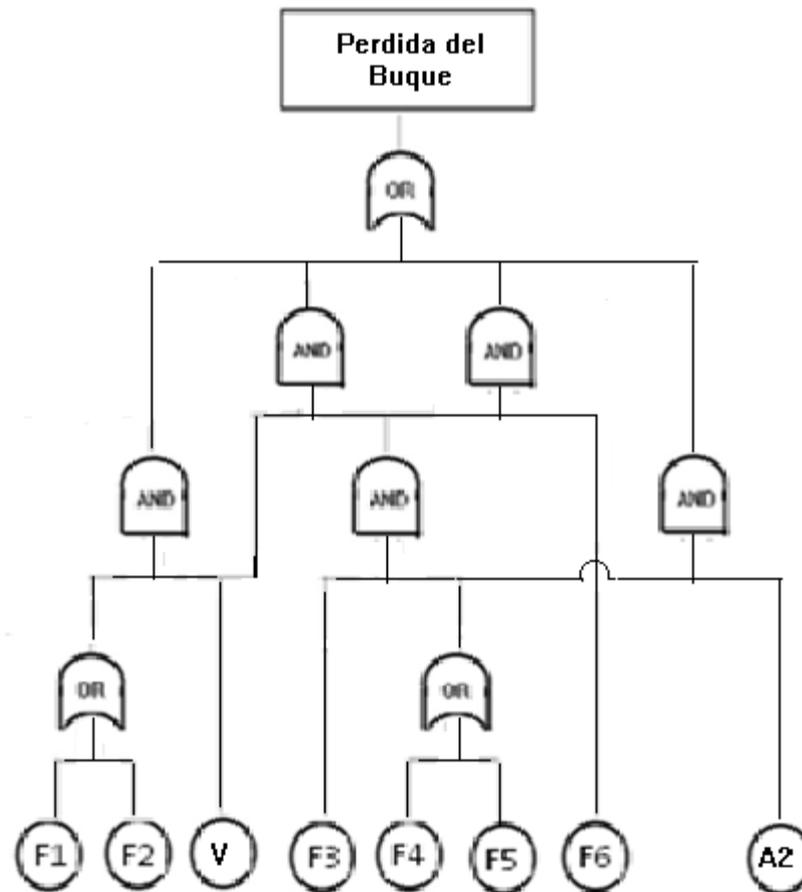


Figura 2.- Subdiagrama de fallos asociado a la pérdida del submarino contemplando únicamente sobrepesos superiores al límite de sustentación dinámica (A2).

**H3.2.-** Las probabilidades de todos los eventos de inicio de las figuras 1 y 2 serán lo suficientemente pequeñas para que las sumas lógicas que conducirían a la pérdida del submarino partiendo de cada uno de los tres estados en que puede encontrarse el mismo en un instante dado (suponiendo que en dicho instante mantenga la inmersión sin contratiempos graves) puedan modelarse mediante la suma directa de las probabilidades asociadas a los productos lógicos correspondientes, siendo los estados arriba citados los siguientes:

- Por debajo del límite de seguridad: En este caso, los eventos de inicio A1 y A2 toman ambos el valor lógico "0".
- Entre los límites de seguridad y sustentación dinámica: En este caso, los eventos de inicio A1 y A2 toman respectivamente los valores lógicos "1" y "0".
- Por encima del límite de sustentación dinámica: En este caso, los eventos de inicio A1 y A2 toman respectivamente los valores lógicos "0" y "1".

**H3.3.-** La probabilidad asociada a cada uno de los eventos de inicio de las figuras 1 y 2 se modelará linealmente, dentro de lo cual podrán distinguirse dos casos (en coherencia con lo exigido en la hipótesis H3.1):

- Eventos ocultos (F1, F2 y F3): la probabilidad asociada a cada uno de ellos se aproximará mediante el producto de una tasa de fallo constante y del tiempo transcurrido desde el inicio de la inmersión.
- Eventos aparentes (F4, F5, F6 y V): la probabilidad asociada a cada uno de ellos se aproximará mediante el producto de una tasa de fallo constante y del umbral de recuperación.

A partir de la lógica de fallo descrita en las figuras 1 y 2, de estas tres hipótesis, y despreciando infinitésimos de orden superior, es posible llegar a la siguiente expresión para la probabilidad de pérdida en cualquier intervalo de tiempo igual al umbral de recuperación ( $\Delta t$ ) condicionada a que el submarino mantenga la inmersión en el instante inicial ( $t$ ) de dicho intervalo:

$$\Delta Q = \left[ (f_G f_V + f_3 f_R) t + (1 - f_3 t) f_R \frac{t_2}{t_T} \right] \Delta t \quad (3)$$

Se hace notar que:

- El evento A1 ha resultado completamente irrelevante en relación con la capacidad de supervivencia del submarino.
- La probabilidad de ocurrencia del evento A2 se ha aproximado mediante la relación  $t_2/t_T$ .

Teniendo en cuenta que en los casos de interés práctico la probabilidad asociada al evento F3 será despreciable frente a la unidad y asumiendo lícito el paso al límite, la expresión (3) puede ser integrada para obtener el siguiente resultado:

$$Q = \frac{1}{2} (f_G f_V + f_3 f_R) t_T^2 + f_R \frac{t_2}{t_T} t_T \quad (4)$$

Y a partir de esta última ecuación es posible calcular la relación existente entre la probabilidad de perder el submarino en cada inmersión contemplando la posibilidad de exceder el límite de sustentación dinámica y la que se tendría evitando por completo tal situación (para  $t_2/t_T$  igual a 0):

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{2f_R}{(f_V f_G + f_3 f_R) t_T} \frac{t_2}{t_T} \quad (5)$$

Suponiendo además que todas las tasas de fallo incluidas en la expresión (5) tuviesen valores parecidos, sería posible llegar al siguiente resultado aproximado:

$$\frac{Q}{Q_0} \cong 1 + \frac{1}{f_V t_T} \frac{t_2}{t_T} \quad (6)$$

#### 4.- Ejercicio numérico

Suponiendo que, por término medio, en cada inmersión fuese necesario romper bruscamente una condición de SNORKEL con muy mala mar y alcanzar cotas profundas de forma rápida, con las expresiones presentadas en los dos epígrafes anteriores podría llevarse a cabo un ejercicio numérico sencillo al objeto de calcular:

- El límite de sustentación dinámica y la cota correspondiente.
- El incremento esperable en el valor de la probabilidad de pérdida catastrófica si se descendiese directamente hasta la cota máxima operativa.

Los datos de partida para el ejercicio serán los siguientes:

- a) Se toma una cota máxima operativa ( $h_0$ ) de 300 metros y un volumen nominal de soplado ( $v_0$ ) de  $12 \text{ m}^3$ .
- b) Se supone que el sobrepeso inducido por la contracción del casco resistente aumenta linealmente con la profundidad hasta alcanzar un valor de 4 toneladas a la cota máxima operativa.
- c) Se asume que dando SNORKEL con muy mala mar se necesita un sobrepeso de 9 toneladas para compensar la succión de las olas.
- d) Se asume la instalación de una bomba de achique/regulación de desplazamiento positivo (es decir, de caudal independiente de la cota) de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- e) Se supone que la cota máxima operativa se alcanza de forma casi inmediata una vez interrumpido el SNORKEL.
- f) Se asume que la duración total de cada inmersión ( $t_T$ ) rondará alrededor de las 1000 horas.
- g) La tasa de ocurrencia de vías de agua ( $f_v$ ) se tomará igual a  $10^{-6}$  eventos/hora.

### Paso 1

Usando la expresión (2) junto con los datos que aparecen en a), b) y c) se puede calcular el límite de sustentación dinámica así como la cota a la que comenzaría a sobrepasarse, obteniéndose respectivamente 12,7 toneladas y 282 metros.

### Paso 2

Suponiendo ahora que el submarino desciende directamente hasta la cota máxima operativa y que la bomba de achique/regulación comienza a funcionar justo al alcanzar dicha cota, de los datos indicados en b), c) y d) se deduce fácilmente que la citada bomba necesitará unos 6 minutos para achicar la tonelada sobrante ( $9 + 4 - 12$ ) en relación con el límite de sustentación dinámica.

### Paso 3

Despreciando el tiempo gastado en descender más allá de los 282 metros (ver e)) se obtiene un tiempo superando el límite de sustentación dinámica ( $t_2$ ) igual al arriba indicado (6 minutos), e introduciendo en la ecuación (6) este dato junto con los incluidos en f) y g) puede verse que la probabilidad de perder el submarino en estas circunstancias resulta tan solo un 10% mayor que la probabilidad de perderlo sin superar nunca el límite de sustentación dinámica.

Por tanto, bajo las condiciones presentadas al inicio de este punto el submarino podría sumergirse rápidamente y, sin efectuar aligeramiento alguno, mantenerse:

- Entre la cota periscópica y los 282 metros de manera prácticamente indefinida sin mermar de forma apreciable su capacidad de supervivencia.
- Entre los 282 metros y la cota máxima operativa unos 6 minutos como máximo si no se quiere mermar en exceso su capacidad de supervivencia.

Para finalizar el ejercicio es ilustrativo comprobar que, según la ecuación (6) y los datos incluidos en f) y g), bastaría con superar el límite de sustentación dinámica tan solo una hora por inmersión para duplicar la probabilidad de pérdida catastrófica respecto de la esperable en condiciones normales.

## **5.- Conclusiones y comentarios finales**

A la vista de los resultados obtenidos, es posible alcanzar una serie de conclusiones interesantes:

- Navegar en inmersión superando el límite de seguridad no incrementa de manera apreciable la probabilidad de pérdida catastrófica de un submarino.

- En contraste con lo anterior, la capacidad de supervivencia de un submarino ha resultado muy sensible al tiempo pasado por encima del límite de sustentación dinámica ( $t_2$ ), bastando con una hora por inmersión para duplicar la probabilidad de pérdida catastrófica respecto de la esperable en condiciones normales.
- Incluso en las peores condiciones razonablemente posibles (ver punto 4), el tiempo arriba citado puede reducirse lo suficiente (a unos pocos minutos) como para desprestigiar su influencia desde un punto de vista SAFETY, sin necesidad de instalar sistemas de aligeramiento rápido adicionales al soplado de emergencia de los lastres principales (soplado del tanque de regulación, etc.).

No obstante, conviene recordar que estas conclusiones únicamente serán válidas para los datos del punto 4 y si se cumplen estrictamente todas las simplificaciones e hipótesis usadas a lo largo de este trabajo, por lo que se recomienda cierta precaución a la hora de extrapolarlas a otros casos distintos del aquí contemplado.

Finalmente cabe decir que las hipótesis H3.1, H3.2 y H3.3 han sido especialmente seleccionadas para simplificar al máximo el tratamiento probabilístico de la lógica de fallo descrita en las figuras 1 y 2, a pesar de lo cual, la deducción rigurosa de las expresiones (3) y (4) ha exigido el uso combinado de un pequeño arsenal matemático: álgebra de BOOLE y sistemas de ecuaciones diferenciales junto con el teorema de la probabilidad total (ver referencia [3]). Dado que dicha deducción ha resultado algo laboriosa, se ha preferido omitirla para no alargar en exceso la exposición.

## 6.- Referencias bibliográficas

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

[2] Casas P., 2014, *Metodología de generación de requisitos técnicos de seguridad para submarinos*, Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº 7.

[3] Warleta J., 1973, *Fiabilidad. Bases teóricas y prácticas*, INTA.

## EL NEUTRÓN. INTERACCIÓN DE LOS NEUTRONES CON LA MATERIA

CF (CIA-EOF) D. JOAQUÍN ORTEGA GARCÍA

INTECDEF Nº 1 MADRID

### 1.- Introducción

En un artículo publicado en el BTI número 10 de mayo de 2016, se explicaban someramente las reacciones de fusión y de fisión y se presentaba la importancia del neutrón en ambos tipos de reacciones.

En las reacciones de **fisión** se comentaba que, al absorberse el proyectil, sea fotón o partícula, se formaba un núcleo compuesto muy inestable y altamente excitado, lo que llevaba a su escisión, normalmente en dos fragmentos asimétricos, liberándose en el proceso cierto número de neutrones. Este tipo de reacciones son altamente exotérmicas.

Se exponía también que la primera reacción de fisión descubierta fue la del uranio, bombardeado con neutrones de baja energía.

En el proceso de fisión, el núcleo compuesto excitado que se forma tras la absorción de un neutrón, se escinde en dos núcleos más ligeros, que se desprenden a gran velocidad. Los neutrones que aparecen, también lo hacen a una determinada velocidad. A todos estos fragmentos que aparecen mediante la reacción nuclear se les denomina fragmentos de fisión y aparecen de modo casi instantáneo.

Las reacciones de **fusión** tienen lugar cuando varios núcleos ligeros se unen para formar otro más pesado, por ejemplo, cuatro protones para formar un núcleo de helio y en general el hidrógeno y sus isótopos. Se exponía como este tipo de reacciones era capaz de producir un gran flujo de neutrones.

Es por ello que se considera conveniente el estudio del neutrón y su interacción sobre la materia.

### 2.- Características de la partícula

En el año 1920, Ernest Rutherford sugirió la posibilidad de que protón y electrón se encontraran en los núcleos tan íntimamente combinados que constituyeran una partícula neutra hipotética, a la que se denominó neutrón. Sin embargo, la partícula propuesta era difícil de detectar, pues al carecer de carga, sería insensible a la acción de los campos eléctricos o magnéticos y tampoco produciría ionización en la materia. En 1932, James Chadwick fue capaz de probar experimentalmente la existencia del neutrón, utilizando las reacciones nucleares de partículas alfa en boro y berilio. El descubrimiento de la nueva partícula, de carga nula y peso atómico muy cercano a la unidad de masa atómica, hizo suponer a los físicos nucleares que todos los núcleos atómicos estaban formados por protones y neutrones, hipótesis utilizada por primera vez por Werner Heisenberg como base de su modelo nuclear.

La masa del neutrón es una característica física cuya precisión ha ido evolucionando desde el valor inicial de 1,15 uma, medido por Chadwick, hasta el valor actual de 1,008665012 uma. Es importante tener en cuenta que el neutrón es una partícula algo más másica que el protón; así el equivalente energético de la diferencia másica entre ambas partículas es  $(M_n - M_p) c^2 = 782,34 \text{ KeV}$ . Por ello, el neutrón como partícula libre es inestable, desintegrándose a protón por emisión beta, con periodo de 12,8 minutos. En cambio, cuando está confinado en el núcleo, su energía de enlace negativa le confiere una estabilidad total.

### 3.- Producción de neutrones

Las reacciones nucleares constituyen la única fuente que se dispone para producir neutrones, y las reacciones  $(\alpha, n)$  sobre ciertos elementos ligeros que, como se ha comentado, permitieron el descubrimiento del neutrón, se siguen utilizando hoy en día para producirlos. Entre las fuentes de neutrones basadas en esta reacción nuclear se encuentran las del tipo radio-berilio, formada por una mezcla íntima de cinco partes de polvo de berilio y una de  $\text{Br}_2\text{Ra}$ .

Las fuentes más frecuentemente utilizadas son las de fotoneutrones, que se basan en las reacciones  $\text{Be}^9 (\gamma, n)\text{Be}^8$  y  $\text{H}^2 (\gamma, n)\text{H}^1$ , reacciones endoérgicas de umbral favorablemente bajo, 1,67 y 2,23 MeV respectivamente.

Como generador de fotones gamma suelen usarse radionucleidos de espectro gamma y periodo adecuadamente largo. En la tabla siguiente se incluyen algunos tipos de fuentes de fotoneutrones y sus propiedades. Los valores que se incluyen como rendimiento neutrónico representan el número de neutrones generados en un blanco de masa 1g situado a 1cm de una fuente radiactiva de 1 Ci de actividad.

| Fuente                                | Periodo | Energía media de los neutrones (KeV) | Rendimiento neutrónico $\times 10^{-4}$ |
|---------------------------------------|---------|--------------------------------------|---|
| $\text{Na}^{24} + \text{D}_2\text{O}$ | 14,8 h  | 820                                  | 27                                      |
| $\text{Na}^{24} + \text{Be}$          | 14,8 h  | 220                                  | 13                                      |
| $\text{Mn}^{56} + \text{D}_2\text{O}$ | 2,6 h   | 220                                  | 0,31                                    |
| $\text{Mn}^{56} + \text{Be}$          | 2,6 h   | 100 (90%)<br>300 (10%)               | 2,9                                     |
| $\text{Ga}^{72} + \text{D}_2\text{O}$ | 14 h    | 130                                  | 6                                       |
| $\text{Ga}^{72} + \text{Be}$          | 14 h    | 200                                  | 5                                       |
| $\text{In}^{116} + \text{Be}$         | 54 min  | 100                                  | 0,82                                    |

Los neutrones también pueden generarse mediante aceleradores de partículas. El hielo pesado ( $\text{D}_2\text{O}$ ) al bombardearse con deuterones (núcleo del deuterio que contiene un protón y un neutrón) de energía adecuada, constituyen una fuente de neutrones sencilla y eficaz: como la reacción  $\text{H}^2(\text{d}, n)\text{He}^3$  es exoérgica con  $Q= 3,28$  MeV, pueden obtenerse buenos rendimientos con deuterones de 100 a 200 KeV y, en condiciones controladas, pueden obtenerse neutrones monoenergéticos.

Otras reacciones que se usan de idéntica forma son:

- $\text{Li}^7(\text{d}, n)\text{Be}^8$
- $\text{Be}^9(\text{d}, n)\text{Be}^{10}$

Finalmente, como ya se ha indicado, las reacciones de fisión constituyen un método adecuado para obtener haces de neutrones de flujo muy elevado, hasta unos  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> s. También se usan como fuentes de neutrones las fisiones espontáneas de algunos elementos transuránicos, por ejemplo con el  $\text{Cf}^{252}$  se obtienen fuentes que emiten  $3,3 \times 10^9$  neutrones por miligramo de californio (Cf).

#### 4.- Clasificación energética de los neutrones

Es norma habitual en la bibliografía clasificar los neutrones en grupos de energías u orden de magnitud energética dada, a los cuales se les da nombre especiales. Aunque existen diferentes clasificaciones, la más aceptada es la siguiente:

| DENOMINACIÓN | ENERGÍA (eV) | VELOCIDAD (cm/s)     |
|--------------|--------------|----------------------|
| Fríos        | 0,005        | $9,66 \times 10^4$   |
| Térmicos     | 0,025        | $2,2 \times 10^5$    |
| Epitérmicos  | 1            | $1,4 \times 10^6$    |
| Lentos       | $10^2$       | $1,4 \times 10^7$    |
| Intermedios  | $10^4$       | $1,4 \times 10^8$    |
| Rápidos      | $10^6$       | $1,4 \times 10^9$    |
| Ultrarápidos | $10^8$       | $1,4 \times 10^{10}$ |

## 5.- Interacción de los neutrones con la materia

Los neutrones son partículas de una gran eficacia para la producción de reacciones nucleares, ya que al carecer de carga eléctrica no están sujetos a fenómenos de repulsión electrostática, y penetran en el núcleo sin la dificultad que la barrera de potencial opone a otras partículas cargadas, tales como partículas alfa, protones y deuterones. No solo los neutrones de energía media o elevada son capaces de producir reacciones nucleares, también los neutrones térmicos han demostrado ser de una gran eficacia.

Los neutrones pueden producir un gran número de reacciones nucleares. Las más importantes son:

### 5.1.- Colisiones elásticas e inelásticas

En su interacción con la materia los neutrones pueden experimentar colisiones elásticas con núcleos, en las cuales el neutrón mantiene su entidad y el núcleo colisionado queda en su nivel energético fundamental. Un caso típico de colisión elástica es el experimentado en núcleos ligeros como el carbono, de gran importancia tecnológica e industrial. En este caso, el primer nivel excitado se encuentra a 4,43 MeV, por lo que si el neutrón tiene una energía menor, la colisión ha de ser forzosamente elástica.

Tecnológicamente es de gran importancia el comportamiento de los neutrones en un medio como el carbono, en el cual la sección eficaz de dispersión es adecuadamente alta y la de absorción muy baja. En este caso, los neutrones rápidos sufren un proceso de moderación consistente en el que los neutrones, por colisiones sucesivas, van perdiendo energía hasta llegar a la correspondiente al valor medio de los átomos o moléculas que integran el medio moderador (carbono en este caso), en cuyo caso los neutrones en cada colisión ceden o ganan energía alrededor de un valor medio que depende de la temperatura.

Situado en el corazón del reactor nuclear, el moderador constituye un medio para disminuir la velocidad de los neutrones, lo cual propicia una reacción nuclear en cadena eficaz.

La razón principal para efectuar este proceso de frenado de los neutrones es permitir la interacción de estos neutrones con los átomos fisibles (uranio 235 y plutonio 239) presentes en el combustible de un reactor nuclear.

Cuando tras la absorción de un neutrón se fisiona un átomo, se emiten dos o tres neutrones a una velocidad de 20000 km/s. A tal velocidad es poco probable que otro átomo fisible absorba estos neutrones. El empleo del moderador permite obtener mejor rendimiento del reactor.

Otros componentes que actúan de moderadores son el hidrógeno y el deuterio.

Los neutrones cuya energía ha sido degradada a este nivel reciben el nombre de neutrones térmicos, y su velocidad presenta un espectro continuo con un máximo que coincide con la llamada velocidad más probable. La distribución de velocidades de los neutrones térmicos sigue la distribución de Maxwell, típica en la teoría cinética de gases. La velocidad más probable se demuestra que vale:

$$V_0 = \sqrt{2K T/m_n}$$

Donde K es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y  $m_n$  la masa del neutrón.

Si la energía de los neutrones supera la del primer nivel excitado del núcleo blanco, tienen lugar colisiones inelásticas. Por ejemplo, en núcleos pesados, el primer nivel excitado se encuentra por debajo de unos 50 KeV por lo que en estos casos las colisiones son predominantemente inelásticas.

### 5.2.- Procesos de captura neutrónica

En los casos en los que en una colisión el neutrón penetra en el núcleo blanco, tienen lugar reacciones nucleares de diversos tipos, como captura radiactiva, emisión de partículas, o fisión. Entre estas reacciones se encuentran por ejemplo:

- $\text{Li}^6 (n, \alpha) \text{He}^3$
- $\text{B}^{10} (n, \alpha) \text{Li}^7$

Que sirven de base a muchos detectores de neutrones debido a que en el proceso nuclear se generan partículas alfa, capaces de producir intensa ionización en el medio interactuado.

Otro ejemplo de reacción con neutrones lo constituye el grupo de reacciones en las que el blanco es el aluminio:

- $\text{Al}^{27} (n, \gamma) \text{Al}^{28}$
- $\text{Al}^{27} (n, p) \text{Mg}^{27}$
- $\text{Al}^{27} (n, \alpha) \text{Na}^{24}$
- $\text{Al}^{27} (n, 2n) \text{Al}^{26}$

Que suceden cuando se irradia aluminio en un reactor nuclear. La primera de las reacciones tiene lugar con neutrones térmicos y es exoérgica, las restantes son todas endoérgicas, en especial la última, que solo se produce con neutrones rápidos.

## 6.- Reacciones de fisión inducidas por captura neutrónica

Los neutrones son proyectiles capaces de inducir reacciones de fisión en una gran variedad de blancos, en especial en núcleos pesados. Tales reacciones nucleares son muy importantes debido a sus variadas aplicaciones, como ya se ha visto.

Las propiedades más importantes de estos procesos son:

- La fisión es una reacción nuclear en la que un núcleo, normalmente pesado, se escinde en dos fragmentos liberándose de 2 a 3 neutrones y desprendiéndose una gran cantidad de energía, del orden de unos 200 MeV en cada fisión.
- Los neutrones térmicos son capaces de inducir fisión en nucleidos pesados de número másico impar, tales como los ya citados  $\text{U}^{235}$  y  $\text{Pu}^{239}$ . Los neutrones rápidos son también capaces de provocar la fisión de muchos núcleos pesados, aunque con probabilidades o secciones eficaces reducidas.
- Los fragmentos en que se escinde un núcleo al fisionarse, los llamados fragmentos de fisión, por ser muy ricos en neutrones son eslabones primarios de cadenas de desintegración beta negativa.
- El hecho de que en cada proceso de fisión inducido por la absorción de un neutrón se liberen de 2 a 3 neutrones, sugiere la posibilidad de establecer una reacción en cadena. Una masa de núcleo fisiónable en la que al producirse reacciones de fisión exista equilibrio entre los neutrones generados y los perdidos en la superficie, recibe el nombre de masa crítica.
- En una masa fisible supercrítica se produce un aumento exponencial de reacciones de fisión. Si se permite este crecimiento en la tasa de reacciones en un tiempo muy corto, se liberará con carácter explosivo una gran cantidad de energía, lo que como ya se explicó, constituye el fundamento de las bombas atómicas. Si por el contrario se produce una liberación de energía pausada, esta se puede usar en los reactores nucleares para la producción de energía eléctrica.

## 7.- Radiación neutrónica. Blindajes neutrónicos

Los neutrones, al carecer de carga eléctrica, no producen directamente ionización. La interacción neutrónica, a diferencia de las partículas cargadas, se produce con los núcleos del medio absorbente y no con los electrones más externos de éste. En consecuencia el proceso predominante de la interacción neutrónica es la producción de reacciones nucleares de dispersión y absorción, siendo la sección eficaz total suma de la sección eficaz de ambas. Los valores de la sección eficaz total son función de las energías de los neutrones y del tipo de núcleos constituyentes del blanco.

La peligrosidad de los neutrones se debe a que tanto en los procesos de absorción como en los de dispersión se originan partículas cargadas y fotones que pueden producir ionización y por ello, los neutrones se clasifican entre las radiaciones indirectamente ionizantes.

Cuando un núcleo estable absorbe un neutrón, puede transformarse en un radionucleido, y en su desintegración, emitir partículas alfa, beta o fotones. Incluso en el caso en que la absorción conduzca a otro nucleido estable, se producen siempre los fotones propios de captura, propios de las reacciones nucleares ( $n, \gamma$ ).

Los procesos de dispersión pueden conducir también a la producción de partículas de alto poder ionizante, como ocurre cuando cuando los neutrones rápidos interactúan con materiales ricos en hidrógeno, como el agua. En este caso, al chocar los neutrones con los átomos de hidrógeno, éstos resultan expulsados al romperse el enlace químico, y emergen en forma de protones con una fracción importante de la energía del neutrón. Estos protones, llamados protones de retroceso, son capaces de producir una alta densidad de ionización a lo largo de su trayectoria.

El cuerpo humano contiene en muchos de sus tejidos un gran porcentaje de agua e hidrógeno, motivo por el cual la absorción de neutrones rápidos genera protones de retroceso, lo que explica la peligrosidad de los neutrones desde el punto de vista de la radioprotección.

La construcción de blindajes de neutrones resulta más complicada que en los casos de partículas cargadas, debido a las peculiaridades de su interacción, ya que no pierden su energía como las partículas cargadas, sino en una única colisión, lo cual conduce a una atenuación exponencial de la forma:

$$\Phi = \phi_0 e^{-\Sigma d}$$

Donde  $\phi_0$  es el flujo incidente,  $\phi$  el flujo emergente,  $d$  el espesor y  $\Sigma$  la sección eficaz macroscópica.

La dificultad del diseño de blindajes neutrónicos se debe a las fuertes variaciones que presenta la sección eficaz con la energía, lo que explica que un absorbente adecuado para neutrones térmicos no sea eficaz para neutrones rápidos y al revés.

El método general para resolver la protección frente a haces de neutrones, muchas veces formados por mezcla de neutrones rápidos y térmicos, es aplicar el principio conservador de suponerlos todos rápidos y utilizar un blindaje que consta por una parte de una capa de un elemento generador de hidrógeno, usualmente agua o parafina, de un espesor adecuado para que la fracción de neutrones rápidos se moderen a térmicos, seguida de una segunda capa de un elemento de alta sección eficaz de captura de neutrones térmicos, usualmente boro o cadmio. Finalmente se coloca una tercera capa de material de número atómico elevado, como el plomo, de espesor conveniente, que atenuará hasta un valor tolerable el flujo de radiación gamma.

### Bibliografía empleada

- H. E. Johns and J.R. Cunningham. Charles C. Thomas Publisher. *The Physics of Radiology*. USA (1983).
- Robley D. Evans. *The Atomic Nucleus*. Mc Graw-Hill Book Company (1955).
- David W. Anderson. *Absorption of Ionizing Radiation*. Ph. D. University Park Press (1984).
- John R. Lamarsh. Anthony J. Baratta. *Introduction to Nuclear Engineering*. Third Edition (2014).
- Yoshihide Hase. *Handbook of Power Systems Engineering*. Wiley (2015).
- Kenneth D. Kok. *Nuclear Engineering Handbook*. (2013).

## **“COLD IRONING”: TOMAS DE TIERRA EN LOS PUERTOS PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE LOS BUQUES**

**CC (CIA-EOT) D. Raúl Villa Caro**

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante

Doctor por la Universidad de A Coruña

### **Introducción**

Se denomina fenómeno de «cold ironing» al suministro de corriente eléctrica a los buques atracados en puerto, a través de tomas propias del puerto. Esta filosofía, aún muy novedosa en los puertos comerciales, es muy conocida entre los miembros de la Armada, ya que nuestros buques siempre se conectan en puerto al atracar en los arsenales militares.

El objetivo de este fenómeno es el tratar de reducir las emisiones contaminantes de los buques durante su estancia en puerto, emisiones que a su vez ya están controladas y reguladas por el Anexo VI del Convenio MARPOL. Este anexo del convenio MARPOL, dependiente de la Organización Marítima Internacional (OMI), ya lleva años preocupándose de prevenir la contaminación atmosférica. Para ello establece los límites de óxidos de azufre y nitrógeno, las zonas ECA, etcétera. Y además la Unión Europea lleva varios años desarrollando normativas para combatir esta contaminación mediante directivas que fomentan el uso de la electricidad en puerto mediante incentivos económicos que premian la adopción de estas medidas.

### **Funcionamiento del sistema**

La electricidad debe ser suministrada al buque atracado, desde el puerto. Este sistema exige que exista una conexión entre el buque atracado y el puerto, y además esa conexión debe cumplir unas características de tensión, potencia y frecuencia, adecuadas para los diferentes buques. Por supuesto, el sistema también deberá estar dotado de una conexión con la red de distribución eléctrica.

Mediante estas conexiones los buques podrían abastecer sus necesidades energéticas durante el atraque, sin utilizar sus propios motores auxiliares. Pero para que los buques puedan utilizar esta fuente de energía deben existir tres tipos de infraestructuras eléctricas:

- a) Conexión del puerto con una red de distribución eléctrica cercana que permita el suministro eléctrico al buque.
- b) Infraestructuras que permitan el suministro eléctrico al buque de acuerdo a los estándares internacionales de suministro eléctrico de alta tensión a buques atracados. Destacar en este sentido que será necesario un convertidor de frecuencia de 50/60 Hz, ya que la mayoría de la flota internacional está preparada para utilizar una corriente eléctrica con una frecuencia de 60 Hz (estándar norteamericano) mientras que el suministro eléctrico en España se realiza a 50 Hz.
- c) Un sistema que permita la conexión física, cuyas características técnicas dependerán del tipo de buque atracado. Por ello podrán instalarse sistemas fijos, o sistemas flexibles, como grúas móviles o incluso barcasas.

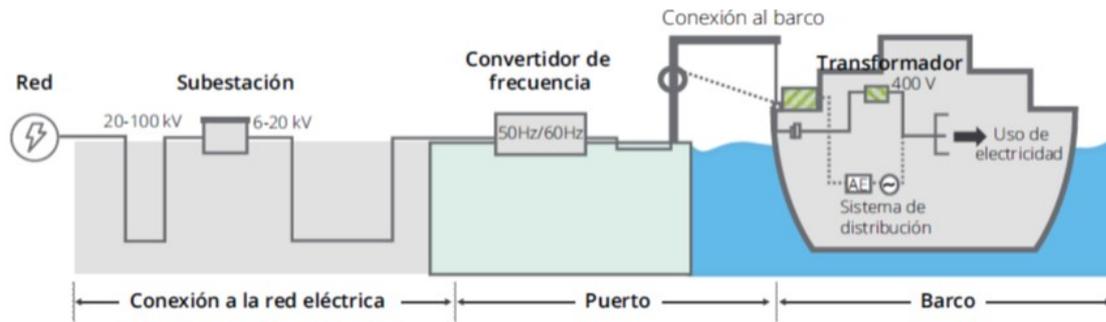


Figura 1: Infraestructuras eléctricas (Fuente: Comisión Europea, análisis Monitor Deloitte)

### Conexión a tierra del buque de acción marítima (BAM)

El buque BAM se alimenta en trifásica de 440V y 60Hz desde una instalación en puerto que esté disponible con esas especificaciones. Precisamente en el Arsenal de Cartagena se está haciendo la obra, pues allí no disponían de esta conexión. El buque BAM dispone de un carretel con tres cables de conexión a tierra en cada banda. Para la alimentación del buque se necesitan dos cables, y si está abarloado otro buque, este segundo barco deberá aportar su cable. La reducción de cuatro a tres cables se realizó por criterios de espacio y peso.

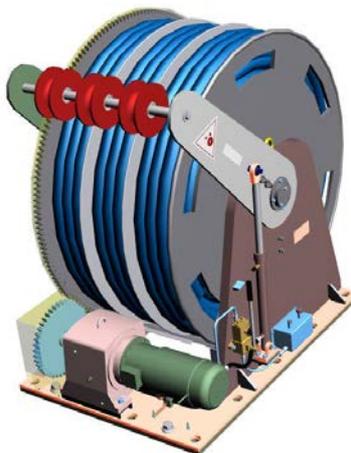
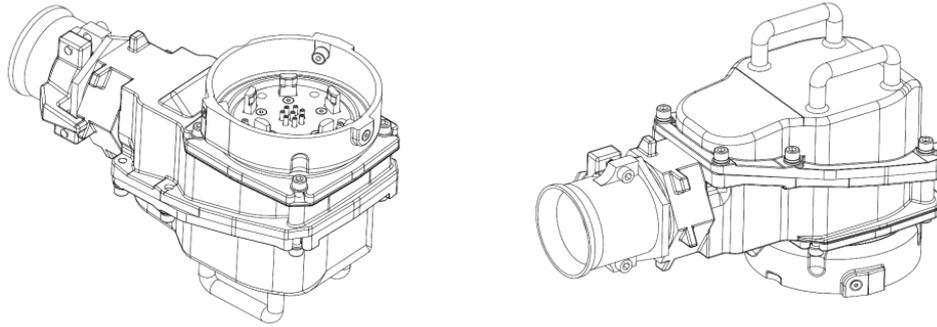


Figura 2: Carretel del BAM

Los cuadros, uno a cada banda, a los que llegan los cables de tierra, son los mismos que en la primera serie BAM 1-4. Estos cables distribuyen la energía a los cuadros principales 1S y 2S, por cada fase de la línea trifásica, a 230V 60Hz.

La conexión en puerto ha cambiado respecto de las fragatas F100, así que para poder utilizarla se suministran adaptadores. Los cables miden 50 m cada uno, con una sección por fase de 240 mm<sup>2</sup>.



**Figura 3: Adaptadores BAM**

### **Posibilidades para reducir las emisiones contaminantes de los buques en puerto**

Se podrían destacar las siguientes posibilidades:

- Consumo de combustibles bajos en azufre.
- Utilización de «scrubbers» para la depuración de los gases de exhaustación.
- Uso del LNG (gas natural licuado).
- Tomas eléctrica en los puertos.

### **Beneficios del consumo eléctrico desde los puertos**

Los beneficios del «cold ironing» son los siguientes:

- Se reduce la totalidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hasta en un 60 %, si la electricidad está generada con un mix eléctrico. Si se tratase de un mix renovable podría llegarse a una eliminación total.
- Se evita la totalidad de las emisiones de otros elementos contaminantes tipo NOx, SOx, y CO, evitando de esta forma el impacto directo sobre la población cercana.
- Se reduce al máximo el ruido y las vibraciones generadas por los motores auxiliares.
- Se aumenta el consumo de energía renovable en el sector del transporte para cumplir con el objetivo establecido por la Comisión Europea de que en el año 2020 al menos el 10% del consumo de energía final proceda de fuentes renovables.

### **Incentivos para el desarrollo del suministro eléctrico a buques atracados**

Para conseguir que el mundo naval se enfoque hacia el mundo eléctrico se deben adoptar medidas del tipo:

- Realización de evaluación de detalle que permita identificar y priorizar aquellos puertos españoles en los que sería más adecuada la instalación de sistemas de alimentación eléctrica a buques atracados.
- Fomento de acuerdos de colaboración entre las Autoridades Portuarias y navieras para que se adapte el desarrollo de las infraestructuras portuarias a los planes de las diferentes compañías privadas para la conversión de sus flotas.
- Incentivo de inversiones necesarias mediante subvenciones e incentivos fiscales para adaptar las infraestructuras portuarias al suministro eléctrico de los buques atracados.

Estudios de Puertos del Estado indican que todas estas medidas anteriores permitirían la recuperación de la inversión, siempre y cuando existiese una demanda mínima de suministro. Mediante la implantación

de estas medidas se reduciría el coste de la inversión necesario y las inversiones en instalaciones de suministro podrían rentabilizarse si se obtuviera el siguiente número de atraques anuales:

- Entre 160 y 400 atraques al año en caso de buques ferris y Ro-Ros.
- Más de 300 atraques al año en caso de portacontenedores.
- Entre 20 y 60 atraques al año en caso de buques cruceros de pasaje.

## Conclusiones

A la vista de todo lo expuesto en este artículo, a continuación procedería el hacerse la siguiente pregunta:

« ¿Es un asunto prioritario el suministro de energía eléctrica a buques atracados en puerto? »

Podría ser cuestionable si se trata de un asunto prioritario, al menos en España, desde el punto de vista de la calidad del aire. Desde el punto de vista de los beneficios en eficiencia energética, tal como se ha indicado en un apartado de este artículo, existen una serie de ventajas.

¿Pero existen desventajas? Evidentemente existen. La primera de ellas es todo el coste que se debe invertir para poder alimentar a toda esa variedad de buques que navegan por el mundo. Inversiones que requieren modificaciones en los buques, así como la disponibilidad de una amplia red de suministro en tierra. Y otro punto a tener en consideración es el del rendimiento. ¿Se podrá obtener o generar energía en puerto a un rendimiento mayor que el que se obtiene con la energía de a bordo? Pues ese será otro interrogante a investigar, para el que habrá que conocer las diferentes pérdidas que se producen en el proceso.

Para finalizar, me gustaría remarcar que a pesar de todas las ventajas que presenta el sistema eléctrico, si nos ajustamos a la normativa, se debe tener en cuenta que las emisiones de CO generadas por el combustible que consumen los buques en puerto, no computan dentro del techo de emisiones de nuestro país, cosa que no ocurriría con las emisiones asociadas a la producción eléctrica.

## Referencias

[1] IMO

[2] *CONVENIO MARPOL 1974*. Anexo VI (y enmiendas)

[3] *Monitor Deloitte: Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050* (Marzo 2017)

## CONSIDERACIONES SOBRE LA PROBABILIDAD DE SUPERVIVENCIA DEL BUQUE Y MEDIDAS REACTIVAS ANTE EL ATAQUE DE MISILES ASCM

TN (CIA-EOF) D. JUAN MANUEL DE SANTIAGO COLLADA

Jefatura de Sistemas Navales

Son muchas y variadas las posibles amenazas que se ciernen sobre un buque de guerra. De entre las más temibles de ellas se encuentra la de ataque de misil ASCM (Anti Ship Cruise Missile). En respuesta se usan técnicas ASMD (Anti Ship Missile Defense).

El propósito de este artículo es el de lograr a través de un modelo simplificado, la evaluación de las estrategias de empleo de los misiles antiaéreos SAM en la supervivencia del buque atacado por misiles de crucero ASCM.

### Introducción

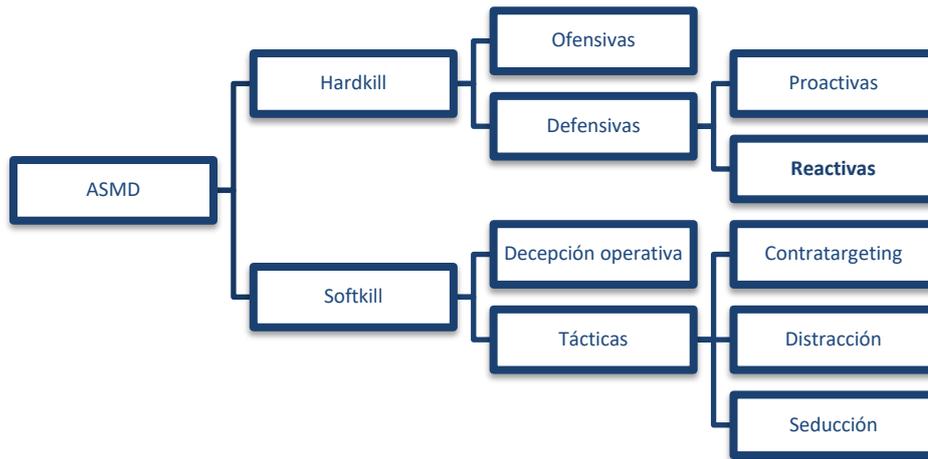
Es inmensa la casuística en la que puede suceder el ataque de misiles: varias plataformas atacantes con distintos tipo de misil y contramedidas electrónicas (ECM) desde tantas demoras y distancias. La reacción preestablecida que la Fuerza puede tomar para cada caso se encuentra en el «plan ZIPPO».

Las medidas ASMD pueden clasificarse en dos grandes grupos: «hardkill» y «softkill», encontrándose para ellas clasificaciones alternativas, según las fuentes. Sin entrar en detalles ni exhaustividad, y solo para dar una idea somera:

Las softkill, pretenden negar al enemigo la efectividad del misil sin recurrir a técnicas de destrucción directa (hardkill). La decepción operativa, tan antigua como la propia guerra, consiste en el engaño al enemigo, induciéndole a la creencia de capacidades, cantidades o ubicaciones de unidades, distintas de las reales, en la esperanza de que tome decisiones erróneas y contraproducentes a sus intereses. Adentrándonos en las contramedidas electrónicas (ECM), las tácticas de *contratargeting* (CTTG) se encaminan a impedir al enemigo la obtención de información de intenciones de lanzamientos propios. En cambio, la distracción (ofrecer blancos alternativos al misil enemigo) y la seducción (inducir al error a un misil enemigo que ha enganchado (lock-on) la unidad propia).

En cuanto a las hardkill, persiguen la eliminación física del misil enemigo, su reservorio como puertos, fábricas, etc. (medidas ofensivas), o su vector como el misil o la plataforma/lanzador (medidas defensivas). Las anteriores serán proactivas si se toman previamente al inicio del ataque. No cabe duda de que las medidas proactivas son expeditivas, en tanto significan la destrucción de las plataformas enemigas. Si las consecuencias son asumibles, esta será la medida deseable sobre todas las demás, además de convertirlas en innecesarias

Respecto a las medidas defensivas reactivas, las PDS (Sistemas de Defensa de Punto), en sus vertientes CIWS (Close-In Weapon Systems), ametralladoras automáticas de elevada cadencia y SAM (Misiles Superficie-Aire) son las comúnmente usadas. Ejemplos de los anteriores serían Phalanx, Meroka o Breda Dardo para CIWS, montaje MK-38 como ametralladora dotada de dirección de tiro con capacidad de búsqueda, seguimiento y predicción balística, y los misiles Standard SM-1, Evolved Sea Sparrow (ESSM), como misiles SAM.



**Figura 1. Esquema resumido de las medidas contra amenaza ASMD**

De las distintas medidas ASMD posibles, el presente artículo se centra en las reactivas defensivas empleando misiles SAM (Figura 1).

### Supervivencia del buque de guerra

Considerando el buque de guerra, se puede definir su *percebilidad*  $P_k$ , medido como probabilidades, la de que el buque sea destruido por un arma. En el caso que nos ocupa lo asimilaremos a un misil ASCM. Supervivencia del buque  $P_s$  y *percebilidad* (killability) de éste  $P_k$  son eventos mutuamente excluyentes.

$$P_k = 1 - P_s \quad (1)$$

La *percebilidad* viene afectada por la *susceptibilidad*  $P_h$  (de ser detectado y ser alcanzado), en el caso de ser alcanzado, no resistir el daño causado y no lograr recuperar su operatividad (*vulnerabilidad y no resiliencia*,  $P_{k/h}$ ).

$$P_k = P_h P_{k/h} \quad (2)$$

Alternativamente, la supervivencia aumenta (o *percebilidad* disminuye) reduciendo la vulnerabilidad y susceptibilidad del buque:

$$P_s = 1 - P_k = 1 - P_h P_{k/h} \quad (3)$$

La deseable disminución de la susceptibilidad forma parte de las reacciones ASMD. Entre ellas se puede citar el alistamiento de armas, el establecimiento de zafarrancho de combate, la minimización de la exposición a la amenaza por reducción de la sección radar (RCS), o la elección del rumbo más adecuado.

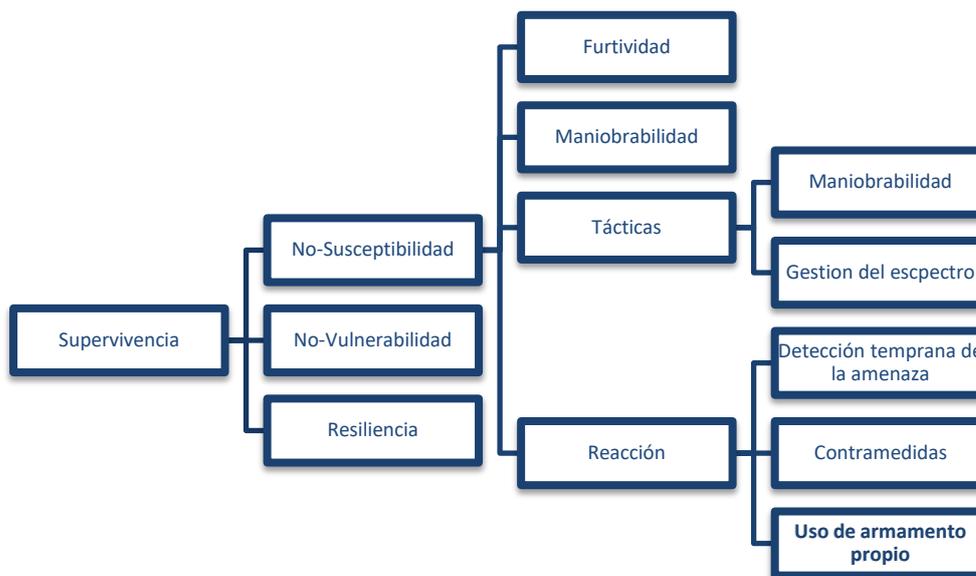
La vulnerabilidad puede ser rebajada desde la etapa de preparación de Seguridad Interior mediante el establecimiento de la condición de estanqueidad más restrictiva (condición Zebra típicamente), o adiestramiento y alistamiento de personal y material para el combate. La resiliencia formaría parte de la etapa de acción llevados a cabo por los trozos de seguridad interior: control de averías, contraincendios, tendido de líneas eléctricas volantes, primeros auxilios en combate, entre otros.

A efectos prácticos y por simplificación, la susceptibilidad y la perecibilidad se aceptan como equivalentes. Esto es, la vulnerabilidad se considera suceso seguro, por lo que un solo impacto de misil será letal para el buque:

$$P_{k/h} \approx 1 \Leftrightarrow P_s = 1 - P_k \Leftrightarrow P_k = 1 - P_h \quad (4)$$

Lo anteriormente expresado, particularizado para un buque (el propio) es extensivo para todo vehículo presente en un escenario: cualquiera puede ser interceptado (y destruido), pudiendo ser éste otro buque de superficie, una aeronave, un submarino o un vehículo no tripulado.

En resumen, el presente artículo se centrará en el aspecto concreto de la repercusión del uso del armamento propio (misiles SAM) tomado como medida de reacción para aumentar la probabilidad de supervivencia del buque propio (Figura 2).



**Figura 2. Esquema de los elementos que intervienen en la supervivencia de una plataforma**

## Planteamiento del problema

Un buque de guerra puede combatir trazas aéreas no amigas, en general ASCM, cuando disponga de los misiles adecuados. La situación de partida (también la más sencilla) será la denominada «one-on-one», en la que se contempla un escenario de uno contra uno (un misil del buque propio contra un misil atacante). En el extremo opuesto participan varios misiles, tanto propios como atacantes (many-on-many). Como cabe esperar, para su comprensión será preciso generar modelos de mayor dificultad y variabilidad.

La SSKP (Single Shot Kill Probability) representa la probabilidad de que un único misil atacante sea derribado con único misil propio. Dicha probabilidad no es en absoluto sencilla de determinar, y estará siempre sujeta a incertidumbres. En cambio, sí podremos establecer su dependencia principal de las características y posiciones relativas de los misiles intervinientes, y del sistema antiaéreo propio.

En un contexto de medios ilimitados, para acometer los distintos cálculos sería ideal realizarlos a través de la experimentación real, lo cual será casi siempre inviable. Por esta razón se recurre a los estudios de sensibilidad, cuyo propósito es el de conocer, a través de modelos, el impacto que tendría en el sistema la modificación de aspectos de diseño, en comparación con el coste aparejado. Dichos estudios son efectuados desde etapas muy tempranas del desarrollo del misil propio. En los modelos matemáticos que caracterizan el comportamiento de los misiles, de manejo complicado y sujetos a muchos acoples, se consideran movimientos en los 6 grados de libertad.

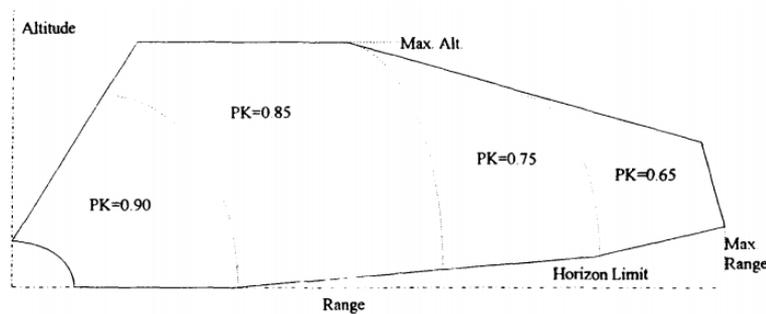
Refiriéndonos al caso one-on-one, la *probabilidad de derribo*  $p_k$  del misil enemigo equivale al SSKP, también denominado  $p_{kSS}$  para este caso particular. Así, la probabilidad de que dicho misil no sea interceptado es su *probabilidad de supervivencia*:

$$P_{sSS} = 1 - p_{kSS} \quad (5)$$

Esto es, si la *probabilidad*  $p_{kSS}$  de que un misil propio derribe una amenaza aislada determinada es 0,7, su probabilidad de supervivencia (la del misil atacante) es su complementario, equivalente a 0,3.

En aras de aumentar en simplicidad, y para un mismo misil propio, es corriente considerar la *probabilidad de derribo*  $p_k$  constante, variando únicamente por el tipo de amenaza, con valores comprendidos típicamente entre 0,70 y 0,85.

Cuando la anterior simplificación no sea admisible, las probabilidades de derribo varían conforme a la zona combatible que ocupe el blanco, llamada "engageability envelope" o cobertura de seguimiento (Figura 3).



**Figura 3. Cobertura de seguimiento de un misil atacante y la probabilidad de su derribo función de la región en que se encuentre**

Otra aproximación para resolver problemas en que se identifican procesos aleatorios es el método de Montecarlo. Por simulación, y modificando el valor de los parámetros aleatorios presentes, se obtienen distribuciones que se asemejan a los valores y desviaciones esperados. Para que se arrojen unos resultados más acordes a la realidad será además necesario combinar en el modelo parámetros como los tiempos de reacción y los comportamientos cinemáticos de los elementos intervinientes. Lo anterior queda fuera del alcance de este trabajo.

Supongamos que tenemos en toda la zona cubierta por nuestro misil una probabilidad constante de abatir a la amenaza, de valor 0.6, o también  $p_{kSS} = 0,6$ . Si lanzamos un único misil contra el único atacante (one-on-one), nuestra *probabilidad de supervivencia*  $P_{sSS} = P_s$  coincide con la *probabilidad de derribo del misil atacante*  $p_k = p_{kSS} = 0,6$ , es decir un 60%. Como se ve, se asume que todo misil atacante no derribado, impacta en el buque propio, negando la supervivencia de este.

La intuición dicta (también lo hace la realidad) que resulta más eficaz usar más de un misil propio para contrarrestar cada misil atacante. Con el lanzamiento de una salva de dos misiles por parte del buque propio, el cálculo de la *probabilidad de supervivencia propia*  $P_s$  puede aproximarse de varias maneras:

El hecho determinante de la supervivencia propia/impacto al buque propio viene condicionado por la probabilidad de no derribo de cada misil atacante (*supervivencia del misil atacante*  $p_{sSS}$ ):

$$P_s = P_{sSS} = P_{\bar{k}} = 1 - p_{kSS} = 1 - 0,6 = 0,4$$

asumiendo  $P_{sSS} = P_{s1} = P_{s1} = \dots = P_{sn}$ .

Para el caso que nos ocupa, el suceso «ser alcanzado por un misil» o «no sobrevivir» se produce cuando ocurre el no-derribo del primer misil atacante, y además, ocurre el no-derribo del segundo misil atacante. Por lo demás, los sucesos «ser alcanzado por un misil» y «supervivencia propia» son mutuamente excluyentes:

$$P_s = 1 - P_{\bar{s}} \quad (6)$$

La *probabilidad de no sobrevivir al ataque de un misil ASCM*  $P_{\bar{s}}$ , equivale a las acumuladas de no tener éxito en el derribo con primer misil y además no tener éxito en el derribo con el segundo. Dado que ambos sucesos son independientes:

$$P_{\bar{s}} = P_{\bar{k}} = P_{s1} \cap P_{s2} = P_{s1} \cdot P_{s2} \quad (7)$$

por ello, la probabilidad de no-supervivencia propia (o de supervivencia de algún misil enemigo):

$$P_{s1} \cap P_{s2} = (0,4)^2 = 0,16$$

Por (6) llegamos a la probabilidad de supervivencia propia:

$$P_s = 1 - P_{\bar{s}} = 1 - P_{\bar{k}} = 1 - 0,16 = 0,84$$

Alternativamente, la probabilidad de «supervivencia propia» al ataque del misil equivale a las probabilidades de que suceda: el éxito en el derribo con el primer misil y no-éxito en el derribo con el segundo O el no-éxito en el derribo con el primer misil y el éxito en el derribo con el segundo, O el éxito en el derribo con el primero y el éxito en el derribo con el segundo. Esto es:

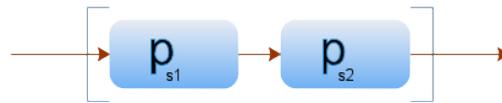
$$P_s = (p_{k1} \cap p_{s2}) \cup (p_{s1} \cap p_{k2}) \cup (p_{k1} \cap p_{k2}) \quad (8)$$

Entonces, por ser  $p_{ki} \cap p_{si} = \emptyset$  y  $p_{ki} = 1 - p_{si} = 1 - 0,4 = 0,6$ :

$$P_s = 0,6 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,6 = 0,84$$

En resumen, ante el ataque un misil enemigo, el gasto de 1 ó 2 misiles propios, implica aumentar notablemente la *probabilidad de supervivencia del buque*  $P_s$ , del 60 al 84%.

Resulta más práctico e intuitivo abordar el problema por diagramas de bloques de fiabilidad, también Reliability Block Diagrams (RBD). La salida del caso expuesto puede entenderse como la *probabilidad de no-supervivencia propia*  $P_{\bar{k}}$ . Cada uno de los 2 bloques se corresponden con la *probabilidad de supervivencia del misil enemigo*  $p_{s1}$  y  $p_{s2}$  de sendos misiles propios lanzados.



**Figura 4. Diagrama de bloques de fiabilidad de 1 misil atacante enfrentado a una salva de 2 misiles propios (probabilidad de supervivencia propia  $P_s$ )**

Podemos deducir la fórmula para un solo misil atacante y salva de 2 propios, que es:

$$P_s = P_k = p_s = \prod_{i=1}^n p_{si} \quad (9)$$

Del examen de (9) se deduce que lógicamente un aumento en el número de misiles empleado repercute en un aumento de las probabilidades de supervivencia propia.

### Descripción del proceso SLS

En el apartado anterior hemos revisado la cancelación de una amenaza consistente en el ataque de un misil a un buque de superficie, mediante el lanzamiento de primeramente de un misil propio y posteriormente una salva de dos misiles propios, también Shoot (S) y Shoot-Shoot (SS), respectivamente. Se comprueba cómo aumenta drásticamente la probabilidad de supervivencia propia para el segundo supuesto (SS).

Por extensión, y siempre que el tiempo de reacción sea suficiente, la mejora de la probabilidad de supervivencia propia, además de por el aumento del número de misiles propios gastados, se logrará a través del de los resultados de la evaluación de daños (kill assessment) de cada salva de misil propio lanzado. Esto es, a las tácticas Shoot (S) y Shoot-Shoot (SS), se le añadirían otras típicas como Shoot-Look-Shoot (SLS), Shoot-Shoot-Look-Shoot-Shoot (SSLSS), denotando Look (L) como el *kill assessment*. Lógicamente, únicamente tras un kill assessment que no confirmase el derribo, se lanzaría un nuevo misil propio. Los sistemas de combate modernos como el Aegis de las fragatas F100, dotados de un radar multifunción con detección y seguimiento automático tridimensional, provén la posibilidad de realizar la evaluación de derribo de múltiples blancos simultáneamente.

Estas técnicas, denominadas genéricamente SLS, como se verá, permiten un claro ahorro en el número de misiles gastado. Pero hay que tener en cuenta que solo podrá usarse en el contexto de tiempos de reacción suficientes para hacer el *kill assessment* y prepararse para un nuevo lanzamiento de misil que intercepte al enemigo en la zona de cobertura. Los misiles enemigos que logran eludir un ataque por misil propio se les denomina *leaker*. Si consumimos la totalidad de los misiles propios y todavía existe algún *leaker*, la *probabilidad de supervivencia propia*  $P_s$  es nula.

Para justificarlo, revisaremos 3 casos distintos (según la Tabla1), en los que se podrá comparar en función de la doctrina aplicada, las probabilidades propias de supervivencia y en número de misiles propios empleados. En aras de lograr una mayor simplificación se tomará  $p_{kSS} = 0,5$  constante.

**Tabla 1. Casos de estudio por número de blancos y doctrina aplicada**

| Caso | Número de blancos | Doctrina  |
|------|-------------------|-----------|
| 1    | 16                | S-S       |
| 2    | 8                 | S-S       |
| 3    | 8                 | S-S-L-S-S |

Se denota por  $m$  el número de misiles propios para contrarrestar  $n$  blancos (misiles que atacan al buque propio).

- **CASO 1**

En el Caso 1, para cada misil atacante, se le asignará una salva de 2 misiles (SS). Así, la probabilidad de supervivencia propia será la probabilidad simultanea de derribar con la salva 1 (SS) el misil 1, y con la salva 2 (SS) el misil 2, y así sucesivamente hasta el misil 16.

Tratando igual e independientemente a cada misil atacante, la probabilidad de supervivencia de cada uno de ellos tras un *single shot*, es:

$$P_{sSS} = P_{\bar{k}} = P_{s1} = P_{s2} = 1 - P_{kSS} = 1 - 0,5 = 0,5$$

Ahora, para cada misil atacante, al lanzarle una salva de dos misiles  $S = 2$  (SS), su probabilidad de supervivencia es la probabilidad conjunta de no lograr derribarlo con el misil S1 y no lograr derribarlo con el misil S2:

$$P_s = P_{s1} \cap P_{s2} = P_{s1} \cdot P_{s2} = (0,5)^2 = 0,25$$

Generalizando:

$$P_s = \prod_{i=1}^S P_{si} \quad (10)$$

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^S P_{si} = 1 - \prod_{i=1}^S (1 - P_{ki}) \quad (11)$$

Igualmente, la probabilidad de haberlo derribado en la salva de dos misiles propios (SS), sería:

$$P_k = 1 - P_s = 1 - 0,25 = 0,75$$

Para obtener la probabilidad de supervivencia propia, contando con el combate a los  $n$  blancos enemigos se considera la probabilidad de derribo para cada salva:

$$P_s = \left[ 1 - \prod_{i=1}^S P_{si} \right]^1 = \left[ \prod_{i=1}^S P_{ki} \right]^1 \quad (12)$$

Particularizando a los  $n = 16$  blancos:

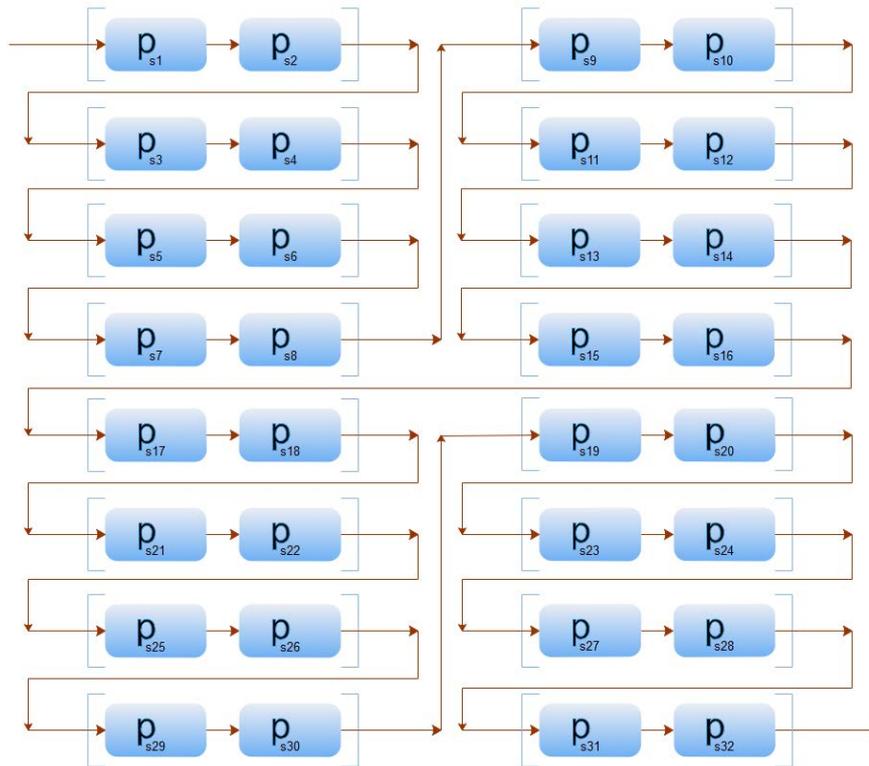
$$P_s = \left[ 1 - 0,5^2 \right]^1 = \left[ 0,75 \right]^{16} \approx 0.01$$

El resultado arrojado pone de manifiesto que una probabilidad de supervivencia de aproximadamente un 1% resulta claramente insatisfactoria. El cálculo del gasto de misiles es:

$$m = m_{-1} = n \cdot S \quad (13)$$

Puesto que se gastan 2 misiles por cada uno de los 16 misiles atacantes, el gasto total es de 32 misiles.

$$m = 16 \cdot 2 = 32 \quad (14)$$



**Figura 5. Diagrama de bloques de fiabilidad de 16 misiles atacantes enfrentado a una salva de 2 misiles propios por misil enemigo (probabilidad de supervivencia propia  $P_s$ )**

- **CASO 2**

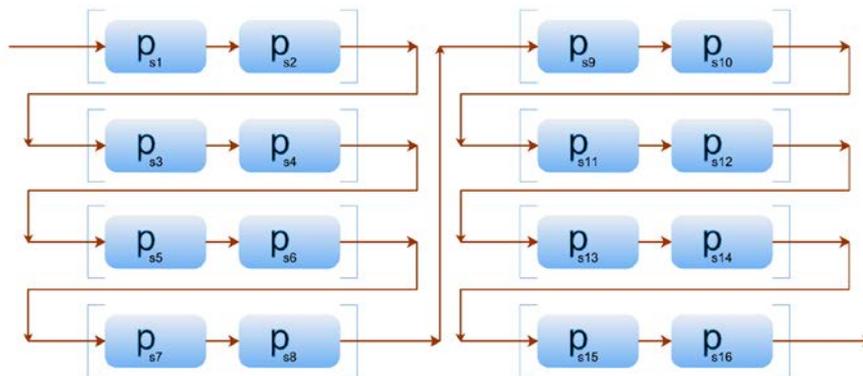
El Caso 2, es idéntico al Caso 1 a excepción de que se trata de los  $n = 8$  blancos. Por tanto, la probabilidad propia de supervivencia, por (12), es:

$$P_s = (0,75)^8 \approx 0,1$$

El gasto propio de misiles, calculado, por (13), sería 16.

$$m = n \cdot S = 8 \cdot 2 = 16$$

Es decir, empleando 16 misiles en salvas de dos, para combatir 8 enemigos, se logra un exiguo 10% de probabilidad de éxito (Figura 6).



**Figura 6. Diagrama de bloques de fiabilidad de 8 misiles atacantes enfrentado a una salva de 2 misiles propios por misil enemigo (probabilidad de supervivencia propia  $P_s$ )**

- **CASO 3**

En el Caso 3 volvemos a considerar los mismos  $n = 8$  blancos. Sin embargo, introduciremos en el estudio el efecto de una evaluación de daños al misil atacante entre dos salvas (*kill assessment*, denotado por L).

Según vimos tanto en el Caso 1 como en el Caso 2, la probabilidad de supervivencia propia coincide con la probabilidad de que no queden *leakers*. Dicho de otra manera, si hubiera existido uno o más *leakers*, no habría ocurrido la supervivencia propia, por haber recibido su impacto. Se produce un *leaker* si de los 8 misiles atacantes logra sobrevivir uno, cualquiera que sea este.

$$\begin{aligned}
 p_{11} = & (p_s \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_s \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_s \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_s \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_s \cap p_k \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_s \cap p_k \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_s \cap p_k) \cup \\
 & \cup (p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_k \cap p_s)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Puesto que para el caso que nos ocupa  $p_k = 0,75$  y  $p_s = 1 - p_k = 0,25$  tenemos que:

$$p_1 = 8(0,25)^1 (0,75)^7 = 0,267$$

De un vistazo al resultado, se intuye que se dan las características de una distribución binomial: tenemos dos únicos resultados posibles (éxito y fracaso,  $p_s$  y  $p_k = 1 - p_s$ , respectivamente),  $n$  misiles atacantes y  $l$  *leakers*. Así, la fórmula general es:

$$p_{ln} = \binom{n}{l} p_s^l p_k^{n-l} = \binom{n}{l} p_s^l (1-p_s)^{n-l} \quad (16)$$

El primer término, se corresponde con el número de filas de (15). En el caso de un *leaker* serían combinaciones de 8 elementos (misiles atacantes) tomados de 1 en 1 (*leakers*):

$$\binom{n}{l} = \frac{n!}{l!(n-l)!} = \frac{8!}{1!7!} = \frac{8 \cdot 7!}{7!} = 8$$

Para el cálculo de la probabilidad de supervivencia propia hay que tener en cuenta que aunque el impacto de un solo *leaker* puede quebrantar la operatividad del buque propio, puede llegar a haber hasta 8, coincidiendo con el número de misiles atacantes, por lo que nos veremos en la necesidad de calcular las probabilidades para cada uno de ellos.

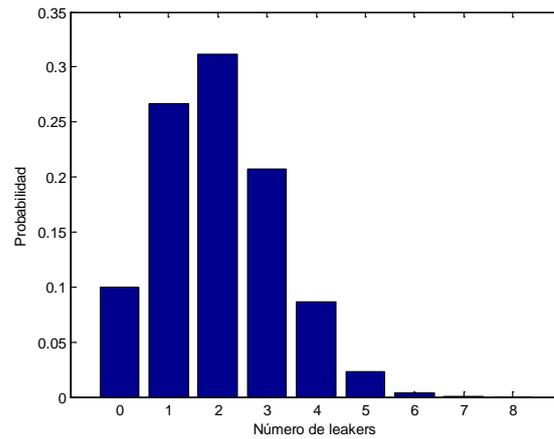
Recurriendo al mismo razonamiento que en caso de un único *leaker*, para conocer cuál es la probabilidad de la aparición de 2 *leakers*, con (16), las combinaciones (número de filas) serían 28:

$$p_{l_2} = \binom{8}{2} 0,25^2 \cdot 0,75^6 = 28 \cdot 0,063 \cdot 0,178 = 0,311$$

En definitiva, las probabilidades obtenidas para la primera capa, de 0 a 8 *leakers*, son:

$$\begin{aligned} p_{l_{0,1}} &= 0,100 = 1 \cdot 1,000 \cdot 0,100 \\ p_{l_{1,1}} &= 0,267 = 8 \cdot 0,250 \cdot 0,133 \\ p_{l_{2,1}} &= 0,311 = 28 \cdot 0,063 \cdot 0,178 \\ p_{l_{3,1}} &= 0,208 = 56 \cdot 0,016 \cdot 0,237 \\ p_{l_{4,1}} &= 0,087 = 70 \cdot 0,004 \cdot 0,316 \\ p_{l_{5,1}} &= 0,023 = 56 \cdot 0,001 \cdot 0,422 \\ p_{l_{6,1}} &= 0,004 = 28 \cdot 0,000 \cdot 0,563 \\ p_{l_{7,1}} &= 0,000 = 8 \cdot 0,000 \cdot 0,750 \\ p_{l_{8,1}} &= 0,000 = 1 \cdot 0,000 \cdot 1,000 \end{aligned}$$

En la Figura 7 se aprecia la variación de la probabilidad de derribar un número específico de misiles perteneciente a una salva enemiga de 8, en las condiciones establecidas.



**Figura 7. Función de masa de probabilidades de aparición de leakers**

Se puede expresar lo anterior como:

$$\begin{aligned}
 P_{k0,1} &= P_{l8,1} \\
 P_{k1,1} &= P_{l7,1} \\
 &\dots \\
 P_{k8,1} &= P_{l0,1}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Dada la doctrina seleccionada (SSLSS), tenemos establecidas dos capas defensivas separadas por el *kill assessment* (L). La probabilidad de supervivencia propia, teniendo en cuenta las dos capas será:

$$\begin{aligned}
 P_s &= (p_{0,1} \cap p_{k0,2}) \cup \\
 &\cup (p_{1,1} \cap p_{k1,2}) \cup \\
 &\cup (p_{2,1} \cap p_{k2,2}) \cup \\
 &\dots \\
 &\cup (p_{8,1} \cap p_{k8,2}) \cup
 \end{aligned} \tag{18}$$

Los términos referidos a la segunda capa  $p_{kn,2}$  se calculan de manera similar a como en los Casos 1 y 2, teniendo en cuenta que se pretende derribar los  $n$  misiles atacantes, la probabilidad de que se dé es:

$$p_{kn,2} = (p_k)^n \tag{19}$$

Alternativamente, también es factible por la manera siguiente: la probabilidad de derribar 8 misiles es igual a la probabilidad de que haya 0 leakers, etc:

$$\begin{aligned}
p_{k8,2} = p_{l0,2} &= \binom{8}{0} 0,75^8 0,25^0 = 0,75^8 \Rightarrow \text{con 8 atacantes} \\
p_{k7,2} = p_{l1,2} &= \binom{7}{0} 0,75^7 0,25^0 = 0,75^7 \Rightarrow \text{con 7 atacantes} \\
&\dots \\
p_{k1,2} = p_{l7,2} &= \binom{1}{0} 0,75^1 0,25^0 = 0,75^1 \Rightarrow \text{con 1 atacante} \\
p_{k0,2} = p_{l8,2} &= \binom{0}{0} 0,75^0 0,25^0 = 0,75^0 \Rightarrow \text{con 0 atacantes}
\end{aligned} \tag{20}$$

Dado que  $p_{li,1}$  y  $p_{ki,2}$  son independientes:

$$p_{li,1} \cap p_{ki,2} = p_{li,1} \cdot p_{ki,2} \tag{21}$$

y que el suceso de derribar un misil en una segunda capa está condicionado a no haberlo derribado en la primera, podemos expresar  $p_{ki,2}$  como:

$$p_{ki,2} = p_{ki,2/li,1} \tag{22}$$

De manera que se puede aplicar el teorema de la probabilidad total:

$$P_s = \sum_{i=0}^n p_{li,1} p_{ki,2} \tag{23}$$

Regresando a (18) sustituimos para obtener, la probabilidad de supervivencia propia para el Caso 3:

$$\begin{aligned}
P_s &= 0,100 \cdot 0,75^0 + \\
&\quad + 0,267 \cdot 0,75^1 + \\
&\quad + 0,311 \cdot 0,75^2 + \\
&\quad + 0,208 \cdot 0,75^3 + \\
&\quad + 0,087 \cdot 0,75^4 + \\
&\quad + 0,023 \cdot 0,75^5 + \\
&\quad + 0,004 \cdot 0,75^6 + \\
&\quad + 0,000 \cdot 0,75^7 + \\
&\quad + 0,000 \cdot 0,75^8 \\
&= 0,596
\end{aligned} \tag{24}$$

Comprensivamente, operando (11) y (23) quedaría:

$$\begin{aligned}
 P_{s=} &= \sum_{l=0}^n p_{l_{i-1}} p_{k_{i-2}} \\
 &= \sum_{l=0}^n \binom{n}{l} (1-p_k)^l (p_k)^{n-l} (p_k)^l = \\
 &= \sum_{l=0}^n \binom{n}{l} (1-p_k)^l (p_k)^n = \\
 &= \sum_{l=0}^n \binom{n}{l} \left( \prod_{i=1}^S (1-p_{ki}) \right)^l \left( 1 - \prod_{i=1}^S (1-p_{ki}) \right)^n
 \end{aligned} \tag{25}$$

El número de misiles gastados en la primera capa está ya previamente calculado en el Caso 2, siendo estos 16. La dificultad de conocer el número adicional de misiles propios gastados en la segunda capa estriba en que debemos recurrir al cálculo de probabilidades. Por el concepto de esperanza matemática, considerando las probabilidades de la aparición de *leakers* en la primera capa, tenemos:

$$E(x) = \sum_{l=0}^n p_{l_{i-1}} x_l \tag{26}$$

Si hay 0 *leakers* no se gastarán misiles. Por seguir la técnica de lanzar salvas de  $S=2$  misiles (SS): si hay 1 *leaker* se gastarán 2 misiles, si hay 2 *leakers* serán 4 misiles los gastados, etc.:

$$x_l = S \cdot l \tag{27}$$

llegamos a la fórmula general:

$$E(S) = \sum_{l=0}^n p_{l_{i-1}} S \cdot l \tag{28}$$

Obtenemos el número de misiles gastados en la segunda capa:

$$\begin{aligned}
 E(S) &= 0,100 \cdot 0 + \\
 &\quad + 0,267 \cdot 2 + \\
 &\quad + 0,311 \cdot 4 + \\
 &\quad + 0,208 \cdot 6 + \\
 &\quad + 0,087 \cdot 8 + \\
 &\quad + 0,023 \cdot 10 + \\
 &\quad + 0,004 \cdot 12 + \\
 &\quad + 0,000 \cdot 14 + \\
 &\quad + 0,000 \cdot 16 + \\
 &= 3,999 \approx 4
 \end{aligned} \tag{29}$$

El número total de misiles gastados resulta ser la suma de los  $m_{-1}$  de la primera capa más los  $m_{-2}$  de la segunda.

$$m = m_{-1} + m_{-2} = n \cdot S + E(S) \tag{30}$$

Para el caso particular tratado serían 20 los misiles gastados, por el razonamiento anteriormente expresado:

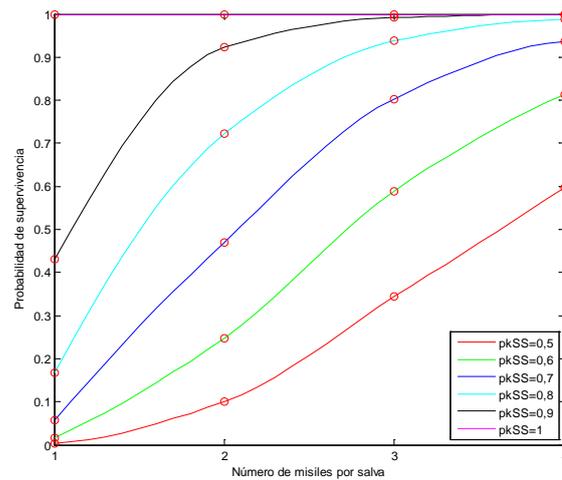
$$m = m_{-1} + m_{-2} = 16 + 4 = 20$$

Finalmente, comprobamos que el hecho de incorporar la evaluación de daños (L) posibilita elegir la reacción en una segunda etapa. Aquello repercute en que las probabilidades de supervivencia del buque propio pasen de un pobre 10% hasta quedarse próximo a un notable 60% con un coste acarreado de 4 misiles adicionales. La siguiente tabla sirve de resumen comparativo del planteamiento y resultado de los tres casos propuestos:

**Tabla 2. Resultados de los casos de estudio.**

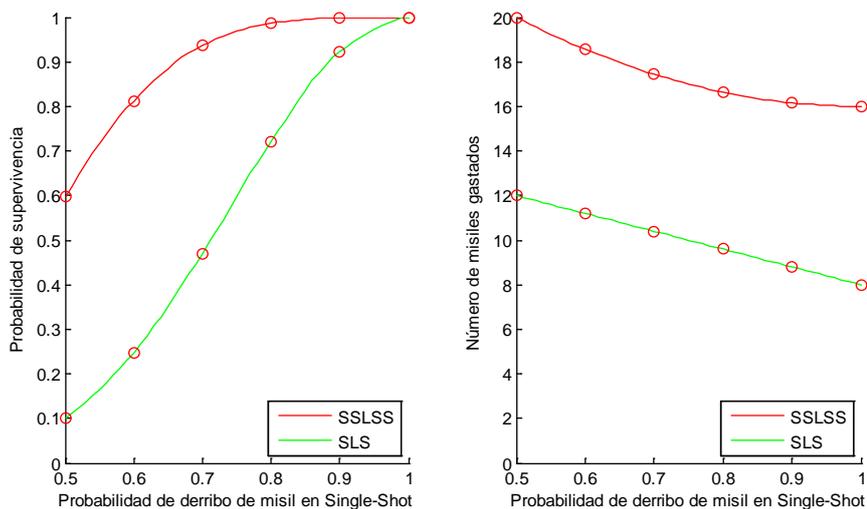
| Caso | Número de blancos | Doctrina  | Probabilidad de sobrevivir | Gasto en misiles propios |
|------|-------------------|-----------|----------------------------|--------------------------|
| 1    | 16                | S-S       | 1%                         | 32                       |
| 2    | 8                 | S-S       | 10%                        | 16                       |
| 3    | 8                 | S-S-L-S-S | 59%                        | 20                       |

La Figura 8 representa el cálculo de probabilidades de supervivencia en el caso de ser atacado con 8 misiles SAM, en función del número de misiles por salva empleados. Se puede apreciar gráficamente (por la curva roja inferior), el resultado obtenido en la Tabla 2 para  $p_{kSS} = 0,5$  y salva de 2 misiles (caso 2) y salva de 4 (caso 3). Es digno de mención que la probabilidad de supervivencia del buque depende en gran medida de la probabilidad de derribo de los misiles enemigos. Como se dijo, dicho valor está sujeto a fuertes aleatoriedades, si bien, la elección de la condición óptima del lanzamiento de cada misil y la bondad de las especificaciones de éstos puede repercutir muy positivamente.



**Figura 8. Probabilidades de supervivencia propia  $P_s$  para ataque de 8 misiles con respuesta de 1 a 4 misiles por salva, sin kill assessment**

La Figura 9 (Izq.) pone de relieve la doble influencia en la probabilidad de supervivencia  $P_s$ , tanto de la probabilidad de derribo del misil atacante  $p_k$ , como del número de misiles propios lanzados  $S$ : SLS (salva 1+1) y SSLSS (salva 2+2). En la parte izquierda se muestra el número de misiles empleados para contrarrestar los 8 misiles atacantes. Se deduce que aunque las probabilidades de supervivencia en función de la estrategia SLS elegida es únicamente dependiente del número de misiles propios lanzados, la introducción de un *kill assessment* produce un ahorro del número de misiles propios a lanzar. Por ejemplo, para los 8 misiles atacantes, gastaríamos 16 en SS (caso 2) frente a los 12 estimados en SLS. La indisponibilidad de misiles propios redonda en un detrimento de la probabilidad de supervivencia del buque, vía aumento de susceptibilidad.



**Figura 9 (Izq.). Probabilidades de supervivencia propia  $P_s$  función de la probabilidad de derribo del misil enemigo  $p_{kSS}$ , empleando SLS (salva 1+1) y SSLSS (salva 2+2). (Dcha.) Número de misiles gastados**

## Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian la extrema conveniencia de que el sistema de combate de un buque, en demanda de su supervivencia, monte sensores capaces de efectuar evaluación de daños efectuados a misiles atacantes (*kill assessment*), así como tener la garantía de contar con los misiles propios más adecuados, y que éstos sean lanzados en el momento y condiciones oportunas.

En definitiva, con este artículo se ha tratado de cubrir parcialmente el vacío encontrado en la mayoría de las fuentes consultadas, acerca de la resolución práctica del problema aplicado al cálculo y mejora de las probabilidades de supervivencia del buque propio cuando sufre el ataque de misiles anti-buque.

## Referencias bibliográficas

- Aviv, Y., & Kress, M. (1997). *Evaluating the Effectiveness of Shoot-Look-Shoot Tactics in the Presence of Incomplete Damage Information*. Obtenido de Military Operations Research, V3 N1: <[http://faculty.nps.edu/mkress/docs/SLS\\_BDA\\_Aviv\\_Kress97.pdf](http://faculty.nps.edu/mkress/docs/SLS_BDA_Aviv_Kress97.pdf)>
- Ball, R. E. (2003). *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*. AIAA.
- Bellido, R. (2003). *Apuntes de Sistemas de Armas Navales*. UPCT.
- Bourn, S. (2012). *Probabilistic Shoot-Look-Shoot Combat Models*. Obtenido de University of Adelaide: <<https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/73043/8/02whole.pdf>>
- Bradford, W. L. (1992). *The Theoretical Layered Air-Defence Capability of a Ship Engaged Against Multiple Anti-Ship Capable Missile Attacks*. Obtenido de Department of Defense. Australia: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a258388.pdf>>
- Constant, J. N. (1981). *Fundamentals of Strategic Weapons. Offense and Defense Systems*. Martinus Nijhoff.
- Dutta, D. (2014). *Probabilistic analysis of anti-ship missile Defence effectiveness*. Obtenido de Defence Science Journal, Vol. 64, No. 2: <<http://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/3532/3752>>
- González Morales, A. (2013). *El Mantenimiento de Sistemas. Fundamentos y Estrategias*. ETSIN.
- Hunt, L. M. (1992). *Integration of Hard-Kill and Soft-Kill Systems for More Effective Fleet Air Defense*. Obtenido de Naval Studies Board: <[https://books.google.es/books?id=vkkrAAAAYAAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?id=vkkrAAAAYAAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>
- Ito, H. (1995). *A Study of the Measures of Effectiveness for the JMSDF Aegis Destroyer in a Littoral, Air Defense Environment*. Obtenido de Naval Postgraduate School: <<https://core.ac.uk/download/pdf/36701023.pdf>>
- Morales Sánchez, P. (2003). *Apuntes de Plataformas Navales*. UPCT.
- NATO. (2002). *ATP 1(D) VOLUME I. Allied Maritime Tactical Instructions and Procedures*. Navy Warfare Library.
- NATO. (2010). *MTP-1 (E) VOLUME I. Multinational Maritime Tactical Instructions and Procedures*.
- Smith, R. M. (2010). *Using Kill-Chain Analysis to Develop Surface Ship CONOPS to Defend Against Anti-Ship Cruise Missiles*. Obtenido de Naval Postgraduate School: <[https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/5345/10Jun\\_Smith\\_Roy.pdf?sequence=1](https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/5345/10Jun_Smith_Roy.pdf?sequence=1)>
- Warleta, J. (1973). *Fiabilidad. Bases Teóricas y Prácticas*. INTA.
- Washburn, A., & Kress, M. (2009). *Combat Modeling*. Springer.
- Wilkening, D. A. (1999). *A Simple Model for Calculating Ballistic Missile Defense Effectiveness*. Obtenido de Science & Global Security, 1999, Volume 8:2, pp.183-215: <[https://cisac.fsi.stanford.edu/sites/default/files/Simple\\_Model\\_for\\_BMD.pdf](https://cisac.fsi.stanford.edu/sites/default/files/Simple_Model_for_BMD.pdf)>

## RIESGO DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES EN EL ENTORNO MILITAR

TN (CIA-EOF) D. Luis Francisco Sánchez Álvarez<sup>1\*</sup>.

<sup>1</sup>Electromagnetic Measurements Centre of the Spanish Navy (CEMEDEM), Spanish Naval Academy, Plaza de España s/n, 36920 Marín, Pontevedra, Spain

\*Corresponding author: L.F. Sánchez (lsanalv@fn.mde.es)

D. Tomas Fernández Ibañez<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria (tomas.fernandez@unican.es)

### Resumen

Un buque de guerra moderno es una plataforma que alberga diferentes sistemas electrónicos operando a multitud de frecuencias y con potencias que pueden llegar a alcanzar los MW. Todos los sistemas electrónicos que transmiten señales generan radiaciones electromagnéticas, los riesgos que generan se denominan «*RADIATION HAZARDS*» (RADHAZ) y pueden afectar negativamente a la dotación embarcada, por lo que se hace necesario a que se está expuesto en todo momento, para que se puedan tomar las medidas oportunas. Este artículo pretende analizar los riesgos que en el entorno militar puede producir.

**Palabras clave:** RADHAZ, HERP, HERO, HERF.

### 1.- Regulación comunicaciones militares

Las comunicaciones en España, en el ámbito militar están regladas por parte del Ministerio de Defensa. En el ámbito naval, el Estado Mayor de la Armada, mediante la publicación ACP 176 ESP NAVY SUPP-1(A) [1], describe la organización y los medios que se emplean.

La Orden DEF/2639/2015, de 3 de diciembre, por la que se establece la Política de los Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones del Ministerio de Defensa, recoge que el Ministerio de Defensa dispone de una RED GLOBAL DE TELECOMUNICACIONES compuesta por dos dominios:

- Recursos propios (Sistema de Telecomunicaciones Militares).
- Recursos externos (dos redes privadas virtuales, una para voz y otra para datos, denominadas de PROPÓSITO GENERAL).

En función del servicio que prestan se clasifican en:

- Sistemas de Mando y Control.
- Sistemas de Propósito General.

Tanto las redes de mando y control como las específicas militares tienen que ser capaces de permitir una interconexión completa: comunicaciones tierra-buque, tácticas de fuerza naval, tierra-aire, aire-aire, buque-aire..., y todas las combinaciones posibles. Pero no podemos olvidar la interconexión con los sistemas civiles. Para implementar estos sistemas, se dispone de una serie de redes, sistemas y servicios que se enumeran en los siguientes apartados. Todos estos servicios deben estar amparados en la legislación en vigor, especialmente:

- Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [2], que se encarga de asignar ciertos rangos de frecuencia para el uso del Ministerio de Defensa con fines de seguridad nacional.
- Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico [3], se asigna el marco jurídico en el que el Ministerio de Defensa debe de interrelacionar con el espectro radioeléctrico. Con el fin de evitar interferencias, sobre todo a día de hoy, dada la inmensa saturación del espectro radioeléctrico y la existencia de numerosas compañías que pagan por poder usarlo, es especialmente necesario cumplir las normativas en [2] y

[3], con todo lo que ello implica, tanto para evitar generar interferencias sobre sistemas externos como para no sufrirlas.

## 2.- Sistemas electrónicos militares

Los sistemas electrónicos que implementan las plataformas navales para poder interconectarse se pueden clasificar en dos tipos: sistemas exteriores y los de uso propiamente interno.

Los sistemas exteriores son aquellos que permiten interrelacionar a la plataforma con el mundo exterior, mediante diversos tipos y modelos de antenas:

- HF («*High Frequency*»)-TX (transmisión), TRX (transmisión y recepción) y HF-RX (recepción)
- UHF («*Ultra High Frequency*»)-VHF («*Very Low Frequency*»).
- Entretenimiento.
- SATCOM («*SATellite COMmunications*»).
- Sistemas de navegación.
- Radares.
- Sistemas de contramedidas de comunicaciones y radar.
- Sensores.

Tal y como su propio nombre indica, son aquellos subsistemas que permiten las comunicaciones entre el buque y el exterior. Cubren tanto las bandas de frecuencias militares como civiles, y son capaces de operar con otros Buques Unidad o Instalación (BUIs) a cualquier tipo de distancia para establecer enlace.

Los sistemas fundamentales para servicio interno de la plataforma son:

- Distribución de alimentación (corriente).
- Distribución de datos.
- Distribución y control de las señales del sistema de navegación desde los equipos fuente (giroscópicas, correderas, o sistema de viento).
- Teléfonos automáticos y auto excitados.
- Sistema de comunicaciones interiores por hilo radiante.
- Sistemas de órdenes con amplificador central y de intercomunicadores.
- Sistemas de entretenimiento (distribución de televisión y radio).
- Sistemas de alarmas, seguridad y aviso.
- Sistemas de órdenes y medidas.
- Sistemas informáticos y de gestión.

## 3.- Riesgos de las radiaciones electromagnéticas

Los sistemas transmisores instalados a bordo, principalmente los exteriores aunque también alguno de los sistemas de uso interno pero en mucho menor grado, generan radiación electromagnética («*ElectroMagnetic Radiation*», EMR), produciendo riesgos de radiación peligrosa conocidos como *RADiation HAZards*, o RADHAZ. Hay dos tipos de radiaciones: no ionizantes e ionizantes.

Las radiaciones no ionizantes, que son aquellas cuya energía es demasiado baja para ionizar la materia. Engloban las fuentes desde 0 HZ (campos estáticos) hasta frecuencias de 300 GHz. Este tipo de radiación se incluye la generada por: líneas de alta tensión, equipos de comunicaciones, radares, direcciones de tiro, contramedidas...

Por el contrario, las ionizantes son aquellas que poseen la energía suficiente como para liberar electrones de los átomos, alterando los enlaces.

En el ámbito militar, predominan las fuentes no ionizantes, por eso que serán las que abordemos. Los tipos de riesgos que originan se clasifican:

- Personal («*Hazards of Electromagnetic Radiation to Personnel*», HERP): La radiación producida por transmisores de alta potencia puede ocasionar daños en las personas cuando se encuentran en las inmediaciones de las antenas transmisoras. En función del tipo de señal (onda continua / pulsada) los efectos son distintos (calor / desgarros). Además, se pueden inducir altos voltajes que produzcan quemaduras.
- Combustibles («*Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel*», HERF): Abarca los peligros de que las transmisiones de radiofrecuencia (RF) durante las operaciones de abastecimiento de combustible, puesto que eventualmente podrían llegar a provocar la ignición de los vapores de dicho combustible cuando éste está en contacto con el aire [4].
- Munición («*Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance*», HERO): Los dispositivos EEDs («*Electro Explosive Devices*») se pueden ver afectados por la energía de RF, ya que una corriente inducida, en función del nivel y de la frecuencia, puede provocar el disparo prematuro, la explosión o la inoperatividad de la munición.
- Sistemas electrónicos de seguridad crítica: como por ejemplo interferencias con equipos y dispositivos médicos electrónicos.

Los riesgos anteriormente indicados generan los siguientes efectos:

- **Biofísicos directos:** los producidos en el cuerpo humano causados directamente por su presencia en un campo electromagnético, entre ellos [5]:
  - Efectos térmicos: calentamiento de los tejidos por la absorción de los mismos de energía procedente de los campos electromagnéticos.
  - Efectos no térmicos, como la estimulación de los músculos, de los nervios o de los órganos sensoriales; estos podrían ser perjudiciales.
  - Corrientes en las extremidades.
- **Indirectos:** aquellos causados por la presencia de un objeto en un campo electromagnético que pueda entrañar un riesgo para la salud o la seguridad, como:
  - Interferencias con equipos y dispositivos médicos electrónicos.
  - Riesgo de proyección de objetos ferromagnéticos en campos magnéticos.
  - Activación de dispositivos electro-explosivos.
  - Incendios y explosiones de materiales inflamables.
  - Corrientes de contacto.

### 3.1.- HERP

Para la prevención riesgos de las personas, RADHAZ HERP, gobiernos y organismos internacionales han establecido diversas legislaciones y estándares, todos ellos caracterizados por introducir un margen de seguridad para el personal. La inmensa mayoría de estos estándares especifican dos límites distintos: **entornos no controlados** con unos niveles de exposición para el público en general y **entornos controlados** con unos niveles de exposición para el público en ocupacional (trabajadores).

La legislación que fija las medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas en entornos no controlados para el público en general en España es el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre, que a su vez se basa en los niveles propuestos para el público en general por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante («*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*», ICNIRP) de 1998 [6]. En el ámbito europeo, la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea de 12 de julio de 1999 [7], adopta los mismos niveles.

La directiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2013 [5] establece las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los campos electromagnéticos, fijando unos niveles máximos de exposición. Esta directiva europea ha sido transpuesta al ordenamiento jurídico español, mediante su publicación en el R.D. 299/2016 [8]. Contempla, para el ámbito militar, que «Dadas las especificidades de las fuerzas armadas, y para permitirles un funcionamiento y una interoperabilidad efectivos, también en ejercicios militares internacionales conjuntos,

los Estados miembros deben aplicar sistemas de protección equivalentes o más específicos, tales como las normas aprobadas internacionalmente, por ejemplo las normas de la OTAN, siempre que se eviten los efectos adversos para la salud y los riesgos para la seguridad».

Los niveles aplicables en el ámbito militar para España se encuentran recogidos en el STANAG («*Standardization Agreement*») 2345 de la NSA («*NATO Standardization Agency*») [9] y en el «*STANAG 1380 E3 RADHAZ NATO Naval Radio and Radar Radiation HAZARD Manual AEC-02*» [10]. El 22 de junio de 2015, por Boletín Oficial de Defensa, se implanta en España el STANAG 2345 MEDSTD (Edición 4), que incluye grandes cambios con respecto a su versión anterior. La nueva edición se basa en la IEEE Std C95.1-2345<sup>TM</sup> -2014.

### 3.2.- HERF

Según [4], la posibilidad de ignición de los vapores procedentes del fuel se puede producir durante operaciones de abastecimiento de combustible (del propio buque, de aeronaves, de zodiacs, de armamento...) debido a las señales de RF del ambiente. Estas posibilidades se ven drásticamente reducidas si se toman ciertas premisas: antenas transmisoras fuera de las proximidades de las estaciones de abastecimiento, sistemas presurizados, o elección de combustibles en los que las condiciones para la ignición sean muy restrictivas (JP-5, «*Jet Propulsion*»).

Para que se produzca la ignición de un combustible debido a un arco de RF inducida deben acontecer, de forma simultánea, las siguientes condiciones (lo cual hay que decir que es muy poco probable):

- Mezcla inflamable de aire y combustible.
- Arco con suficiente energía para producir la ignición.
- El espacio a través del cual salta el arco debe tener una mínima distancia.

Se aplican una serie de criterios para minimizar la posibilidad de ignición:

- No transmitir con ningún equipo de la aeronave y/o vehículo que está siendo reabastecido, ni de ninguno colindante.
- No hacer o deshacer ninguna conexión eléctrica, toma de masa estática, conexión de amarre o cualquier otra conexión metálica del vehículo. Hacer las conexiones necesarias antes, y deshacerlas cuando se concluye, evitando manipularlas durante la maniobra de repostaje.

#### 3.2.1.- Restricciones de transmisores

Según [4], los radares y sistemas de comunicaciones que trabajan por encima de 225 MHz, y que son capaces de producir iluminaciones directas sobre las áreas de manipulación del combustible con una densidad de potencia de pico de 5 W/cm<sup>2</sup> o superior, deben cumplir las siguientes restricciones:

- Cesar la transmisión durante las operaciones de petróleo.
- Inhibir de la iluminación las áreas en las que se desarrolla el petróleo.
- Mantener una distancia en la cual la densidad de potencia, desde el transmisor a la zona de petróleo, sea inferior a 5 W/cm<sup>2</sup>.

Para equipos de comunicaciones que trabajan por debajo de 225 MHz las restricciones son diferentes:

- Las antenas que radien 250 vatios o menos, deben ser instaladas a no menos de 15 metros de las zonas de manipulación de combustibles.
- Para las antenas que radien más de 250 vatios, la distancia mínima a la zona de manipulación de combustibles debe ser tal que la densidad de potencia en esa zona no supere los 0.009 mW/cm<sup>2</sup>.

Para el cálculo de las distancias se emplean las fórmulas de la ecuación (1) de [4]:

$$D = \sqrt{\frac{PG}{4\pi PD}} \quad (1)$$

D = distancia (metros).

P = potencia transmisora de pico (vatios)

G = ganancia de la antena =  $10^{\frac{\text{ganancia de la antena en DBi}}{10}}$

$\pi = 3.14159$  (pi).

PD = densidad de potencia deseada ( $W/m^2$ )

Si no se puede respetar la distancia de seguridad, ya que el espacio a bordo de una plataforma naval es un bien muy preciado, se efectuará la manipulación en la zona de petróleo con el equipo transmisor apagado.

### 3.3.- HERO

En función de la susceptibilidad electromagnética, se clasifica la munición [11] en cuatro clases:

- HERO segura (*HERO SAFE*).
- HERO susceptible (*HERO SUSCEPTIBLE*).
- HERO no fiable (*HERO UNREALIBLE*).
- HERO no segura (*HERO UNSAFE*).

En función del tipo de munición, es necesario determinar distancias de seguridad, calcular el entorno de RF, así como generar un plan de equipos que se pueden poner a transmitir en cada situación («*Emissions Control*», EMCON).

En la publicación NAVSEA OP 3565/VOLUME 2 [11], así como a partir del Manual Interejércitos [12], se obtienen distancias de seguridad y condiciones de manipulación, transporte y almacenaje para la munición. El objetivo es la determinación del plan EMCON, ya bien sea mediante las distancias de seguridad en función de los distintos equipos / munición o bien a través de los códigos SRAD («*Susceptibility RADHAZ Designator*») y TRAD («*Transmitter RADHAZ Designator*») [10].

### 4.- Conclusiones

En el presente artículo se han introducido los diferentes riesgos que generan los campos electromagnéticos no ionizantes en el entorno militar. Pese a que no se “puedan ver” los campos electromagnéticos hay que conocer los riesgos que pueden producir, con el fin de evitar sorpresas no deseadas.

## Bibliografía

- [1] MINISDEF, *ACP 176 ESP NAVY SUPP-1(A) ORGANIZACIÓN DE LAS COMUNICACIONES NAVALES*, ESTADO MAYOR DE LA ARMADA.
- [2] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, *CNAF 2013 (B.O.E. de 9 de mayo 2013, actualizado B.O.E. de 16 de abril 2015)*., Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, 2015.
- [3] Órgano Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, *Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico*, BOE núm. 57 de 08 de Marzo de 2017.
- [4] NAVSEA, *NAVSEA OP 3565/NAVAIR 16-1-529 VOLUME 1. ELECTROMAGNETIC RADIATION HAZARDS (U) (Hazards to Personnel, Fuel and other Flammable Material)*, February 2003.
- [5] Diario Oficial de la Unión Europea, *DIRECTIVA 2013/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de junio de 2013 sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos)*, 2013.
- [6] M. d. Presidencia, *Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre (RCL 2001\2415, 2597)*.
- [7] C. d. I. U. Europea, *Recomendación del Consejo relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)*, 1999/519/CEE.
- [8] *Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos*, MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, Publicado en BOE núm. 182 de 29 de julio de 2016 .
- [9] NATO Standardization Agency, «*Stanag No. 2345. Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields 3 kHz to 300 GHz (Edition 3)*.», NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2003.
- [10] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION, «*NATO NAVAL RADIO AND RADAR RADIATION HAZARD MANUAL AECF-02(D) STANAG 1380 EDITION 5 DRAFT*,» THE NATO STANDARDIZATION OFFICE (NSO), 2014.
- [11] NAVSEA, *NAVSEA OP 3565/NAVAIR 16-1-529 VOLUME 2. ELECTROMAGNETIC RADIATION HAZARDS (U) (Hazards to Ordnance)*, February 2003 12 revision.
- [12] M. d. D. E. M. C. d. Planes, *Manual Interejércitos para el almacenamiento de municiones y explosivos para las Fuerzas Armadas españolas.*, MINISDEF, 2004.

## RESISTENCIA DEL ESLABÓN OTAN Y EL GUARDABOS TIPO “D” DURANTE LA MANIOBRA DE REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES

TN (CIA-ETO) D. Jesús Manuel Cillero Ares  
Arsenal Militar de Ferrol/ Ramo de Plataforma

### Resumen

Presentación de algunos resultados, obtenidos de Informes elaborados en la Sección Técnica en 2016, relativos a la resistencia del Eslabón OTAN -en acero AISI 4140H- y el Guardacabos Tipo “D” durante las maniobras de remolque entre buques no remolcadores. Se incluye un conjunto de Tablas donde se relaciona, de forma estimada, la resistencia a remolque a diferentes velocidades para distintos tipos de buques de la Armada Española, calculadas según el procedimiento indicado en los siguientes documentos: U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002) y ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008).



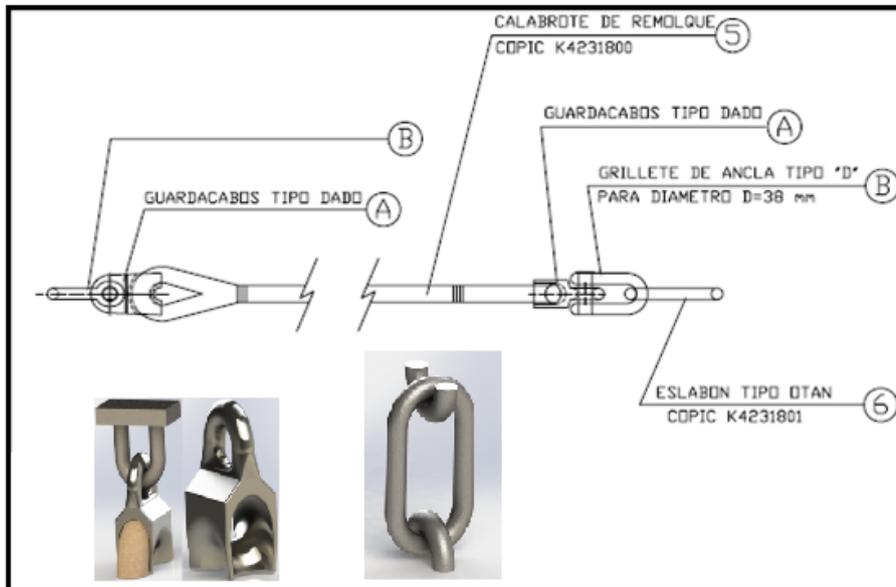
### Índice

1. INTRODUCCIÓN.
2. EL ESLABÓN OTAN.
3. EL GUARDACABOS TIPO “D”.
4. RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES.
  - 4.1. LHD Juan Carlos I.
  - 4.2. BAC Cantabria.
  - 4.3. BAC Patiño.
  - 4.4. F100 Álvaro de Bazán.
  - 4.5. F80 Santa María.
  - 4.6. P40 Meteoro.
  - 4.7. P70 Serviola.
  - 4.8. RESUMEN de las cargas promedio y extremas durante el remolque.
5. CONCLUSIONES.

#### 1.- Introducción

Dentro del marco de colaboración del **Arsenal Militar de Ferrol** y la **Oficina de Normalización N59** -Maniobra- del Servicio de Normalización de la Armada, durante el primer trimestre del año 2016 se realizaron una serie de estudios para evaluar la capacidad y composición química de algunos eslabones que conforman la maniobra de remolque de los buques no remolcadores. Algunos de los resultados obtenidos se presentan a continuación:

- Carga máxima Eslabón OTAN (6) para un acero AISI 4140H.
- Propuesta de: una nueva Tabla de dimensiones para los diferentes cuatro modelos de Guardacabos Tipo “D” (A), así como de las características mínimas del acero empleado en la fabricación de estos Guardacabos.



## 2.- El eslabón OTAN

### 2.1.- Descripción geométrica

NATO-UNCLASSIFIED

ATP-43(C)/MTP-43(C)

ANNEX A TO CHAPTER 3

R

## NATO STANDARD TOWING LINK (STANAG 1289)

### 3A01 Introduction

1. The NATO Standard Towing Link is to be used during ship-to-ship towing operations as an interface between the towing equipments of the towing ship and that of the ship towed whichever of the two ships provides the equipment, in order to improve interoperability.
2. Ships of less than 1000 metric tons displacement, other than tugs are not obliged to have a Standard Towing Link.
3. The interface will be at the presented end of one or both ships' towing hawsers.
4. The NATO Standard Towing Link shall conform with the dimensions in Figure 3A-1.
5. The strength of the link is the responsibility of the Providing Nation.

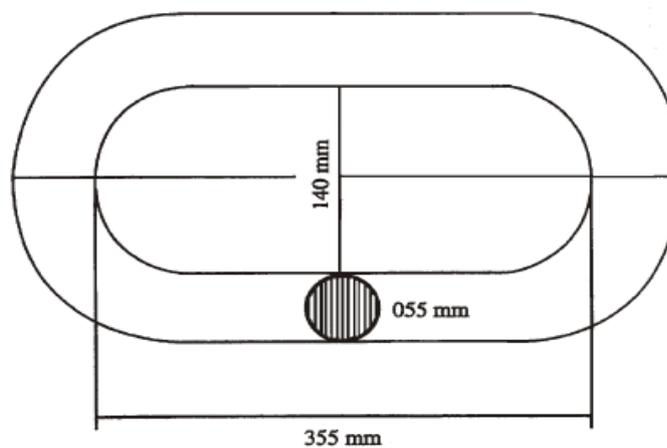


Figure 3A-1. Dimensions of NATO Standard Towing Link

## 2.2.- Propiedades mecánicas

### Chemical Composition

The chemical composition AISI 4140H alloy steels is outlined in the following table.

| Element        | Content (%)    |
|----------------|----------------|
| Iron, Fe       | 96.585 - 97.93 |
| Chromium, Cr   | 0.75 - 1.2     |
| Manganese, Mn  | 0.65 - 1.1     |
| Carbon, C      | 0.37 - 0.44    |
| Molybdenum, Mo | 0.15 - 0.3     |
| Silicon, Si    | 0.15 - 0.3     |
| Sulfur, S      | ≤0.040         |
| Phosphorous, P | ≤0.035         |

| Properties | Metric                 | Imperial                 |
|------------|------------------------|--------------------------|
| Density    | 7.85 g/cm <sup>3</sup> | 0.284 lb/in <sup>3</sup> |

### Mechanical Properties

The mechanical properties of AISI 4140H alloy steels are displayed in the following table.

| Properties            | Metric   | Imperial   |
|-----------------------|----------|------------|
| Tensile strength      | 1150 MPa | 167000 psi |
| Yield strength        | 1050 MPa | 152000 psi |
| Modulus of elasticity | 205 GPa  | 29700 ksi  |
| Bulk modulus          | 140 GPa  | 20300 ksi  |
| Shear modulus         | 80 GPa   | 11600 ksi  |
| Poisson's ratio       | 0.29     | 0.29       |
| Elongation at break   | 17.50%   | 17.50%     |
| Reduction of area     | 55%      | 55%        |
| Hardness, Brinell     | 341      | 341        |
| Hardness, Vickers     | 361      | 361        |
| Hardness, Knoop       | 369      | 369        |
| Hardness, Rockwell C  | 37       | 37         |
| Hardness, Rockwell B  | 99       | 99         |

### Thermal Properties

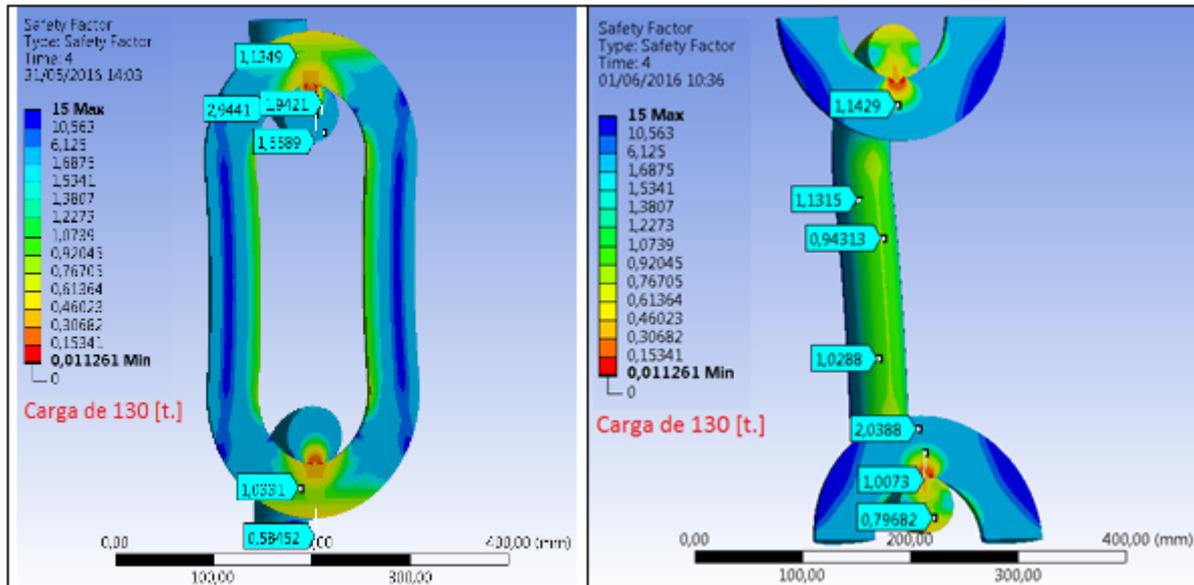
The thermal properties of AISI 4140H alloy steels are given in the following table

| Properties   | Metric      | Imperial                         |
|--|-------------|----------------------------------|
| Thermal expansion co-efficient (@0-100°C/32-212°F) | 12.2 µm/m°C | 6.78 µin/in°F                    |
| Thermal conductivity                               | 42.6 W/mK   | 296 BTU.in/hrft <sup>2</sup> .°F |

### 2.3.- Estimación de la carga de rotura

Se realizan diferentes simulaciones por EEF para cargas: entre 40 y 220 [t.]

**Factor de Seguridad** >1. (deformaciones elásticas),  $0.91 < \text{Factor de Seguridad} < 1$ . (comienzo de las deformaciones inelásticas), **Factor de Seguridad** < 0.91 (alta probabilidad de rotura).



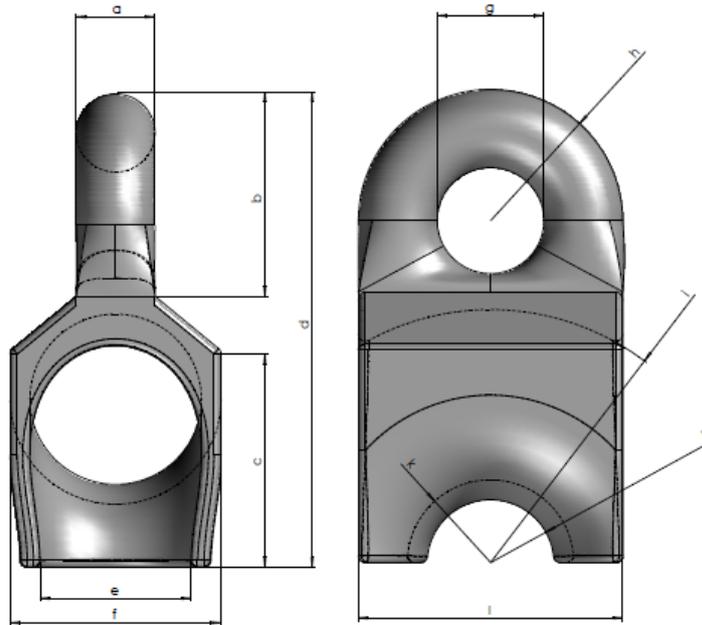
Carga de rotura del eslabón OTAN fabricado en acero AISI 4140H: 130 [t.] == 1275 [kN]

## 3.- El guardacabos tipo "D"

### 3.1.- Descripción geométrica

SE HA PROPUESTO LA SIGUIENTE TABLA DE COTAS:

Sustituir la Figura A1 y las cotas de la actual Norma Militar: NME - 2958:2014 por la figura y tabla de cotas siguientes:

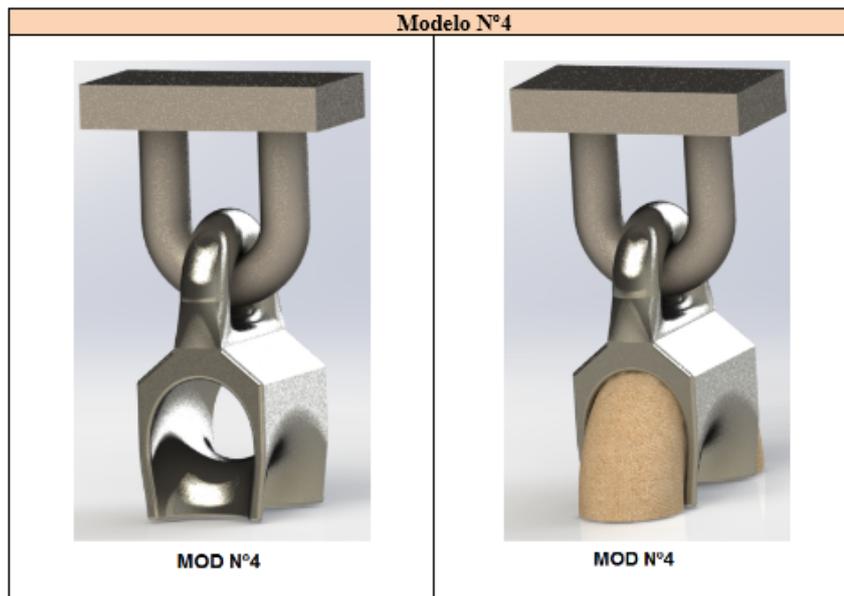


| Desplazamiento (t) |        |        | NUEVA TABLA PROPUESTA DE COTAS DE GUARDACABOS TIPO "D" |     |     |     |     |     |    |    |     |    |    |     |
|--------------------|--------|--------|--|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|
| MOD                | Desde: | Hasta: | a  | b   | c   | d   | e   | f   | g  | h  | i   | j  | k  | l   |
| Nº1                | 1000   | 5000   | 56   | 145 | 136 | 339 | 90  | 106 | 76 | 94 | 165 | 67 | 75 | 188 |
| Nº2                | 5000   | 10000  | 57   | 146 | 140 | 340 | 98  | 120 | 76 | 95 | 169 | 60 | 71 | 190 |
| Nº3                | 10000  | 17000  | 58   | 147 | 144 | 341 | 106 | 130 | 76 | 96 | 173 | 55 | 67 | 192 |
| Nº4                | 17000  | 27000  | 59   | 148 | 155 | 342 | 122 | 150 | 76 | 97 | 181 | 45 | 59 | 194 |

Tolerancia: 5% en cada Cota.  
 Redondeo Aristas: radio curvatura 4 mm.  
 Unidades: mm.

| MOD | Peso Est. (Kgf) |
|-----|-----------------|
| Nº1 | 15,49           |
| Nº2 | 17,05           |
| Nº3 | 17,67           |
| Nº4 | 18,99           |

**Ejemplo renderizado del modelo "4".**



### 3.2.- Propiedades mecánicas

Para determinar las características mínimas se han considerado como referencia las requeridas por el Documento Americano (805-2130889-0) y los siguientes tres tipos de acero:

- X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462), actualmente incluido en la NME-2958:2011.
- AISI 4140H (1.7225), de uso comercial.
- AISI 630 H1025 (1.4542), de uso comercial.

Dado que el acero del Guardacabos trabajará en un ambiente marino se ha considerado necesario requerir un PRE (*Número Equivalente de Resistencia al Picado*) mínimo que garantice la conservación de las propiedades mecánicas del acero durante la vida útil de la pieza.

| Tabla Comparativa  |   | Documento americano<br>805-2130889-0 |                           | NME-2958:2011<br>X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) |                                   | Opción en estudio N1<br>AISI 4140H (1.7225) |                           | Opción en estudio N2<br>AISI 630 H1025 (1.4542) |                           |  |
|--|---|--------------------------------------|---------------------------|---|-----------------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|--|
| <b>Composición química</b>   | Elemento                                | Required (Máx.)                      | Desired (Min.)            | (Máx.)                                    | (Min.)                            | (Máx.)                                      | (Min.)                    | (Máx.)  | (Min.)                    |  |
|  | C                                       | 0,150                                | 0,140                     | 0,030                                     | 0,000                             | 0,440                                       | 0,370                     | 0,070   | 0,000                     |  |
|  | Mn                                      | 1,000                                | 0,750                     | 2,000                                     | 0,000                             | 1,100                                       | 0,650                     | 1,500   | 0,000                     |  |
|  | P                                       | 0,050                                | 0,000                     | 0,035                                     | 0,000                             | 0,035                                       | 0,000                     | 0,030   | 0,000                     |  |
|  | S                                       | 0,050                                | 0,000                     | 0,015                                     | 0,000                             | 0,040                                       | 0,000                     | 0,030   | 0,000                     |  |
|  | Si                                      | 1,500                                | 1,000                     | 1,000                                     | 0,000                             | 0,300                                       | 0,150                     | 0,500   | 0,000                     |  |
|  | Ni                                      | 1,000                                | 0,000                     | 6,500                                     | 4,500                             | 0,000                                       | 0,000                     | 5,000   | 3,000                     |  |
|  | Cr                                      | 14,000                               | 3,000                     | 23,000                                    | 21,000                            | 1,200                                       | 0,750                     | 17,000  | 15,000                    |  |
|  | Mo                                      | 0,500                                | 0,000                     | 3,500                                     | 2,500                             | 0,300                                       | 0,150                     | 0,600   | 0,000                     |  |
|  | N                                       | 0,000                                | 0,000                     | 0,220                                     | 0,100                             | 0,000                                       | 0,000                     | 0,000   | 0,000                     |  |
| Cu   | 0,000                                   | 0,000                                | 0,000                     | 0,000                                     | 0,000                             | 0,000                                       | 5,000                     | 3,000   |                           |  |
| <b>Tipo acero</b>  |   | Austenítico-Martensítico             | Austenoferrítico completo | Austenoferrítico (Duplex)                 | Austenoferrítico (Duplex)         | Austenoferrítico completo                   | Austenoferrítico completo | Ferrito-Martensítico                            | Austenoferrítico (Duplex) |  |
| <b>Propiedades Físicas</b>   |   | <b>Mínimas requeridas en Mpa</b>     |                           |   | <b>Mínimas disponibles en Mpa</b> |   |                           |   |                           |  |
|  | Tensile Strength (Rt)                   | 792,90                               |                           |   | 640,00                            |   | 1150,00                   |   | 1070,00                   |  |
|  | Yield Point (Rp0.2)                     | 586,05                               |                           |   | 460,00                            |   | 1050,00                   |   | 1000,00                   |  |
|  | Elongation mín.                         | 12,00%                               |                           |   | 20,00%                            |   | 17,50%                    |   | 12,00%                    |  |
| <b>PRE</b>   | Resistente al Picado si $40 < PRE < 60$ | Max.                                 | Min.                      | Max.                                      | Min.                              | Max.  | Min.                      | Max.  | Min.                      |  |
|  |   | 31,65                                | 19,00                     | 41,15                                     | 45,25                             | 18,19                                       | 17,245                    | 34,98   | 31                        |  |
| <b>MEJOR ACERO A CONSIDERAR COMO REFERENCIA PARA LA NUEVA NORMA -OPCIÓN N2-</b> AISI 630 H1025 (1.4542). De acuerdo con la norma EN 10088-1:2014, página -8-, Pt. -3.1 Aceros inoxidables-, "Los aceros inoxidables son aquellos que contienen, al menos, un 10,5% de cromo y un máximo de 1,2% de carbono." |   |                                      |                           |   |                                   |   |                           |   |                           |  |
| <b>Tensile Strength (Rt):</b> Resistencia a la tracción (Rt) en MPa.<br><b>Yield Point (Rp0.2):</b> El límite de Fluencia o Límite Convencional de Fluencia para el 0,2% de alargamiento permanente en MPa.  |   |                                      |                           |   |                                   |   |                           |   |                           |  |

#### **CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS REQUERIDAS PARA EL ACERO DEL GUARDACABOS: (son las consideradas para la simulación por EEF.)**

- 1) Resistencia a Tracción min. (Rt): 1070 [MPa].
- 2) Límite de Fluencia min. (Rp0.2): 1000 [MPa].
- 3) PRE mínimo: 31, o acero inoxidable ( $\geq 10.5\%Cr$  y  $\leq 1.2\%C$ ).

**Ejemplo:** un acero adecuado que cumple los requisitos anteriores sería el **AISI 630H1025 (1.4542)**.

<sup>1</sup> PRE: Número Equivalente de Resistencia al Picado. Resistente al picado cuando:  $40 < PRE < 60$ , según norma EN 10088-1:2014, página: 45, Tabla D.1. {PRE= Cr+3.3Mo+16, para aceros súper austeníticos / dúplex / ferríticos.}. {PRE= Cr+3.3Mo+30N, para aceros austeníticos con Mo>3%}. En la actualidad, el acero propuesto por el Documento americano no se considera Resistente al picado, dado que su PRE es inferior a 40.

### 3.3.- Estimación de la carga de rotura

Para cada uno de los cuatro modelos estudiados se han aplicado una Fuerza Mínima de Rotura (MBF) correspondiente a una estacha de “12 cabos sin empalme”, según UNE-EN ISO 1346:2012.

| MOD | Desplazamiento (t) |        | Diámetro Estacha (mm)<br>Según NME2958_Ed_2014 | MBFmax (kN)         |                      |
|-----|--------------------|--------|--|---------------------|----------------------|
|     | Desde más de:      | Hasta: |  | 8 cabos sin empalme | 12 cabos sin empalme |
| N1  | 1000               | 5000   | 80   | 750                 | 800                  |
| N2  | 5000               | 10000  | 88   | 900                 | 950                  |
| N3  | 10000              | 17000  | 96   | 1060                | 1120                 |
| N4  | 17000              | 27000  | 120  | 1600                | 1700                 |

*Fuerza Mínima de Rotura: Según UNE-EN ISO 1346:2012*

**JMCA:**  
Diámetro máximo 120mm; el Cantabria embarca una estacha de 104mm (19500 t < 27000t).

| REFERENCIAS       |                    |                       | Cargas Máximas de diseño para estudiar los diferentes Guardacabos; son algo superiores a las indicadas en la NME-2958 |                      |
|-------------------|--------------------|-----------------------|---|----------------------|
| BUQUE:            | $\Delta_{max}$ (t) | Diámetro Estacha (mm) | MBFmax (kN)   |                      |
|                   |                    |                       | 8 cabos sin empalme   | 12 cabos sin empalme |
| BAC Cantabria     | 19500              | 104                   | 1250  | 1320                 |
| LHD Juan Carlos I | 27000              | 120                   | 1600  | 1700                 |

**Se propone que el BAC Cantabria utilice un Guardacabos tipo “D” MOD N4, como el indicado en el presente informe.**

En este informe el Factor de seguridad Mínimo se considera igual al cociente entre el *Límite Elástico* y la *Tensión Máxima* en el modelo durante la prueba de carga.

Dadas las características mecánicas mínimas del acero considerado como referencia –AISI 630 H1025-:

- Límite Elástico Convencional (Rp0.2) no inferior a 1000 [MPa].
- Resistencia a tracción (Rt) no inferior a 1070 [MPa].

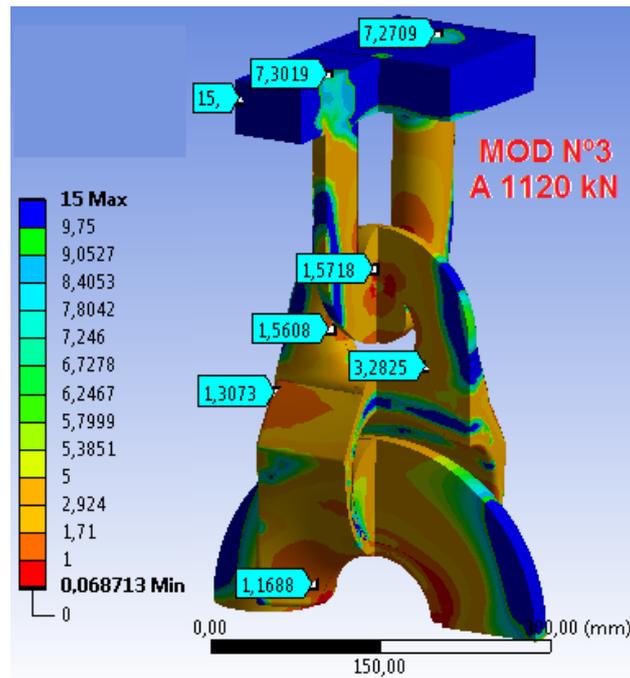
Un Factor de Seguridad igual a 1 implica una tensión máxima de trabajo en algún punto del modelo de hasta 1000 [MPa], por otro lado, si el Factor de Seguridad Mínimo es igual a  $(1000/1070 = 0.93)$  el guardacabos se encuentra al borde de la “*fractura virtual*”.

Se han diseñado dos elementos auxiliares para realizar cada simulación:

- Un grillete muy robusto, del mismo acero empleado para los guardacabos.
- Una estacha, de acero Naval Grado A.

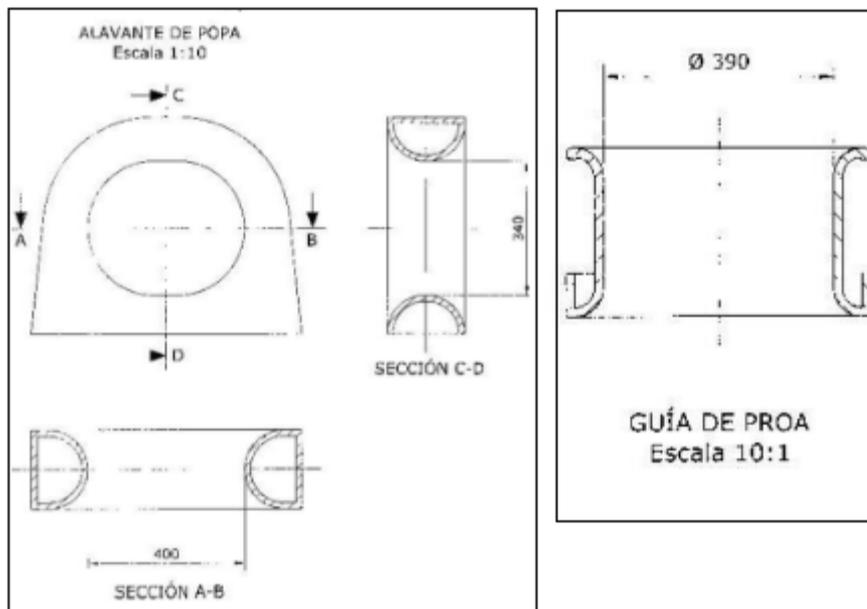
Para todas las simulaciones se ha considerado un Coeficiente de rozamiento entre la estacha y el Guardacabos de 0,10.

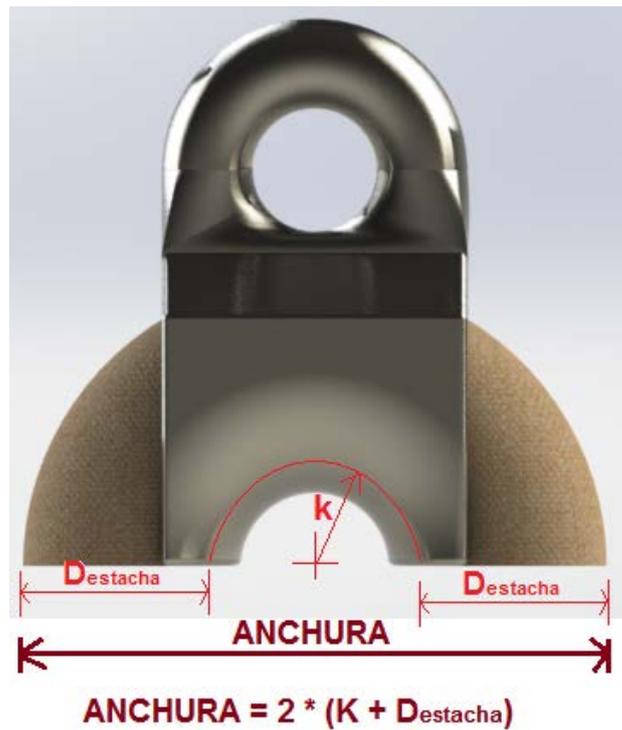
**Figuras de ejemplo:** {Estacha + Guardacabos + Grillete} durante el estudio de uno de los modelos.



### 3.4.- Restricciones dimensionales

El laboreo del Guardacabos y su estacha junto al eslabón OTAN se realiza a través del alavante de Popa y la Guía de Proa. La dimensión máxima del Guardacabos no debe ser superior al valor mínimo del siguiente conjunto de cotas: { 400, 390} mm.





| <b>ANCHURA = 2 x (K + D.ESTACHA )</b> |                       |          |                |                    |
|---------------------------------------|-----------------------|----------|----------------|--------------------|
| <b>MOD</b>                            | <b>D.ESTACHA (mm)</b> | <b>K</b> | <b>ANCHURA</b> | <b>ANCHURA MAX</b> |
| <b>Nº1</b>                            | 80                    | 75       | 310            | 390                |
| <b>Nº2</b>                            | 88                    | 71       | 318            | 390                |
| <b>Nº3</b>                            | 96                    | 67       | 326            | 390                |
| <b>Nº4</b>                            | 120                   | 59       | 358            | 390                |

La Tabla de cotas propuesta da lugar a una ANCHURA del conjunto (Guardacabos + Estacha) inferior a la cota máxima disponible - ANCHURA MAX-, por lo que queda comprobada la compatibilidad dimensional del conjunto anterior con el alavante de Popa y la Guía de Proa indicados.

## 4.- Resistencia durante el remolque entre buques no remolcadores

## 4.1.- LHD Juan Carlos I

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |                |               |               |               |               |
|--|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |                |               |               |               |               |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |                |               |               |               |               |
| CLASE BUQUE:   | LHD JUAN CARLOS I                                      |                |               |               |               |               |
| <b>PARAMETROS REF 1</b>  | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b>  | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados         | 0,0           | 0,0           | 0,0           | 0,0           |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.             | 27000         | 27000         | 27000         | 27000         |
| Área frontal viento:   | A <sub>T</sub>   | m <sup>2</sup> | 576,00        | 576,00        | 576,00        | 576,00        |
| Coef. Arrastre viento:   | C <sub>W</sub>   |                | 0,45          | 0,45          | 0,45          | 0,45          |
| Área proyectada hélices:   | A <sub>P</sub>   | m <sup>2</sup> | 31,81         | 31,81         | 31,81         | 31,81         |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |                | 2             | 2             | 2             | 2             |
| Vel. viento verdadero:   | V <sub>wind</sub>                                      | Nudos          | 20            | 20            | 20            | 20            |
| NÚM. Beaufort:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 24,00         | 26,00         | 28,00         | 30,00         |
| Coef. Rumbo:   | K  |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Resistencia Viento:  | R <sub>W</sub>   | t.             | 3,69          | 4,33          | 5,02          | 5,77          |
| Factor Resistencia:  | R <sub>H</sub> / $\Delta$                              |                | 0,25          | 0,60          | 1,20          | 2,00          |
| Resistencia Casco:   | R <sub>H</sub>   | t.             | 3,83          | 9,19          | 18,39         | 30,65         |
| Resistencia Estado Mar:  | R <sub>S</sub>   | t.             | 4,59          | 4,59          | 4,59          | 4,59          |
| Resistencia hélice:  | R <sub>P</sub>   | t.             | 9,29          | 20,91         | 37,18         | 58,09         |
| Resist. Buque Remolcado:   | R <sub>T</sub>   | t.             | 21,40         | 39,02         | 65,17         | 99,09         |
| Resist. Cable remolque:  | R <sub>WIRE</sub>                                      | t.             | 2,14          | 3,90          | 6,52          | 9,91          |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | <b>R=R<sub>T</sub>+R<sub>WIRE</sub></b>                | <b>t.</b>      | <b>23,54</b>  | <b>42,93</b>  | <b>71,69</b>  | <b>109,00</b> |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |                |               |               |               |               |
|  |  |                | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | <b>4,00</b>   | <b>6,00</b>   | <b>8,00</b>   | <b>10,00</b>  |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 20,00         | 20,00         | 20,00         | 20,00         |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | <b>R=R<sub>T</sub>+R<sub>WIRE</sub></b>                | <b>t.</b>      | <b>23,54</b>  | <b>42,93</b>  | <b>71,69</b>  | <b>109,00</b> |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | <b>R=R<sub>T</sub>+R<sub>WIRE</sub></b>                | <b>KIPS</b>    | <b>51,86</b>  | <b>94,55</b>  | <b>157,91</b> | <b>240,08</b> |
| NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)   |  |                | 78            | 77            | 79            | 82            |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |                |               |               |               |               |
| Carga extrema remolque:  | <b>KIPS</b>  |                | 78,00         | 164,00        | 330,00        | 550,00        |
| Carga extrema remolque:  | <b>t.</b>  |                | 35,41         | 74,46         | 149,82        | 249,70        |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | <b>t.</b>  |                | <b>23,54</b>  | <b>42,93</b>  | <b>71,69</b>  | <b>109,00</b> |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |                |               |               |               |               |

## 4.2.- BAC Cantabria

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |                |               |               |               |               |
|--|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |                |               |               |               |               |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |                |               |               |               |               |
| CLASE BUQUE:   | <b>BAC CANTABRIA</b>                                   |                |               |               |               |               |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD         | CASO A        | CASO B        | CASO C        | CASO D        |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados         | 0,0           | 0,0           | 0,0           | 0,0           |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.             | 19500         | 19500         | 19500         | 19500         |
| Área frontal viento:   | A <sub>T</sub>   | m <sup>2</sup> | 509,11        | 509,11        | 509,11        | 509,11        |
| Coef. Arrastre viento:   | C <sub>W</sub>   |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Área proyectada hélices:   | A <sub>P</sub>   | m <sup>2</sup> | 25,52         | 25,52         | 25,52         | 25,52         |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |                | 3             | 3             | 3             | 3             |
| Vel. viento verdadero:   | V <sub>wind</sub>                                      | Nudos          | 20            | 20            | 20            | 20            |
| NÚM. Beaufort:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 24,00         | 26,00         | 28,00         | 30,00         |
| Coef. Rumbo:   | K  |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Resistencia Viento:  | R <sub>W</sub>   | t.             | 7,25          | 8,51          | 9,87          | 11,33         |
| Factor Resistencia:  | R <sub>H</sub> / $\Delta$                              |                | 0,25          | 0,60          | 1,20          | 2,00          |
| Resistencia Casco:   | R <sub>H</sub>   | t.             | 2,77          | 6,64          | 13,28         | 22,13         |
| Resistencia Estado Mar:  | R <sub>S</sub>   | t.             | 4,59          | 4,59          | 4,59          | 4,59          |
| Resistencia hélice:  | R <sub>P</sub>   | t.             | 7,46          | 16,78         | 29,82         | 46,60         |
| Resist. Buque Remolcado:   | R <sub>T</sub>   | t.             | 22,06         | 36,51         | 57,56         | 84,65         |
| Resist. Cable remolque:  | R <sub>WIRE</sub>                                      | t.             | 2,21          | 3,65          | 5,76          | 8,46          |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>24,26</b>  | <b>40,16</b>  | <b>63,31</b>  | <b>93,11</b>  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |                |               |               |               |               |
|  |  |                | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | <b>4,00</b>   | <b>6,00</b>   | <b>8,00</b>   | <b>10,00</b>  |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 20,00         | 20,00         | 20,00         | 20,00         |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>24,26</b>  | <b>40,16</b>  | <b>63,31</b>  | <b>93,11</b>  |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS           | <b>53,45</b>  | <b>88,46</b>  | <b>139,46</b> | <b>205,09</b> |
| <b>NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)</b>  |  |                | <b>78</b>     | <b>77</b>     | <b>79</b>     | <b>82</b>     |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |                |               |               |               |               |
| <b>Carga extrema remolque:</b>   |  | <b>KIPS</b>    | <b>80,00</b>  | <b>160,00</b> | <b>300,00</b> | <b>500,00</b> |
| <b>Carga extrema remolque:</b>   |  | t.             | <b>36,32</b>  | <b>72,64</b>  | <b>136,20</b> | <b>227,00</b> |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  |  | t.             | <b>24,26</b>  | <b>40,16</b>  | <b>63,31</b>  | <b>93,11</b>  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |                |               |               |               |               |

## 4.3.- BAC Patiño

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |        |        |        |        |        |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |        |        |        |        |        |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |        |        |        |        |        |
| CLASE BUQUE:   | <b>BAC PATIÑO</b>                                      |        |        |        |        |        |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD | CASO A | CASO B | CASO C | CASO D |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos  | 4,00   | 6,00   | 8,00   | 10,00  |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.     | 17045  | 17045  | 17045  | 17045  |
| Área frontal viento:   | A_T  | m2     | 509,11 | 509,11 | 509,11 | 509,11 |
| Coef. Arrastre viento:   | C_W  |        | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |
| Área proyectada hélices:   | A_P  | m2     | 25,52  | 25,52  | 25,52  | 25,52  |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |        | 5      | 5      | 5      | 5      |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |        | 3      | 3      | 3      | 3      |
| Vel. viento verdadero:   | Vwind  | Nudos  | 20     | 20     | 20     | 20     |
| NÚM. Beaufort:   |  |        | 5      | 5      | 5      | 5      |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos  | 24,00  | 26,00  | 28,00  | 30,00  |
| Coef. Rumbo:   | K  |        | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |
| Resistencia Viento:  | R_W  | t.     | 7,25   | 8,51   | 9,87   | 11,33  |
| Factor Resistencia:  | $R_H/\Delta$   |        | 0,25   | 0,60   | 1,20   | 2,00   |
| Resistencia Casco:   | R_H  | t.     | 2,42   | 5,80   | 11,61  | 19,35  |
| Resistencia Estado Mar:  | R_S  | t.     | 4,59   | 4,59   | 4,59   | 4,59   |
| Resistencia hélice:  | R_P  | t.     | 7,46   | 16,78  | 29,82  | 46,60  |
| Resist. Buque Remolcado:   | R_T  | t.     | 21,71  | 35,68  | 55,89  | 81,86  |
| Resist. Cable remolque:  | R_WIRE   | t.     | 2,17   | 3,57   | 5,59   | 8,19   |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.     | 23,88  | 39,24  | 61,48  | 90,05  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |        |        |        |        |        |
|  |  |        | CASO A | CASO B | CASO C | CASO D |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos  | 4,00   | 6,00   | 8,00   | 10,00  |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos  | 20,00  | 20,00  | 20,00  | 20,00  |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.     | 23,88  | 39,24  | 61,48  | 90,05  |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS   | 52,60  | 86,44  | 135,41 | 198,34 |
| NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)   |  |        | 77     | 80     | 81     | 82     |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |        |        |        |        |        |
| Carga extrema remolque:  |  | KIPS   | 70,00  | 240,00 | 350,00 | 550,00 |
| Carga extrema remolque:  |  | t.     | 31,78  | 108,96 | 158,90 | 249,70 |
| Total Promedio Resist. Remolque:   |  | t.     | 23,88  | 39,24  | 61,48  | 90,05  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |        |        |        |        |        |

## 4.4.- F100 Álvaro de Bazán

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |                |               |               |               |               |
|--|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |                |               |               |               |               |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |                |               |               |               |               |
| CLASE BUQUE:   | <b>F-100 Álvaro de Bazán.</b>                          |                |               |               |               |               |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD         | CASO A        | CASO B        | CASO C        | CASO D        |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos          | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados         | 0,0           | 0,0           | 0,0           | 0,0           |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.             | 5982          | 5982          | 5982          | 5982          |
| Área frontal viento:   | A_T  | m <sup>2</sup> | 278,71        | 278,71        | 278,71        | 278,71        |
| Coef. Arrastre viento:   | C_W  |                | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          |
| Área proyectada hélices:   | A_P  | m <sup>2</sup> | 31,81         | 31,81         | 31,81         | 31,81         |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |                | 3             | 3             | 3             | 3             |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |                | 1             | 1             | 1             | 1             |
| Vel. viento verdadero:   | Vwind  | Nudos          | 20            | 20            | 20            | 20            |
| NÚM. Beaufort:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos          | 24,00         | 26,00         | 28,00         | 30,00         |
| Coef. Rumbo:   | K  |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Resistencia Viento:  | R_W  | t.             | 2,78          | 3,26          | 3,78          | 4,34          |
| Factor Resistencia:  | $R_H/\Delta$   |                | 0,75          | 1,75          | 3,10          | 5,00          |
| Resistencia Casco:   | R_H  | t.             | 2,55          | 5,94          | 10,52         | 16,97         |
| Resistencia Estado Mar:  | R_S  | t.             | 6,13          | 6,13          | 6,13          | 6,13          |
| Resistencia hélice:  | R_P  | t.             | 9,29          | 20,91         | 37,18         | 58,09         |
| Resist. Buque Remolcado:   | R_T  | t.             | 20,75         | 36,24         | 57,61         | 85,53         |
| Resist. Cable remolque:  | R_WIRE   | t.             | 2,07          | 3,62          | 5,76          | 8,55          |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>22,82</b>  | <b>39,87</b>  | <b>63,37</b>  | <b>94,09</b>  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |                |               |               |               |               |
|  |  |                | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos          | <b>4,00</b>   | <b>6,00</b>   | <b>8,00</b>   | <b>10,00</b>  |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos          | 20,00         | 20,00         | 20,00         | 20,00         |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>22,82</b>  | <b>39,87</b>  | <b>63,37</b>  | <b>94,09</b>  |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS           | 50,27         | 87,81         | 139,59        | 207,24        |
| NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)   |  |                | 79            | 78            | 82            | 83            |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |                |               |               |               |               |
| Carga extrema remolque:  |  | KIPS           | 90,00         | 160,00        | 450,00        | 800,00        |
| Carga extrema remolque:  |  | t.             | 40,86         | 72,64         | 204,30        | 363,20        |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  |  | t.             | <b>22,82</b>  | <b>39,87</b>  | <b>63,37</b>  | <b>94,09</b>  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Se indica el máximo desplazamiento de la F-105 Cristóbal Colón. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |                |               |               |               |               |

## 4.5.- F80 Santa María

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |                |               |               |               |               |
|--|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |                |               |               |               |               |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |                |               |               |               |               |
| CLASE BUQUE:   | <b>F-80 STA. MARÍA</b>                                 |                |               |               |               |               |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD         | CASO A        | CASO B        | CASO C        | CASO D        |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados         | 0,0           | 0,0           | 0,0           | 0,0           |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.             | 4017          | 4017          | 4017          | 4017          |
| Área frontal viento:   | A <sub>T</sub>   | m <sup>2</sup> | 204,39        | 204,39        | 204,39        | 204,39        |
| Coef. Arrastre viento:   | C <sub>W</sub>   |                | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          |
| Área proyectada hélices:   | A <sub>P</sub>   | m <sup>2</sup> | 13,20         | 13,20         | 13,20         | 13,20         |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |                | 2             | 2             | 2             | 2             |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |                | 1             | 1             | 1             | 1             |
| Vel. viento verdadero:   | V <sub>wind</sub>                                      | Nudos          | 20            | 20            | 20            | 20            |
| NÚM. Beaufort:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 24,00         | 26,00         | 28,00         | 30,00         |
| Coef. Rumbo:   | K  |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Resistencia Viento:  | R <sub>W</sub>   | t.             | 2,04          | 2,39          | 2,77          | 3,18          |
| Factor Resistencia:  | R <sub>H</sub> / $\Delta$                              |                | 1,70          | 2,90          | 4,40          | 7,10          |
| Resistencia Casco:   | R <sub>H</sub>   | t.             | 3,88          | 6,61          | 10,03         | 16,19         |
| Resistencia Estado Mar:  | R <sub>S</sub>   | t.             | 3,63          | 3,63          | 3,63          | 3,63          |
| Resistencia hélice:  | R <sub>P</sub>   | t.             | 3,86          | 8,68          | 15,43         | 24,11         |
| Resist. Buque Remolcado:   | R <sub>T</sub>   | t.             | 13,40         | 21,31         | 31,87         | 47,11         |
| Resist. Cable remolque:  | R <sub>WIRE</sub>                                      | t.             | 1,34          | 2,13          | 3,19          | 4,71          |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>14,74</b>  | <b>23,45</b>  | <b>35,05</b>  | <b>51,82</b>  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |                |               |               |               |               |
|  |  |                | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | <b>4,00</b>   | <b>6,00</b>   | <b>8,00</b>   | <b>10,00</b>  |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 20,00         | 20,00         | 20,00         | 20,00         |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>14,74</b>  | <b>23,45</b>  | <b>35,05</b>  | <b>51,82</b>  |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS           | <b>32,47</b>  | <b>51,64</b>  | <b>77,21</b>  | <b>114,15</b> |
| NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)   |  |                | 78            | 77            | 79            | 82            |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |                |               |               |               |               |
| Carga extrema remolque:  |  | <b>KIPS</b>    | 40,00         | 70,00         | 180,00        | 350,00        |
| Carga extrema remolque:  |  | t.             | <b>18,16</b>  | <b>31,78</b>  | <b>81,72</b>  | <b>158,90</b> |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  |  | t.             | <b>14,74</b>  | <b>23,45</b>  | <b>35,05</b>  | <b>51,82</b>  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |                |               |               |               |               |

## 4.6.- P40 Meteoro

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |                |               |               |               |               |
|--|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |                |               |               |               |               |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |                |               |               |               |               |
| CLASE BUQUE:   | <b>P-40 BAM</b>  |                |               |               |               |               |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD         | CASO A        | CASO B        | CASO C        | CASO D        |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados         | 0,0           | 0,0           | 0,0           | 0,0           |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.             | 2500          | 2500          | 2500          | 2500          |
| Área frontal viento:   | A <sub>T</sub>   | m <sup>2</sup> | 139,35        | 139,35        | 139,35        | 139,35        |
| Coef. Arrastre viento:   | C <sub>W</sub>   |                | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          |
| Área proyectada hélices:   | A <sub>P</sub>   | m <sup>2</sup> | 18,70         | 18,70         | 18,70         | 18,70         |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |                | 2             | 2             | 2             | 2             |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |                | 1             | 1             | 1             | 1             |
| Vel. viento verdadero:   | V <sub>wind</sub>                                      | Nudos          | 20            | 20            | 20            | 20            |
| NÚM. Beaufort:   |  |                | 5             | 5             | 5             | 5             |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 24,00         | 26,00         | 28,00         | 30,00         |
| Coef. Rumbo:   | K  |                | 1,00          | 1,00          | 1,00          | 1,00          |
| Resistencia Viento:  | R <sub>W</sub>   | t.             | 1,39          | 1,63          | 1,89          | 2,17          |
| Factor Resistencia:  | R <sub>H</sub> / $\Delta$                              |                | 1,00          | 2,40          | 4,40          | 7,10          |
| Resistencia Casco:   | R <sub>H</sub>   | t.             | 1,42          | 3,41          | 6,24          | 10,07         |
| Resistencia Estado Mar:  | R <sub>S</sub>   | t.             | 3,63          | 3,63          | 3,63          | 3,63          |
| Resistencia hélice:  | R <sub>P</sub>   | t.             | 5,46          | 12,29         | 21,85         | 34,14         |
| Resist. Buque Remolcado:   | R <sub>T</sub>   | t.             | 11,90         | 20,96         | 33,62         | 50,02         |
| Resist. Cable remolque:  | R <sub>WIRE</sub>                                      | t.             | 1,19          | 2,10          | 3,36          | 5,00          |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>13,09</b>  | <b>23,05</b>  | <b>36,98</b>  | <b>55,02</b>  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |                |               |               |               |               |
|  |  |                | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |
| Velocidad de remolcado:  | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos          | <b>4,00</b>   | <b>6,00</b>   | <b>8,00</b>   | <b>10,00</b>  |
| Vel. viento Rel.:  | V <sub>R</sub>   | Nudos          | 20,00         | 20,00         | 20,00         | 20,00         |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.             | <b>13,09</b>  | <b>23,05</b>  | <b>36,98</b>  | <b>55,02</b>  |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS           | <b>28,84</b>  | <b>50,78</b>  | <b>81,45</b>  | <b>121,19</b> |
| <b>NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)</b>  |  |                | <b>78</b>     | <b>77</b>     | <b>79</b>     | <b>82</b>     |
| Entrando en la Figura M-5 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |                |               |               |               |               |
| <b>Carga extrema remolque:</b>   |  | <b>KIPS</b>    | <b>35,00</b>  | <b>65,00</b>  | <b>190,00</b> | <b>260,00</b> |
| <b>Carga extrema remolque:</b>   |  | t.             | <b>15,89</b>  | <b>29,51</b>  | <b>86,26</b>  | <b>118,04</b> |
| <b>Total Promedio Resist. Remolque:</b>  |  | t.             | <b>13,09</b>  | <b>23,05</b>  | <b>36,98</b>  | <b>55,02</b>  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |                |               |               |               |               |

## 4.7.- P70 Serviola

| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES   |  |        |        |        |        |        |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |        |        |        |        |        |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |        |        |        |        |        |
| CLASE BUQUE:   | <b>P-70 SERVIOLA</b>                                   |        |        |        |        |        |
| PARAMETROS REF 1   | SIMBOLO  | UNIDAD | CASO A | CASO B | CASO C | CASO D |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos  | 4,00   | 6,00   | 8,00   | 10,00  |
| Rumbo Buque remolcado:   | $\gamma$   | Grados | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Despl. Buque remolcado:  | $\Delta$   | t.     | 1200   | 1200   | 1200   | 1200   |
| Área frontal viento:   | A_T  | m2     | 140,00 | 140,00 | 140,00 | 140,00 |
| Coef. Arrastre viento:   | C_W  |        | 0,75   | 0,75   | 0,75   | 0,75   |
| Área proyectada hélices:   | A_P  | m2     | 11,03  | 11,03  | 11,03  | 11,03  |
| NÚM. C. Resist. Casco:   |  |        | 2      | 2      | 2      | 2      |
| NÚM. C. Resist. Estado Mar:  |  |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
| Vel. viento verdadero:   | Vwind  | Nudos  | 20     | 20     | 20     | 20     |
| NÚM. Beaufort:   |  |        | 5      | 5      | 5      | 5      |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos  | 24,00  | 26,00  | 28,00  | 30,00  |
| Coef. Rumbo:   | K  |        | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |
| Resistencia Viento:  | R_W  | t.     | 1,50   | 1,76   | 2,04   | 2,34   |
| Factor Resistencia:  | $R_H/\Delta$   |        | 1,00   | 2,40   | 4,40   | 7,10   |
| Resistencia Casco:   | R_H  | t.     | 0,68   | 1,63   | 3,00   | 4,84   |
| Resistencia Estado Mar:  | R_S  | t.     | 3,63   | 3,63   | 3,63   | 3,63   |
| Resistencia hélice:  | R_P  | t.     | 3,22   | 7,25   | 12,89  | 20,14  |
| Resist. Buque Remolcado:   | R_T  | t.     | 9,03   | 14,27  | 21,56  | 30,95  |
| Resist. Cable remolque:  | R_WIRE   | t.     | 0,90   | 1,43   | 2,16   | 3,09   |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.     | 9,93   | 15,70  | 23,71  | 34,04  |
| <b>CARGA EXTREMA DE REMOLQUE CON PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 0.001 CADA 24 H.</b>   |  |        |        |        |        |        |
|  |  |        | CASO A | CASO B | CASO C | CASO D |
| Velocidad de remolcado:  | Vtow   | Nudos  | 4,00   | 6,00   | 8,00   | 10,00  |
| Vel. viento Rel.:  | V_R  | Nudos  | 20,00  | 20,00  | 20,00  | 20,00  |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.     | 9,93   | 15,70  | 23,71  | 34,04  |
| Total Promedio Resist. Remolque:   | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | KIPS   | 21,88  | 34,58  | 52,23  | 74,99  |
| NÚM. CURVA en Tabla M-6 de REF.1 (ver pestaña NUM curva)   |  |        | 78     | 77     | 79     | 82     |
| Entrando en la Figura M-2 de REF.1 con los datos anteriores:   |  |        |        |        |        |        |
| Carga extrema remolque:  |  | KIPS   | 25,00  | 40,00  | 90,00  | 250,00 |
| Carga extrema remolque:  |  | t.     | 11,35  | 18,16  | 40,86  | 113,50 |
| Total Promedio Resist. Remolque:   |  | t.     | 9,93   | 15,70  | 23,71  | 34,04  |
| <b>OBSERVACIONES:</b> Se ha considerado "Rel Wave Dir" de 0°. A partir de una velocidad de remolcado de 6 nudos los valores extremos se incrementan exponencialmente. Cálculos para un estado de la Mar 5 (Sea State 5), es decir: con S.S. < 5 remolcar a no más de 8 nudos; con S.S. > 5 remolcar a 4 nudos. |  |        |        |        |        |        |

## 4.8.- Resumen

| RESUMEN  |  |               |               |               |               |               |                                |                                    |
|--|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|------------------------------------|
| RESISTENCIA DURANTE EL REMOLQUE ENTRE BUQUES NO REMOLCADORES |  |               |               |               |               |               |                                |                                    |
| REF.: 1  | U.S. NAVY TOWING MANUAL (1 JULY 2002)                  |               |               |               |               |               |                                |                                    |
| REF.: 2  | ATP-43(C)/MTP-43(C) SHIP-TO-SHIP TOWING (OCTOBER 2008) |               |               |               |               |               |                                |                                    |
| NOTA:  | Carga Rotura del Eslabón OTAN con acero AISI 4140H     |               |               |               |               |               |                                |                                    |
| <b>P-70 SERVIOLA</b>   | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 1200          | 1200          | 1200          | 1200          |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 9,93          | 15,70         | 23,71         | 34,04         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 11,35         | 18,16         | 40,86         | 113,50        |                                |                                    |
| <b>P-40 METEORO (BAM)</b>                                    | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 2500          | 2500          | 2500          | 2500          |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 13,09         | 23,05         | 36,98         | 55,02         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 15,89         | 29,51         | 86,26         | 118,04        |                                |                                    |
| <b>F-80 STA. MARÍA</b>                                       | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 4017          | 4017          | 4017          | 4017          |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 14,74         | 23,45         | 35,05         | 51,82         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 18,16         | 31,78         | 81,72         | 158,90        |                                |                                    |
| <b>F-100 ÁLVARO DE BAZÁN</b>                                 | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 5982          | 5982          | 5982          | 5982          |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 22,82         | 39,87         | 63,37         | 94,09         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 40,86         | 72,64         | 204,30        | 363,20        |                                |                                    |
| <b>BAC PATIÑO</b>  | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 17045         | 17045         | 17045         | 17045         |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 23,88         | 39,24         | 61,48         | 90,05         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 31,78         | 108,96        | 158,90        | 249,70        |                                |                                    |
| <b>BAC CANTABRIA</b>   | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 19500         | 19500         | 19500         | 19500         |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 24,26         | 40,16         | 63,31         | 93,11         |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 36,32         | 72,64         | 136,20        | 227,00        |                                |                                    |
| <b>LHD JUAN CARLOS I</b>                                     | <b>SIMBOLO</b>   | <b>UNIDAD</b> | <b>CASO A</b> | <b>CASO B</b> | <b>CASO C</b> | <b>CASO D</b> |                                |                                    |
| Velocidad de remolcado:                                      | V <sub>tow</sub>                                       | Nudos         | 4,00          | 6,00          | 8,00          | 10,00         | Carga Rotura Eslabón OTAN [t.] | Carga Rotura Estacha remolque [t.] |
| Despl. Buque remolcado:                                      | Δ  | t.            | 27000         | 27000         | 27000         | 27000         |                                |                                    |
| Total Promedio Resist. Remolque:                             | $R=R_T+R_{WIRE}$                                       | t.            | 23,54         | 42,93         | 71,69         | 109,00        |                                |                                    |
| Carga extrema remolque: Prob. 0,001 / 24H                    |  | t.            | 35,41         | 74,46         | 149,82        | 249,70        |                                |                                    |

## 5.- Conclusiones

- a) A la vista de la **Tabla Resumen** anterior: “**Resistencia durante el remolque entre buques no remolcadores**”, se deduce la no linealidad entre el desplazamiento del buque, la carga promedio de remolque y la carga extrema. Es buques de dos hélices se advierte una mayor resistencia promedio al remolque que otros buques de mayor desplazamiento, pero con un solo eje propulsor. Los buques con formas más finas (menor coeficiente de bloque) en general presentar mayores cargas extremas para similares desplazamientos.
- b) La probabilidad de tener que soportar una carga extrema de remolque es de 0,001/24H para estados de la mar 5 o inferiores y a 10 nudos.
- c) En buques de hasta 17000 [t.], ante una sobre carga durante la maniobra de remolque, lo más probable es que rompa primero la estacha; en cambio, para buques de más de 17000 [t.], rompería primero el eslabón OTAN.
- d) Sería interesante estudiar un nuevo diseño de guardacabos con cáncamos de mayor diámetro –*actual en este estudio 60 mm*- que repartan mejor la carga sobre el eslabón OTAN con el objeto de reducir el gradiente de tensiones en las zonas en contacto.
- e) A partir de una carga superior a 130 [t.], el Factor de Seguridad es inferior a 1,0 pudiéndose romper el eslabón OTAN en cualquier momento. Dado que las cargas extremas son superiores en algunos casos a 130 [t.], se puede inferir que la probabilidad de excedencia –en algunos escenarios- es superior a 0,001/24H.
- f) Para buques de más de 5000 [t.], si se desea mantener una probabilidad de excedencia de tensiones extremas no superiores a las indicadas anteriormente se propone no superar velocidades de remolque superiores a 6 nudos.



Saludos cordiales.

## NUEVOS VIENTOS PARA LA SOSTENIBILIDAD VIENTO EN POPA. EÓLICA OFFSHORE

AN (CIA-EOF) D. FERNANDO ABAD BARRAL  
ISEMER

### Introducción

El mundo necesita un suministro de energía limpia y sostenible cada vez mayor. Necesita energía moderna que promueva el desarrollo sostenible y una mayor prosperidad para todos los habitantes del planeta. Esa energía, en gran parte, la puede proporcionar la energía eólica, la energía del futuro. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de buque en el que se han instalado aerogeneradores en su estructura. Pero para ello, es necesario promover la creación de parques eólicos para un eficiente aprovechamiento de la energía del viento.



Figura 1. Energía eólica en buques. [1]

En la Figura se presenta un esquema ilustrativo de mapa eólico nacional, con las isoventas (líneas en las que la velocidad media anual es constante) para las cinco áreas geográficas de mayor potencial. Se puede diferenciar la zona de tipo A (potencial muy alto), la zona tipo B (potencial alto), zona tipo C (potencial medio), zona tipo D (potencial medio-bajo) y zona tipo E (potencial bajo). En dichas zonas, se encuentran algunos de los principales arsenales de la Armada, donde se llevan a cabo las principales misiones de la flota.

Dada la relevancia que ha tomado el cambio climático y atenuado por el periodo de crisis en el que se ve inmerso nuestro país, se exige al sector público que cumpla un papel ejemplar en la aplicación de medidas de ahorro y eficiencia energética y en la promoción de la contratación de servicios energéticos. En coherencia con lo anterior, en nuestro país se han diseñado e implementado desde hace años políticas públicas que nos permitan cumplir con los objetivos comunitarios en materia de ahorro y eficiencia energética. Así, la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012, aprobada por el Gobierno el 28 de noviembre de 2003, definió los potenciales de ahorro y las medidas a llevar a cabo con el fin de mejorar el rendimiento energético de nuestra economía. Esta estrategia se desarrolló posteriormente en el Plan de Acción para el periodo 2005-2007 y en el actual Plan de Acción para el periodo 2008-2012, aprobado por el Consejo de Ministros el 20 de julio de 2007, como continuación del anterior.

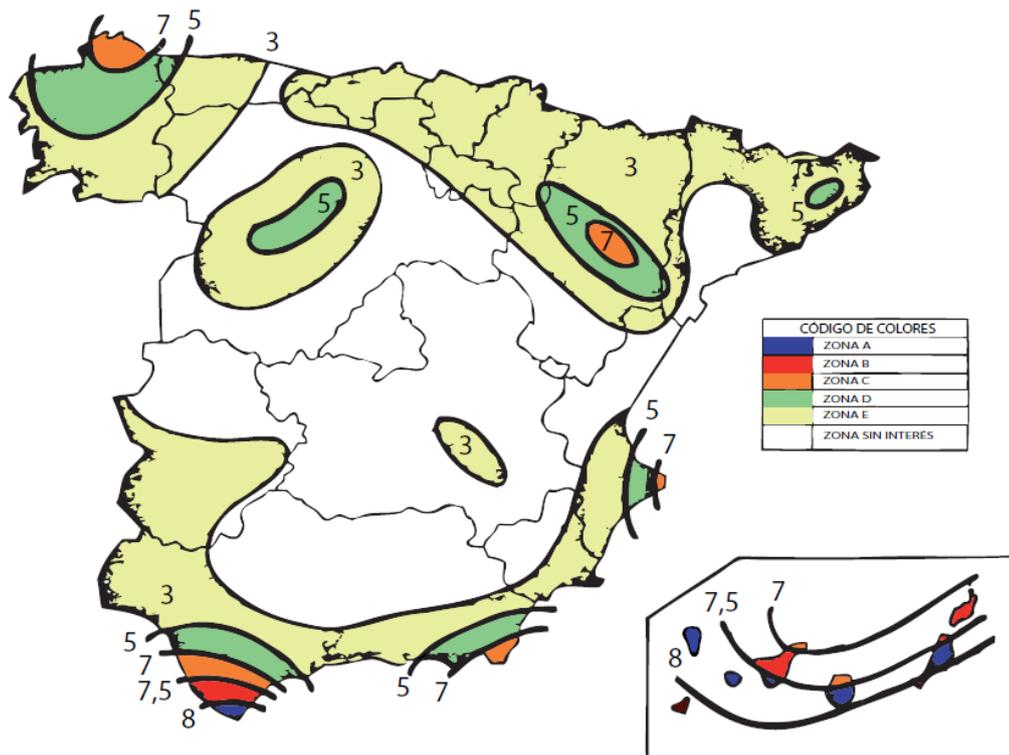


Figura 2. Mapa eólico de isoventas. Velocidad media anual en  $m.s^{-1}$ . [2]

El presente trabajo tiene como objetivo detallar los aspectos técnicos para la implantación de un parque eólico marino. Para ello se debe analizar la zona bajo estudio, que tiene que venir caracterizada por su alto potencial eólico, teniendo en cuenta su orografía y sus curvas de nivel, así como la rugosidad del terreno y las características del viento y demás aspectos relevantes que se tienen en consideración para el desarrollo de cualquier proyecto eólico. Desde un punto de vista económico, y con el objetivo de conseguir el mayor rendimiento, es necesario realizar una comparativa entre modelos de aerogeneradores en función de la potencia que se debe instalar, teniendo en cuenta sus curvas de potencia, de duración de velocidad, de duración de potencia, etc., y estimando la producción anual de energía y por tanto, el beneficio bruto, en función de las características del viento en el emplazamiento. Desde un punto de vista técnico y empleando software especializado (el software WAsP es un claro ejemplo), se debe analizar la distribución de los aerogeneradores considerando la dirección del viento predominante, aspectos medioambientales (impacto visual y contaminación acústica), impacto social y económico, efecto de las estelas, y por supuesto, las zonas donde se obtiene un mayor aprovechamiento de la energía cinética del viento.

### Selección del Emplazamiento

El proceso para seleccionar un emplazamiento de una central eólica debe hacerse de forma sistemática e implica la ejecución de varias etapas. En primer lugar, es necesario determinar las áreas geográficas candidatas, lo que supone analizar los datos meteorológicos regionales publicados, la accesibilidad desde carreteras, la proximidad de líneas eléctricas, descartando zonas protegidas y teniendo en cuenta las características topográficas. Una vez seleccionadas las áreas candidatas, se analiza en detalle cada una de ellas, investigando la existencia de datos meteorológicos que puedan facilitar distintas fuentes. Por ejemplo, tal y como se muestra en la Figura 3, una fuente común de consulta es el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDEA, a través de su atlas eólico.

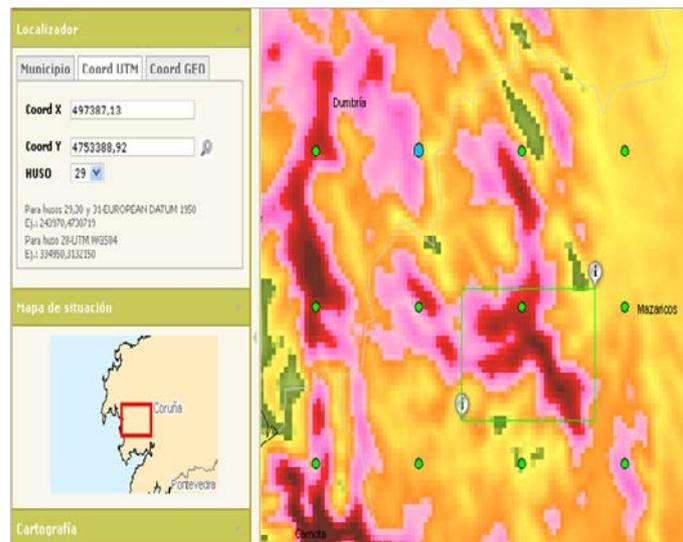


Figura 3. Mapa eólico de la zona bajo estudio. [3]

Una fase fundamental en todo proyecto eólico es la estimación del potencial eólico de cada emplazamiento. Es de vital importancia medir y documentar las características del viento de un determinado emplazamiento y por ello se deberán obtener los siguientes datos:

- Velocidad media del viento.
- Función de distribución de velocidad.
- Ley de variación de la velocidad del viento con la altura.
- Intensidad de la turbulencia.
- Rosa de los vientos (distribución de direcciones del viento tal y como se muestra en la Figura ) y distribución de velocidades en cada dirección.
- Valores extremos de la velocidad del viento y estadísticas sobre ráfagas.
- Información sobre efectos topográficos en la distribución espacial de la velocidad y la intensidad de la turbulencia.

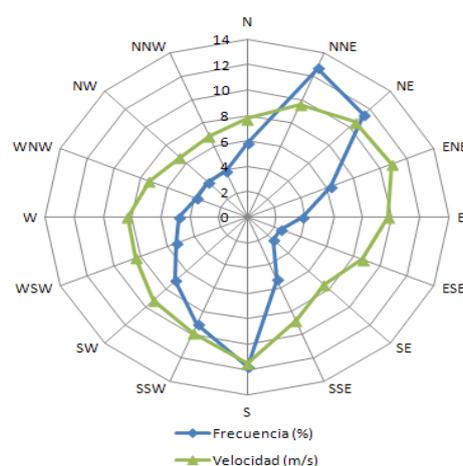


Figura 4. Rosa de los vientos de una estación meteorológica. [4]

Por definición, la potencia generada por un aerogenerador es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento.

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1)$$

Por ello, es importante que el emplazamiento tenga una velocidad media del viento relativamente elevada, teniendo en cuenta que la velocidad de arranque de una aeroturbina tripala suele estar en torno a los 3 ó 4 m/s.

Las medidas realizadas de la velocidad del viento en un determinado lugar durante un intervalo de al menos un año suelen estar bien representadas mediante una función de distribución de Weibull, que proporciona información sobre la probabilidad de que la velocidad del viento  $v$  supere un cierto valor  $u$ ,

$$P(v > u) = \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

donde  $k > 0$  es un factor de forma y  $c > 0$  un factor de escala. Ambos, vienen definidos desde la estación meteorológica y dependen de la altura a la que se realiza la medida.

#### Información Media Anual

Elevación Estación M. (m): 604

Rugosidad (m): 0,15

| Altura (m)      | 30    | 60    | 80    | 100   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Velocidad (m/s) | 7,97  | 8,92  | 9,34  | 9,66  |
| Weibull C (m/s) | 9,17  | 10,19 | 10,65 | 10,9  |
| Weibull k       | 2,289 | 2,23  | 2,173 | 2,142 |

Tabla 1. Información media anual de la estación meteorológica.[3]

A partir de la función de distribución de Weibull, derivándola con respecto a  $u$ , se determina la correspondiente función de densidad de probabilidad  $f(u)$ ,

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

Si se conoce la función de densidad de probabilidad  $f(u)$  en un determinado lugar, se puede calcular la probabilidad de que la velocidad  $v$  del viento se encuentre comprendida entre dos valores arbitrarios  $u_1$  y  $u_2$  simplemente integrando la densidad de probabilidad en el intervalo deseado. En el caso de la distribución de Weibull,

$$P(u_1 < v < u_2) = \int_{u_1}^{u_2} f(u) du \quad (4)$$

Todas estas funciones y probabilidades representan las herramientas fundamentales que todo ingeniero debe utilizar en el estudio del emplazamiento. Obviamente, la materia prima es el viento y es necesario garantizar que superará una cierta velocidad durante un determinado número de horas en el periodo de un año. Para calcular el tiempo en horas, en un periodo de un año, durante el cual la velocidad del viento  $v$  superará una cierta velocidad  $u_{ref}$ , basta multiplicar la ecuación de probabilidad (4) por el número total de horas de un año, 8760 horas.

Otro aspecto determinante es la variación de la velocidad con la altura, mostrado en la Figura 5. La capa límite atmosférica es la capa de la troposfera en contacto con la superficie terrestre en la que los efectos de fricción sobre el terreno son importantes y la velocidad del viento aumenta con la altura. Esta variación de la velocidad del viento con la altura es una característica importante que debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar y emplazar aeroturbinas, ya que elevar el rotor de la turbina supone aprovechar un mayor potencial eólico. Obviamente, el aumento de la altura de la torre supone también que el aerogenerador quede sometido a mayores cargas, encareciendo su diseño. El análisis de cómo varía la velocidad del viento se puede realizar a partir de la ecuación del perfil logarítmico de la velocidad.

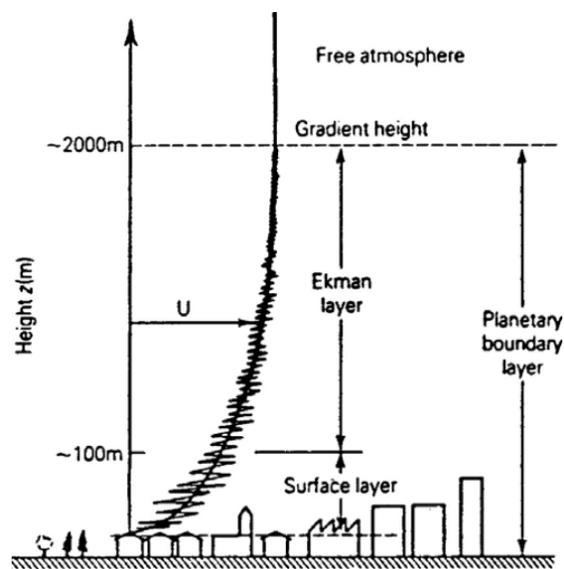


Figura 5. Perfil logarítmico típico de la velocidad del viento en función de la altura. [2]

$$u = 2,5u^* \left( \ln \frac{z}{z_0} + \psi \right) \quad (5)$$

En la ecuación (5),  $z$  es la altura a la que se desea determinar la velocidad,  $z_0$  es la rugosidad del terreno y  $\psi$  es una función que depende del grado de estabilidad atmosférica ( $\psi=0$  en el caso de atmósfera neutra). La rugosidad del terreno depende de las características topográficas de éste y por lo tanto existen diferentes grados de rugosidad en función del tipo de terreno.

| Grado de rugosidad | Tipo de terreno        | $\alpha$    |
|--------------------|------------------------|-------------|
| Liso               | Mar, arena, nieve      | 0,10 – 0,13 |
| Rugosidad moderada | Hierba, cultivos       | 0,13 – 0,20 |
| Rugoso             | Bosques, edificaciones | 0,20 – 0,27 |
| Muy rugoso         | Ciudades               | 0,27 – 0,40 |

Tabla 2. Grado de rugosidad en función del terreno. [2]

El carácter turbulento del flujo de viento da lugar a fluctuaciones de pequeña escala que hacen que las condiciones de entrada del flujo al rotor no sean uniformes. En la Figura se muestra el campo de vorticidad para el plano central del rotor. Unido a esto, el efecto de la interferencia entre aeroturbinas suele ser importante, ya que las utilizadas en la actualidad tienen una potencia nominal típica de entre 500 y 2000 kW, con diámetros de entre 40 y 80 m, y para poder producir energía de forma significativa es necesario agrupar las máquinas en parques eólicos. Por ello, hay que buscar de forma adecuada el emplazamiento de las máquinas, de manera que se aprovechen aquellos lugares con más potencial eólico, situando en ellos el mayor número posible de aerogeneradores, minimizando al mismo tiempo los efectos nocivos asociados a la interferencia.

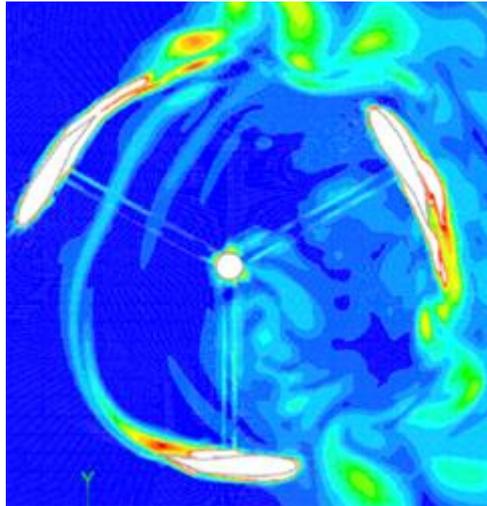


Figura 6. Campo de vorticidad para el plano central del rotor. [5]

Dichos efectos son diversos. La máquina eólica extrae energía cinética del viento, por lo que éste es menos intenso en su estela, dando lugar a que la producción energética de una máquina situada a sotavento de otra disminuya. En la estela el nivel de turbulencia es mayor que en el viento libre, dando lugar a que aumenten las cargas no permanentes sobre la máquina a sotavento, y a que su vida se acorte, fundamentalmente debido al fenómeno de fatiga.

Existen diversas estrategias para aminorar el efecto de las estelas. Una de ellas consiste en desalinear con la dirección del viento el eje de giro de la turbina que genera la estela. El aerogenerador desalineado produce algo menos de potencia, pero la turbina de aguas abajo no pierde ninguna y sufrirá menos por fatiga generada menor impacto medioambiental y una reducción de los costes de conexión a red y de obra civil.

### Potencial Eólico y Distribución de Aerogeneradores

Dentro de un parque eólico, un punto clave para el buen aprovechamiento de la energía del viento es la colocación de los aerogeneradores. Los aerogeneradores extraen parte de la energía cinética del viento y la convierten en energía eléctrica, por lo que aguas abajo de la aeroturbina el viento tiene menor energía que aguas arriba. Este hecho influye en la posición relativa de los aerogeneradores, puesto que en determinadas direcciones del viento éstos se encuentran situados en la estela de otro u otros. Esta situación propicia pérdidas en la generación de energía, por lo que un parque eólico con  $N$  aerogeneradores no produce la misma energía que producirían  $N$  aerogeneradores aislados con las mismas condiciones de viento. Las pérdidas debidas a su distribución son función del espaciado entre turbinas, de su modo de operación, de la densidad de turbinas en el parque, de la intensidad de la turbulencia y de la rosa de los vientos en el emplazamiento.

Una distancia de separación típica entre aerogeneradores es de 8 ó 10 diámetros de la aeroturbina en la dirección del viento, y de 3 en dirección perpendicular a ésta, configuración para la cual las pérdidas son menores del 10%. La velocidad del viento en la estela se recupera al interactuar con el viento que rodea el tubo de corriente que pasa por el rotor.

Para realizar una correcta distribución de las máquinas se realizan diferentes estudios mediante software especializado. Uno de los programas más empleados a nivel mundial es WAsP, desarrollado por el Instituto de Investigaciones Científicas DTU RISØ. Este software permite crear un mapa orográfico de la zona, digitalizando sus curvas de nivel e indicando la rugosidad del terreno, tal y como se muestra en la Figura 7.

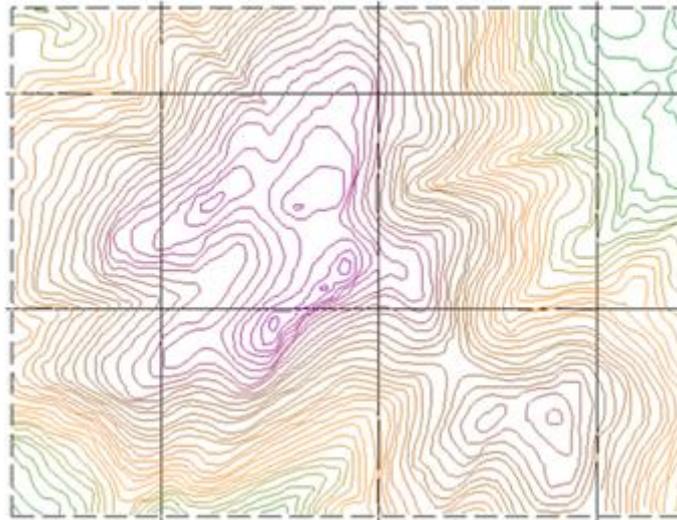


Figura 7. Mapa topográfico creador con el editor de WAsP. [6]

A partir de este mapa, se sitúa la estación meteorológica y se introduce los datos de viento, obteniendo la información del emplazamiento: rosa de los vientos, representación de la función de Weibull y los datos de velocidad de viento. En la Figura 8 se muestra dicha información.

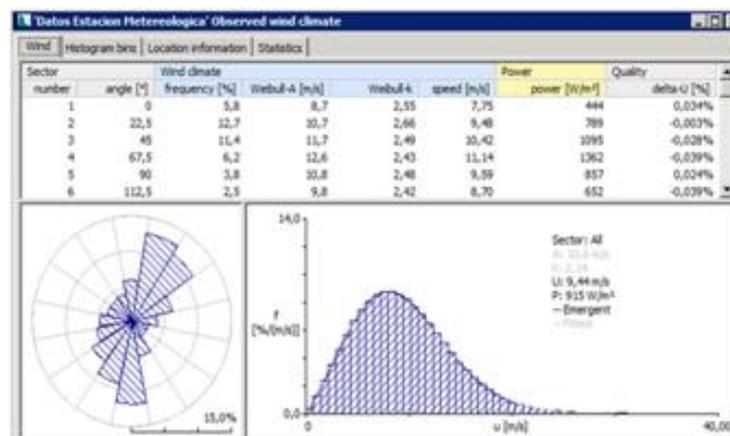


Figura 8. Datos estación meteorológica en el entorno WAsP. [6]

Una vez se ha introducido toda la información referente al emplazamiento, es necesario crear el modelo de aerogenerador que ha sido elegido para el proyecto eólico, tal y como se muestra en la Figura 9. Es importante indicar todas las características de la máquina para realizar una simulación congruente y evaluar cuál es su mejor emplazamiento en el terreno.

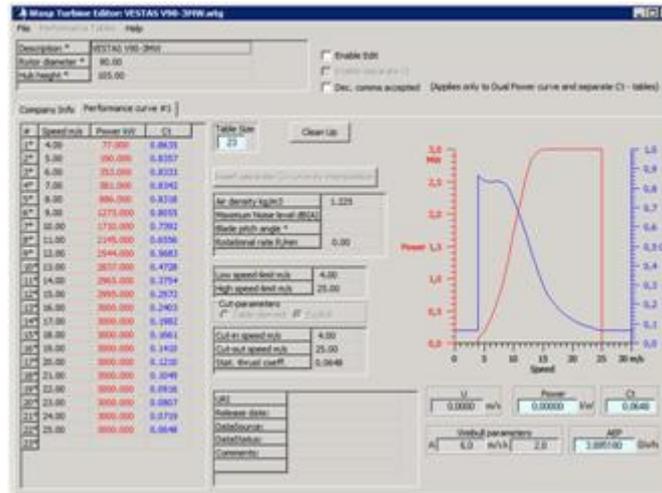


Figura 9. Características técnicas del aerogenerador. [6]

Una vez que se ha cargado el modelo de aeroturbina en el proyecto, se procede a ubicar los aerogeneradores en el emplazamiento (Figura 10). La manera más eficiente es crearse inicialmente un mallado de la zona de interés en los que se calculan las variables que se precisan en el estudio en un plano paralelo al suelo. El mallado se ha configurado teniendo en cuenta el diámetro de la turbina y considerando que los aerogeneradores deben separarse al menos 3 diámetros.

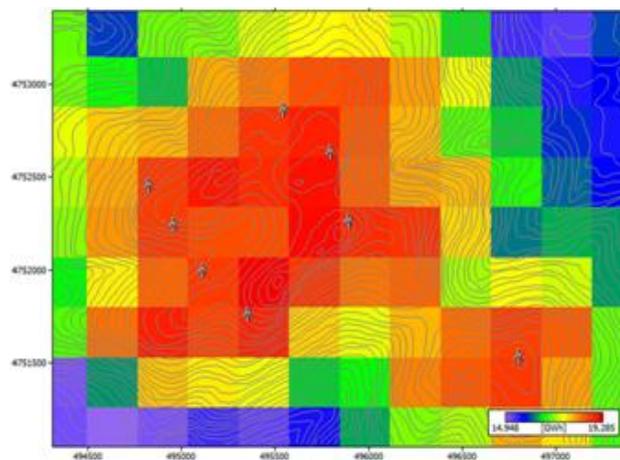


Figura 10. Ubicación de los aerogeneradores en la zona de estudio. [6]

Los mapas donde se ubican finalmente los aerogeneradores suelen configurarse para que presenten una escala de colores para que al representar la producción energética expresada en GWh/año, se visualicen, en el caso de la imagen 9, de color rojo las celdas que se estiman rentables eólicamente y por tanto, en cada una de ellas se podría instalar un aerogenerador teniendo en cuenta la dirección del viento.

Una vez se han ubicado los aerogeneradores es importante analizar el rendimiento de cada aerogenerador, comprobando la energía teórica que produce y sus pérdidas. En la tabla 3 se desglosa la información detallada por turbina de un proyecto eólico. Se indica la elevación a la que se encuentra, el RIX, definido como el porcentaje de la superficie del terreno alrededor de un punto de interés en el que se supera una determinada pendiente límite (lo ideal es que fuese nulo, lo que indica que el flujo no se desprende), la velocidad, la energía bruta y neta que produce y las pérdidas debidas a la interferencia con otras turbinas. De esta manera se puede realizar una estimación de la energía total producida por el parque eólico.

Finalmente, se debe calcular el factor de capacidad, que se define como el cociente entre la energía producida por un aerogenerador en un determinado emplazamiento durante un periodo de tiempo y la máxima que podría producir si estuviese funcionando a la potencia nominal durante el mismo periodo.

$$FC = \frac{E}{P_n * 8760} \quad (6)$$

Un valor de  $FC=0,32$  se interpreta como que el aerogenerador está funcionando a plena potencia durante un 32% del tiempo.

### **Bibliografía**

- [1] <<https://elbauldelporvenir.wordpress.com>>
- [2] ETS de Ingenieros Industriales (2010). *Energía eólica: Fundamentos y Tecnología*. UNED.
- [3] <<http://www.atlaseolico.idae.es/atlas>>
- [4] J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz (2011). *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Editorial Rueda.
- [5] <<http://www.dicyt.com>> Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología.
- [6] <<http://www.wasp.dk>>. The Wind Atlas Analysis and Application Program.

## LA FRAGATA NUMANCIA, DE LA MADERA AL ACERO

AN (CIA-EOFO) D. ALFONSO ROJO LAHUERTA

ARFER

Año 133 a.C., Publio Cornelio Escipión (nieta del Africano) toma la ciudad de Numancia. Tras trece meses de hambruna los numantinos, para evitar se esclavizados, decidieron suicidarse. Así finalizó una resistencia que se remontaba al año 153 y que ha dejado huella en nuestra nación. Rememorando esa gesta, la Armada Española le ha dado el nombre de la ciudad a tres de los buques que hemos tenido a lo largo de la historia. Las dos más famosas la actual F-83 y la que comandó, el por entonces capitán de navío, Méndez Núñez. En esta última vamos a detenernos en este artículo para analizarla algo más detenidamente.



Ilustración 1. Fragata *Numancia* [6]

barcos blindados del mundo, aportó innovaciones tecnológicas como la ventilación forzada y la utilización de energía eléctrica.

Este artículo quiere resaltar el hecho de que nuestra fragata fuese una de las primeras fragatas blindadas de la historia. Estamos en el año 1863 y se dice que el primer barco de la historia se construyó hace más de 10.000 años, cuando un hombre ahuecó un tronco y, mal que bien, consiguió flotar. ¿Cómo es posible que se haya tardado tanto en pasar al hierro?

Un motivo es, por supuesto, la aparición de la máquina de vapor que aumentaba la propulsión para unos buques que incrementaron su peso de manera considerable. Pero también hay que tener en cuenta que aunque ahora nos parezca algo lógico que los barcos sean de metal debemos reconocer que no resulta para nada intuitivo. De todos es sabido que la madera flota debido a que su densidad es menor a la del agua, por lo que resulta lógico que cuanto más madera haya más flotará el barco y por lo tanto más hombre, cañones, provisiones podremos llevar en él. Sin embargo con el hierro pasa lo contrario, que se hunde. Así fue hasta el siglo XIX no se vio que el Principio de Arquímedes podía ir un poco más allá. Dicho principio estipula que:

$$\text{Empuje} = \rho_{\text{agua}} * V_d * g$$

Es decir, que el empuje que el agua hace sobre el barco es igual al peso del agua desalojada por el propio barco, por lo que cuanto más se hunde el barco más fuerza hace el agua para mantenerlo a flote. Por eso, al ser el acero un material que puede laminarse se pueden hacer finas chapas que recubran espacios grandes de aire, consiguiendo que la densidad media de todo el bloque sea inferior a la del agua, y por lo tanto el barco metálico flote. De la idea de que «cuanto más se hunda el barco más flota» surge el coeficiente de flotabilidad ( $C_f$ ), que se define mediante:

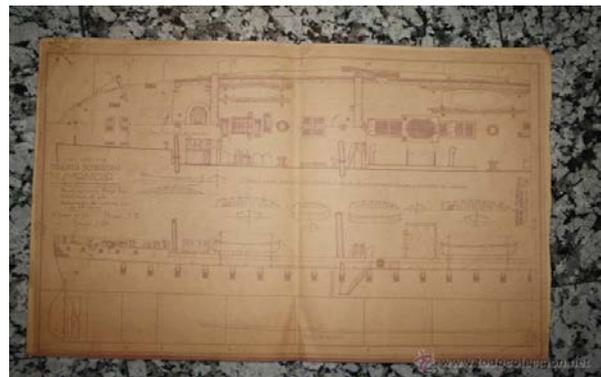


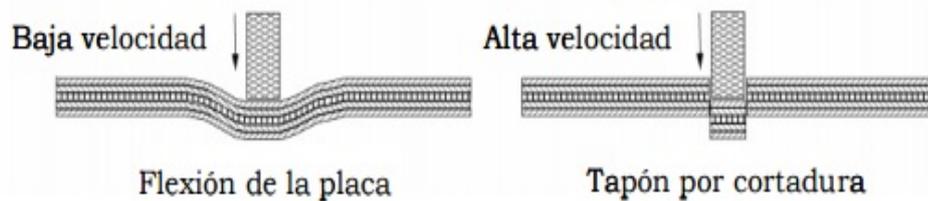
Ilustración 2. Planos de la fragata *Numancia* [7]

$$C_f = \frac{\text{Reserva de flotabilidad}}{\text{Volumen de carena}}$$

La reserva de flotabilidad no es más que el volumen comprendido entre la superficie de flotación y la cubierta principal. La carena es el volumen sumergido. Así pues el valor resulta ser el cociente entre la obra muerta y la obra viva.

Las ventajas que presenta un buque de guerra de acero frente a uno de metal son evidentes. El acero, o hierro como en el caso de la Numancia, presentan una resistencia mucho mayor al impacto y menor probabilidad de incendiarse por lo que resultan ideales para entrar en combate.

Hay que tener en cuenta que en la guerra naval hasta entonces un proyectil no explosivo podía dañar un buque abriéndole vías de agua o desarbolándolo. Un proyectil suponía un impacto a gran velocidad que producía mayores esfuerzos cortantes que de flexión, como así sucede en los impactos a baja velocidad [1].



**Ilustración 3. Diferencia impacto baja velocidad y alta [1]**

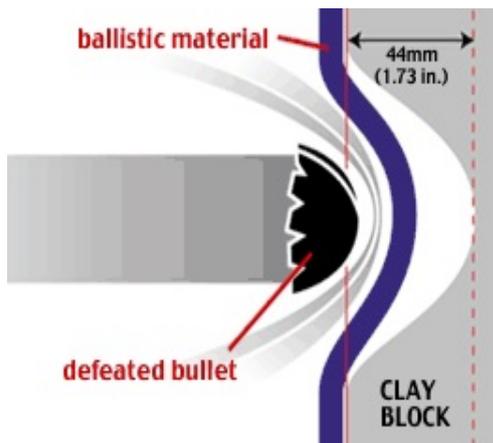
El paso al metal supuso un incremento del límite balístico de los proyectiles, entendiendo por tal la velocidad mínima que ha de llevar para perforar la superficie de impacto. Se conoce como velocidad residual a la celeridad que le queda al proyectil tras atravesar la superficie. La energía absorbida por la placa depende fundamentalmente del material y de su espesor. Pero debe tenerse en cuenta que al aumentar el espesor aumenta el peso del buque y por lo tanto disminuimos su coeficiente de flotabilidad, por lo que hay que llegar a un compromiso.

La energía de impacto de un proyectil es la de su energía cinética, por lo que la podemos definir como:

$$E_i = \frac{1}{2}mv_i$$

Dicha energía disminuirá notablemente al atravesar el material (si es que lo consigue) debido a múltiples causas. Como ya dijimos dicha absorción de energía dependerá mucho del material (por ejemplo en las fibras de carbono y de vidrio una parte se disipa en deformar las fibras de la matriz), pero limitándonos a nuestro caso de un metal podemos resumirlas en:

- Energía absorbida en la formación y movimiento del cono del lado de salida



Al impacto se forma en la cara posterior de la placa un cono, cuyo vértice se mueve a la misma velocidad del proyectil.

La fórmula de la energía perdida en esta deformación también es semejante a la cinética:

$$E_{pc} = \frac{1}{2} m_c v_i$$

Siendo  $m_c$  la masa del cono formado y  $v_i$  la velocidad de impacto.

Ilustración 4. Cono producido por deformación [8]

- Energía absorbida por cortadura

$$E_{cor} = e \cdot R_c \cdot \pi D$$

Siendo  $e$  el espesor de la lámina,  $D$  el diámetro del proyectil y  $R_c$  la resistencia a cortante del material (N/m).

Ahora bien, ¿cómo saber si el metal es bueno para frenar un impacto? Intuitivamente podemos suponer que sí, que será mejor que la madera pero siempre puede haber algún material mejor. La resistencia frente al impacto de un material se mide por la tenacidad. Ésta se define como la medida de la capacidad de un material de absorber energía, durante toda la deformación (elástica y plástica) antes de la fractura [2]. En la

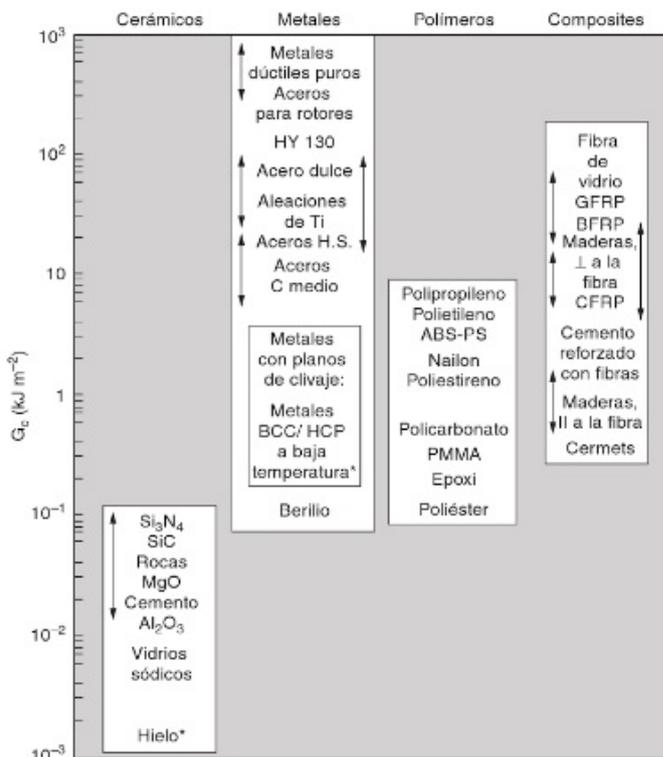


Ilustración 5. Tenacidades de algunos materiales [9]

siguiente *ilustración 5* se gradúan los valores de la tenacidad de algunos de los materiales más importantes:

Comprobamos que efectivamente los aceros pueden llegar a tener hasta del orden de 10 veces más de resistencia. Eso, por supuesto, añadido al hecho de que es mucho más resistente al envejecimiento, con menos impacto medioambiental que la tala de árboles, mucho más económico y rápido y fácil de construir. El paso de la madera al acero se antoja como un paso lógico con múltiples ventajas.

Actualmente se está investigando la posibilidad de utilizar otros materiales en la fabricación de barcos como pueden ser fibras, resinas o composites. Dichos materiales presentan, aparte de la evidente ventaja de ser más ligeros que el metal, muchas mejoras como puede ser incluso el cambio de color en las zonas que han sufrido tensiones y roturas tras un impacto o un esfuerzo exagerado, lo que proporciona ventajas evidentes. [3]

Como hemos dicho nuestra fragata fue uno de los primeros barcos blindados del mundo pero no el primero. Dicho honor corresponde a la fragata francesa *La Gloire* que fue botado en 1859 y que presentaba un blindaje de hierro de 120 mm en la zona central del casco y 75 mm en los extremos. Aparte del blindaje otra ventaja era que pasando a una estructura más sólida se podía albergar un cañón más pesado que en los barcos de línea.



Ilustración 6. *Mary Rose - Victory - Monitor* [4]

No obstante los argumentos dados, puede seguir resultando extraño que en estas fechas se diese un salto tan grande en la construcción naval. Para valorar en su justa medida la magnitud de tal avance vamos a valernos de las palabras de Colin White, antiguo director del Royal Naval Museum en Portsmouth: «hubo un periodo de estabilidad entre el *Mary Rose* y el *Victory*. Se dieron, por supuesto, cambios pero pocos y fundamentalmente pequeños (...) El *Victory* representa, si quieren, la cumbre en el diseño del buque de línea que empezó con el *Mary Rose*». A lo que añade el Dr. Andrew Lambert, historiador naval del King's College en Londres: «Durante 200 años el poder naval se medía por los navíos de línea de madera, cada uno de los cuales era solo un poco mejor que el anterior, donde un viejo barco de cuarenta años como el *Victory* pudo permanecer en perfecto estado de combate en *Trafalgar*». Así es cierto que en unos 200 años el avance fue nimio comparado con el que hubo en los 50 años posteriores. [4]

Así se pasó del *Mary Rose* en 1509 al famoso *Victory* de Nelson en 1765, que se mantuvo hasta el 1812, y de éste al *Monitor* 1862. Dicha transformación fue propulsada por la aparición de artillería capaz de disparar granadas explosivas de trayectoria tensa en 1819, desarrollada por el general francés Henri-Joseph Paixhans. Esta artillería producía muchos más incendios que la usada hasta ese momento por lo que fue obligado el uso de un material menos combustible que la madera.

Ahora bien, el blindaje no fue desde el principio tal y como lo conocemos hoy día. De hecho ni siquiera al principio estaba claro que blindar todo el casco fuera lo mejor. Así lo demuestra las diferencias entre *La Gloire* y el *HMS Warrior*, la respuesta británica al avance francés. Así mientras los franceses blindaron todo el casco los ingleses prefirieron proteger sólo el reducto artillero y la maquinaria, dejando más vulnerables la línea de flotación y el sistema de gobierno. La razón la dio W. Hovgaard en su «*Modern History of Warships*»: «Durante siglos los barcos de madera habían estado sin ninguna protección especial de estas partes, y cuando se empezaron a utilizar los buques de hierro no se sintió la necesidad de hacerlo». En la *Numancia* el hierro recubría todo el casco blindando la estructura de madera de teca [5].

Por último, no puede acabar el artículo sin recordar que la nuestra fue la primera fragata blindada en dar la vuelta al mundo. Hito relevante pues aunque hoy en día cualquier buque de guerra debe poder operar en cualquier escenario es cierto que los cálculos para su construcción deben tener en cuenta las mareas y cambios de densidad del agua de cada zona geográfica. Siempre es un honor que haya sido un barco español el primero en lograrlo.

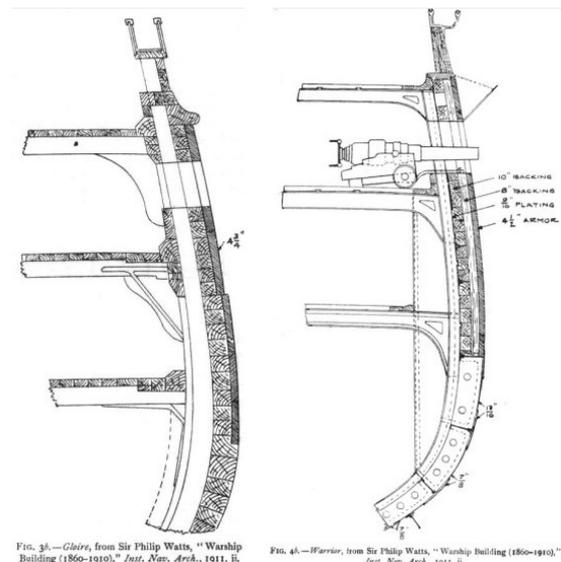


Ilustración 7. Blindajes de *La Gloire* (izq.) y *Warrior* (dcha.) [4]



Ilustración 8. Itinerario vuelta al mundo de la *Numancia* [10]

## Referencias

- [1] García Castillo S. K. *Análisis de laminado de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto*. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Recuperado de <<https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjxxqiy1a7TAh-VGaxQKHdC2CUsQFghAMAQ&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5781437439%2FAn%25C3%25A1lisis%2Bde%2Blaminados%2Bde%2Bmateriales%2Bcompuestos%2Bcon%2Bprecarga%2Ben%2Bsu%2Bplano%2By%2Bsometidos%2Ba%2Bim-pacto.pdf&usq=AFQjCNGUhCiwaZVP04ferusmoxglK6yHSg&cad=rja>>
- [2] Blanco F. *TEMA II Propiedades Mecánicas* (14/03/2017) Universidad de Oviedo. Recuperado de <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAII.2.7.PROPIEDADESMECANICAS.pdf>>
- [3] (14/03/2017) *Materiales de futuro*. Fondear.org. Recuperado de <[http://www.fondear.org/infonautic/barco/Diseno\\_Construccion/Mat\\_Futuro/Mat\\_Futuro.htm](http://www.fondear.org/infonautic/barco/Diseno_Construccion/Mat_Futuro/Mat_Futuro.htm)>
- [4] Ceño A. (15/03/2017). *La Introducción de los Primeros Acorazados (1859-1860)*. KBismarck.org. Recuperado de <<http://es.kbismarck.org/los-primeros-acorazados.html>>
- [5] Iriondo, Eduardo (1867). *Impresiones del viaje de circunnavegación en la fragata blindada Numancia*. España. Madrid.
- [6] Fotografía recuperada de <<http://foro.todoavante.es/viewtopic.php?f=49&t=898>>
- [7] Fotografía recuperada de <<http://www.todocoleccion.net/antiguedades-tecnicas/planos-fragata-acorazada-numancia-declarada-monumento-nacional-anos-1865-1916-14-4-43~x39777953>>
- [8] Fotografía recuperada de <[http://www.112gear.com/chalecos/informacion\\_general.htm](http://www.112gear.com/chalecos/informacion_general.htm)>
- [9] Ashby M. F. *Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades*. Vol 1. Pag 176. Recuperado de <<https://books.google.es/books?id=nrLSqjbHEl0C&pg=PA175&lpg=PA175&dq=tenacidad+tablas+materiales&source=bl&ots=Y199CZTc89&sig=VANmZd4Ba85FsWP-MeoAEydjOXPg&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj38r0w9bSAhVH04MKHXkFAdUQ6AEIM-TAG#v=onepage&q=dulce&f=false>>
- [10] Imagen recuperada de <<http://hombresdelamar.fundacionmuseonaval.com/la-exposicion/galerias-ambitos-tematicos/la-fragata-numancia-galeria>>

## FENÓMENO “WHIPPING” DERIVADO DE UNA EXPLOSIÓN SUBMARINA SIN CONTACTO

AN (CIA-EOT) D. BORJA NAVA CARÚS  
ARDIZ

### 1.- Introducción

Una explosión submarina sin contacto directo es muy perjudicial para el buque, ya que además de su estructura, sus sistemas y equipos pueden ser dañados por consecuencia de este fenómeno.

La principal consecuencia de una explosión submarina es la creación de una onda de presión que se transmite en el agua a la velocidad del sonido en este medio, y el desarrollo de una burbuja llena de los gases generados por la volatilización de los explosivos.

De forma general, se puede afirmar que la energía generada se divide entre la onda de presión (onda de choque) y la burbuja de gas en partes iguales.



*Fig. 1. Efecto WHIPPING sobre un buque*

### 2.- Onda de choque

Cuando una carga submarina explota, se produce instantáneamente, un pulso u onda de presión que se transmite en todas las direcciones, debido a la gran cantidad de energía generada durante la explosión. Esta onda de choque actúa en contra de la presión hidrostática en su camino de propagación y, en general, se puede decir que se traslada con la velocidad del sonido en el agua.

La curva de presión presenta una forma exponencial decreciente a partir del pico inicial de presión  $P_0$  que se alcanza rápidamente después de la explosión. El pico de presión en cada punto, depende a su vez de la cantidad de explosivo y de la distancia entre los puntos de detonación y estudio.

Las presiones se rigen de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\frac{t}{\sigma}}$$

$$P_0(R) = k_1 \cdot \left( \frac{M^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_1}$$

R: distancia entre los puntos de detonación y estudio

M: carga explosiva en kg.

K1, A1: constantes en función del tipo de explosivo.

Hay que destacar que, en el caso de que la onda de presión directa alcance el fondo marino, se produce otra onda reflejada de compresión.

La magnitud y naturaleza de esta onda depende en gran medida de la profundidad a la que la carga detona y del tipo de material del fondo.



*Fig. 2. Detonación de una mina en el mar*

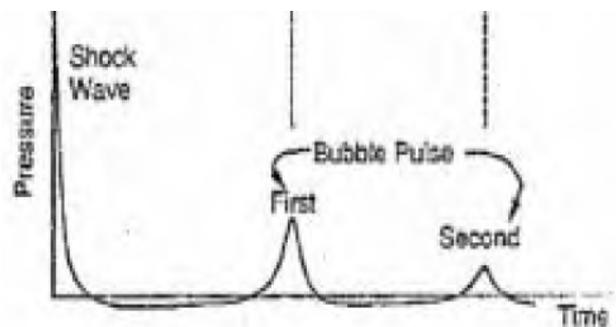
### 3.- Burbuja

Los gases creados durante la explosión originan una burbuja de gas de muy alta temperatura. La presión interna de la burbuja es mucho mayor que la suma de las presiones atmosférica e hidrostática. El diámetro de la burbuja crece muy rápidamente. Además de la expansión de la burbuja por la diferencia de presiones, ésta emigra simultáneamente hacia la superficie. Mientras la expansión tiene lugar, la presión interior decae, pero su ascensión continúa debido a la inercia y al propio empuje hidrostático.

Debido a la inercia propia de la expansión, la presión interna de la burbuja llega a superar a la hidrostática. En este momento la burbuja empieza a disminuir su tamaño, comprimiendo y calentando de nuevo los gases hasta que se produce una nueva explosión y se genera otra segunda onda de choque de menor intensidad.

Este fenómeno se repite de forma oscilante hasta que la burbuja alcanza la superficie, de manera que en su ascensión se van generando ondas secundarias de choque.

En la figura se presenta la evolución de la burbuja.



*Fig. 3. Evolución de la presión de las burbujas en el tiempo*

#### 4.- Whipping o latigazo

La burbuja oscilante, emigra hacia la superficie con un movimiento oscilatorio de expansión y contracción, excitando en su desplazamiento una gran cantidad de agua, similar en tamaño al desplazamiento de un buque. Esta gran cantidad de agua es acelerada y decelerada en el entorno del fondo del buque. Además tienen lugar pulsos secundarios, generados por sucesivos colapsos de la burbuja, creándose ondas de choque superpuestas a la principal. El resultado de estos movimientos y ondas de choque son fuerzas de gran entidad actuando sobre el buque, excitando su estructura longitudinal y respondiendo ésta de manera similar a un «látigo». Este fenómeno se conoce como *whipping o latigazo*.

Dependiendo del comportamiento dinámico de la burbuja y de su interacción con el casco, la estructura puede llegar a colapsar repentinamente, dando lugar a la pérdida del buque.

El fenómeno del *whipping* suele tener lugar especialmente cuando la carga explota a distancias relativamente cortas del buque. Consiste en un movimiento de flexión longitudinal cíclico a todo lo largo de la eslora, en sus modos propios más bajos. La onda de choque principal excita al buque, haciendo que vibre en su modo primario. Si coincide una segunda onda en el momento en que el buque se encuentra en quebranto, se produce un fenómeno de resonancia, resultando por tanto en un movimiento de gran amplitud. Si se da el caso de que la explosión sucede lo suficientemente cerca, puede incluso ocurrir que este movimiento sea lo suficientemente severo para que la estructura global colapse.

Se puede afirmar que los parámetros de los que depende la amplitud del momento flector inducido son: la cantidad de explosivo (M), la distancia a la que se produce la explosión (R) y la orientación con respecto al buque ( $\beta$ ).

Estos parámetros se resumen en lo que se conoce como geometría de la carga.

Comúnmente el nivel de amenaza se define en términos del *Shock Factor*.

Existen principalmente dos formas de definirlo: *Hull Shock Factor* (HSF) y *Keel Shock Factor* (KSF).

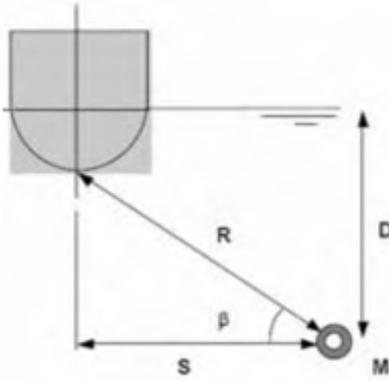
$$HSF = \frac{\sqrt{M}}{R}$$

$$KSF = \frac{\sqrt{M}}{R} \cdot \frac{1 + \text{sen}(\beta)}{2}$$

En general y para choques de una severidad moderada, se puede afirmar que los efectos del choque sobre los equipos del buque se pueden considerar proporcionales a estos factores.

| Factor de choque | Dañar  |
|------------------|--|
| <0,1             | Daño muy limitado. Generalmente considerado insignificante                                     |
| 0,1-0,15         | Fallos de iluminación; Fallas eléctricas; Algunas fugas de tubería; Rupturas de tubos posibles |
| 0,15 - 0,20      | Aumento en la ocurrencia de daño arriba; Probable ruptura del tubo; Fallas de maquinaria       |
| 0,2              | Daño general a la maquinaria   |
| ≥ 0,5            | Normalmente considerado letal para una nave  |

**Tabla 1. Daños y consecuencias asociados al impacto de la carga sobre el buque**



D: distancia de la mina a la superficie.

R: mínima distancia al buque.

S: distancia horizontal mina-buque.

M: posición de la mina que detona.

$\beta$ : ángulo de la mina con respecto al buque.

**Fig. 4. Esquema buque-mina**

Para este estudio se utilizan códigos para predecir la respuesta elástica de baja frecuencia del buque ante las fuerzas hidrodinámicas inducidas por la burbuja gaseosa. En general, la predicción de esta respuesta dinámica no precisa de modelos estructurales complejos, y el buque se puede considerar como estructuralmente equivalente a una viga de Timoshenko [1], con una distribución no uniforme de masas y rigidez a lo largo de la eslora. Como es lógico, estos códigos incorporan a su vez la interacción dinámica entre la estructura y el fluido incompresible circundante.

Para el estudio de la magnitud de la respuesta de la estructura ante este fenómeno, se introduce el parámetro adimensional *whipping factor*. Un valor igual a la unidad indica pandeo incipiente por compresión en las fibras extremas del buque-viga. En el caso de estados de tensión de tracción, la unidad indica que el material ha alcanzado su límite elástico.

Por tanto, el objetivo principal del estudio del fenómeno es establecer los contornos de este factor para el buque cuando se encuentra sometido a una carga submarina. La extensión de estos contornos da una idea clara y comparativa del comportamiento dinámico de la estructura frente a distintas «geometrías de la carga», y de la configuración de la amenaza en el entorno del buque.

Hay que destacar que este tipo de representaciones únicamente proporciona una medida de la vulnerabilidad de manera global y no indican qué áreas del buque son particularmente susceptibles de ser dañadas. Este tipo de información únicamente se puede conocer a partir de análisis similares a lo largo de toda la eslora del buque.

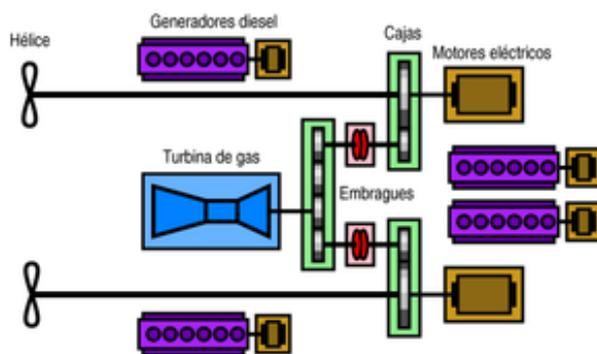
## 5. - Referencias

- [1] Timoshenko, S.P. «*Strength of Materials. Part 1: Elementary Theory and Problems*».

## SISTEMA CODELAG PARA LA FRAGATA F110

AN (CIA-EOT) D. ANTONIO INOCENCIO CATALÁN  
ARCART

### Descripción general del sistema de propulsión



CODELAG (COmbined Diesel-ELEctric And Gas - Combinado diésel-eléctrico y gas) es un sistema de propulsión naval, modificación del sistema CODAG.

[A] Esquema de un sistema de propulsión CODELAG

Un sistema CODELAG [A] emplea motores eléctricos conectados a los árboles de las hélices. Los motores son alimentados por generadores diésel. Para obtener velocidades mayores, una turbina de gas impulsa los árboles mediante una caja de transmisión de conexión cruzada; para velocidades de crucero el sistema de transmisión de la turbina se desconecta mediante embragues.

Este tipo de planta permite la propulsión diésel-eléctrica sin reductor gracias a que los motores eléctricos van directamente acoplados a los ejes. A través del reductor se realizan la propulsión modo turbina y modo CODELAG.

Con este sistema de propulsión se pretende disminuir los consumos y emisiones contaminantes en un 20% respecto a los sistemas propulsivos de las fragatas F80 y F100 (Electric, 1985) que utilizaban el llamado CODOG (combinado diésel o turbina de gas).

El sistema CODOG a diferencia del CODELAG no puede actuar simultáneamente con la turbina y los motores eléctricos, por lo necesitaríamos mayor potencia en la turbina para conseguir las mismas aceleraciones y velocidades máximas que con el sistema CODELAG, lo que produciría un aumento del gasto de combustible, ya que los consumos de las turbinas son muy superiores a los de motores diésel.

El problema de utilizar la turbina para velocidades de crucero es que en ese régimen de revoluciones el consumo es mayor que para el régimen de potencia máxima.

El combustible utilizado será el DFM F76 para poder cumplir con las especificaciones mínimas del MARPOL 73/78 (Blanco Montes, 2016) que concretamente afecta a la definición de los límites de emisión de Óxidos de Nitrógeno y también hace referencia a las últimas revisiones del limitado contenido en azufre y así cumplir con la normativa de medio ambiente.

### Turbina LM2500

La turbina LM2500 está formada por un generador de gas y una turbina de potencia. Forman parte del equipo la bomba de aceite, el sistema de suministro de combustible, las secciones de aire de entrada y gases de escape, y el sistema de control. La potencia total es de unos 22.028 kW, la velocidad máxima de la turbina de potencia es de 3600 rpm, el peso es de 22.232 kg, longitud de 8200 mm y el rendimiento mecánico supera actualmente el 37% en condiciones ISO (Blanco Montes, 2016).

El generador de gas de la LM2500 (Electric, 1983) consta de 16 etapas de compresión con una relación 16:1. Dispone de 16 etapas de geometría variable, una cámara de combustión anular con inyectores de com-

bustible montados desde el exterior, y 2 etapas de turbina de alta presión refrigeradas por aire de alta presión que se extrae del compresor. La turbina de potencia está formada por 6 etapas de turbina de baja presión que giran gracias a la energía que reciben de los gases que salen del generador de gas.

Se trata pues de una turbina de gas derivada de un motor de aviación de General Electric CF6, de cámara de combustión anular y multieje, dividida generalmente en dos partes:

- El generador de gas, que incluye el compresor, la cámara de combustión y la turbina de alta presión. Las entradas de este generador de gas son el aire comburente y el combustible. El eje del compresor, de 16 etapas, y de la turbina de alta presión, de dos etapas, están unidos y rotan solidarios a la misma velocidad. La salida son gases a cierta velocidad, que todavía pueden generar trabajo mecánico.
- La turbina de potencia tiene como entrada los gases a temperatura y presión intermedia, ya que, estos han perdido una buena parte de su energía en el accionamiento del compresor. La energía de estos gases se emplea para producir movimiento mecánico rotativo en el eje de dicha turbina, que es independiente del eje del generador de gas.

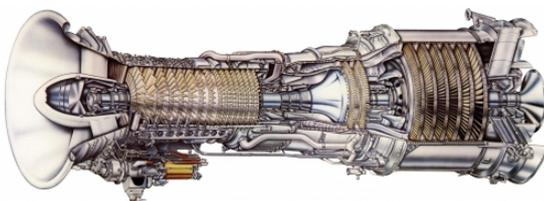
El eje de la turbina de potencia está acoplado con el eje del equipo que se quiere impulsar, este hecho hace que la salida de los gases en el escape tenga que ser radial (en la dirección axial está el equipo accionado).

Los elementos constituyentes de la turbina de gas LM2500 son los siguientes:

- El generador de gas, compuesto a su vez por compresor de 16 etapas, cámara de combustión anular de 30 combustores y turbina de alta presión de 2 etapas, que mueve al compresor.
- La turbina de potencia, con eje independiente del anterior, compuesta por 6 etapas.
- Contenedor acústico, que aloja el conjunto formado por el generador de gas y la turbina de potencia.
- Equipo de lubricación, encargado de suministrar aceite de lubricación, filtrado y a la temperatura adecuada, a los rodamientos encastrados en los ejes.
- Sistema de limpieza del compresor, que suministra agua y productos químicos para el mantenimiento de los álabes del compresor.
- Sistema de control, encargado de la monitorización de los principales parámetros de funcionamiento, el control de las secuencias de determinadas maniobras (arranque, parada, limpieza, giro lento) y el gobierno de las protecciones que lleva implementada la turbina para su funcionamiento seguro.
- Sistema auxiliar de suministro de combustible, encargado de suministrar combustible desde los tanques de servicio a la turbina de gas, en las condiciones especificadas por los fabricantes.

### Funcionamiento turbina de gas

Las turbinas de gas (figura 1) tienen como objetivo convertir la energía química en energía mecánica. Por lo



**Figura 1. Turbina de Gas**

que el funcionamiento de una turbina de gas viene dado por la inyección de aire al compresor (figura 1. [A]), éste comprime el aire para aumentar la presión, después pasa por la cámara de combustión (figura 1. [B]) donde se inyecta el combustible de forma continuada y se produce la ignición. Y al aumentar la presión y la temperatura se obtiene una energía mayor que al principio por lo que se introduce la mezcla en la turbina de alta presión (figura 1. [C]) donde se expande

parcialmente para obtener la energía que mueve a la turbina de compresor y seguidamente se aprovecha esta energía que queda y se introduce en la turbina de potencia (figura 1. [D]) que acoplada a un eje que nos da la potencia necesaria (figura 1. [A]). La energía que no se utiliza para mover el eje sale en forma de gases, por lo que estarán a muy alta temperatura y a una gran velocidad.

## Ciclo de Brayton

Cabe destacar que la turbina se adapta al ciclo de Brayton. Es un ciclo termodinámico consistente, en su forma más sencilla, en una etapa de compresión adiabática (sin intercambio de calor con el entorno), una etapa de calentamiento isobárico (presión constante) y una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible.

Su funcionamiento por etapas es el siguiente:

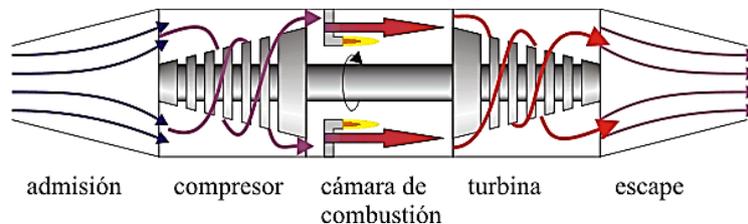


Figura 1.2. Turbina de gas

### I. Admisión

El aire frío y a presión atmosférica entra por la boca de la turbina.

### II. Compresor

El aire es comprimido y dirigido hacia la cámara de combustión mediante un compresor (movido por la turbina). Puesto que esta fase es muy rápida, se modela mediante una compresión adiabática A→B.

### III. Cámara de combustión

En la cámara, el aire es calentado por la combustión del queroseno. Puesto que la cámara está abierta el aire puede expandirse, por lo que el calentamiento se modela como un proceso isóbaro B→C.

### IV. Turbina

El aire caliente pasa por la turbina, a la cual mueve. En este paso el aire se expande y se enfría rápidamente, lo que se describe mediante una expansión adiabática C→D.

### V. Escape

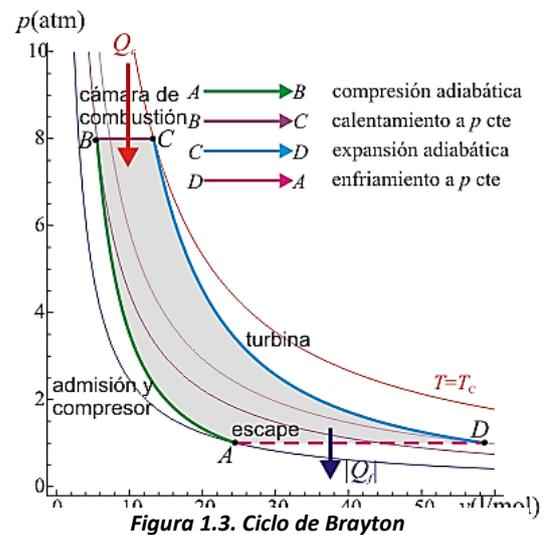


Figura 1.3. Ciclo de Brayton

Por último, el aire enfriado (pero a una temperatura mayor que la inicial) sale al exterior. Técnicamente, este es un ciclo abierto ya que el aire que escapa no es el mismo que entra por la boca de la turbina, pero dado que sí entra en la misma cantidad y a la misma presión, se hace la aproximación de suponer una recirculación. En este modelo el aire de salida simplemente cede calor al ambiente y vuelve a entrar por la boca ya frío. En el diagrama PV esto corresponde a un enfriamiento a presión constante D→A.

- El trabajo neto realizado por el compresor es:  $W_{\text{compresor}} = mC_p(\text{aire})(T_B - T_A)$
- El calor aportado en la cámara de combustión es:  $Q_{\text{aportado}} = mC_p(\text{gas})(T_C - T_B)$
- El trabajo neto realizado por la turbina es:  $W_{\text{turbina}} = mC_p(\text{gas})(T_C - T_D)$

- El trabajo neto puede escribirse como:  $W_{neto} = mCp(gas)(T_C - T_D) - mCp(aire)(T_B - T_A)$
- El trabajo neto realizado por unidad de masa:  $W_{neto} = W_{turbina} - W_{compresor}$
- La eficiencia térmica ideal es:  $\eta_t = \frac{W_{neto}}{Q_{aportado}}$

- ❖  $C_p$  (Kcal/Kg °C) = Calor específico medio. (Cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad.
- ❖ T (°C) = Temperatura.
- ❖ m (Kg) = Masa.

## Funcionamiento de las partes principales de la turbina de gas

### 1) El compresor

El compresor es el primer elemento en la turbina de gas, su función es aumentar la presión de aire de admisión. Al aumentar la presión se aumenta la temperatura, quedando constante la entropía (grado de desorden molecular) y disminuyendo el volumen. En el esquema (figura 1.4) del Ciclo Brayton se muestra como el punto 1-2 la fase del compresor, donde 1 es a temperatura y presión ambiente, es decir la entrada de aire, y el punto 2 es la salida al compresor a una presión mayor.

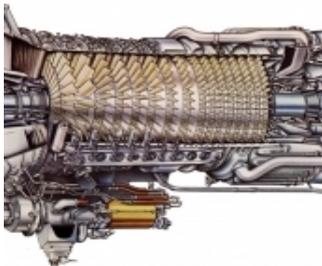


Figura 1. Compresor [A]

En los compresores axiales, la corriente de aire fluye paralela al eje de rotación, a través de unos álabes móviles situados en el rotor y otros álabes fijos situados en el estator. Este eje de rotación estará ensamblado a la turbina de alta presión. A diferencia de la turbina, el recorrido de la corriente de aire de un compresor axial va disminuyendo el área de su sección transversal, en la dirección de la corriente en proporción a la reducción de volumen del aire según progresa la compresión de escalón a escalón. En el compresor se pierde la mayor

parte del trabajo generado por la turbina, del orden del 40% del rendimiento total de la turbina es perdido en esta etapa.

### 2) Cámara de combustión

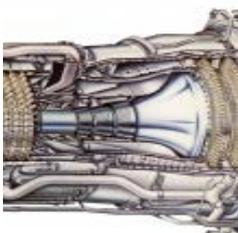


Figura 1. Cámara de Combustión [B]

El segundo elemento en una turbina de gas es la cámara de combustión, donde se mezcla el aire con combustible y se inicia la ignición. Se tiene que tener en cuenta que la cantidad de aire que se mezcla es mucho mayor que la cantidad de combustible, en general la relación será de 10:1.

En el esquema del Ciclo Brayton se muestra la cámara de combustión como los puntos 2-3 (figura 1.4) donde se eleva la temperatura a presión constante y a la salida de la cámara existirán unas pérdidas. En la cámara de combustión se producen pérdidas de rendimiento del orden del 5% del total.

### 3) Turbina de alta presión

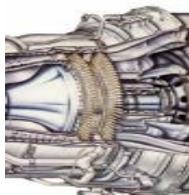


Figura 1. Turbina de alta presión [C]

La turbina de alta presión consta de álabes fijos y móviles que hacen girar un eje de rotación que está unido al compresor.

La mezcla que sale de la cámara de combustión llega a la turbina a una temperatura que está alrededor de 1200°C.

En el Ciclo Brayton se representa en punto 3 (figura 1.4) como la entrada a la turbina y el punto 4 (figura 1.4) a la salida, por lo que se observa que se pierde presión,

es decir energía. La pérdida de rendimiento en esta etapa se atribuye a la del compresor ya que están unidos por medio de un eje.

#### 4) Turbina de potencia



Figura 1. Turbina de Potencia [D]

En la turbina de potencia, la mezcla entra a una presión menor que en la etapa anterior pero suficiente como para aprovechar la caída de presión y llegar a la presión ambiente.

Esta turbina puede estar conectada a un alternador o a una hélice, donde también tendremos unas pérdidas mecánicas.

Los puntos 4-5 (figura 1.4) representan la entrada y salida respectivamente, y se puede observar que los gases que salen de esta turbina están a presión atmosférica. En esta etapa la pérdida de rendimiento está en torno al 18% del rendimiento total de la turbina.

#### Esquema explicativo del ciclo de Brayton:

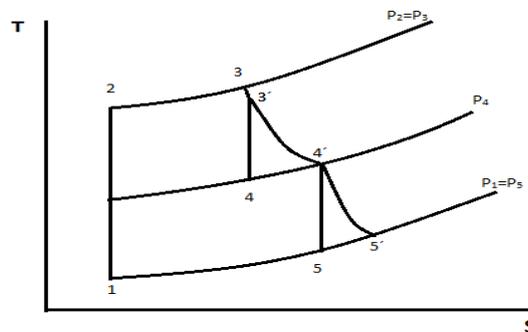


Figura 1.4. Ciclo Brayton para turbina LM2500

#### Motores diésel y generadores

La fragata F-110 dispondrá de dos ejes (Quílez Ruiz, 2016). Su planta propulsora proporcionará al buque la máxima capacidad de propulsión, gobierno y maniobra, tanto en situación normal de navegación como en cualquier otra demandada por la situación táctica, alcanzando una autonomía mínima de diseño de 4100 millas a la velocidad de 15 nudos (González Tejero, 2016).

La planta propulsora será combinada, en una configuración de al menos una turbina de gas y de motores eléctricos (o combinación de motores eléctricos con motores diésel como alternativo). La planta propulsora permitirá al buque alcanzar la velocidad máxima de al menos 26 nudos con turbina y una velocidad máxima con la propulsión eléctrica (diésel-eléctrica) de 17 nudos.

La planta eléctrica deberá satisfacer las necesidades de energía eléctrica, tanto de suministro de potencia como de aquellas otras señales eléctricas necesarias para que el buque pueda seguir cumpliendo sus cometidos y, dependiendo de la situación táctica, adoptar la configuración más adecuada.

La planta eléctrica, en combinación con la planta propulsora, proporcionarán al buque un alto margen de reserva de capacidad de generación eléctrica (al menos 500 kW), en previsión a la incorporación en el futuro de sistemas de armas con una demanda significativa de potencia eléctrica.

#### Motores eléctricos propulsores

El motor eléctrico considerado será un motor de aproximadamente 3,4 MW de potencia (Quílez Ruiz, 2016). Operando en modo CODELAG, los motores eléctricos propulsores a velocidad máxima aumentarán sus rpm por medio del convertidor de frecuencia adaptándose a las rpm provenientes de la turbina de gas.

## Engranaje reductor

Tal y como se muestra en la figura 1.5, el engranaje reductor está compuesto por una etapa primaria y dos etapas secundarias (Quílez Ruiz, 2016). La etapa primaria tiene un eje de entrada para la turbina de gas y dos ejes de salida que conectan con las etapas secundarias. Cada etapa secundaria tiene una salida para acoplar la línea de ejes respectiva.

En la siguiente figura se muestra una disposición del reductor para esta alternativa:

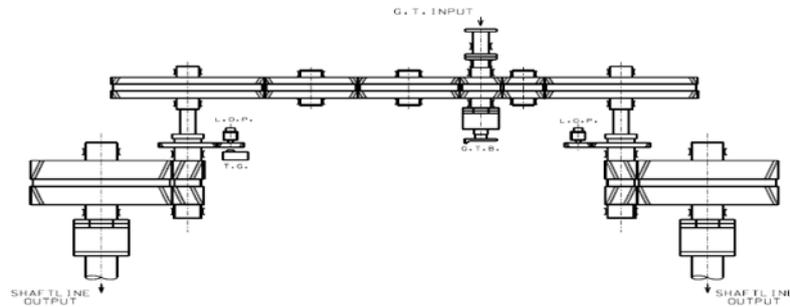


Figura 1.5. Engranaje reductor

## Líneas de ejes

Se instalarán dos líneas de ejes y cada línea de ejes constará de una hélice, un eje de cola, un eje de bocina y dos ejes intermedios (Quílez Ruiz, 2016). Entre los ejes intermedios, se instalarán el actuador hidráulico de la hélice, la chumacera de empuje y el motor eléctrico propulsor.

El dimensionamiento será acorde con la potencia máxima a suministrar por cada línea de ejes.

## Modos de funcionamiento

El sistema CODELAG permite diferentes modos de propulsión al combinar de distintas partes que lo componen:

- A. Los dos (2) motores eléctricos propulsores funcionando (cada motor eléctrico mueve su línea de ejes asociada). Reductor parado y embragues del reductor desconectados y turbina de gas parada. (Figura 1.6).

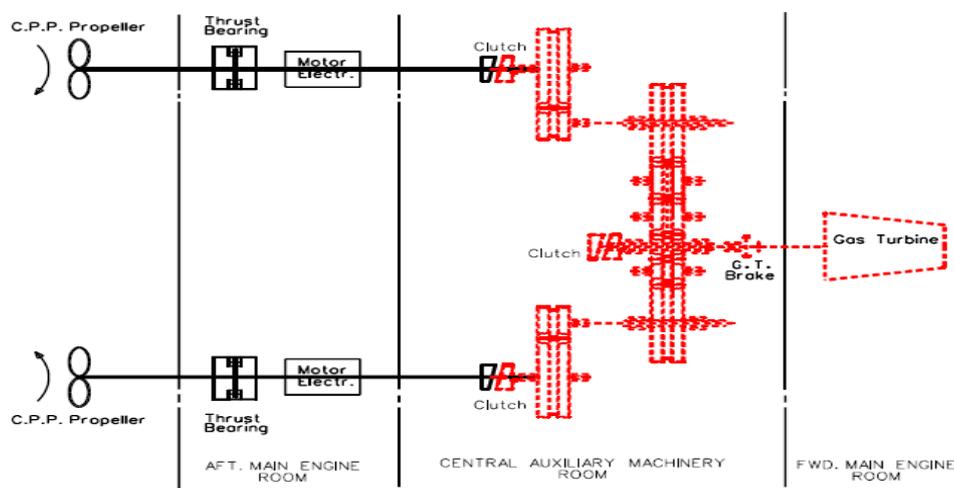


Figura 1.6. Engranaje reductor

- B. Turbina de gas en funcionamiento (se mueven las dos líneas de ejes) y motores eléctricos propulsores desconectados. (Figura 1.7).

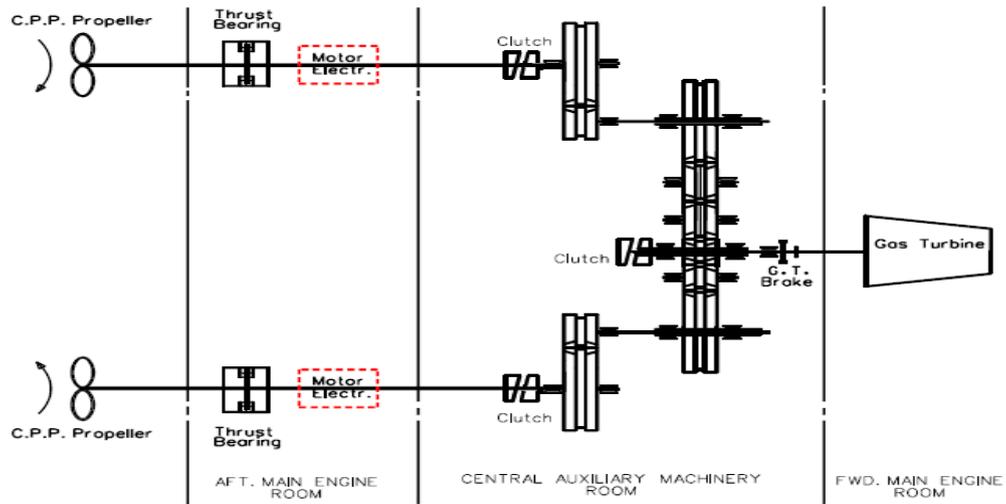


Figura 1.7. Engranaje reductor

- C. Turbina de gas y los dos motores eléctricos propulsores en funcionamiento (se mueven las dos líneas de ejes). (Figura 1.8).

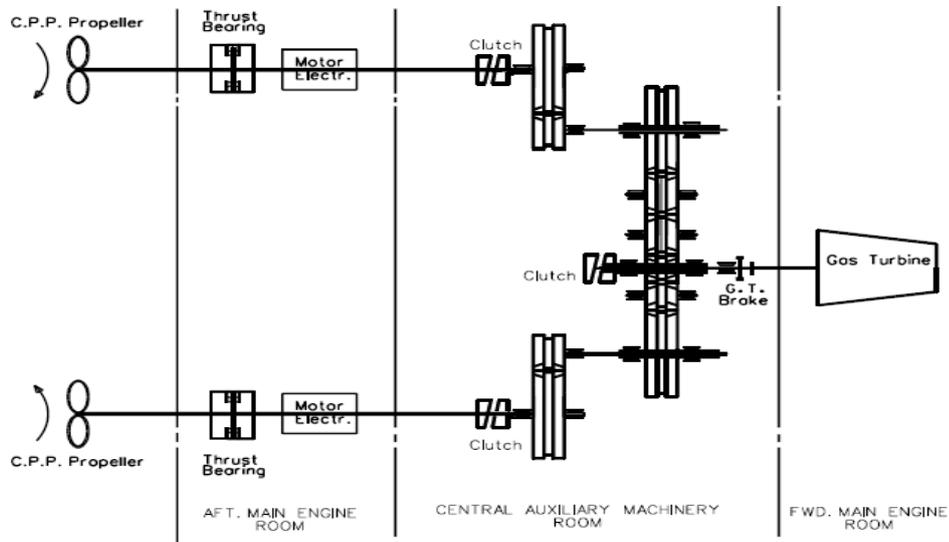
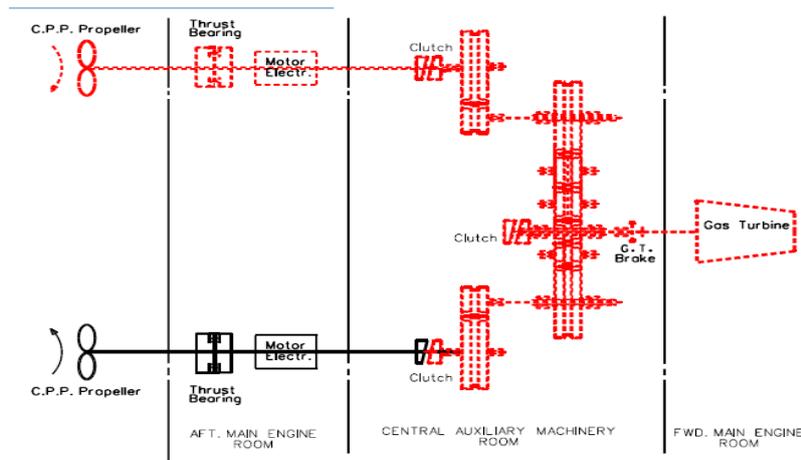


Figura 1.8. Engranaje reductor

- D. Uno de los dos motores eléctricos propulsores en funcionamiento y el otro parado (se mueve la línea de ejes asociada al motor eléctrico en funcionamiento), reductor parado y embragues del reductor desconectados y turbina de gas parada. (Figura 1.9).



**Figura 1.9. Engranaje reductor**

## Bibliografía

- Blanco Montes, G. (2016). *Fragata F-110 Fase de Definición. Documento N° 835-2-08-Deficiencia de sistemas de admisión y exhaustación*. Ferrol: Navantia.
- Blanco Montes, G. (2016). *Fragata F-110.Fase de definición. Documento N° 835-2-01.Criterios y estándares de proyecto para propulsión*. Ferrol: Navantia.
- Electric, G. (1983). *Introducción a turbina de gas LM2500.DIC-23411-024*. Chicago: GE.
- Electric, G. (1985). *Manual técnico de sistema de turbina de gas LM2500 para Fragatas F80. DIC-234-02002-300*. Cincinnati: GE.
- Electric, G. (1999). *Manual técnico de sistema de turbina de gas LM2500 para Fragatas F100.DIC-23411-010*. Cincinnati: GE.
- González Tejero, S. (2016). *Fragata F-110.Fase de definición. Documento N° 835-8-03. Informe potencia-velocidad*. Ferrol: Navantia.
- Navy, U. (1991). *Programa de turbina de gas ICR.N° 00024-91PR-52146*. U.S Navy.
- Quílez Ruiz, S. (2016). *Fragata F-110.Fase de definición. Documento N° 835-2-05.Cálculo línea de ejes*. Ferrol: Navantia.
- Quílez Ruiz, S. (2016). *Selección de maquinaria propulsora.Fase de definición de fragata F-110.Documento N° 835-2-03*. Ferrol: Navantia.

## EVOLUCIÓN DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DEL BUQUE

AN (CIA-MOEOF) D. BENITO IGNACIO RODRÍGUEZ-PASTORIZA ALÍAS

Base Naval de Rota

### Introducción

La hidrodinámica, además de ser un adjetivo que significa la disminución de la resistencia al agua, es la rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos. A continuación, se va a analizar cómo el desarrollo del estudio de la hidrodinámica ha ido evolucionando a la vez que influía notablemente en la comprensión del comportamiento en la mar de un buque.

**Palabras clave:** hidrodinámica, comportamiento, ola, balance, cabezada.



*Fragata Álvaro de Bazán navegando*

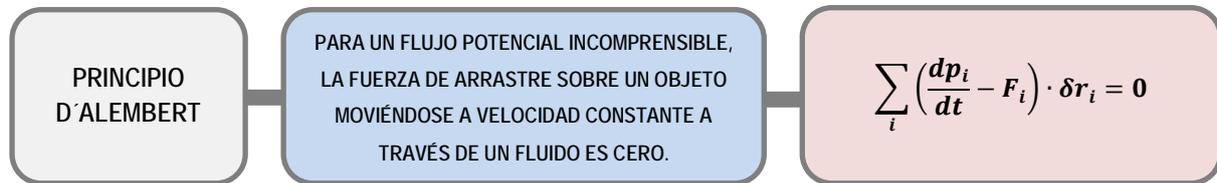
### Estudio hidrodinámico del buque

Casi siempre las embarcaciones se han pensado como si fueran a navegar en aguas tranquilas, pero pocas veces se ha navegado en esa situación. Es decir, no se tenía en cuenta el empeoramiento experimentado por el comportamiento de un barco bajo la acción de las olas. Raramente hasta ahora, se había analizado la capacidad de un buque para negociar la mar durante el proyecto; primeramente, porque todavía no se tenía experiencia suficiente sobre los procesos de modificación de sus formas sin perjudicar otras características; y además, porque existía una gran ausencia de experiencia para conocer previamente lo que podría sucederle a una embarcación navegando en mar gruesa.

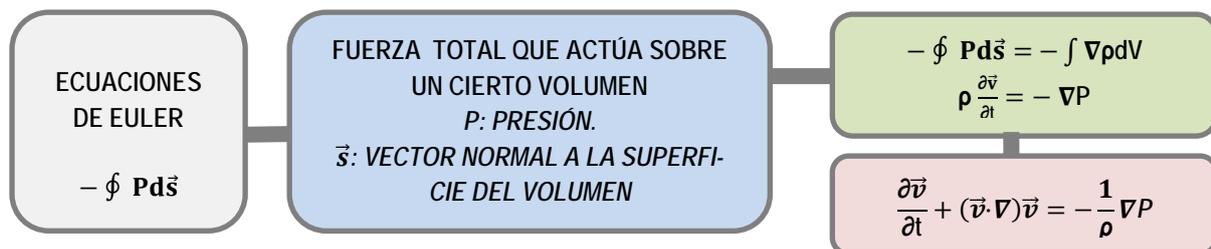
Aunque últimamente la situación ha mejorado, los buques de guerra trabajan con valores normalizados de aceleración vertical o ángulos de balance, dichos criterios sólo se pueden comprobar en el barco ya construido. Sí es cierto que hubo un interés genérico por estudiar lo que le sucedía a un buque en mar con olas y el propio Nelson ya reflexionó dejando claro que los barcos no eran útiles si no eran capaces de aguantar la mar.

«Si tengo que vigilar a los franceses debo estar en la mar; y en la mar hace mal tiempo; si los barcos no son capaces de soportar el mal tiempo, no sirven para nada».

Lord Nelson al Almirantazgo Británico, desde Tolón.



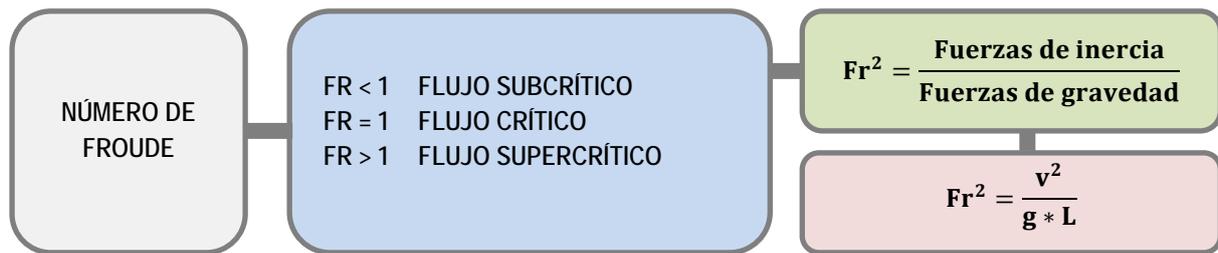
Sin embargo, no es hasta el siglo XVIII cuando se presta atención, de verdad, a la hidrodinámica del buque. Ejemplos de este interés son el establecimiento de las bases de la teoría matemática de la Arquitectura Naval por parte del D. Jorge Juan, así como el trabajo de D'Alambert [1] *Essai d'une Nouvelle Theorie de la Resistance des Fluides* englobado en una iniciativa de la Academia de Ciencias de Berlín sobre la resistencia de los fluidos. En éste, se enunciaba la paradoja según la cual un cuerpo sumergido en un fluido perfecto no experimenta ninguna clase de resistencia al movimiento. Y es que la Academia de Ciencias de París comenzó a proponer, a sabios de todo el mundo, estudios relacionados con la Arquitectura Naval. Destacó el propio Euler [2], considerado padre de la hidrodinámica, siendo capaz de reunir ideas inconexas dándoles unidad, y publicando su tratado de arquitectura naval *Scientia Navalis*; que junto con el de Bouguer [3] *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements*; constituyó la base del famoso *Examen Marítimo* de Jorge Juan [4].



En el siglo XIX, los trabajos de hidrodinámica del buque se multiplicaron, apareciendo estudios sobre las olas cuyo punto de partida es la *Theorie der Wellen*, publicada por F. Gerstner [5]. Sin embargo, los buques se seguían construyendo en función de la experiencia; de nada servía la teoría. Y es que el problema principal seguía siendo la dificultad de resolver teóricamente los problemas que los barcos planteaban.

Más tarde, con el uso de la propulsión mecánica y del hierro para construir el casco, cambió la situación, permitiéndose el establecimiento de líneas regulares al no depender la velocidad de una fuerza como el viento. Conocer previamente la velocidad a la que iba a poder ir un barco se había convertido en una necesidad imperiosa hasta entonces no resuelta. Pero el desarrollo científico hizo que fueran mejorando los conocimientos sobre los fenómenos que intervenían en el comportamiento hidrodinámico de los buques, y que pasados la mitad del XIX, se hubiera estudiado seriamente la resistencia al avance, algo mínimo sobre el gobierno, y se encontraran los focos de atención sobre el balance y la cabezada.

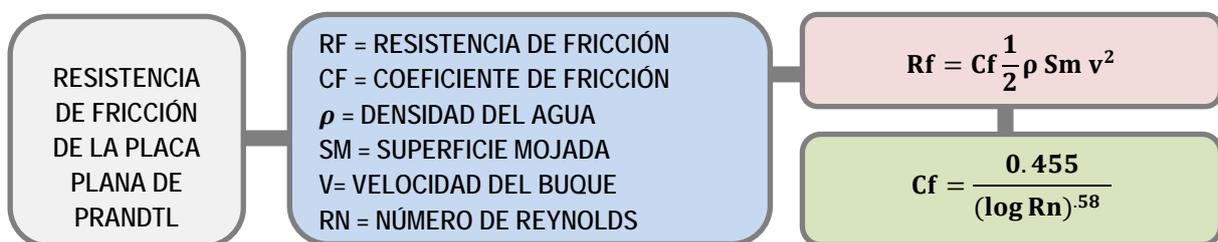
En relación con lo anterior, destacan los trabajos de Navier, Reech, Scott Russell, Rankine, Lord Kelvin y W. Froude. De este último, la ley de comparación inició el camino de la experimentación. El éxito de su método, ya que lleva a la consecución de predicciones próxima a la realidad, también colaboró en la dejación de la teoría. Se descentró el foco de trabajos como el de Michell [6] sobre la resistencia por formación de olas de un buque.



Ya a comienzos del siglo XX, científicos como Tomas Havelock y Ludwig Prandtl, comenzaron una nueva etapa en el estudio de la resistencia de un buque. Se reflexionó mucho sobre el balance pero no se alcanzaban resultados prácticos, y no se era capaz de saber cómo era la superficie del mar ni cómo representarla matemáticamente. Las hipótesis eran que el buque se movía: porque se forzaba el movimiento en mar en calma, o por la acción de olas regulares; tesis defendidas por Froude y Krylov. Pero la realidad es que la superficie del mar no es una ola regular. Daban a la superficie del mar la forma de una senoide o de una trocoidé, geometrías diferentes de la que sigue la superficie de una mar agitada, ya que las olas no se repiten. Es cierto que una relación elevación-depresión, pero poco más hay de similitud. Es confusa la mar, aunque se puede sacar una dirección predominante. Dicha dificultad para parametrizarlas hizo concluir a Lord Rayleigh que no hay ley que sigan las olas.

**«Aparentemente la principal ley que sigue la mar, es que no sigue ninguna».**

Lord Rayleigh

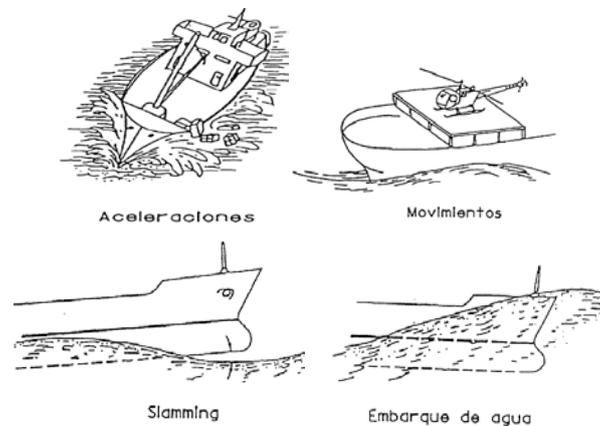


Por su parte, las torres de los barcos de guerra aportaban un enorme aumento de pesos. Es cierto que ya se conocía la teoría de la estabilidad transversal pero no había procedimiento de calcularla cuando el buque se escoraba un gran ángulo, desconociéndose la influencia del francobordo. Cuando el acorazado británico *Captain* en 1870 se hundió en una tormenta, se atribuyó el desastre al par escorante producido por las velas unido a una incorrecta estimación de pesos y al escaso francobordo. La discusión sobre la altura del francobordo en los buques de guerra siguió, defendiendo algunos, que la masa de agua embarcada en cubierta amortiguaba el balance. Luego, se demostraría que si se aumentaba el francobordo -en especial a proa- el barco embarcaba menos agua. Los proyectos iban, a medida que avanzaba el estudio, teniendo en cuenta la influencia del comportamiento en la mar, no contando aún, con base teórica o experimental sólida.

Por ejemplo, el aumento del agua embarcada en los buques de guerra de la serie Narvik – alemanes – fue debido a un aumento en el ángulo de cabezada producido por el montaje de una torre de cañones en el castillo de proa. Se ha demostrado que, navegando a 20 nudos y en una mar 5 -altura de ola 3.25-, la instalación de la batería modificaba poco el ángulo de cabeceo pero reducía el francobordo 25 cm, lo que aumentaba la probabilidad de embarque de agua.

Fue a mediados del XX, cuando comenzó la época moderna de los estudios del comportamiento en la mar. Manley St. Denis y J. Pierson [7] publicaron un trabajo donde ordenaron la confusión en torno a la superficie del mar, sentando las bases para calcular los movimientos de un buque. Por fin, y contrariamente a lo que decía Lord Rayleigh, demostraron que la superficie del mar puede describirse matemáticamente de

modo muy preciso -pero estadísticamente-. Son las olas un inconveniente e incluso un grave peligro para la navegación. Nada hay más influyente en el comportamiento de los barcos, ya que son capaces de zarandear o destrozarse cualquier embarcación. Para más inri, el propio barco al navegar va generando olas que frenan su avance.



Siguiendo con las olas, las situaciones difíciles en las que puede encontrarse una embarcación como resultado de la acción de la mar son: movimientos exagerados, fuertes cargas, o abundante embarque de agua. También se pueden producir otros efectos que empeoran el comportamiento de la embarcación. Y es que los movimientos reducen la capacidad de los equipos y sistemas –aumentan la probabilidad de avería– causando fatiga a los hombres, así como pueden inducir otros movimientos en los líquidos encerrados en los tanques –período de excitación próximo al del movimiento del fluido– apareciendo grandes fuerzas. Respecto a las cargas estructurales, los fuertes golpes en el pantoque –slamming– son las que más daños suelen causar, y las altas presiones asociadas con estos impactos son la fuente de daños locales. Existe también el fenómeno de *whipping* cuando vibra toda la estructura. Por su parte, en buques grandes, los momentos flectores y de torsión a los que están sometidas las estructuras debido a las olas, son también considerables. De menor entidad, son otros efectos como la pérdida involuntaria de velocidad, la disminución de estabilidad, o el *broaching*. Para mejorarlo es fundamental tratar de reducir los movimientos y las cargas inducidas por la mar.

En general, la disminución de movimientos y cargas aumentará la seguridad del barco y de su tripulación. Por eso, uno de los principales factores a tener en cuenta es la capacidad que la embarcación tiene para realizar su cometido en las diferentes condiciones de mar y climatología. Hoy en día, se emplean tres procedimientos tradicionalmente en la hidrodinámica del buque para averiguar los movimientos y las cargas que las olas inducen sobre los barcos: cálculos teóricos, ensayos con modelos geoméricamente semejantes, y pruebas con barcos reales –el de resultados más fiables–. Si se piensa en la embarcación acabada de construir, las pruebas de mar sirven para conocer cómo se comporta en la realidad, así como para comprobar la validez de las predicciones realizadas tanto por la teoría como por la experimentación, mejorando los procedimientos de la correlación modelo-buque.

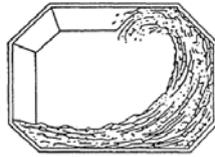
Ya hoy se aplican unas pruebas de comportamiento en la mar de un buque, llamadas técnicas de identificación, que permiten resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan cualquier fenómeno específico, calculando previamente sus coeficientes. Estos ensayos con modelos geoméricamente similares permiten hacer pruebas sistemáticas, mediante las que se puede conocer la influencia de cada uno de los parámetros principales de la embarcación en sus características hidrodinámicas. Sin embargo, tienen el inconveniente de la extrapolación, de obtener lo que haría el barco real desde resultados obtenidos probando un modelo de tamaño reducido. Para disminuir el efecto de escala conviene construir modelos grandes, y como se sabe de las limitaciones impuestas por el tamaño de las instalaciones, los modelos se ensayan en estanques naturales –sin control de las condiciones ambientales–. Eso sí, en los programas para calcular las características hidrodinámicas mediante computador, se producen grandes simplificaciones con el peligro de que no represente la realidad la ecuación final.

Lo más difícil en el estudio del comportamiento de un buque es decidir si, viendo cálculos o valores obtenidos, los movimientos son aceptables. Si no lo son, será preciso modificar el proyecto para que lo sean.

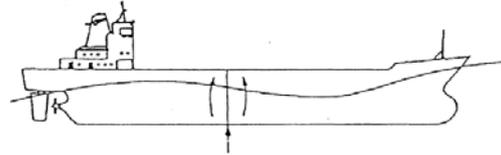
Es complejo de establecer ya que dependen, aparte de las características del buque, de la misión que debe desempeñar. De hecho, es en los barcos de guerra donde se han intentado establecer los primeros criterios ya que un movimiento excesivo podría provocar el empeoramiento de la eficacia, haciéndolos inservible para la misión. Del estudio de la hidrodinámica del buque, deben salir todas las respuestas.



Olas rompientes



Movimiento de líquido en tanques



Esfuerzos estructurales

## Referencias bibliográficas

- [1] Alambert, D'. (1752). *Essai d'une Nouvelle Theorie de la Resistance des Fluides*.
- [2] Euler, Leonhard. (1750). *Scientia Navalis*.
- [3] Bouguer, Pierre. (1746). *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements*.
- [4] Juan, Jorge. (1771). *Examen Marítimo*.
- [5] Gerstner, Franz. (1809). *Theorie der Wellen*.
- [6] Michell, J.H. (1898). *El método de Michell*.
- [7] St. Denis, Manley y Pierson, J. (1953). *On the Motions of Ships in Confused Seas*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.

García, J. (2008). *Un método de elementos finitos para análisis hidrodinámico de estructuras navales*. Tesis doctoral. Director: Eugenio Oñate. Universidad Politécnica de Cataluña.

Pérez, L. (2006). *II simposio de diseño e ingeniería naval "el futuro enfoque de la hidrodinámica marina"*. Madrid

Aláez, J.A. (1995). *Conferencia comportamiento del buque en la mar*. Madrid.

Pascual, E. (1999). *Optimización de la resistencia por formación de olas para una determinada gama de velocidades*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval de Madrid.

## BIOGRAFÍA



### EXCMO. SR. D. GASPARD SALCELDO Y ANGUIANO

Por Manuel Acedo Cerda<sup>1</sup>

D. Gaspar Salcedo y Anguiano, militar y político español, nacido en Badajoz el 3 de enero de 1835 y muerto en Madrid, el 3 de marzo de 1905. Ingresó en la Academia de Artillería en 1.850, siendo promovido a teniente en 1885 y a capitán en 1859, en cuyo año pasó al Cuerpo de Estado Mayor de Artillería de la Armada, llegando en 1901, a inspector del Arma. En 1867 y embarcado en la fragata Navas de Tolosa, prestó importantes servicios como comandante del Arma de la Escuadra del Pacífico. En 1873 y a petición propia, fue destinado a las órdenes del entonces mariscal de Campo, Excmo. Sr. don Arsenio Martínez Campos, y tomó parte en el sitio y rendición de Valencia. Sus trabajos sobre transformación del revólver Kres, montajes de hierro, aparato Gato Kric para la suspensión de los cañones Armstrong y el alza, punto de mira e instalación de estos aparatos en el cañón de 8 cm, fueron declarados reglamentarios. Formó parte, en 1870, de la comisión que pasó a Italia a notificar a S.A.R., el duque de Aosta, su elección para el Trono de España, y fue nombrado ayudante de Campo de don Amadeo y jefe Económico de su Real Casa. Como diputado a Cortes, que lo fue constantemente de 1877 a 1896, en que se le nombró senador vitalicio, y también en el ejercicio de este cargo, intervino en cuantas discusiones se relacionaban con el Ejército y la Marina, mereciendo recordarse sus discursos en los grandes debates a que dieron lugar las reformas Cassola.

<sup>1</sup> Coronel Manuel Acedo Cerdá. *Real Cuerpo de Artillería de la Armada*. CAE (1970)

