BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA

Junio 2022
Número 22

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES

(ETSIAN-JEPER-DIENA)

MINISTERIO DE DEFENSA

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

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

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

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2022

NIPO 083-17-203-7 (edición impresa)

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

Fecha de edición: junio de 2022
Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

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

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

A NUESTROS COLABORADORES

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

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

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

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

Se citará la bibliografía consultada.

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

Maquetación:
Mª José Pizarro García

ARMADA

Índice

EDITORIAL Pág. 2

FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA I: ECUACIONES DE GOBIERNO Pág. 3
CC (CIA) DR. D. Julio Manuel Pernas Urrutia

TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ: APLICACIÓN EN BUQUES Pág. 15
CC (CIA) DR. D. Raúl Villa Caro

MODELOS DE DESPLAZAMIENO DE CONTIGENTES A BORDO DE UN BUQUE ANFIBIO Pág. 21
CC (CIA) D. Heitor Martínez Grueira
DR. D. Rafael Asorey Cacheda

MEDIDA DE LA VELOCIDAD EN UN RADAR MEDIANTE EL EFECTO DOPPLER Pág. 30
AN (CGA) D. José Vázquez Paz

EVALUACIÓN Y CONTROL DE LA FIRMA RADAR DE PLATAFORMAS MILITARES MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE MATERIALES AVANZADOS Pág. 35
GM1 (CIA) D. Félix Bernal Sánchez

ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES, COEFICIENTES Y FORMAS EN EL DISEÑO DEL CASDO DE UN BUQUE DE GUERRA Pág. 43
GM1 (CIA) D. Miguel Rueda Bravo

CRITERIO DE ESTABILIDAD EN AVERÍAS PARA BUQUES DE GUERRA Pág. 52
GM1 (CIA) D. Álvaro González Castellano

ANÁLISIS DE RIESGOS BASDO EN LA OPERACIÓN, MEDIANTE METODOLOGÍA SORA, PARA LOS RPAS EN DOTACIÓN DE LA ARMADA Pág. 62
GM1 (CIA) D. Marcelo Fraguas Velasco

EL BUQUE MILITAR EN EL RENACIMIENTO DE LA VELA Pág. 72
D. Jaime Pérez-Martínez
DR. D. Rodrigo Pérez-Fernández

BIOGRAFÍA: Pág. 81
ANTONIO DE ULLOA Y DE LA TORRE-GUIRAL

DECÁLOGO DEL CUERPO DE INGENIEROS Pág. 83

Foto portada: "Juan Sebastián de Elcano"
Autor: AN (CGA) D. Carlos Ameyugo Fernández del Campo

75 ANIVERSARIO 1944 2019
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES
ETSIAN

EDITORIAL

El Capitán de Navío del Cuerpo de Ingenieros
Comandante-Director de la ETSIAN
D. JESÚS IBARZ FERNÁNDEZ

Estimados amigos y compañeros

Me complace presentaros la primera publicación del año 2022.

Quiero agradecer el esfuerzo continuo de los colaboradores para la publicación de este Boletín Técnico de Ingeniería.

Sigo animando a todos los que pudieran estar interesados en el Programa de Doctorado para que sigan sondeando posibles áreas de investigación de provecho para la Armada. Este Programa está a punto de finalizar los trámites con la ANECA.

Quiero comentaros que hemos acabado de impartir la primera edición de la asignatura de Ingeniería de Sistemas con un resultado satisfactorio.

Se encuentra en ciernes la entrada del nuevo currículo para la Enseñanza de Formación que comprenderá un año en la ENM, incluyendo como novedad, entre otras, el embarque de 10 semanas como formación específica naval y un segundo año en la ETSIAN que incluye un embarque de 10 semanas, bajo la tutela de la ETSIAN, desde el punto de vista técnico.

Estamos viviendo tiempos interesantes, cada vez se necesita más personal cualificado y los proyectos son más demandantes. Esto nos obliga a formar al personal para que esté preparado para cumplir con la misión que le va a ser asignada. La labor de los ingenieros no siempre sale a la luz, sin embargo es evidente su contribución decisiva a los cambios tecnológicos de la Armada.

El fin de curso está cercano, aprovecho para desearos un muy feliz verano y que os permita volver con energía renovada.

Un fuerte abrazo para todos.

FUNDAMENTOS CFD DE APLICACIÓN EN INGENIERÍA I: ECUACIONES DE GOBIERNO

CC (CIA) D. JULIO MANUEL PERNAS URRUTIA
Doctor Ingeniero Naval y Oceánico

Resumen

La mecánica de fluidos es la rama de la ciencia que estudia el equilibrio y movimiento de fluidos, dividiéndose a su vez en el estudio de fluidos que circulan por conducciones o *flujo interior* como, por ejemplo, sistemas de tubería, ventilación, etc., y en fluidos que rodean y envuelven a sólidos o *flujo exterior* como, por ejemplo, la interacción del agua de mar con la obra viva de un buque y del aire con su superestructura.

A la hora de predecir el comportamiento de un fluido y ante la dificultad de realizar ensayos experimentales en determinadas ocasiones, una solución consiste en el empleo de técnicas CFD (*Computational Fluid Dynamics*), con el fin de prever su comportamiento.

Las técnicas CFD consisten en el planteamiento y resolución de modelos fisicomatemáticos con el fin de encontrar soluciones aproximadas a las ecuaciones de gobierno de los fenómenos en los que intervienen fluidos.

En el presente artículo se realiza una descripción de las ecuaciones de gobierno que intervienen en la modelización de los fluidos, abordándose su simplificación en los casos de flujo estacionario e incompresible (condición de aplicación mayoritaria en la industria). Se incluye el tratamiento del fenómeno de *turbulencia*.

También se realiza una breve exposición del concepto de *simetría axial* (también llamada de reflexión, rotacional, radial o cilíndrica) y su aplicación a un dominio concreto, como método de simplificación del problema fluido para los casos de conducciones internas de sección circular, típicas de sistemas de exhaustación de motores de combustión interna, tubería correspondiente a los servicios auxiliares del buque, sistemas de ventilación o HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), etc.

1. Introducción

Las técnicas CFD consisten en el análisis del movimiento de fluidos mediante simulaciones realizadas por ordenador, convirtiéndose en una herramienta de enorme utilidad a la hora de estudiar y evaluar diferentes situaciones prácticas en las que intervienen fluidos.

En los últimos años las técnicas CFD han evolucionado enormemente, gracias al desarrollo de programas informáticos comerciales y a la mejora en los sistemas que les dan soporte (ordenadores).

Mediante el empleo de técnicas CFD lo que se pretende es resolver el sistema de ecuaciones generado a partir del planteamiento de las ecuaciones de conservación del movimiento fluido a un problema concreto, mediante su transformación en ecuaciones algebraicas lineales, proceso conocido como *discretización espacial* de las ecuaciones de gobierno.

Las ecuaciones de gobierno de los fluidos son las conocidas como *ecuaciones de Navier-Stokes*, que son la *ecuación de conservación de la masa* (o ecuación de continuidad) y la *ecuación de conservación del momento* (o ecuación del momento lineal).

Adicionalmente, en aquellos casos en los que intervienen fenómenos relacionados con la transferencia de calor o la compresibilidad (por ejemplo, en gases a alta velocidad), se va a resolver una tercera ecuación denominada *ecuación de conservación de la energía* (o ecuación de la energía).

Además de las anteriores ecuaciones, en el caso de régimen turbulento, hay que considerar las llamadas *ecuaciones de transporte*, conocidas como RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), con el fin de evaluar los fenómenos relacionados con el fenómeno de turbulencia.

Aunque las ventajas que proporciona el análisis con técnicas CFD son numerosas (reducción de tiempos y costes de diseño, estudio de situaciones complejas y peligrosas, elevados niveles de detalle, etc.), tampoco resultan gratuitas ya que, por lo general, se precisa de ordenadores con gran capacidad de cálculo, software específico de elevado coste y una gran cualificación de personal utilizador que debe de analizar e interpretar los resultados obtenidos.

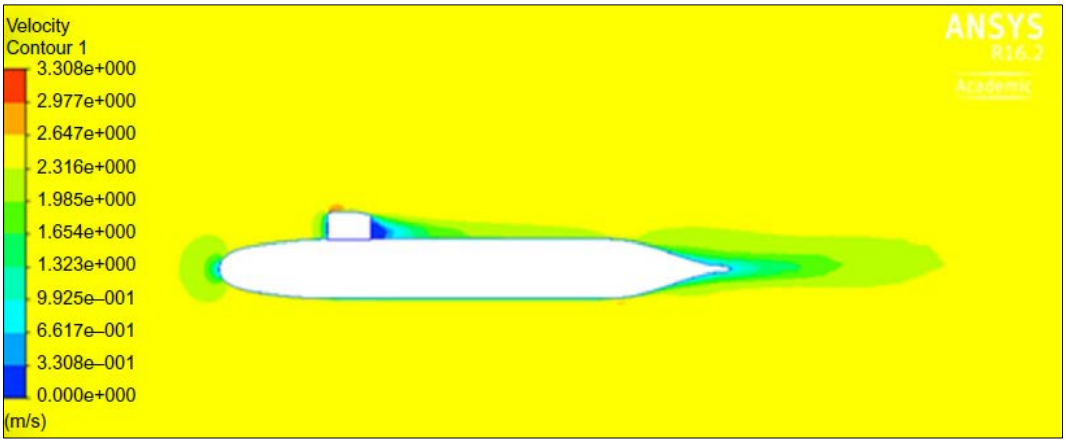

Ilustración 1. Velocidades proyecto SUBOFF – DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) [1]

2. Ecuaciones de gobierno

Los modelos matemáticos de la mayoría de los fenómenos físicos se pueden expresar a partir de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales cuasi-lineales de primer o segundo orden.

Las ecuaciones de conservación de la masa y del momento lineal, o ecuaciones de gobierno, constituyen una modelización correcta del flujo de un fluido, mediante el balance entre fenómenos de convección y difusión, además de la inclusión de los términos denominados *fuente*.

Mientras que los fenómenos convectivos aparecen representados por derivadas de primer orden que expresan propiedades de transporte o arrastre, los fenómenos difusivos se representan por derivadas de segundo orden.

La expresión general para la ecuación de continuidad en forma diferencial aplicada a un volumen de control, resulta la siguiente: [2]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

donde ρ es la densidad y $\vec{v}$ es el vector velocidad.

Se trata de una ecuación escalar y demuestra que la variación, por unidad de tiempo, de la masa contenida en un volumen de control se debe al flujo convectivo de masa a través de las paredes del volumen de control.

La anterior expresión resulta válida tanto para flujos compresibles como incompresibles, dentro del dominio fluido contenido en el volumen de control.

Para el caso particular de flujo compresible y estacionario, los términos temporales de cualquier variable se anulan, por lo que la ecuación de continuidad se reduce a la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{2}$$

En aquellos casos en los que el fluido sea un líquido o bien un gas que fluye a baja velocidad, se puede considerar la condición de flujo incompresible. En estos casos, el término de densidad deja de ser función temporal y/o espacial, por lo que se puede extraer del operador de divergencia. En estos casos, la ecuación de continuidad queda reducida a la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{3}$$

En lo que respecta a la ecuación de conservación del momento lineal, en su forma diferencial, se puede escribir de la siguiente forma: [3]

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \nabla \cdot \sigma + \rho \vec{f_m} \tag{4}$$

donde el término σ es el tensor de esfuerzos, que integra a su vez a las fuerzas de presión y viscosas, y el término $\vec{f_m}$ representa a las fuerzas másicas por unidad de volumen (p. e. gravitatorias).

Se trata de una ecuación vectorial que demuestra que el producto de la densidad por la aceleración de una partícula fluida es igual a la resultante sobre la unidad de volumen de las fuerzas de superficie más las fuerzas másicas.

En el caso de fluidos en reposo, el tensor de esfuerzos σ_{ij} está compuesto únicamente por las fuerzas de presión normales al volumen de control. En cambio, para el caso de fluidos en movimiento, además de las fuerzas de presión, hay que tener en cuenta las fuerzas de origen viscoso tangenciales al volumen de control.

Para el caso concreto de flujo estacionario e incompresible, y despreciando los efectos de la gravedad, la ecuación de conservación del momento lineal se puede escribir de la siguiente forma: [4]

$$\rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla \mathrm{p} + \mu \nabla^2 \vec{v} \tag{5}$$

donde el tensor de esfuerzos viscosos τ_{ij} resulta el siguiente:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \tag{6}$$

siendo ε_{ij} es el tensor ratio de tensión y μ la viscosidad. Dicha expresión confirma que las fuerzas de origen viscoso, representadas por el tensor de esfuerzos viscosos τ_{ij}, son linealmente proporcionales a las tensiones, representadas por el tensor ratio de tensión ε_{ij}.

Por lo tanto, las ecuaciones de gobierno en coordenadas cartesianas 3D, para flujos estacionarios e incompresibles, resultan de la siguiente forma (expandida):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{7}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{8}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{9}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{10}$$

3. Ecuación de conservación de la energía

A la hora de contabilizar los fenómenos relacionados con la transferencia de calor o la compresibilidad de los gases, habrá que añadir a las anteriores ecuaciones de gobierno una ecuación más, conocida como ecuación de conservación de la energía o ecuación de la energía.

Las ecuaciones de gobierno más la ecuación de la energía formarán un sistema de ecuaciones acoplado y no lineal, permitiendo de esta forma una modelización correcta del flujo de un fluido, mediante el balance de fenómenos convectivos y difusivos.

En concreto, la resolución de la ecuación de la energía permitirá conocer el campo de temperaturas (T) y flujos de calor (q) tanto en sólidos como en fluidos compresibles e incompresibles.

Aplicando el teorema de *transporte de Reynolds* a la energía interna (e), se obtiene la siguiente expresión, suma de términos temporal, convectivo, difusivo y fuente (S_e): [5]

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v}e) = -\nabla\cdot q + S_e \tag{11}$$

Por definición, la energía interna de un fluido (e) es el producto del calor específico a presión constante (c_p) por su temperatura (T): [6]

$$e = c_p T \tag{12}$$

Sustituyendo la expresión (12) en la (11) se obtiene:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} c_p T) = -\nabla \cdot q + S_e \tag{13}$$

Según la Ley de Fourier aplicada al flujo de calor:

$$q = -\kappa \nabla \mathrm{T} \tag{14}$$

Por lo que sustituyendo (14) en (13) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} c_p T) = \nabla \cdot (\kappa \nabla \mathrm{T}) + S_e \tag{15}$$

La anterior expresión es la ecuación de la energía interna, la cual puede ser utilizada tanto para fluidos como para sólidos. En cambio, no será suficiente para el caso de fluidos compresibles, debido a que una parte de la energía interna (e) puede transformarse en energía cinética (k), por lo que su valor no puede ser despreciado frente al de la energía interna debiendo ser tenido en cuenta en estos casos.

4. Turbulencia

En régimen turbulento, las distintas variables fluidas (presión, velocidad, etc.) fluctúan de manera desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico, en el que las variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo de un modo aleatorio. [7]

El número de Reynolds (Re) de un flujo da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas a efectos convectivos, respecto de las fuerzas viscosas, asociadas a efectos difusivos: [8]

$$Re = \frac{VL}{\nu} \tag{16}$$

donde V es la velocidad, L es una longitud característica (el diámetro de una tubería o la distancia desde el borde de ataque de una placa plana) y ν es la viscosidad cinemática.

En el caso concreto de flujos internos, se comprueba experimentalmente que el flujo es laminar si Re < 2000, de transición si 2000 < Re < 4000 y claramente turbulento si Re > 4000. [6]

Para modelar el fenómeno de turbulencia, se pueden aplicar dos enfoques diferentes:

- Simulación DNS (*Direct Numerical Simulation*), en base a la discretización temporal y espacial de un problema determinado y simulación de grandes vórtices o LES (*Large Eddy Simulation*), simulando el efecto de los vórtices de menor escala.

- Modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) o modelos de promedio temporal de las ecuaciones de gobierno, a partir de la descomposición de las variables fluidas en su valor medio y valor fluctuante. Surgen debido al elevado coste computacional de la simulación DNS y LES.

Ilustración 2. Visualización de un flujo de corriente [9]

5. Ejemplo de aplicación para sistemas HVAC

Se parte de un conducto de descarga de aire a la atmósfera (p_{out} = 1 atm.), de geometría cilíndrica y longitud determinadas, por la que discurre un flujo de aire a una velocidad u_{in} = 2,5 m/s, estacionario (independiente del tiempo, t), incompresible (condición de baja velocidad, densidad ρ = cte.) e isotermo (temperatura constante, T = cte.):

Ilustración 3. Geometría 3D del conducto de descarga de aire HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

Debido a las condiciones de flujo estacionario, incompresible e isotermo, las ecuaciones de gobierno se reducen a un sistema de dos componentes en coordenadas cilíndricas, r y z (para todo θ):

$$\frac{1}{r}\frac{\partial r u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{16}$$

$$\rho\left(u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_r}{\partial r}\right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}\right] \tag{17}$$

$$\rho\left(u_r\frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right] \tag{18}$$

La simetría axial consiste en la simetría alrededor de un eje, lo que significa que todos los semiplanos tomados a partir del eje de simetría axial presentan idénticas características. Esta propiedad, aplicada a la geometría objeto de estudio, va a suponer:

- Pasar de una geometría 3D (cilindro) a una 2D (plano).
- Cambiar de coordenadas (cilíndricas a cartesianas).
- Simplificar las ecuaciones de gobierno.
- Reducir el número de celdas del mallado.
- Mejorar la estabilidad en la convergencia.
- Incrementar la precisión de la solución alcanzada.
- Reducir el número de iteraciones y tiempo de simulación.

En cuanto a la condición de flujo turbulento, régimen que se caracteriza por la fluctuación de las variables del campo fluido, hay que recurrir al concepto de *descomposición de Reynolds*, en base a las siguientes relaciones de las variables fluidas:

$$u = \bar{u} + u' \tag{19}$$

$$v = \bar{v} + v' \tag{20}$$

$$p = \bar{p} + p' \tag{21}$$

Teniendo en cuenta además que u' = 0 y v' = 0 y, por lo tanto, u = $\bar{u}$ y v = $\bar{v}$, resultan las siguientes expresiones expandidas de las ecuaciones de gobierno para flujo turbulento, estacionario, incompresible e isotermo en coordenadas cartesianas 2D:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{22}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}\right) - \rho\left(\overline{u'\frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial u'}{\partial y}}\right) \tag{23}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2}\right) - \rho\left(\overline{u'\frac{\partial v'}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial v'}{\partial y}}\right) \tag{24}$$

El nuevo término no lineal que aparece a la derecha de la ecuación de conservación del momento lineal para las direcciones «*x*» e «*y*», o *término de fluctuación*, es igual a:

$$-\rho\left(\overline{u'\frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial u'}{\partial y}}\right) = \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{u'u'}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho\overline{u'v'}\right)\right) = \bar{f}_{turb,x} \tag{25}$$

$$-\rho\left(\overline{u'\frac{\partial v'}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial v'}{\partial y}}\right) = \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{v'v'}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho\overline{u'v'}\right)\right) = \bar{f}_{turb,y} \tag{26}$$

donde $\bar{f}_{turb,x}$ y $\bar{f}_{turb,y}$ representan a las fuerzas sobre el flujo debidas al fenómeno de turbulencia en las direcciones x e y respectivamente y $-\rho\overline{u'v'}$ a la componente tangencial de dichas fuerzas turbulentas. Por lo tanto, el sistema a resolver de forma numérica para el caso de flujo turbulento, estacionario, incompresible e isotermo en coordenadas cartesianas 2D resulta finalmente el siguiente:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{27}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}\right) + \bar{f}_{turb,x} \tag{28}$$

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2}\right) + \bar{f}_{turb,y} \tag{29}$$

Además de las ecuaciones de gobierno, para la resolución numérica del problema planteado, se precisa de la definición de las denominadas *condiciones iniciales* y *condiciones de contorno*, las cuales aparecen resumidas en las siguientes ilustraciones:

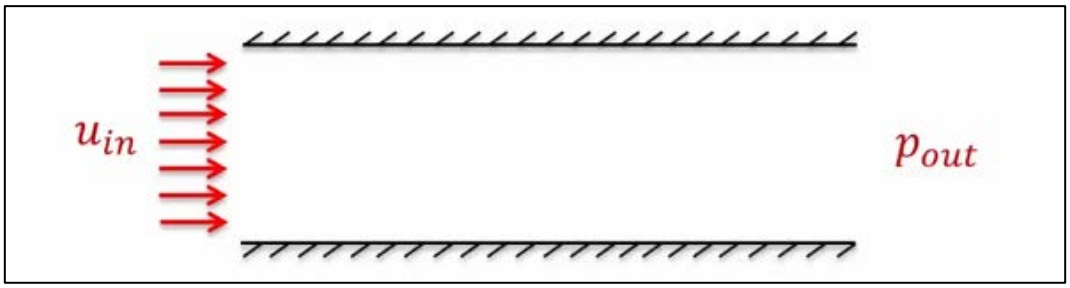

Ilustración 4. Condiciones iniciales en el volumen de control (elaboración propia)

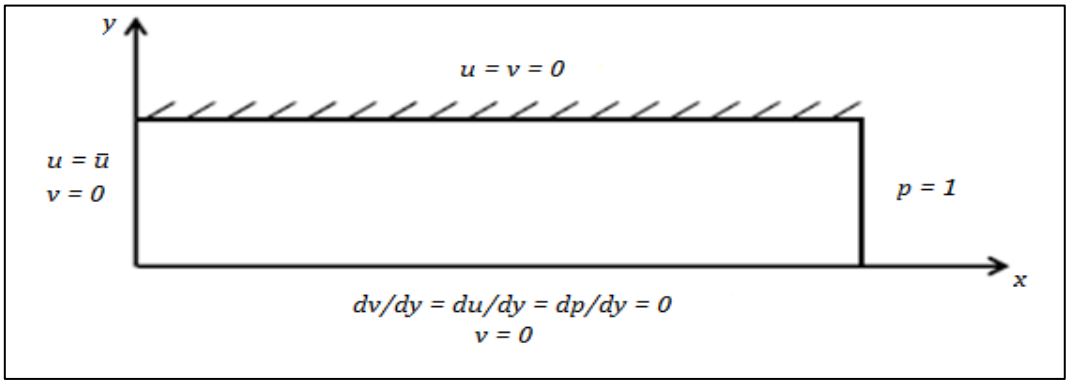

Ilustración 5. Condiciones de contorno en el volumen de control (elaboración propia)

6. Resultados

A continuación, se muestran detalles de la geometría en 2D del problema correspondiente al sistema HVAC planteado, así como los campos de presiones y velocidades alcanzados en su interior para las condiciones iniciales y de contorno definidas con anterioridad:

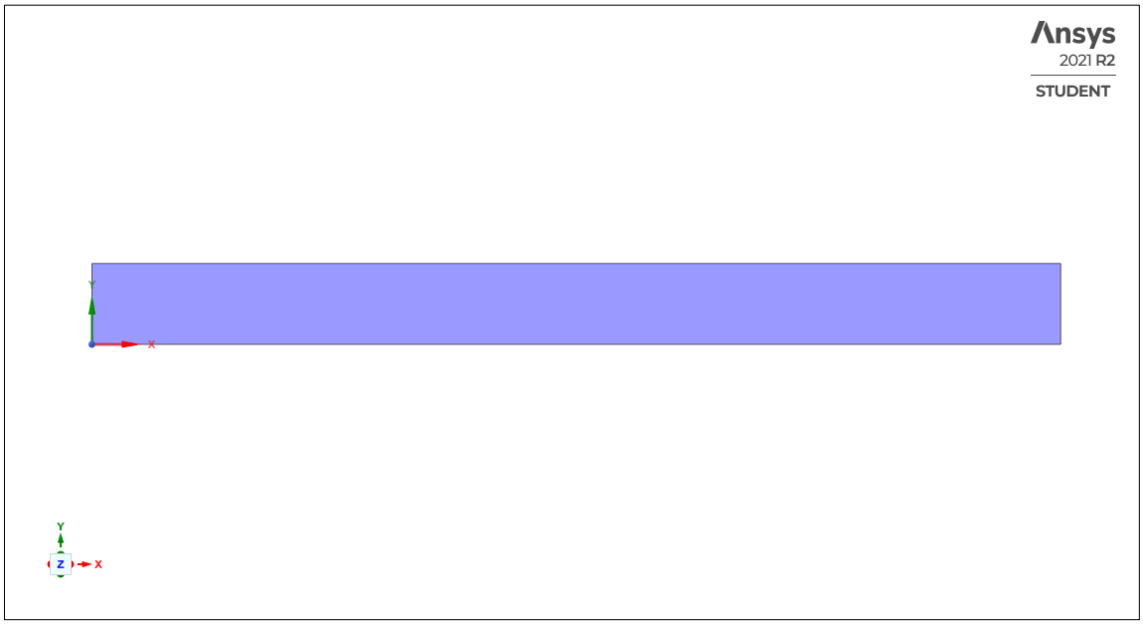

Ilustración 6. Geometría 2D del conducto HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

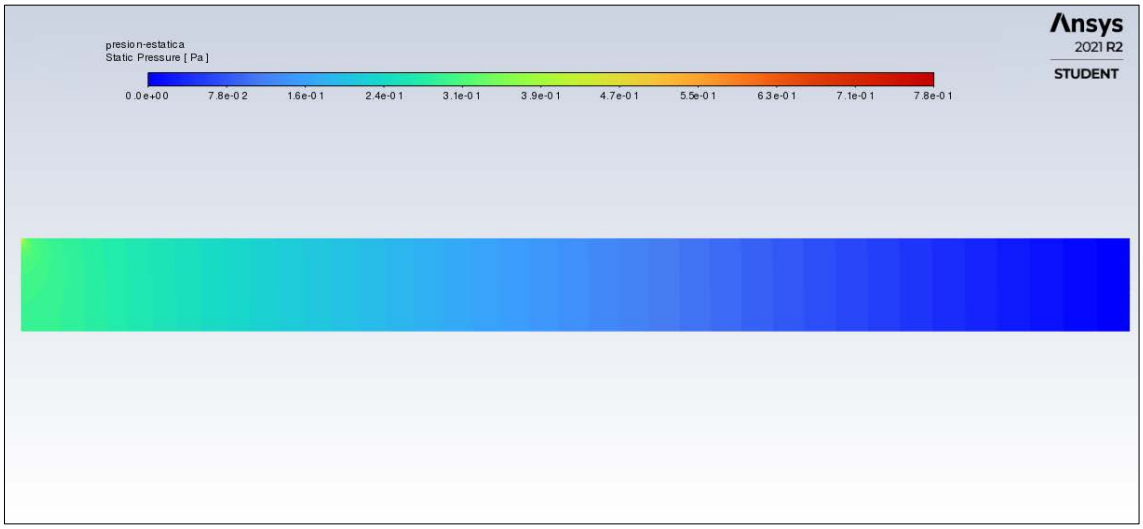

Ilustración 7. Campo de presiones 2D en el conducto HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

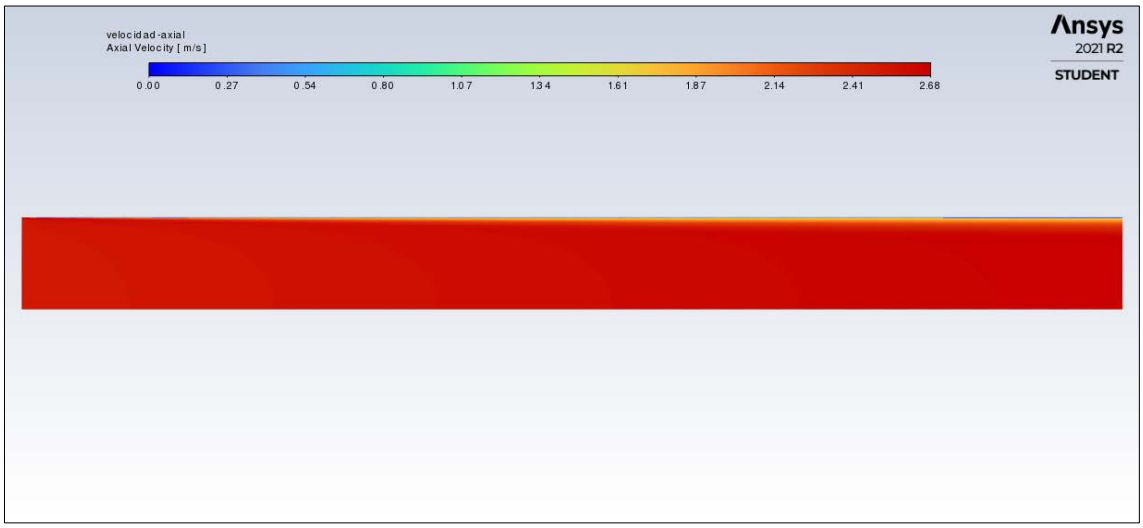

Ilustración 8. Campo de velocidades 2D en el conducto HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

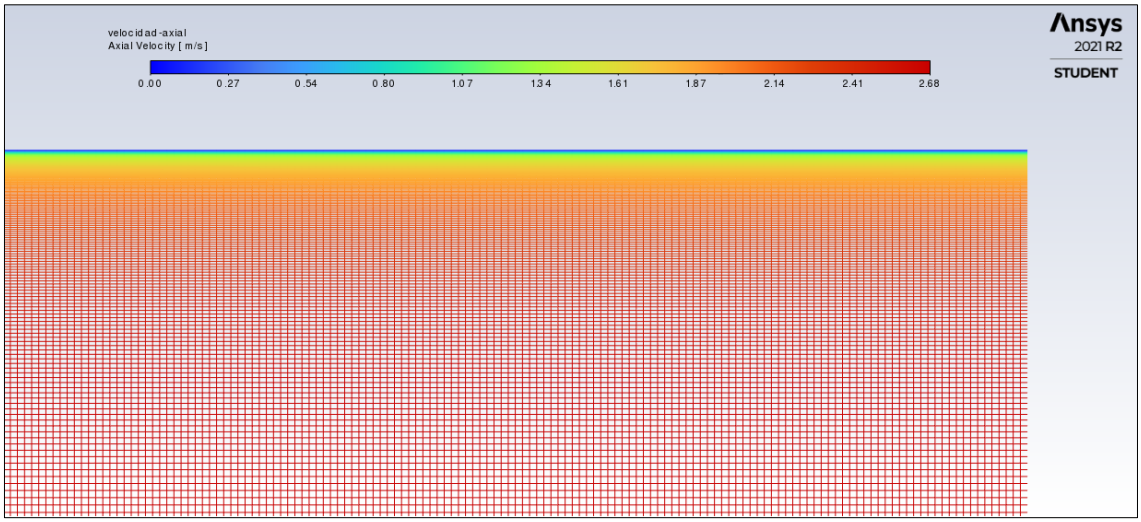

Ilustración 9. Campo de velocidades 2D próximas a la pared en el conducto HVAC (cortesía ANSYS, Inc.)

Como se puede comprobar, la variación de la presión estática a lo largo del dominio es lineal y decreciente hasta el valor correspondiente a la condición de contorno, en línea con lo esperado.

En cuanto al campo de velocidades, apenas se aprecian diferencias debido a los elevados valores de Re y, por lo tanto, el predominio de esfuerzos de inercia frente a viscosos, a excepción de la capa adherida a la pared, zona en la que la velocidad decrece rápidamente (bajos valores de Re). En esta capa delgada, o *capa límite*, el aire en contacto con la pared presenta velocidad nula (*condición de adherencia*).

Para la definición de la capa límite se ha utilizado el modelo de turbulencia *Spalart-Allmaras*, además de un mallado mucho más afinado en zonas cercanas a la pared, con el fin de mejorar la predicción del flujo en dicha zona.

7. Conclusiones

A partir de los apartados anteriores, relacionados con el planteamiento de las ecuaciones de gobierno en un sistema HVAC, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El fenómeno sometido a estudio se ha podido representar de manera correcta a partir de las ecuaciones de continuidad y del momento lineal.
- No ha sido necesaria la ecuación de la energía interna, debido a la ausencia de fenómenos de transferencia de calor ($q = 0$) y compresibilidad del aire (ρ = cte.).
- Se ha aplicado la condición de flujo turbulento, por tratarse de un gas (elevados valores de Re debido a bajos valores de viscosidad cinemática ν).
- La aplicación del concepto de simetría axial ha permitido pasar de geometría 3D (cilíndrica) a 2D (cartesiana), simplificándose las ecuaciones de gobierno.
- Además de las ecuaciones de gobierno, se han tenido que establecer condiciones iniciales y de contorno para la resolución numérica del problema.

8. Referencias bibliográficas

[1] Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C. (2018) Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach, 3th Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., ISBN: 978-0-08-101127-0.

[2] Crespo Martínez, A. (2006) Mecánica de Fluidos, Thomson Editores Spain Paraninfo S.A., Madrid, ISBN: 84-9732-292-4.

[3] Liñán Martínez, A., Rodríguez Fernández, M., Higuera Antón, F. J. (2005) Lecciones 1 a 22 de Mecánica de Fluidos, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (ETSIA), Madrid, España.

[4] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2018) Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA.

[5] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., Dewitt, D. (2011) Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, ISBN: 978-0470-50197-9.

[6] Burbano, S., Burbano, E., Gracia, C., (2003) Física General, 32ª ed., Tebar, Madrid, ISBN: 8-495-44782-7.

[7] Ballesteros, R., González, J., Fernández, J., Argüelles, K., (2003) Técnicas Numéricas en Mecánica de Fluidos, Universidad de Oviedo, Rafael Ballesteros Tajadura, Gijón, ISBN: 84-607-9546-2.

[8] Potter, M. C., Wiggert, D. C. (2008) Fluid Mechanics, The McGraw-Hill Companies INC., ISBN: 0-07-148781-6.

[9] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (2007) An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, 2nd Edition, Pearson Education Limited, USA, ISBN: 978-0-13-127498-3.

TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ: APLICACIÓN EN BUQUES

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO
Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante
Doctor por la Universidad de A Coruña
Jefe de Ingeniería de Plataforma de ICOFER (Arsenal Militar Ferrol)

1. Introducción

El término yuxtapuesto utilizado para referirnos a la energía obtenida del movimiento de las olas, undimotriz, está formado por las palabras «unda», que en latín significa ola, y «motriz», que se refiere a la generación de movimiento. Este término, existente en algunos diccionarios de ingeniería eléctrica, curiosamente no está reconocido por la RAE, a pesar de su uso cotidiano.

La generación de energía a partir de las olas es una tecnología comercial poco empleada en comparación con otras fuentes de energía renovable como pueden ser la energía eólica, la hidroeléctrica o la solar, ya que la instalación de dispositivos en la mar supone de forma general un reto mucho mayor a su establecimiento en tierra firme, tanto por dificultad técnica ante un medio hostil como es el mar, como por costes. En el caso de las olas, y a diferencia de lo que ocurre en mareas y corrientes, la fuerza de las primeras depende de los siguientes factores: velocidad del viento, superficie del agua y extensión afectada, y profundidad. A su vez la altura de las olas estará determinada por la velocidad del viento y por la duración del tiempo que sople, por la distancia afectada por el viento, y por la profundidad y la topografía del fondo marino.

Figura 1. Representación de la energía de las olas (Fuente: Roberto Marín)

La gran importancia de la energía de las olas radica en su abundancia. En el caso de la ola, una de sus principales características descansa en su capacidad para poder desplazarse a grandes distancias sin apenas perder energía, y concentrándose además ésta, cerca de las costas. Obviamente, la energía contenida en las

olas varía de un punto a otro, pero, en general, cuanto más alejadas del ecuador estén, más energía contienen. Además, la importancia de la energía undimotriz se debe a que supera en densidad energética a la energía eólica y solar, y se estima, según algunos estudios, que su potencia oscila entre 30 y 100 kW por cada metro de frente de ola.

El primer convertidor de energía undimotriz se patentó en Francia en 1799, pero, sin embargo, el verdadero desarrollo de esta tecnología no comenzó hasta el último cuarto del siglo XX. Noruega y Escocia son pioneras y líderes en la tecnología undimotriz en la actualidad, aunque España y Portugal están estudiando mucho esta técnica. Noruega instaló en 1985 una planta en su costa cerca de Bergen, mientras que Escocia lleva también años experimentado con estos sistemas en la isla de Islay, e incluso aportando nuevos desarrollos, como una especie de conos que al oscilar con las olas impulsan un generador. En Portugal en 2009 se inauguró al norte de Oporto, frente a la localidad norteña de Póvoa de Varzim, el primer parque undimotriz comercial del mundo, Okeanós. En este parque se instalaron tres máquinas Pelamis con capacidad de 2,25 MW.

Figura 2. Representación de la fuerza de las olas en la costa (Fuente: Roberto Marín)

2. Tipos de tecnologías existentes

Existen tres tipos principales de equipos de energía undimotriz, clasificados en dispositivos en costa, dispositivos cerca de la costa y dispositivos fuera de la costa. A pesar de que existen más de mil patentes mundiales de generadores energéticos de olas (GEO), los conceptos en los que se basan se pueden clasificar en una serie de tipos básicos, dependiendo de cómo reciben el oleaje o del principio que utilizan para la captación de la energía. Algunos de ellos aprovechan de manera directa la oscilación (como las columnas oscilantes, las boyas de absorción o los convertidores) a través de diferentes mecanismos que aprovechan el movimiento oscilante para generar electricidad. Otros, los atenuadores, usan los movimientos de flexión de los dispositivos para generar energía a través de bombas hidráulicas. En los dispositivos de desborde el agua del mar se eleva y genera energía potencial por la diferencia de altura. Finalmente, los conversores, que pueden ser flotantes o sumergidos, aprovechan las diferencias de presión entre el agua y fluidos para generar la electricidad.

Atendiendo a una clasificación dependiente de la dirección en la que los dispositivos reciben el oleaje, podríamos dividirlos en atenuadores, terminadores y extractores puntuales. En el primer caso, el de los

atenuadores, nos encontramos a aquellos que se encuentran posicionados en paralelo con la dirección de avance del oleaje. Se podría decir que «cabalgan» sobre las olas generando la energía eléctrica que se transportará mediante cables. Generalmente son estructuras de gran longitud y su misión consiste en amortiguar (atenuar) las olas, aprovechando de este modo la energía mecánica de éstas. Dentro de este tipo encontramos el dispositivo «pelamis (serpiente)», formado por diferentes secciones cilíndricas que poseen movimiento relativo entre ellas, movimiento que es utilizado para generar energía, bombeando aceite a presión, mediante unos brazos hidráulicos que obtienen energía del movimiento relativo entre secciones.

Figura 3. Dispositivo atenuador "pelamis" en funcionamiento (Fuente: S.Portland)

3. Ventajas e inconvenientes de la energía undimotriz

Como principal ventaja se podría destacar que se trata de una energía muy extendida, existente en muchísimas localizaciones. Su capacidad de predicción, a pesar de ser más baja que en las corrientes, es mayor que en la eólica y, además, existe una buena correlación entre el recurso existente y la demanda (aproximadamente el 40% de la población mundial vive a menos de 90 km de la costa).

Como contrapartida presenta que se produce con condiciones severas del mar, lo que supone altos costes de instalación y mantenimiento. Por ello, a pesar de llevar muchos años en estudio, todavía se puede considerar que está en fase de desarrollo a nivel mundial, con diversas tecnologías existentes, pero sin que ninguna se haya impuesto al resto, debido principalmente a las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas.

Respecto a su impacto en el medio ambiente, a pesar de ser una fuente de energía renovable, con su ventaja respecto a la reducción de la contaminación, podría tener otros efectos negativos que se deben estudiar. Tal como ocurre con las turbinas eólicas, los dispositivos de energía undimotriz podrían interactuar con el medio marino, obstaculizando por ejemplo la migración de las aves. Capturar parte de la energía de las olas podría conducir a una menor mezcla de nutrientes, e impactar a las especies que vivan en una determinada zona. Se debe tener en cuenta que las zonas ideales para los emplazamientos de los convertidores de olas, generalmente también lo serán para la pesca, y para que las aves y los mamíferos marinos busquen peces, por lo que el cableado de los generadores podría impactar en el medio ambiente, tanto por la instalación en sí, como por la acústica que genere.

4. Aplicación en buques

Con el objetivo de reducir el consumo de los buques y, por tanto, los costes medioambientales y económicos asociados, se podría aprovechar la energía contenida en la mar de forma sencilla para que pudiera ser consumida por los sistemas de a bordo, mejorando así la eficiencia total del buque. Como no existe mejor artefacto marino, flotante y consumidor de energía que el propio buque, ya se han realizado varios estudios al respecto. En el 55º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima celebrado en octubre de 2016 en Barcelona varios autores presentaban un trabajo en el que aparecía un sistema innovador para la generación de energía a bordo, que apuntaba al balance de un buque como medio de transformación de la energía undimotriz en energía hidráulica contenida en sus tanques estabilizadores. El sistema contaba con una turbina hidráulica, una serie de válvulas automáticas y un sistema de control que mejoraba la eficiencia de la turbina y aseguraba el correcto comportamiento dinámico del buque en la mar.

Figura 4. Dispositivo asimétrico tipo buque generador de energía (Fuente: Wello)

Al año siguiente el ferrolano Gerardo García, presentaba el trabajo *Método y sistema de generación de energía eléctrica en un Barco* para cubrir un vacío en la literatura técnica mediante el aprovechamiento de las proas del barco en su obra viva para la recuperación de energía «undimotriz – mareomotriz» obtenida en ciertas maniobras de navegación al reducir velocidad, algo similar al sistema Kers de los automóviles. La inercia del buque proporciona energía mecánica suficiente para producir electricidad en ciertas condiciones y distribuirla posteriormente en distintos servicios a bordo. Gerardo finalmente patentó este sistema y en la actualidad está elaborando una tesis doctoral para complementarlo. Tal vez este tipo de dispositivos puedan incorporarse en un futuro en los nuevos buques autónomos que se están diseñando y construyendo.

Figura 5. Buque portacontenedores autónomo (Fuente: Yara)

5. Conclusiones

En el año 2022 aún no se puede considerar que las fuentes de obtención de energía undimotriz posean tecnologías maduras. Todavía es una energía en fase de desarrollo, carente de un diseño óptimo, en la que ninguna tecnología se impone sobre el resto, debido principalmente a las irregularidades en amplitud, fase y dirección de las olas. Se han realizado muchos experimentos, prototipos y proyectos de investigación, y puntualmente existen algunos dispositivos comerciales, pero aún existen muchos desafíos técnicos que deben resolverse antes de que se pueda disponer de dispositivos de generación eléctrica fiables y efectivos, tanto en mantenimiento como en coste.

El potencial existente en España, tanto en la costa Cantábrica, como en Galicia y Asturias en particular, es de los mayores del mundo, por lo que la energía de las olas debe ser un recurso a explotar en un futuro cercano. A este respecto, a finales del pasado año 2021 el *MITECO (Ministerio para la Transición ecológica y el Reto demográfico)* sacó a la luz la *Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y las Energías del Mar* que podría convertir a España en la referencia europea para el desarrollo tecnológico y el *I+D* de las energías renovables en el entorno marino. Esta *Hoja de Ruta* aspira a instalar de 40 a 60 MW para las energías de mareas y olas en 2030, a partir de la sólida base de los centros de investigación nacionales.

Se debe destacar que España es el país europeo con más instalaciones de *I+D* para eólica flotante y otras energías del mar, tales como como la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN), la Plataforma de Energía Marina de Vizcaya (BiMEP), o la zona experimental de aprovechamiento de energías marinas de Punta Langosteira (La Coruña), el segundo banco de pruebas del mundo para la energía de las olas.

Recientemente, a finales de septiembre del pasado año 2021, la unión de Cantabria, Asturias y Galicia formalizó la creación del *Superclúster Atlantic Wind (SAW)*, una alianza para impulsar la energía marina, principalmente eólica, en el mar Cantábrico. Este nuevo clúster del sector marítimo está formado por 112 empresas.

6. Referencias bibliográficas

[1] A. Gorlov, *Helical Turbine and Fish Safety* Northeastern University, Boston, 2010.

[2] G. Iglesias, M. López, R. Carballo, A. Castro, J. Fraguela y P. Frigaard, *Wave energy potential in Galicia (NW Spain)* ELSEVIER, vol. 34, pp. 2323-2333, 2009.

[3] H. H. Aly y M. El-Hawary, *State of the art for tidal currentes electric energy resources* IEEE, 2011.

[4] M. C. Calero Quesada, J. García Lafuente, J. C. Sanchéz Garrido, J. Delgado and S. Sammartino, *Energy of marine currents in the Strait of Gibraltar and its potential as a renewable energy resource*. R*enewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 34, pp. 98-109, 2014.

[5] L. Myers and A. Bahaj, *Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race Renewable Energy,* vol. 30, no. 11, pp. 1713-1731, 2005.

[6] R. Villa Caro, *Energía undimotriz: pelamis y penguin* DINAMO TÉCNICA, 2021.

[7] W.-H. Lam, L. Chen and R. Hashim, *Analytical wake model of tidal current turbine*. *Energ*y, vol. 79, pp. 512-521, 2014.

[8] <www.marineturbines.com,> [Online].

[9] <www.magallanesrenovables.com,> [En línea].

MODELOS DE DESPLAZAMIENTO DE CONTINGENTES A BORDO DE UN BUQUE ANFIBIO

CC. (CIA) D. HEITOR MARTÍNEZ GRUEIRA,
SEGEMAR-SETAD;
DR. D. RAFAEL ASOREY CACHEDA,
UPCT

RESUMEN

En el año 2009 se publica la primera versión del *Naval Ship Code* (NSC) [1], como un proyecto de homogenización normativa dirigido a las Armadas miembro de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). Hasta ese momento, cada país promulgaba su propia legislación, lo que provocaba gran disparidad normativa entre las Armadas aliadas.

La adopción de un capítulo en el NSC dedicado al *Escape, Evacuación y Rescate* (EER) supuso un hito respecto a la adopción y homogenización normativa de la seguridad naval militar en el marco OTAN. Para anticiparse al desarrollo de esta norma, la Armada encarga al *Gabinete de Investigación Militar Operativa* (GIMO) un estudio centrado en la temática EER (Movimiento de personal en situación de emergencia, 2008). El objetivo era adquirir conocimiento para implementar nuevas técnicas y herramientas dentro de esta temática.

El resultado de este proyecto notable, alcanzando unas conclusiones más ambiciosas de lo previsto. Así, permitió justificar y validar los protocolos de seguridad implantados por Armada, más completos y restrictivos que el propio NSC.

En este artículo se aborda una línea de investigación dirigida a conocer las características y distribución de las poblaciones embarcadas en un buque anfibio de la Armada. De esta forma, se pueden construir modelos de desplazamiento para sus contingentes.

1. Introducción

Hasta bien entrado el siglo XX, la seguridad del pasaje o de la propia tripulación no era un tema relevante desde un punto de vista técnico o legislativo. Por el contrario, la seguridad de las dotaciones en buques militares siempre ha gozado de un tratamiento completamente diferente, puesto que se trata de personal altamente cualificado con actividades que, bajo determinadas situaciones, entrañan un enorme riesgo.

Como contraposición, la minimización de los riesgos inherentes a la navegación y la mitigación de los posibles efectos ocasionados por un accidente naval, han sido tema de estudio recurrente durante el último siglo, desarrollándose nuevas técnicas y tecnologías que han permitido alcanzar un marco de seguridad sin precedentes en la historia naval.

En este sentido, la marina militar no se ha mantenido al margen. Así, su desarrollo técnico y tecnológico en seguridad marítima ha sido consecuente al riesgo inherente que conlleva su actividad. Sin embargo, a finales del siglo pasado en la Armada este desarrollo se ralentizó como consecuencia del cambio de modelo de las

Fuerzas Armadas (FAS). Fue a partir del año 2007 cuando se relanza de nuevo con las directivas emitidas por el *Estado Mayor de la Armada* (EMA) para profundizar en el estudio de la temática EER.

Aunque la última versión del NSC [3] aborda ampliamente la temática EER, es todavía muy generalista. En este sentido, frecuentemente se remite a normas y datos propios de la normativa civil adoptados por la *Organización Marítima Internacional* (OMI). Esto se traduce en su escasa aportación o nula implantación al entorno naval militar. De hecho, uno de los primeros escollos identificado en las fases iniciales del estudio fue la imposibilidad de aplicar la distribución poblacional adoptada por el NSC para un buque de guerra. El motivo es que hace referencia a la normativa OMI, que se corresponde con la distribución poblacional para un pasaje y una tripulación de un buque civil. Esta distribución hace referencia a ratios de sexo, intervalos de edad y la distinción entre pasaje y tripulación, características que no son aplicables a un buque militar y, por extensión, a su dotación.

Con base en el conocimiento de la época, no era posible definir un punto de partida. Así, el GIMO propuso abordar su estudio como un proyecto de mínimos, promoviendo una etapa previa para tratar el modelo de distribución de la población embarcada. De esta manera, podría consolidarse una base sólida para acometer el estudio objeto o cualquier otra investigación paralela e independiente.

Este planteamiento resultaría transcendental, permitiendo modelar la distribución poblacional para un buque militar y conocer las características antropométricas de sus miembros, sus rasgos profesionales más relevantes y ciertas aptitudes conductuales.

2. Línea de investigación

El conocimiento adquirido, así como los datos recabados en la fase previa, actuarían como base de conocimiento para formular líneas de investigación más específicas y ambiciosas. Una de estas líneas de investigación conduciría a la tesis doctoral *La evacuación del buque de guerra* [4], cuyos resultados principal son una distribución de la población embarcada y una metodología para identificar las rutas óptimas de escape de un buque de guerra. Así, con base en ellas, se asignan las balsas de rescate a los miembros de la dotación para un proceso óptimo de evacuación. Es decir, en el menor tiempo posible.

Esta tesis estaba dirigida a buques de la Flota y sus dotaciones. Sin embargo, propone líneas de investigación a futuro el estudio de otras clases de buque y de sus correspondientes dotaciones. En este punto surge una duda relacionada con las características de las distintas poblaciones embarcadas en el sentido de si influirán en la metodología propuesta o si no es exportable a otras clases de buque, donde su disposición general o su dotación difiriesen en gran medida del planteamiento de la tesis.

En paralelo, se produce la promulgación de una nueva Ley de personal [5], cuyas características y connotaciones particulares hacían prever un envejecimiento de la población que mantiene una relación profesional de carácter temporal con las FAS. Esto se puede verificar a través de la figura 1, donde las medianas de edad de la categoría de Marinería y de Oficiales se igualan, hecho que afecta a la capacidad de desplazamiento, como se confirmará posteriormente.

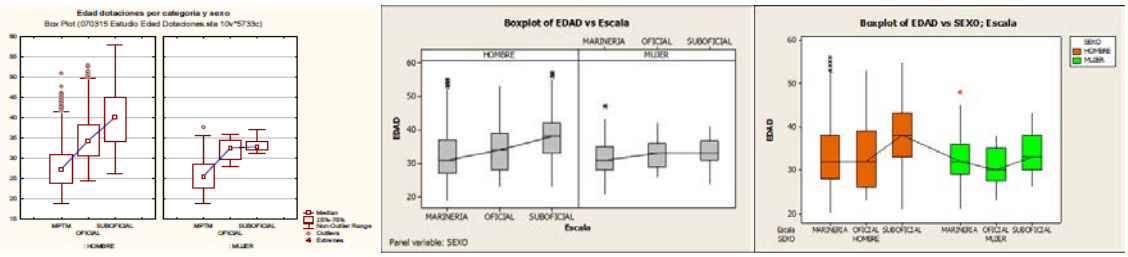

Figura 1. Evolución de la mediana de edad por categoría profesional (Marinería, Suboficiales y Oficiales) y sexo, registrados en los ciclos navales[1] 2007, 2015 y 2017 respectivamente (fuente Armada española).

Esta amalgama de dudas e incógnitas plantearía la necesidad de actualizar de nuevo el estudio poblacional en los mismos términos y con el mismo alcance para volver a fijar el punto de partida en nuevas líneas de investigación.

3. Objeto de la investigación

Ante la necesidad de disponer de un buque de referencia adecuado a las características del estudio propuesto, el EMA designó al *Buque de Asalto Anfibio* (BAA) «Galicia» (L-51). El objetivo era analizar el plan de evacuación para esta clase de buques, así como las características de su plataforma y el modo de desplazarse de sus contingentes. Esta investigación resultó en un notable desafío por las dimensiones del buque, el tamaño de la población embarcada y por la heterogeneidad de sus contingentes.

Puesto que estos buques desempeñan una funcionalidad muy diversa, demandan de contingentes específicos para dotarle de unas capacidades muy concretas (fuerzas embarcadas, dotaciones de vuelo, sanitarias, de Estado Mayor, etc.). Además, el embarque de estos contingentes está supeditado a la duración de las operaciones. Estos se caracterizan por su temporalidad, factor determinante sobre su conocimiento de la disposición general del buque, el nivel de instrucción y adiestramiento y de los planes y procedimientos de emergencia del buque.

Entre los contingentes o grupos embarcados, destacan los miembros de la *fuerza de desembarco* (FD) por su tamaño y funcionalidad. Este contingente está compuesto por miembros del Cuerpo de *Infantería de Marina* (IM), cuyo número podría duplicar al contingente de miembros que componen la dotación propia del buque.

Así, el carácter temporal del contingente embarcado influye negativamente en la instrucción y adiestramiento de sus miembros, en contraste con la dotación propia del buque. No obstante, es un error considerar a la FD como pasaje, por tratarse de un contingente no permanente del buque. Este se debe a que, al estar especializado en la ejecución de operaciones anfibias, sus miembros cuentan con la instrucción y adiestramiento básico en lo que respecta a planes y procedimientos del buque.

Acorde con la normativa específica promulgada por el EMA, aplicable a esta clase de buques [6], los contingentes embarcados intervendrán en los adiestramientos periódicos, programados como simulacros para tratar de inferir conocimiento acerca de la disposición general y los planes o procedimientos de emergencia del buque, incluido el plan de abandono de buque.

[1] Ciclo naval, período correspondiente entre el 01JUL del año en curso, hasta el 30JUN del siguiente año.

Por todo lo anterior, el contingente más relevante de la investigación es la FD, por su tamaño y características inherentes.

4. Plan de captación de datos

Durante la fase previa del proyecto, el EMA autorizó el embarque de un investigador operativo a bordo del buque de estudio, durante el desarrollo de unas maniobras anfibias que tienen lugar con carácter anual en el golfo de Cádiz. De este modo, se analizó en el propio buque el plan de emergencia, el desplazamiento de efectivos y se tomaron datos para la investigación.

Como resultado de la experiencia adquirida en anteriores proyectos para la captación y análisis de datos, se programó una gama de ensayos acorde al *Diseño Estadístico de Experimentos* (DEE) [7]. Ante la imposibilidad de emplear a la totalidad de la población embarcada, por su falta disponibilidad al encontrarse inmerso en la ejecución de unas maniobras y en el gobierno del buque, la metodología del DEE es fundamental para recopilar datos suficientes que permitan hacer un estudio representativo sin tener que recurrir a la aplicación de una costosa técnica de muestreo como el aleatorio estratificado [8].

Para la implementación de un DEE es necesario conocer de antemano la población y categorizar sus factores de estudio. Con base en ello se caracterizará a sus miembros para conformar diferentes grupos de control (muestras poblacionales). De este modo, se identificarán los miembros que constituyan los diferentes grupos de control que ejecutarán los ensayos de captación de datos o mediciones para llevar a cabo un estudio representativo.

Una vez que se ha obtenido el volumen de datos necesario y se han realizado los procesos de depuración[2] y análisis[3] de la metodología DEE, se cuantifica la contribución de los factores de estudio y se determina qué factores se mantienen o eliminan en función de su significancia.

A partir de las conclusiones alcanzadas [9], se consolida el DEE donde se justifica que los factores índice de masa corporal (IMC) [10], edad y antigüedad contribuyen de manera decisiva en el modelo de desplazamiento de los efectivos militares embarcados.

Ante las características tan dispares que muestran los contingentes embarcados en un buque anfibio, se plantean dos líneas de estudio totalmente independientes, aunque proyectadas ambas a partir del mismo DEE consolidado. En la primera se aborda el estudio exclusivo del modelo de desplazamiento del contingente de la FD [11], mientras que en la otra se abordará el estudio del modelo de desplazamiento de la dotación propia del buque.

A partir de las técnicas de depuración[4] y regresión[5] de la metodología DEE, se obtendrá la función de desplazamiento para ambos contingentes, con base en los factores que muestran una contribución básica (IMC, edad y antigüedad).

[2] Eliminación de valores atípicos.
[3] Test de normalidad Anderson-Darling y pruebas de independencia con estadístico Durbin-Watson, para los ensayos.
[4] Criterio de Chauvenet.
[5] Ecuación de Shieffle.

De nuevo, en este punto de la investigación se presenta otra duda. A pesar de las diferencias de los contingentes de estudio (infantes de marina frente a dotación propia), podría valorarse si sus modelos de desplazamiento siguen una misma distribución o, por el contrario, como dicta la intuición, sus modelos de desplazamiento son diferentes, lo que confirmaría que se trata de poblaciones diferentes.

5. Contraste de poblaciones

Después del proceso de depuración y análisis de datos de la metodología DEE para obtener un modelo de desplazamiento para cada uno de los ensayos implementados (desplazamiento por un corredor longitudinal, apertura y cierre de puertas estanca y escotillas), se descartó que estos modelos siguiesen una misma distribución, algo que parecía intuitivo.

Debido a que la gama de ensayos fue ejecutada por unos grupos de control que son representativos de sus poblaciones de origen (dotación y FD), cada población contará con su correspondiente modelo de desplazamiento, constituido por unas funciones de regresión que estiman el tiempo de tránsito a través de los elementos de paso u obstáculos de referencia para cada miembro.

Para verificar si ambos contingentes pertenecen a una misma población, se plantean varias pruebas para conocer si los ensayos realizados por cada contingente siguen la misma distribución. Para ello, se procesan los datos de trabajo obtenidos en los ensayos realizados por los distintos contingentes, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 1.

ENSAYOS (DEE)			Pruebas
CORREDOR 5m.	**PUERTA ESTANCA**	**ESCOTILLAS**	**Tiempos DOT**
SÍ	SÍ	SÍ	Normalidad[6]
SÍ	SÍ	SÍ	Independencia[7]
SI	SÍ	NO	Homocedasticidad[8]
NO	NO	NO	ANOVA[9]

Tabla 1. Resultados de distintas pruebas, datos DEE de la dotación

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que los datos de los distintos ensayos son independientes y que siguen una distribución normal, aunque no todos resultan homocedásticos. A partir de las condiciones exigidas para aplicar el ANOVA se concluye que con los datos obtenidos no siguen una misma distribución.

A continuación, falta comprobar si los datos obtenidos en los ensayos realizados por los grupos de control de la FD siguen una misma distribución. Para ello, se aplican las mismas pruebas que en la tabla 1, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 2.

[6] Test de normalidad Ryan-Joiner (similar a Shapiro-Wilk).
[7] Pruebas de independencia con estadístico Durbin-Watson.
[8] Test F de Fisher, para la prueba de homocedasticidad de los ensayos.
[9] ANOVA, ANalysis Of Variance mediante la prueba de Welch, para los ensayos.

ENSAYOS (DEE)			Pruebas
CORREDOR 5m.	**PUERTA ESTANCA**	**ESCOTILLAS**	**Tiempos FD**
SÍ	SÍ	SÍ	Normalidad[6]
SÍ	SÍ	SÍ	Independencia[7]
NO	NO	NO	Homocedasticidad[8]
NO	NO	NO	ANOVA[9]

Tabla 2. Resultados de distintas pruebas, datos DEE de la FD

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que los datos de los ensayos ejecutados por miembros de la FD son independientes y que siguen una distribución normal, aunque no resultan homocedásticos. Debido a las condiciones necesarias para aplicar el ANOVA, se concluye que los datos obtenidos en los distintos ensayos no siguen una misma distribución.

A partir de los resultados obtenidos se aplicarán distintos modelos de desplazamiento a cada uno de los elementos de paso u obstáculo para estimar el tiempo de tránsito por ellos. Sin embargo, si se parte de la suposición que considera que los contingentes de estudio no tienen el mismo grado de conocimiento, instrucción y adiestramiento de la disposición general del buque y de los planes o procedimientos de emergencia, podría implicar una diferencia sustancial entre ellos. Es por ello por lo que es necesario comprobar si los datos disponibles validan esta suposición.

Para ello, se retoman las pruebas para formular otras nuevas con los datos disponibles de los contingentes (dotación y FD). El objetivo es conocer si los ensayos realizados por ambos contingentes siguen una misma distribución. Así, se procesan los datos de los ensayos, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 3.

ENSAYOS (DEE) Pruebas			
CORREDOR 5m.	**PUERTAS ESTANCA**	**ESCOTILLAS**	**Tiempos DOT**
SÍ	SÍ	SÍ	Normalidad[6]
SÍ	SÍ	SÍ	Independencia[7]
CORREDOR 5m.	**PUERTAS ESTANCA**	**ESCOTILLAS**	**Tiempos FD**
SÍ	SÍ	SÍ	Normalidad[6]
SÍ	SÍ	SÍ	Independencia[7]

CORREDOR 5m.	PUERTAS ESTANCA	ESCOTILLAS	Tiempos DOT vs FD
SÍ	NO	NO	Homocedasticidad[8]
NO	NO	NO	ANOVA[9]

Tabla 3. Resultados de distintas pruebas, datos de dotación frente a FD

Así, se valida que los ensayos de ambas contingentes resultan independientes y siguen una distribución normal, aunque no todos se muestran heterocedasticidad. Debido a las condiciones necesarias para aplicar el ANOVA, se concluye que los datos de los distintos contingentes no permiten afirmar que siguen una misma distribución.

A partir de estos resultados, se deberán aplicar distintos modelos de desplazamiento en cada uno de los elementos de paso u obstáculo para estimar el tiempo de tránsito de los distintos contingentes. Así, los datos avalan que los ensayos practicados por cada contingente no siguen una misma distribución y, por lo tanto, no se corresponden con una misma población de origen.

6. Conclusiones

En virtud de los resultados obtenidos, se validan las siguientes suposiciones de partida:

1. Los datos obtenidos en los ensayos (desplazamiento por un corredor longitudinal, apertura y cierre de puertas estanca y escotillas) de los grupos de control de la dotación propia del buque indican que no siguen una misma distribución. En consecuencia, se deberá aplicar el correspondiente modelo de desplazamiento para un elemento de paso u obstáculo concreto, a la hora de estimar el tiempo empleado por uno de sus miembros en atravesarlo.

2. Los datos obtenidos en los ensayos (desplazamiento por un corredor longitudinal, apertura y cierre de puertas estanca y escotillas) de los grupos de control de la FD indican que no siguen una misma distribución. En consecuencia, se deberá aplicar el correspondiente modelo de desplazamiento para un elemento de paso u obstáculo concreto, a la hora de estimar el tiempo empleado por uno de sus miembros en atravesarlo.

3. Los datos obtenidos en los ensayos (desplazamiento por un corredor longitudinal, apertura y cierre de puertas estanca y escotillas) de los grupos de control de ambos contingentes indican que no siguen una misma distribución. En consecuencia, se deberá aplicar el correspondiente modelo de desplazamiento para cada contingente y cada elemento de paso u obstáculo concreto, a la hora de estimar el tiempo empleado en atravesarlo.

Como conclusión final, se confirma el supuesto de partida. Así, como consecuencia de la singularidad de los contingentes analizados, su conocimiento sobre la disposición general, su instrucción y adiestramiento de los planes y procedimientos de seguridad del buque de referencia difiere enormemente. Por lo tanto, se deberá aplicar a cada contingente su correspondiente modelo para estimar el tiempo de desplazamiento a través de los elementos de paso u obstáculos durante el proceso de abandono del buque.

7. Tabla de siglas

TABLA DE SIGLAS	
3V	Tres vigilancias, estado del buque
ANOVA	*ANalysis Of Variance*
BAA	Buque de asalto anfibio
CIM	Cuerpo de Infantería de Marina
Comte.	Comandante
DEE	Diseño estadístico de experimentos
DOT	Dotación propia del buque
EER	Escape, Evacuación y Rescate
EMA	Estado Mayor de la Armada
FAS	Fuerzas Armadas
FD	Fuerza de desembarco
GIMO	Gabinete de Investigación Militar Operativa
IM	Infantería de Marina
IMC	Índice de Masa Corporal
NSC	*Naval Ship Code*
OMI	Organización Marítima Internacional
OTAN	Organización del Atlántico Norte
Z/C	Zafarrancho de combate, estado del buque

8. Referencias bibliográficas

[1] NATO Standarization Office, *Naval Ship Code (NSC, 2009)*, *Allied Nav. Eng. Publ.*, vol. 1st editio, 2009.

[2] Gabinete de Investigación Militar Operativa (GIMO), *Movimiento de personal en situación de emergencia.* 2008.

[3] NATO Standarization Office, *Naval Ship Code (NSC, 2019)*, *Allied Nav. Eng. Publ.*, vol. Edition G, p. 164, 2019.

[4] F. J. Pérez Villalonga, *La evacuación del buque de guerra,* Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN), 2008.

[5] Gobierno de España, *Ley de la Carrera Militar.* España: Boletín Oficial de Defensa núm. 278, 2009.

[6] Comte. BAA «Galicia» (L-51), *Manual de Organización del buque*. España: Estado Mayor de la Armada, 2014, p. 28.

[7] R. Acero, J. Pastor, J. Sancho Val, and M. Torralba, *Ingeniería de la Calidad*, 1ª edición. Zaragoza (Aragón, España), 2012.

[8] H. Martínez Grueira, *TFM. DDE adquisición de datos de estudio de desplazamiento. Evacuación de dotaciones embarcadas en buques anfibios*, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), 2017.

[9] H. Martínez Grueira, *La antigüedad, es un grado... o más si cabe*, *Boletín Técnico Ing.*, vol. 14, no. Diseño Estadístico de Experimentos (DEE), pp. 37–48, 2018, doi: NIPO: 083-17-202-1 (edición en línea).

[10] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, *Índice de masa corporal*, *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, 2015, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[11] J. M. Riola Rodríguez and H. Martínez Grueira, *Estudio de evacuación en buques con Infantería de Marina*, *Derrotero*, vol. 12, no. Diseño Estadístico de Experimentos, pp. 49–64, 2018, doi: ISSN 2027-0658.

MEDIDA DE LA VELOCIDAD EN UN RADAR MEDIANTE EL EFECTO DOPPLER

AN (CGA-EOF) D. JOSE VAZQUEZ PAZ
Ingeniero Industrial
Alumno Máster IAN

Resumen

El objetivo de este artículo es el de expresar los fundamentos de cálculo de velocidad de un radar empleado el efecto Doppler. Sin embargo, en la gran mayoría de textos y manuales sólo se expone este problema para el caso de un radar anclado en tierra y un objetivo móvil.
Es por ello que, la principal motivación de este artículo es la demostrar los fundamentos matemáticos para la medida de la velocidad del radar independientemente de que este se encuentre en movimiento o no, lo cual, resulta de especial interés para el caso de un radar instalado a bordo de buque.

1. Introducción

Los sistemas de radar se pueden clasificar atendiendo al tipo de emisión, así estos pueden ser de onda pulsada o de onda continua [1][2].

Los radares de onda pulsada son aquellos en los que se emiten trenes de ondas sinusoidales, habitualmente moduladas, intercaladas con períodos de escucha en los cuales no se produce emisión. Por otro lado, un radar de onda continua es aquel en que se emite una onda, habitualmente de tipo sinusoidal, en el cual no hay períodos de escucha.

De este modo, en los radares de onda pulsada es posible obtener la distancia a un determinado objetivo a través del eco radar recibido al existir intervalos de tiempo en los cuales no se produce emisión. Sin embargo, esto no es posible en los radares de onda continua al no presentar estos períodos sin emisión. Esto provoca que los radares de onda pulsada se empleen como radares de navegación a bordo de los buques.

Figura 1. Patrullero P-63 «*Arnomendi*» equipado con radar de navegación de onda pulsada Sperry Marine Vision Master FT

Sin embargo, la medida de velocidad del objetivo en ambos radares se efectúa haciendo uso del efecto Doppler, pero mientras que para el caso del radar pulsado la medida de velocidad es más inexacta debido a que las ondas de eco se reciben intercaladas, en el radar de onda continua existe una mayor exactitud debido a que se reciben ecos continuamente. Estas características provocan que los radares de onda continua se empleen como iluminadores de misiles o radares de tráfico.

Figura 2. Fragata F-102 «*Almirante Juan de Borbón*» equipada con iluminador de onda continua MK-99 para el guiado de misiles

2. El efecto *Doppler-Fizeau*

Para explicar su aplicación en la medida de velocidad de un radar, primeramente, se hace preciso conocer los fundamentos de este principio.
De este modo, si se parte de un de un emisor y un receptor en reposo, se obtiene que las distancias entre los frentes de onda es la longitud de onda ($\lambda = c \cdot T_E$), siendo c la velocidad de la luz en el vacío y T_E el período de la onda emitida tal y como se muestra en la figura 3 [3].

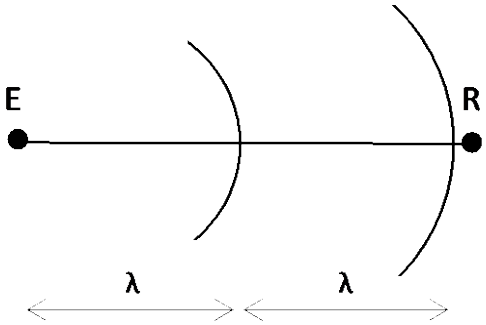

Figura 3. Emisor y receptor en reposo

Posteriormente, considerando que el emisor se acerca al receptor a una velocidad v_E, se produce una modificación de la longitud de onda de percibe el receptor mostrado en la figura 4.

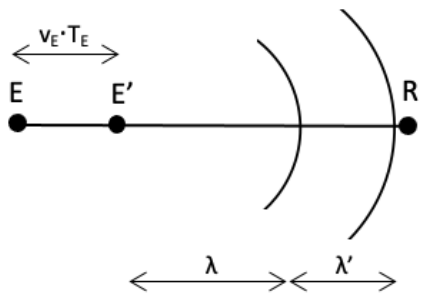

Figura 4 . Emisor en movimiento

Es por ello que el receptor percibirá los frentes de onda separados a una distancia de menor longitud de onda (λ') que en el caso de que el emisor se encontrase en reposo, expresándose este efecto matemáticamente como:

$$\lambda' = \lambda - v_E \cdot T_E$$
$$c \cdot T_R = c \cdot T_E - v_E \cdot T_E$$
$$T_R = \left(\frac{c - v_E}{c}\right) \cdot T_E$$
$$f_R = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} \cdot f_E$$

Por otro lado, haciendo un razonamiento similar para el caso de que el emisor se aleje, se obtiene que:

$$f_R = \frac{1}{1 + \frac{v_E}{c}} \cdot f_E$$

Por otro lado, si se considera que el emisor se encuentra en reposo y es el receptor quien se acerca, el receptor percibe unos frentes de onda separados una distancia de menor longitud de onda (λ') que los originales. De este modo, haciendo uso del razonamiento anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$f_R = \left(1 + \frac{v_R}{c}\right) \cdot f_E$$

Que para el caso de que el receptor se alejase resultaría:

$$f_R = \left(1 - \frac{v_R}{c}\right) \cdot f_E$$

Por último, combinando las cuatro expresiones anteriores, y considerando el signo superior como acercamiento, se obtiene la expresión final del efecto *Doppler-Fizeau*:

$$f_R = \left(\frac{1 \pm \frac{v_R}{c}}{1 \mp \frac{v_E}{c}}\right) \cdot f_E$$

3. El efecto *Doppler-Fizeau* en el radar

Una vez establecidos los fundamentos, para el caso particular de un radar en el cual el emisor y el receptor radar se sitúan en la misma posición, se hace preciso aplicar dos veces la fórmula deducida en el apartado anterior.

De este modo, denotando *r* como radar y f_0 como su frecuencia, *ob* como objetivo y trabajando con velocidades relativas tal que $v_{ob}' = v_{ob} - v_r$, se tiene considerando al radar como emisor y al objetivo como receptor lo siguiente:

$$f_{ob}' = \left(1 \pm \frac{v_{ob}'}{c}\right) \cdot f_0$$

Sin embargo, al estar trabajando con velocidades relativas no es preciso tener en cuenta el signo de la ecuación, por lo que la fórmula resultante sería la siguiente:

$$f_{ob}' = \left(1 + \frac{v_{ob}'}{c}\right) \cdot f_0$$

Ahora, para el caso de la onda reflejada, en la cual el objetivo es el emisor y el radar el receptor se obtiene que:

$$f_0' = \frac{1}{\left(1 - \frac{v_{ob}'}{c}\right)} \cdot f_{ob}'$$

Por último, sabiendo que la frecuencia Doppler (f_d) se define como la diferencia de las expresiones anteriores, se obtiene que:

$$f_d = f_0' - f_0$$

$$f_d = \left[\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{v_{ob}'}{c}\right)}\right) - \left(1 + \frac{v_{ob}'}{c}\right) - 1\right] \cdot f_0$$

$$f_d = \frac{2\, v_{ob}'}{c - v_{ob}'} \cdot f_0$$

Por último, la diferencia de velocidades entre el radar y el objetivo y considerando nuevamente velocidades absolutas es:

$$v_{ob} - v_r = \frac{f_d \cdot c}{2\, f_0 + f_d}$$

De este modo, mediante la fórmula anterior es posible conocer la velocidad del objetivo, bien sea este un avión o un buque, con independencia de que el radar esté anclado a tierra o se encuentre en movimiento.

5. Referencias bibliográficas

[1] Skolnik, M. I. (1980). *Introduction to radar systems* 2nd edition. New York.
[2] Mahafza, B. R., & Elsherbeni, A. (2003). MATLAB *simulations for radar systems design*. Chapman and Hall/CRC.
[3] De Ercilla, S. B., García, E. B., & Muñoz, C. G. (2006). *Física general*. Editorial Tébar.

EVALUACIÓN Y CONTROL DE LA FIRMA RADAR DE PLATAFORMAS MILITARES MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE MATERIALES AVANZADOS

GM1 (CIA) D. FÉLIX BERNAL SÁNCHEZ*
Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Máster en Ingeniería de Telecomunicación
Alumno en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales (ETSIAN)
C/ Arturo Soria, 287, 28033, Madrid
Email: fbersa5@mde.es: (FBS)

* Autor principal y responsable del trabajo

Abstract: La reducción de la RCS (RCSR) tiene un impacto directo en el reconocimiento y clasificación de un blanco a través del procesado y análisis de su firma radar. Uno de los casos más críticos en los que se requiere la reducción de la RCS son los buques de guerra, donde se trata de pasar desapercibido frente a los sistemas de detección de un enemigo.

Keywords: Radar Cross-Section (RCS), firma radar, materiales avanzados, electromagnetismo.

---

1. Introducción

La firma radar, Sección Radar Equivalente o RCS por sus siglas en inglés (*Radar Cross-Section*) se trata de una medida cuantificable del nivel de detección de un objeto haciendo uso de un sistema radar. Un objeto puede detectarse con mayor facilidad cuando la RCS tiene un valor elevado y viceversa, por tanto, se trata de un parámetro fundamental y muy prioritario en el diseño de cualquier vehículo o equipo de carácter militar [1].

Un sistema radar está basado en la emisión mediante una antena de ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia, las cuales son reflejadas en el blanco y de nuevo interceptadas por una antena receptora. De la comparación entre la onda emitida y la reflejada se puede obtener gran cantidad de información como la forma, la distancia o la velocidad del blanco [2].

Una gran parte de la información sobre la RCS es clasificada, dada la ventaja militar que proporcionaría a un enemigo.

Multitud de factores modifican la cantidad de energía electromagnética que recibe la antena receptora después de haberse reflejado como son: el tamaño del blanco, su forma, el ángulo de incidencia, la distancia o el material del que está fabricado, el cual es el objetivo de este artículo. Las diferentes propiedades de los materiales pueden modificar la cantidad de energía electromagnética absorbida y no reflejada por un blanco.

El Trabajo Fin de Formación (TFF) que se está llevando a cabo sobre el que versa este artículo, consiste en la investigación del efecto que provocan en la reducción de la RCS, la utilización de distintos materiales en un buque de guerra de la Armada Española, concretamente sobre una Fragata F-100 (Figura

1). Se trata de reducir la RCS para evitar la detección e identificación de buques de guerra de la Armada Española sin modificar su tamaño, forma o estructura, únicamente haciendo uso de materiales avanzados de diferentes propiedades.

2. Limitaciones

Se presentan dos limitaciones en este proyecto: la capacidad computacional para su simulación y la caracterización de los materiales avanzados.

Respecto a la primera de ellas, se pretende realizar el estudio de la RCS sobre materiales avanzados apoyándose en simulaciones sobre el modelo digital de las Fragatas F100. Esto requiere una capacidad de computación alta, debido a la complejidad del modelo a analizar.

Figura 1. Modelo 3D de una Fragata F-100.

La segunda limitación existe, dado que, el entorno de simulación requiere de ciertos parámetros físicos y experimentales de cada material para poder caracterizarlos. Estos parámetros pueden ser complicados de conseguir para ciertos materiales.

Los resultados serán analizados, con su debida justificación, basándose en las simulaciones que se realicen sobre diferentes materiales avanzados y aportando los diagramas polares y simulaciones 3D correspondientes de cada material.

Por último, se realizará una comparación entre los materiales que han sido analizados con el objetivo de concluir cuál es el más apto para la aplicación que se propone en términos de RCS, haciendo hincapié sobre sus propiedades mecánicas, aunque no sea el objetivo directo de este trabajo.

3. Desarrollo

Las medidas de RCS que se han llevado a cabo y las que quedan pendientes se han apoyado en un software basado en el programa de cálculo matemático Matlab. Este programa no permite simular directamente sobre el modelo 3D de la Fragata F-100, por tanto, ha sido necesario realizar una transformación del modelo de la Figura 1 a un modelo basado en triángulos compatible con el programa (Figura 2).

Figura 2. Modelo triangular de la Fragata F-100.

El software elegido para realizar la simulación es PoFacets. Este software está basado en la aproximación de óptica física para predecir la RCS de objetos complejos. El software permite el cálculo de la RCS monoestática (antena emisora y receptora en el mismo dispositivo) y biestática (antena emisora y receptora en distinta ubicación) aunque, se ha elegido la monoestática por ser la configuración más utilizada y extendida entre los radares de los buques de guerra [5].

Los parámetros físicos y experimentales de cada material que previamente han sido mencionados en el apartado de limitaciones, son necesarios para estimar el comportamiento eléctrico de un material frente a una onda electromagnética. Dichos parámetros son: la permitividad relativa (o constante dieléctrica) y la tangente de pérdidas (δ) [3].

La permitividad relativa o constante dieléctrica de un material es su permitividad absoluta expresada como una relación relativa a la permitividad del vacío, siendo la permitividad una propiedad característica de los materiales que afecta a la fuerza de Coulomb entre dos cargas puntuales de ese material. En otras palabras, es el factor por el cual el campo eléctrico entre las cargas disminuye en relación con el vacío (a menor permitividad relativa, menor reacción frente a una onda electromagnética).

Otro parámetro necesario para el cálculo aproximado de la RCS con el software previamente mencionado es la tangente de pérdidas (δ). Está ampliamente relacionado con las pérdidas dieléctricas en un material y hace referencia al fasor en el plano complejo cuyas partes real e imaginaria son el componente resistivo (con pérdida) de un campo electromagnético y su contraparte reactiva (sin pérdida). A efectos prácticos, cuanto menor es la tangente de pérdidas, menor es la energía electromagnética que ese material deja escapar.

Una vez definidas ambas propiedades, se debe analizar qué es propicio desde el punto de vista de la reducción de la RCS. Es interesante un material que reaccione notablemente frente a las ondas electromagnéticas (permitividad relativa alta) pero que, por otra parte, no tenga pérdidas (tangente de pérdidas baja). De esta forma, el comportamiento ideal del material consistiría en que la onda electromagnética del radar incidiese sobre el material, fuera absorbida y nada reflejada [4].

Para establecer una referencia del nivel de RCS, se ha realizado una simulación sobre acero (el material actualmente utilizado para la construcción de los buques de guerra). El acero es un metal, por lo tanto, no tiene propiedades dieléctricas (por definición). Su permitividad relativa es 1, es decir, su permitividad absoluta es la del vacío. Respecto a la tangente de pérdidas, es infinito, toda onda electromagnética incidente será devuelta y nada absorbida.

Idealmente, todos los metales poseen esas características con esos valores, aunque físicamente depende de las impurezas presentes en cada material derivadas de su fabricación. Dichas impurezas pueden producir pequeñas variaciones en los parámetros eléctricos del material. Para la simulación del acero, se han utilizado los parámetros ideales anteriormente mencionados.

Cabe mencionar que, la frecuencia es otro parámetro a tener en cuenta en la simulación. Los radares de los buques de guerra realizan barridos a una frecuencia fija, pero es cambiada de forma aleatoria cada cierto tiempo para evitar ataques de *jamming* (perturbación de una señal electromagnética con el objetivo de interferir el funcionamiento de un radar y proveer de información falsa o ruido). Las bandas más comunes donde se emplean los radares son la banda X (entre 8 GHz y 12 GHz) y la banda S (entre 2 GHz y 4 GHz) [7], ambas bandas se encuentran en la banda SHF (*Super High Frequency*) (entre 3 GHz y 30 GHz). El rango de frecuencias donde suele trabajar un radar marino está entre 5,2 GHz y 10,9 GHz, por lo que, para la simulación se ha elegido la frecuencia de 10 GHz [8].

El software de simulación realiza una aproximación de la RCS sobre un corte o *slice* del modelo triangular tridimensional. Se ha decidido realizar esa simulación a un metro sobre la cubierta principal, ya que, es donde se encuentra la mayoría de elementos que intervienen en la RCS (dotación, armamento, puertas, amuras, etc.). Además, correspondería a la altura de una línea recta aproximadamente paralela al mar desde otro buque.

El espesor o grosor del material utilizado también es un parámetro a tener en cuenta durante la simulación. Sería un parámetro realmente importante en una simulación que utilizase materiales multicapa, aunque este trabajo se basa en materiales compuestos monocapa. Se ha elegido un espesor de 8 milímetros, típico en el casco y estructura exterior de los buques de guerra.

A continuación, se mostrará la simulación de la RCS correspondiente a una Fragata F-100 construida sobre acero. Posteriormente, se comparará con la RCS de la misma Fragata F-100 pero esta vez, construida sobre *Kevlar*.

El *Kevlar* es un tipo de poliamida cuyas moléculas forman líneas paralelas y regulares creando fibras unidas. Es una fibra resistente a impactos, a altas temperaturas y a la exposición química entre otras propiedades que lo hacen un material propicio para tanto la industria textil como para la industria aeronáutica o los equipos de protección individual [6].

Las propiedades eléctricas del *Kevlar* son bastante más interesantes que las del acero, aunque lejos de ser ideales. Presenta una permitividad dieléctrica de 4,3 (@ 10 GHz) y una tangente de pérdidas de 0,03; parámetros que van a permitir reducir la RCS de forma notable. También se debe destacar que el precio del *Kevlar* es muy elevado y por esto, no es un material realmente interesante para la construcción de buques de guerra dada la gran cantidad de toneladas que se necesita para fabricar una unidad.

La Figura 3 muestra el resultado de una simulación monoestática sobre acero a 10 GHz de frecuencia en gráfica lineal, mientras que la Figura 4 muestra la misma información sobre un gráfico polar.

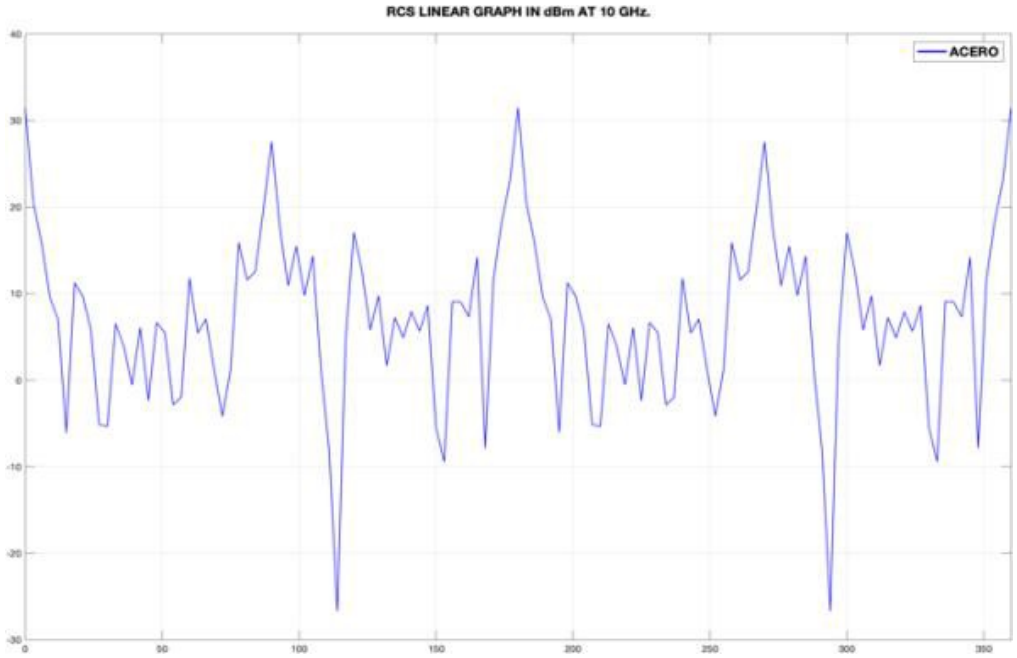

Figura 3. RCS lineal de una Fragata F-100 en acero.

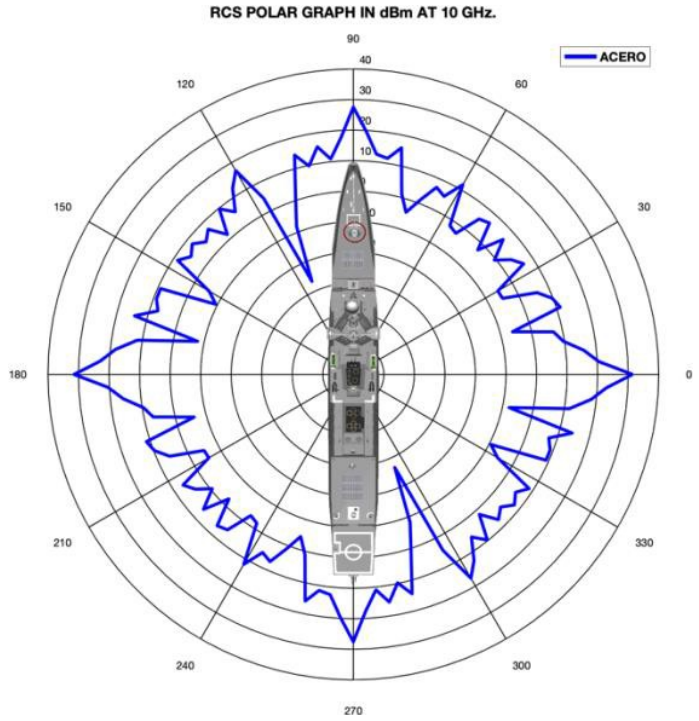

Figura 4. RCS polar de una Fragata F-100 en acero.

La Figura 5 muestra la comparación lineal de la RCS entre un buque fabricado en acero y un buque fabricado en *Kevlar*. La Figura 6 muestra la misma en información en un gráfico polar.

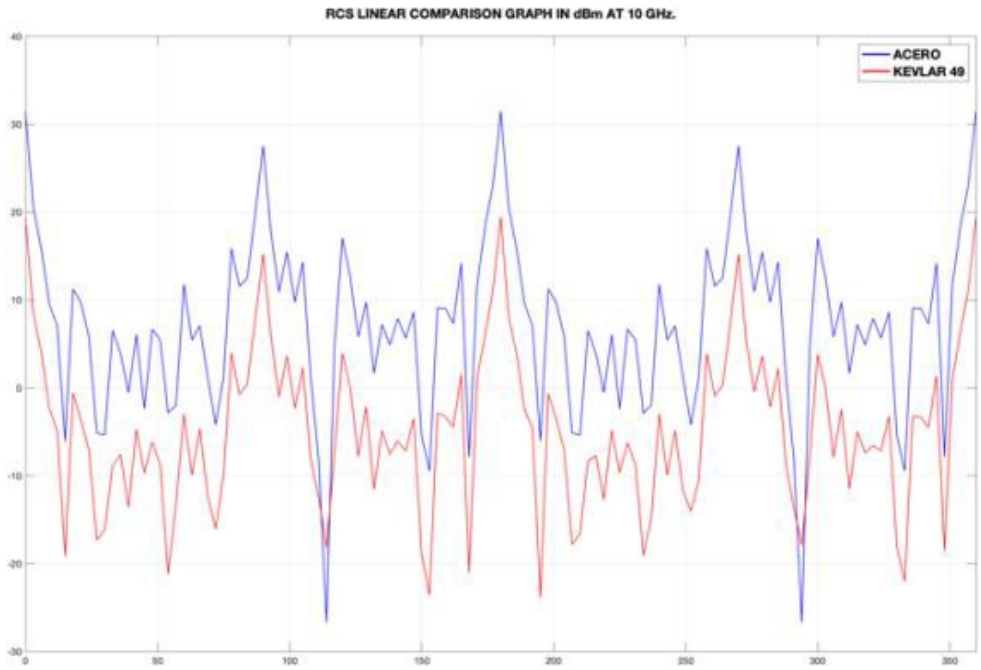

Figura 5. Comparación RCS lineal (acero y Kevlar).

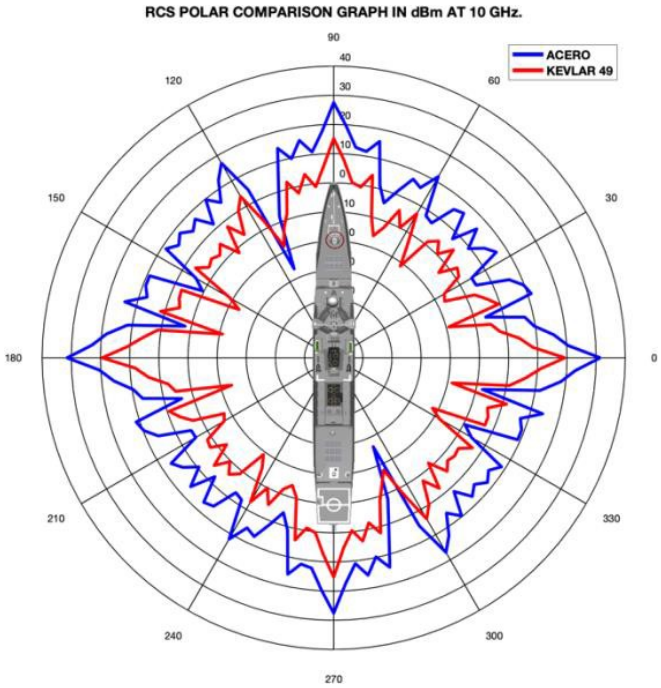

Figura 6. Comparación RCS polar (acero y Kevlar).

Se puede apreciar como el *Kevlar* logra disminuir la RCS en aproximadamente 20 dB desde algunas perspectivas de la Fragata.

A simple vista, destaca que las RCS no cambian de forma, de hecho, coinciden. Esto se debe a que únicamente se ha modificado el material y no la geometría de la Fragata. Como se ha mencionado en la introducción, la modificación de la geometría del buque es otra técnica para la reducción de la RCS (evitando formas planas y ángulos rectos o buscando cancelaciones entre los distintos rebotes de las señales electromagnéticas), pero no es objetivo de este trabajo.

Posteriormente, se realizarán más simulaciones con otro tipo de materiales y sus correspondientes propiedades. Se enfrentarán las propiedades eléctricas de los materiales con las propiedades mecánicas, tratando de encontrar un punto donde ambas sean propicias para la construcción de un buque de guerra. De esta forma, se pretende obtener un material que sea interesante para la reducción de la RCS y a la vez, ofrezca unas propiedades mecánicas adecuadas para la construcción de un buque de guerra.

4. Conclusiones

Se han realizado varias simulaciones enfrentando los valores de la RCS de una Fragata F-100 construida en acero frente a la misma Fragata (con la misma geometría) construida en *Kevlar*. Los resultados muestran que el *Kevlar* es un material interesante para llevar a cabo la reducción de la RCS (aproximadamente es capaz de reducirla unos 20 dB), pero en contrapartida, se encuentra el elevado precio del kilogramo de *Kevlar*, que puede llegar a enfrentar una diferencia de más de 10 veces el precio del kilogramo de acero.

Es necesario realizar más simulaciones con otros materiales que ofrezcan buenas características eléctricas para la reducción de la RCS, y que, a la vez, también ofrezcan buenas propiedades mecánicas. Para ello, se utilizará GRANTA EduPack, un software comparador de materiales que consta de una base de datos muy extensa y que permite enfrentar distintas propiedades para obtener materiales adecuados a la aplicación que se está intentando desarrollar.

5. Referencia bibliográficas.

[1] E. F.Knott, J. F. Shaeffer, M. T. Tuley, *Radar Cross Section*. Segunda Edición. Raleigh: SciTech Publishing, Inc, 2004.

[2] García-Tuñón Blanca, *Experiencia en el control de la firma radar y reducción de la Sección Recta Radar (RCS) de una plataforma naval*, II Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2014.

[3] V. D. Charris, J. M. G. Torres, A*nalysis of radar cross section assessment methods and parameters affecting it for surface ships*. *Ship Science & Technology*. Vol. 6 – nº 11. Julio 2012.

[4] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. *Evaluación y explotación de firma radar*. INTA. Available: https://www.inta.es/INTA/es/servicios/95e523d0-14da-11eb-bb2f-ed22714883d2/
Último acceso: 4 de abril de 2022.

[5] MathWorks. *POFACETS 4.1*. D. Jean.
Available:<https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35861-pofacets4-1>
Último acceso: 3 de abril de 2022.

[6] Dupont. *¿Qué es Kevlar?* Stephanie Kwolek.
Available: <https://www.dupont.es/kevlar/what-is-kevlar.html>
Último acceso: 3 de abril de 2022.

[7] UIT-R, *Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones.* Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, 2015.

[8] Armada Española, *Sistemas Electrónicos de Navegación*, 2010.
Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/ShowProperty?nodePath=/BEA%20Repository/Desktops/Portal/ArmadaEspannola/Pages/mardigitalbiblioteca/11ingenieriaelectronica/11ingenieriaelectronica-es/doc998sistelecnaveg//archivo>
Último acceso: 5 de abril de 2022.

ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES, COEFICIENTES Y FORMAS EN EL DISEÑO DEL CASCO DE UN BUQUE DE GUERRA

GM1 (CIA) MIGUEL RUEDA BRAVO
Ingeniero Naval y Oceánico
Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales (ETSIAN).
C/Arturo Soria, 287, 28033 Madrid.
mruebra@mde.es

Resumen:

A la hora de desarrollar el proyecto de un buque la primera cuestión a determinar es el tamaño y las formas del casco, definido por sus dimensiones principales y una serie de coeficientes.

Históricamente el tamaño de los buques ha venido delimitado por la longitud de su quilla que, en los buques de madera, era una única pieza y por lo tanto estaba limitada por la altura del árbol del que se tallara.

Con la construcción de buques en acero, esta limitación se ha superado, pero ¿cuáles son las dimensiones idóneas para que un buque de guerra pueda desarrollar sus funciones de la mejor manera posible? Los buques de gran tamaño podrán disponer de mayor espacio para la dotación, para transporte de vehículos y cargas y para el sistema de combate que integre pero, por otra parte, ven mermada su maniobrabilidad, necesitan una planta propulsora de mayor potencia que buques de dimensiones más reducidas e incluyen costes de mantenimiento y de construcción mayores, además de la necesidad de disponer de instalaciones de mayor tamaño para su construcción y para mantener el buque en los periodos de inactividad.

La respuesta a esta pregunta está, por lo tanto, directamente relacionada con las capacidades que se busquen del buque en cuestión, las limitaciones relacionadas con el presupuesto disponible, los sistemas de combate que se vayan a integrar en el buque y la propulsión de la que se vaya a dotar al mismo, entre otras cuestiones.

En este artículo se pretende tratar de una manera breve el procedimiento con el que usualmente se determinan estos parámetros y la influencia que puede tener cada uno de ellos sobre el comportamiento del buque en la mar, la resistencia al avance del buque (traducido en términos de potencia propulsora) y el coste del buque. Para que resulte más ilustrativo se tomará como ejemplo el dimensionamiento del casco y las formas de un buque tipo fragata.

1. Introducción

El buque de guerra se dimensiona y se construye orientado a unas funciones determinadas, que se traducen en una serie de requisitos que debe cumplir. Sin embargo, hay que tener en cuenta también la limitación derivada de los presupuestos asignados para cada proyecto, siendo críticos para el éxito del proyecto el control de los costes finales de construcción, operación y mantenimiento del buque.

A lo largo de todo el diseño del buque se debe mantener la vista fija en estos objetivos, resumidos en los distintos requisitos definidos y la limitación del coste. No obstante, existen otros requisitos importantes que también condicionarán las formas del buque y que vale la pena tener en consideración. Algunos de ellos están directamente relacionados con el bienestar de la dotación, como son las aceleraciones producidas a

bordo por los movimientos del buque y las vibraciones y ruidos producidos por los flujos de agua a lo largo de las formas del casco y por los fenómenos de cavitación.

Estos requisitos y limitaciones serán los que condicionen y fundamenten las decisiones que se tomarán a lo largo del diseño del buque.

Cabe remarcar que por la complejidad del diseño de un buque y la relación entre los distintos parámetros que afectan al diseño, se suele seguir una metodología de diseño en espiral, donde en cada vuelta a la espiral se aproxima a lo que será el diseño final y, en cada revisión se van afinando las dimensiones y formas finales.

Por lo tanto, en este artículo no se pretende definir unos coeficientes y dimensiones exactos o definitivos, sino una primera aproximación para ilustrar el proceso de diseño y los parámetros más relevantes.

2. Dimensiones principales

2.1. La eslora (L)

En el desarrollo del proyecto de diseño de cualquier buque, el primer parámetro a determinar debe ser la eslora del buque, dada la importancia que tiene este parámetro en todas las fases posteriores del diseño.

A este respecto hay que diferenciar la eslora total del buque (L_T) de la eslora entre perpendiculares (L_{pp}), definida esta última como la distancia horizontal entre los puntos de corte de la línea de flotación con la roda y el codaste (aunque en buques donde no corta la línea de la flotación con el codaste se suele tomar la mecha del timón como referencia a popa), y de la eslora en la flotación (L_F), que no es más que la eslora del buque en la línea de flotación, medida al calado de diseño (*Figura 1*).

La eslora en la flotación es determinante para los cálculos hidrodinámicos del buque y condicionará la

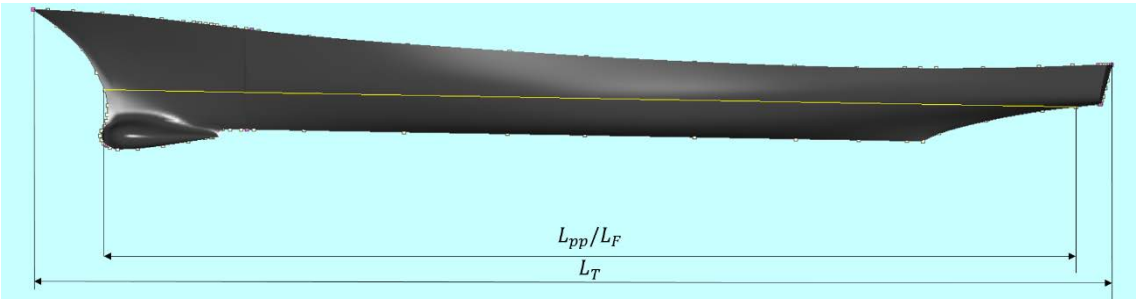

Figura 1. Distintas esloras representadas en un modelo realizado en Maxsurf

resistencia que tendrá que vencer la propulsión del buque para su avance, el círculo de evolución y las amplitudes de cabeceo y oscilación vertical.

Se debe tener en cuenta que en numerosos buques la eslora entre perpendiculares y la eslora en la flotación coinciden por lo que es común que sólo se trabaje una de ellas. En este artículo se considerarán similares.

El primer parámetro a definir será, por tanto, la eslora total que, junto con las formas a popa y proa y el calado, condiciona la eslora en la flotación.

La eslora total está directamente relacionada con la cantidad de acero necesaria para la construcción del buque (coste y peso), el volumen interior disponible y el planteo de elementos sobre la cubierta.

Para definir la eslora mínima que debe disponer el buque, se suele tener en cuenta precisamente las esloras de los distintos elementos instalados en cubierta, así como la eslora de las distintas cámaras de máquinas

(dado que dispondrán de chimeneas y conductos de ventilación que ocuparán parte de la eslora en cubierta). Para una fragata moderna, estas dimensiones se corresponden con: las dimensiones de la cubierta de vuelo, del hangar, de las cámaras de máquinas, del puente, de la distribución de armas, de los espacios necesarios para la superestructura (sensores, antenas y espacios de habilitación), y la eslora necesaria para instalar los equipos de fondeo y aprovisionamiento en la mar.

Tomando como modelo el armamento que se pretende instalar en la próxima fragata F-110, así como las dimensiones del helipuerto y del hangar necesarias para el nuevo helicóptero modelo NH-90, se estima una eslora total próxima a los 145 m (*Figura 2)*. La eslora en la flotación se define a partir de esta eslora, una vez esté definido el calado de diseño.

	Dimensiones F-100 [m]	Dimensiones mínimas Fragata [m]	Dimensiones Fragata incluyendo huelgos [m]
Elementos de fondeo y maniobra pp:	4,5	4,5	4,5
Cubierta Helicóptero:	21,9	19,6	22,0
Hangar:	15,1	13,5	15,0
Lanzador Vertical de Misiles:	7,2	4,4	4,4
Cámaras de Propulsión:	33,6	33,6	33,6
Puente:	10,2	10,2	10,2
Cañon 5 54 | OTO 127/64 LW:	14,0	10,1	15,0
Estación de aprovisionamiento vertical:	6,0	6,0	6,0
Superestructura:	16,4	16,4	16,5
Elementos de fondeo y maniobra pr:	17,7	17,7	17,7
Eslora total:	*146,7*	*136,2*	*145,0*

Figura 2. Dimensiones estimadas para la eslora de la Fragata

Disminuir el valor de la eslora no garantizaría el poder instalar a bordo las armas y sistemas de combate determinados, mientras que aumentar el valor de la eslora, para una misma manga y calado, presentaría algunas ventajas e inconvenientes.

Como ventajas, cabe mencionar una disminución de la resistencia al avance al lograr unas formas más afinadas, una mayor velocidad máxima teórica (ya que esta está directamente relacionada con la eslora en la flotación y la amplitud de onda de la ola producida por el propio buque), menor amplitud en el cabeceo y oscilación en mares de proa, un mayor volumen en cubierta, lo que se traduce en mayor holgura para instalar los distintos sistemas y equipos, una superestructura menos elevada al disponer de una mayor longitud y, por lo tanto, un KG menor y menor superficie vélica. Como principal inconveniente se encuentra el mayor coste y el aumento del círculo de evolución, lo que se refleja en una peor maniobrabilidad.

2.2. La manga (B)

Parámetro que influye de manera directa en la estabilidad del buque y en su periodo de balance. La manga mínima del buque se ve limitada por la longitud transversal necesaria para instalar la máquina propulsora (especialmente en buques con una única cámara de máquinas) u otros elementos decisivos para cumplir con los requisitos fijados como especificaciones. En el caso de una fragata que disponga de cámaras de máquinas separadas y cubierta de vuelo a popa, la manga mínima se verá limitada por el área necesaria para la correcta operación del helicóptero y no tanto por el empacho transversal de las cámaras de máquinas, que será menor. También, se ve influida por la separación mínima entre ejes en buques bi-hélice.

Un aumento en el valor de la manga aumentará el volumen disponible a bordo que, en ocasiones, posibilita reducir la eslora reduciendo en gran medida el acero necesario en la construcción del buque (reduciendo por tanto el coste del proyecto). Por otro lado, un incremento de la manga mejora la estabilidad transversal del buque (intacta y en avería), afectada también por las formas del casco y el compartimentado del buque. No obstante, un elevado valor de la manga, implicará un valor alto del GM transversal, que se traduce en un

periodo de balance pequeño, siendo, en ese caso, un buque muy estable pero poco "marinero", lo que sería perjudicial para la vida a bordo y el bienestar de la tripulación.

El periodo de balance será determinante para la correcta elección de la manga, siendo lo idóneo valores del periodo medio de entre 8 y 15 segundos.

Para el buque tipo fragata una primera aproximación al valor de la manga se podría definir por el valor mínimo para la correcta operación del helicóptero, comprobándose y afinándose este valor en etapas posteriores, mediante el estudio de la estabilidad del buque y el cálculo del periodo de balance, así como la separación mínima entre ejes para el correcto funcionamiento de las hélices.

Por último y ligado a la estabilidad, habrá que tener en cuenta la inclusión de aletas estabilizadoras y quillas de balance, imprescindibles para el amortiguamiento del balance.

2.3. El calado (T)

Este parámetro influye directamente en la estabilidad del buque (ya que, junto con las formas, determina el volumen de la carena y por lo tanto el empuje del buque y la posición del centro de carena). También tiene influencia en la resistencia al avance del buque, el buen funcionamiento de las hélices y del sónar, la inclinación de los ejes propulsores, la aparición del fenómeno de "slamming" y los puertos, fondeaderos, canales y vías por las que podrá transitar el buque.

Un aumento del calado en popa reduce la inclinación de los ejes propulsores y mejora la operación de las hélices, reduciendo la aparición de fenómenos de cavitación y permitiendo un mayor diámetro de pala en el propulsor, que trabajará menos revolucionado, mejorando el rendimiento y reduciendo el consumo.

En proa un aumento del calado reduce la aparición del slamming, fenómeno altamente perjudicial para el buque y mejora la operación del sónar.

Como contrapartida, el aumento del calado aumenta la superficie mojada del casco, aumentando la resistencia al avance y por lo tanto el consumo.

En fragatas bi-helice, el diámetro del propulsor suele ser del orden del calado, por lo que una primera aproximación se podría estimar a partir del diámetro crítico, calculado como función de la potencia propulsora y la velocidad del buque:

$$D_{Crítico} = \frac{1}{5}\sqrt{\frac{BHP_{eje}[kW]}{v}}$$

El valor obtenido para una fragata bi-hélice estará entre 4 y 5 m, por lo que un valor para una primera estimación podría ser de 5 m de calado. Para afinar este valor se debería contactar con un fabricante de hélices.

2.4. El puntal (D)

El puntal a la cubierta principal influye en la supervivencia del buque y en el francobordo disponible y se puede estimar a partir de la altura de la cámara de máquinas, determinada por la máquina propulsora (si se ha determinado la máquina a instalar), incluyendo unos márgenes para desmontaje de equipos y rutado de conductos, y teniendo en cuenta la altura del doble fondo. En fases tempranas del diseño, se puede estimar esta altura como la suma del calado más el francobordo en popa.

El francobordo en popa no es más que el valor del francobordo en proa, descontándole una altura aproximada correspondiente a la altura de entrepuentes (que será un valor aproximado de 2,5 m). Y el francobordo en proa se puede estimar de manera preliminar en función de la eslora:

$$f_{pr} = 0{,}6\sqrt{L}$$

Por tanto, un valor preliminar del puntal para un buque tipo fragata se situará en torno a los 9,5 m.

3. Peso y volumen

Una vez definidas las dimensiones principales y antes de continuar con el diseño del buque, es necesario fijar unos valores estimados del desplazamiento. El procedimiento habitual pasa por la determinación de los distintos pesos. El conjunto de estos pesos estimados define el desplazamiento del buque en toneladas (Δ).

A través del Principio de Arquímedes se puede relacionar este desplazamiento con el volumen de agua desplazada (∀), que se corresponde con el volumen de la carena.

3.1. El desplazamiento (Δ/ ∀)

Para la determinación del desplazamiento se debe conocer, o ser capaz de estimar, los distintos pesos que componen el peso total del buque. Se puede definir en fases tempranas del diseño a partir del registro de un histórico de datos de buques similares diseñados y construidos con anterioridad, mediante una serie de métodos teóricos que descomponen el peso total del buque en distintas partidas o grupos y aplican expresiones teóricas para la corrección de cada una de ellas, adaptando los pesos a las características del nuevo buque.

Algunos de estos grupos que componen el peso total del buque son: el peso del acero, el peso de la planta propulsora, el peso de la planta eléctrica, el peso de la habilitación, el peso de equipos y sistemas y el peso de las cargas y consumibles.

La estimación de pesos es, por lo tanto, compleja, y cobra especial relevancia el disponer de una base de datos detallada o de la información de un buque "patrón" que se asemeje en gran medida al que se pretende diseñar.

Si no se dispone de estos detalles, un valor muy preliminar para buques de tipo fragata podría rondar las 6.000 toneladas que se traduce en un desplazamiento volumétrico estimado de en torno a 5.800 m^3.

El valor final de los distintos pesos y su distribución a bordo son parámetros que condicionarán la estabilidad del buque y su comportamiento, así como los calados finales a proa y popa, que determinan el trimado del buque, por lo que son parámetros que deben controlarse durante todo el proceso de diseño y construcción y condicionarán en gran medida el éxito del proyecto.

4. Coeficientes

Las formas de la carena se definen a través de una serie de coeficientes que son representativos de estás y pueden utilizarse para realizar los cálculos teóricos de resistencia al avance antes de disponer de un modelo físico sobre el que ensayar.

4.1. Coeficiente de Bloque (C_b)

El coeficiente de bloque refleja la similitud del buque con respecto a un prisma cuyas dimensiones fueran la eslora en la flotación, la manga y el calado del buque. Es decir, un valor próximo al 1 reflejaría unas formas

muy llenas, cuadernas en "U" y formas poco afinadas, propias de buques mercantes lentos, con un gran volumen de carga. Por otro lado, valores muy bajos del C_b implican cuadernas en "V" y formas afinadas, propias de buques rápidos.

En este punto del diseño, se puede estimar el coeficiente de bloque del buque, ya que se conocen todos los parámetros necesarios para su cálculo.

$$C_b = \frac{\forall}{L_F \cdot B \cdot T}$$

Las dimensiones principales están definidas de antemano y, aunque no se ha fijado un valor para la eslora en la flotación, esta puede estimarse a partir de la eslora total y el calado de diseño, teniendo en cuenta las formas habituales de fragatas (una proa lanzada con un ángulo respecto a la horizontal de en torno a 40º y una popa con un ángulo en torno a 50º). Un valor estimado de esta manera, para una fragata de las dimensiones fijadas, se sitúa en torno a los 132 m de eslora en la flotación y un valor del coeficiente de bloque de 0,44.

Este valor es relativamente bajo y se corresponde con un buque de formas afinadas, donde se busca disminuir la resistencia al avance y alcanzar velocidades altas.

En buques tipo fragata el coeficiente de bloque suele oscilar entre 0,40 y 0,55.

4.2. Coeficiente Prismático Longitudinal (C_{pl})

Este coeficiente es un indicador de cómo se distribuye el volumen del buque a lo largo de su eslora, es decir, cómo de afinadas son las formas del buque en relación al área transversal del buque en la cuaderna maestra. Se define de la siguiente manera:

$$C_{pl} = \frac{\forall}{L_F \cdot Área\ de\ la\ sección\ media}$$

Un valor elevado del Coeficiente prismático longitudinal indica formas en los extremos poco afinadas.

La distribución del desplazamiento influye mayormente en la superficie de las distintas cubiertas y en la resistencia al avance que tendrá que vencer la propulsión del buque.

El valor óptimo teórico del coeficiente prismático longitudinal para minimizar la resistencia por formación de olas puede obtenerse a partir de los estudios realizados por distintos investigadores (*Figura 3*). Entre los estudios más conocidos se encuentran las series sistemáticas de Taylor.

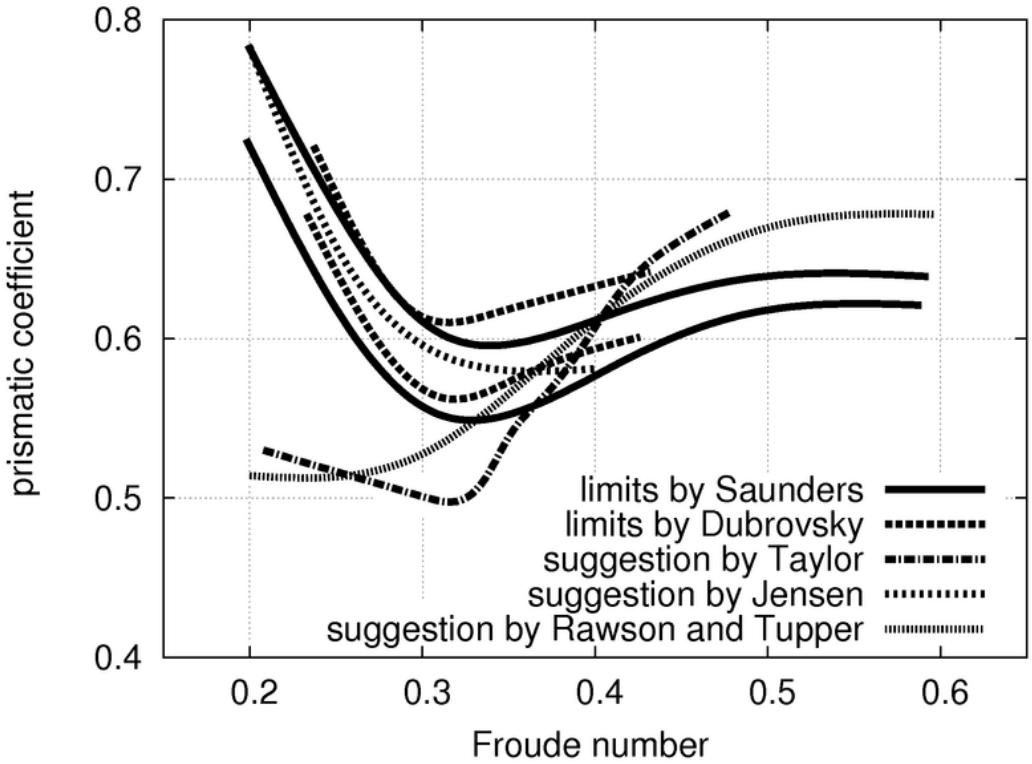

Figura 3. Coeficiente Prismático Longitudinal óptimo en función del Número de Froude

No obstante, hay que tener en cuenta que el valor óptimo teórico es función del número de Froude y, por lo tanto, de la velocidad. A este respecto se podrá optimizar el coeficiente para la velocidad máxima del buque o para la velocidad de servicio, pero no será el mismo para ambas.

Una práctica habitual es elegir un valor intermedio de compromiso que, generalmente, en buques de tipo fragata, se encuentra definido entre 0,56 y 0,64.

Para unas velocidades máxima y de servicio de 30 y 18 nudos respectivamente un valor preliminar del coeficiente prismático longitudinal se sitúa en torno a 0,58.

4.3. Coeficiente de la flotación (C_w)

El coeficiente de la flotación tiene una gran influencia en la estabilidad inicial y algo de repercusión en la resistencia hidrodinámica del buque. El valor de este parámetro es indicativo de cómo de llena es la planta del buque en su línea de flotación, es decir, la distribución del área longitudinal en la flotación. Se define como:

$$C_w = \frac{Área\ de\ la\ flotación}{L_F \cdot B}$$

Existen una serie de fórmulas teóricas para estimar un valor preliminar, en función de los coeficientes ya fijados y del tipo de buque. Para una fragata se podría aproximar en las fases iniciales del proyecto con la siguiente expresión:

$$C_w = 0{,}932 \cdot C_{pl} + 0{,}216$$

Lo que, teniendo en cuenta el valor comentado para el coeficiente prismático longitudinal, supondría un valor de en torno a 0,75.

4.4. Coeficiente de la maestra (C_x)

Igual que el parámetro anterior, se define a partir de una relación de áreas.

$$C_x = \frac{Área\ de\ la\ sección\ media}{B \cdot T}$$

Tendrá un valor próximo a 1 para buques con formas más llenas en el cuerpo central.

Al tener definidos los coeficientes anteriores, el Coeficiente de la maestra queda definido automáticamente.

$$C_x = \frac{C_b}{C_{pl}}$$

Para el buque tipo fragata que se está utilizando para ejemplificar el proceso tendría un valor próximo a 0,74.

5. Conclusiones

Queda patente la gran complejidad que engloba la determinación de las dimensiones y coeficientes de las formas de un buque, dando lugar a multitud de soluciones y variantes en función de los objetivos que se persigan y las limitaciones del proyecto.

En este artículo se ha querido ilustrar un procedimiento de estimación de unos valores preliminares en una fase muy temprana del diseño, sin embargo, estos parámetros definidos deberán ser corroborados y afinados en fases posteriores. Una buena práctica pasa por cruzar estos valores con una base de datos de buques reales, similares y modernos (*Figura 4*) para validarlos.

País	Nombre	Año entrada en servicio	Eslora total Lt(m)	Manga B(m)	Calado T(m)	Δ(toneladas)	vmax(nudos)	v(nudos)	Pmax(MW)	P (MW)
Rusia	Admiral Gorshkov	2018	135	15,0	4,5	4500	29,5	14	40	7,8
Alemania	Sachsen	2003	143	17,4	4,4	5780	29	18	23,5	14,8
Dinamarca	Iver Huitfeldt	2012	138,7	19,8	5,2	5850	30		32,8	
España	Álvaro de Bazán	2002	146,7	18,6	4,9	5853	29	18	34,8	9,1
Francia	Aquitaine	2012	142,2	19,7	5,0	6000	27,5	16	34,8	5
Italia	Carlo Bergamini	2013	144,7	19,7	5,4	6900	27	15	32	5
Noruega	Fridtjof Nansen	2006	134	16,8	7,6	5300	26	16	30,5	9
India	Shivalik	2010	142,5	16,9	5,3	6200	32	22	50,2	22,6
China	Type 054A	2008	134	16,0	6,0	4053	28		22,8	

Figura 4. Información de las dimensiones principales de fragatas similares en servicio

Una vez validados, se podría realizar un estudio teórico de la resistencia al avance del buque, donde se afinarían los coeficientes y dimensiones para pasar al modelado de formas, modelos físicos y virtuales ensayados hasta determinar las formas del buque que satisfagan por completo las necesidades fijadas en los requerimientos, adaptándose a las limitaciones del proyecto.

6. Referencias Bibliográficas

R. Alvariño Castro, *El Dimensionamiento de los modernos buques de combate*. *Ingeniería Naval* Nº721, noviembre 1995.

MARIN. *Still Water Ship Hydrodynamics*. 2017.

JANES. *Jane's Fighting Ships 2009-2010*. 2010.

Morton Gertler, *A reanalysis of the original test data for the Taylor standard series*, marzo 1954.

Robert D Moody, *Preliminary power prediction during early design stages of a ship*, noviembre 1996.

Emil Petersson, *Study of semi-empirical methods for ship resistance calculations*, junio 2020.

Max Haase, Giles Thomas, Gary Davidson, Jonathan R. Binns, *A practical design approach including resistance predictions for medium-speed catamarans*, enero 2013.

Military-Today.com, *Top 10 frigates*, 2022.

J. Maíz Sanz, *Fragatas F-110: el futuro de la Armada Española,* febrero 2022.

CRITERIO DE ESTABILIDAD EN AVERÍAS PARA BUQUES DE GUERRA

GM1 (CIA) D. ÁLVARO GONZÁLEZ CASTELLANO
Ingeniero Naval y Oceánico
Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales (ETSIAN)
C/Arturo Soria, 287, 28033 Madrid.
agonc28@mde.es

Resumen:

Para que un buque se encuentre totalmente en equilibrio su desplazamiento debe ser igual al empuje y a su vez, el centro de gravedad debe coincidir en la vertical con el centro de la carena. Estas condiciones son las deseadas para cualquier creador de artefactos oceánicos.

La estabilidad es la capacidad del buque de volver a su posición de equilibrio, al cesar la fuerza externa que provoca dicha desviación. Para su estudio, hay que destacar la metodología probabilística utilizada en los buques mercantes y la metodología determinística siendo usada por los buques de guerra.

A la hora de construir un buque, debemos regirnos a la normativa impuesta por una sociedad de clasificación. En el mundo naval militar, estas reglas no contemplan los escenarios pertinentes como combatientes por lo que se creó otro tipo de normativa a partir de la normativa civil. Las principales son la *Design Data Sheet* (DDS) americana o la *Naval Ship Code* (NSC) promulgado por la OTAN.

Abstract:

Stability is the ability of the ship to return to its equilibrium position, when the external force that causes said deviation ceases. For its study, it is necessary to highlight the probabilistic methodology used in merchant ships and the deterministic methodology being used by warships.

1. Introducción

Para que un buque se encuentre totalmente en equilibrio su desplazamiento debe ser igual al empuje y a su vez, el centro de gravedad debe coincidir en la vertical con el centro de la carena. Estas condiciones son las deseadas para cualquier creador de artefactos oceánicos.

La estabilidad es la capacidad del buque de volver a su posición de equilibrio, al cesar la fuerza externa que provoca dicha desviación.

Podemos estar ante dos situaciones de estabilidad, aquella considerada estable es aquella de recuperar su posición de equilibrio y la no estable es el caso contrario.

Un buque parado tiene seis grados de libertad: tres de traslación y tres de rotación. Los tres movimientos de traslación se realizan a lo largo de los ejes X, Y, Z, denominándose movimientos de traslación longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. En estos movimientos, el buque tiene un equilibrio indiferente ya que no afectan en la condición de estabilidad. Simplemente, en el movimiento vertical si varía el volumen sumergido, varía el empuje y la tendencia clara del buque es la de recuperar su flotación inicial, consiguiendo la igualdad entre el desplazamiento y empuje.

Los tres movimientos restantes de rotación se realizarán respecto a los tres ejes X, Y, Z paralelos a los X, Y, Z del sistema principal de coordenadas, teniendo su origen en el centro del buque. Los tres movimientos se les conocen como balance, cabeceo y guiñada.

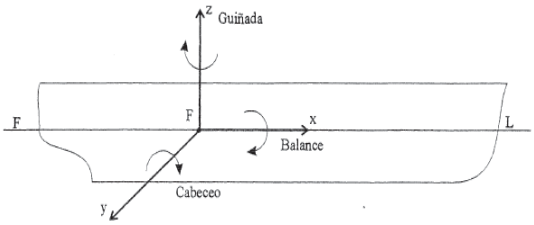

Figura 1. Movimientos de un buque

Encontramos dos tipos de estabilidades: transversal y longitudinal. En función del valor del ángulo de inclinación que sufre el buque, dentro de esta clasificación encontramos:

- Estabilidad transversal inicial.
- Estabilidad transversal para grandes escoras.
- Estabilidad longitudinal inicial.

Cabe destacar, que para el estudio de la estabilidad se supone que la superficie marítima se encuentra sin perturbaciones. A su vez, el estudio puede realizarse de manera estática o dinámica, pero destacar que la que prioriza es la estabilidad transversal para pequeñas y grandes escoras.

Partiendo de una situación de equilibrio, al existir una cierta escora, trazando todas las fuerzas de empuje vertical que pasan por el centro de la carena, éstas se cortarán en un punto al que llamamos metacentro. Si el buque se encuentra adrizado, la línea de empuje coincidirá con la línea central y el metacentro situado en ella se le llamará metacentro transversal inicial.

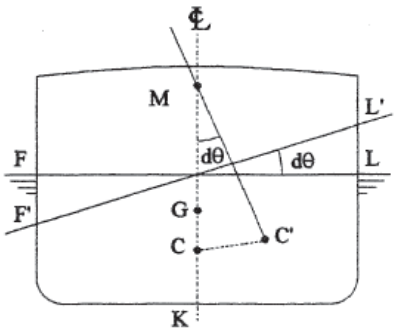

Figura 2. Estabilidad transversal de un buque

Dentro de la estabilidad transversal hay que destacar dos valores primordiales para su estudio.

El radio metacéntrico transversal (CM) es el valor de la distancia entre el centro de carena y el metacentro. Hay que diferenciarlo de la altura metacéntrica transversal (GM) siendo esta la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro.

Las diferentes posiciones que pueden tomar el centro de carena, el centro de gravedad y el metacentro definen el equilibrio inicial que puede tener el buque.

Se analizan cuatro casos de posición entre estos puntos, en el primero de todos, el centro de carena está por encima del centro de gravedad, y en los otros tres el centro de gravedad se encuentra por encima del de carena, siendo estos últimos lo más normal en la mayoría de los buques. Los cuatros escenarios serían:

- GM > 0 y CG < 0. Metacentro por encima del centro de gravedad y centro de gravedad por debajo del centro de carena. Obteniendo un equilibrio estable.
- GM > 0 y CG > 0. Metacentro por encima del centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena. Obteniendo una situación estable.
- GM < 0 y CG > 0. Metacentro por debajo del centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena. El equilibrio sería no estable debido la condición de equilibrio inestable. El par de fuerzas será escorante, aumentando la escora tomada por el buque.
- GM = 0 y CG >0. Metacentro coincidente con el centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena. El equilibrio sería no estable debido a la condición de equilibrio indiferente. El par de fuerzas será nulo, por lo que el buque permanecerá con la escora obtenida.

En definitivas, se puede afirmar que el buque se encontrará en equilibrio estable siempre que la altura metacéntrica sea positiva, mientras que la situación de equilibrio no estable se producirá cuando la altura metacéntrica sea cero o negativa. Pudiéndose encontrar un buque escorado o con flotabilidad negativa.

Cuando hablamos de estabilidad en avería, estamos ante un escenario en el que la estabilidad del buque se modifica empeorando sus condiciones.

Durante la vida útil de un buque, puede sufrir diversas averías que ponen en riesgo su flotabilidad. Por lo que hay que estudiar su nuevo escenario tras una avería. Actualmente, se utilizan dos métodos: el probabilístico y el determinístico.

2. ¿Qué problema se aborda?

La Organización Marítima Internacional (IMO) en concreto la Convención Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS) ha creado un reglamento para garantizar la estabilidad de un buque tras una avería. Pero este convenio no es siempre el correcto para buques de guerra ya que las misiones demandan soluciones no contempladas en el SOLAS.

A lo largo de la historia tras una avería se evalúa los daños a través de sus compartimentados inundados y el valor que coge el GM siendo este siempre mayor a cero. Cuando se inunda un compartimento se produce una pérdida de flotabilidad, cogiendo además una nueva escora y con ello, modificando las alturas metacéntricas. Cuanto más tiempo permanezca a flote el buque, más eficaz será su evacuación y en su caso, las operaciones de búsqueda y rescate.

En el siglo XIX y principios del XX fue la revolución del sector marítimo, no existían los aviones y había una gran emigración entre América y Europa. La creación del SOLAS fue a raíz del hundimiento del trasatlántico RMS Titanic durante su viaje inaugural en 1912, en el que fallecieron más de 1500 personas. A parte de crear un reglamento donde se introdujo los Sistemas de Comunicación Marino conocidos como “GMDSS”, se incorporó las necesidades de mamparos estancos, mantenimientos de servicios esenciales de emergencia, protección contraincendios y normas de estabilidad. Destacando la división de los buques en

compartimentos estancos donde después de una avería por colisión del casco, el buque continúe a flote. A esta necesidad de flotabilidad tras una colisión habría que sumarle la estabilidad del artefacto con una cierta cantidad de agua en las cubiertas en función de la altura significativa del buque, dependiendo de la forma que navegue y del francobordo residual tras el impacto.

3. ¿Cómo se resuelve hoy en día?

3.1. Método probabilístico

A la hora de diseñar un buque mercante, su estabilidad queda determinada por un concepto al que denominamos método probabilístico. Los conceptos probabilísticos consideran que la posibilidad de que un buque conserve la flotabilidad después de un abordaje es una forma de medir el grado de seguridad del buque en la condición de avería. Dicho grado de seguridad se hace corresponder con un valor numérico A, denominado índice de compartimentado alcanzado, de tal manera que se puede considerar que dos barcos diferentes, que tengan el mismo valor del índice A tienen el mismo grado de seguridad. La normativa que indica las directrices para el cálculo probabilístico de estabilidad en averías se encuentra en la MSC-216 (82).

El grado de seguridad de un buque se considera satisfactorio cuando el valor del índice A es igual o superior a R, siendo este el índice de compartimentado requerido por la normativa.

$$\mathrm{A} \geq \mathrm{R}$$

En la normativa se diferencia el índice R dependiendo de la clasificación del buque:

Buques de carga:

$$\mathrm{A} \geq 0{,}5 * \mathrm{R}$$

Buques de pasaje:

$$\mathrm{A} \geq 0{,}9 * \mathrm{R}$$

El SOLAS reconoce que tanto la flotabilidad como la estabilidad después de averías dependen mucho de cuál sea la condición de carga en la que se encuentre. Se establece que los cálculos, para determinar el índice A, deben realizarse partiendo de tres condiciones de carga diferentes:

(1) Light (Dl): Condición con menor desplazamiento del buque. Se obtiene «Al».
(2) Deepest (Ds): Condición de mayor desplazamiento del buque. Se obtiene «As».
(3) Partial (Dp): Condición con un calado al 60% de la diferencia entra las condiciones anteriores. Se obtiene «Ap».

Con estos valores se obtienen el índice “A” total, calculándose:

$$\mathrm{A} = 0{,}4 * \mathrm{As} + 0{,}4 * \mathrm{Ap} + 0{,}2 * \mathrm{Al}$$

Cada condición de «A», se obtiene teniendo en cuenta la probabilidad de que un compartimento o grupo de compartimentos se puedan inundar (P) y además, la probabilidad de supervivencia del buque después de la inundación de los compartimentos.

$$A = \sum P_i * S_i$$

Para que el buque pueda ser analizado por términos probabilísticos, no es necesario que soporte todos los casos de averías planteados, sino que resista un número de ellos tal que, la finalidad principal es que el valor del índice «A» sea superior al índice «R» requerido.

3.2. Método determinístico

El método determinístico fue el método por excelencia a la hora de construir un buque. Hay que destacar que el Titanic fue construido de esta manera, por ello en su hundimiento, el saber cuántos compartimento estaban dañados fue crucial para calcular cuánto tiempo le quedaba al buque a flote.

Se trata de un método el cual define una avería supuesta y su localización en el buque. El buque después de la avería en varios compartimentos debe ser capaz de cumplir los criterios después de averías. En la armada, no se ha dado el paso de utilizar el método probabilístico y aún se sigue utilizando el criterio determinístico. El criterio utilizado es el propuesto por la Design Dara Sheet (DDS) 079-1 americana. Los criterios de estabilidad usados por la Armada estadounidense fueron desarrollados durante y posteriormente a la Segunda Guerra Mundial, en base a un estudio que se hizo tras varios naufragios de buques americanos que habían sufrido un ciclón. Estos criterios están basados en la curva de brazo adrizante estático. Son básicamente datos empíricos, lo cual puede tener un mayor impacto en la estabilidad dinámica en buque intacto.

Antes de la segunda Guerra Mundial, los criterios de estabilidad estaban basados principalmente en la altura metacéntrica «GM». La principal base de datos que usó para el criterio de estabilidad fue la obtenida durante el tifón que azotó el Pacífico en diciembre de 1944. La gran mayoría de los buques militares estadounidenses fueron hundidos. Se realizó un amplio análisis en función de cómo el tifón afectó a los buques diseñados para unas condiciones meteorológicas adversas. Los resultados se trazaron con las características de los buques, y decidieron establecer una velocidad de viento de cien nudos, y fue elegida como el valor nominal para modelar tormentas en el trópico, valor nominal medido a veintitrés pies por encima de la línea de flotación.

Respecto a la relación del brazo adrizante en la intersección del brazo escorante debido al viento y las curvas de brazo adrizante, al máximo brazo adrizante, fue «0.67» y más grande para los mayores destructores. Los buques que sobrevivieron al estudio tenían un ratio de «0.51» a «0.54». Para proveer un margen para las rachas, el ratio máximo especificado fue establecido en «0.6».

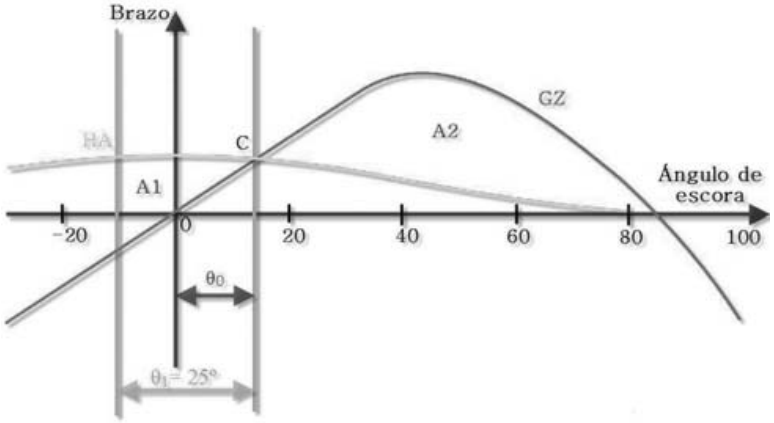

Figura 3. Gráfica relación brazo adrizante con el brazo escorante

En 1948, los datos obtenidos en el estudio se incluyeron en un «DDS». En 1962 el criterio fue redefinido y documentado por Sarchin y Goldberg. Esta versión del criterio fue adoptada por la Armada estadounidense en las «DDS 79-1», y en parte por otras Armadas del mundo.

En la DDS se encuentran tanto los criterios de estabilidad sin avería y con averías. El criterio para evaluar la estabilidad después de averías está basado en la reducción del brazo adrizante igual a «$0{,}05 * \cos\theta$» está incluida en la curva del brazo adrizante para tener en cuenta la inundación asimétrica desconocida o el movimiento transversal de pérdida de material. La curva del brazo escorante debida al viento de costado es calculada con el mismo método usado para los cálculos de estabilidad intacta, pero considerando una velocidad viento de costado de alrededor treinta y tres nudos como se define en las «DDS 079-1». La estabilidad después de averías es considerada correcta si el ángulo de equilibrio estático de la escora (θc), sin efectos de balance debido al viento, no excede de quince grados.

La curva del brazo adrizante en averías es de «45º». El ángulo «θr» es el ángulo esperado de balance por el viento desde el punto de intersección de las curvas del brazo adrizante y del brazo escorante, suponiéndose para un viento y un estado del mar conocido. El valor del ángulo de balance será estimado de acuerdo con las «DDS 079-1». El criterio es considerado que cumple si la reserva de estabilidad dinámica «A2» es menor que «A1», donde «A2» se extiende desde «θr» a barlovento.

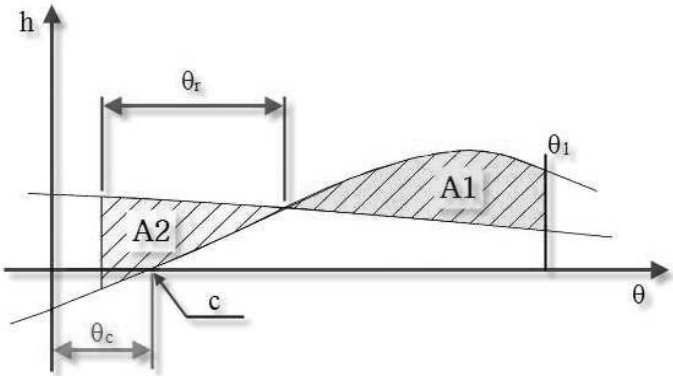

Figura 4. Reservas de estabilidad dinámica

Para el análisis de defensa nunca se trata el tema de la vulnerabilidad como una probabilidad. La principal diferencia entre la susceptibilidad y la vulnerabilidad es que la primera puede ser modificada a lo largo del ciclo de vida del artefacto, mientras que todo aquello que afecta a la vulnerabilidad son las características intrínsecas del buque a lo largo de su vida.

La metodología de diseño de los buques debe ser teniendo como principal objetivo minimizar la vulnerabilidad en la primera fase de diseño de concepto.

Para el diseño de buques de guerra la armada británica y la americana ha presentado diversos requerimientos de estabilidades después de averías. Con el fin, de minimizar la vulnerabilidad de su flota.

Criterio	**Armada Real Británica NES 109**		**Armada estadounidense *DDS 079***	
Eslora de avería	$L_{WL} < 30\ (m)$	Un compartimento	$L_{WL} < 30.48\ (m)$	Un compartimento
	$30(m) < L_{WL} < 92(m)$	Dos compartimentos de al menos seis metros	$30.48\ (m) < L_{WL} < 91.44\ (m)$	Dos compartimentos de al menos seis metros
	$92\ (m) < L_{WL}$	Máx. {15 % L_{WL} ó 21 (*m*)}	$91.44\ (m) < L_{WL}$	15 % L_{WL}
Permeabilidad	Espacio estanco	97 %	Espacio estanco	95 %
	Acomodación	95 %	Acomodación	95 %
	Maquinaria	85 %	Maquinaria	85 % - 95 %
	Gambuzas	60 %	Gambuzas	60 % - 95 %
GZ en C	60 % de $GZ_{máx}$		—	
Área A_1	$> 1.4 \cdot A_2$		$> 1.4 \cdot A_2$	
GM Longitudinal	> 0		—	
Flotabilidad	Trimado longitudinal menor que el requerido a causa del hundimiento		Tres en línea de margen	

Figura 5. Criterio de estabilidad después de averías para buques de guerra

Los rangos de medidas son los resultados del análisis de una serie de datos reales y fórmulas empíricas que une el rango de daños con las características del buque en sí.

4. Estudio propuesto

Los astilleros encargados de suplir las necesidades de Defensa se basan en la experiencia o se acogen a la normativa propuesta por otros países, con las consecuencias de la dependencia que ello conlleva. Para unificar los criterios de los países pertenecientes a la OTAN y obtener un reglamento conjunto, se creó la *Naval Ship Code* (NSC). Se trata de un código naval militar basado en las normas nacionales, códigos internacionales como el *High Speed Craft* (HSC), y normativa del SOLAS. Creadas con el fin de mejorar los diseños de construcción, como la navegación en aguas internacionales, comunicaciones o la protección del medioambiente.

A diferencia de la mayoría de documentación utilizada para la construcción naval, NSC utiliza la metodología denominada *estándares basados en objetivos*. Se caracteriza por definir que debe cumplirse, más que como debe hacerse. Con ello, la NSC consigue proporcionar una elevada seguridad a los buques de guerra encontrados dentro del marco de la OTAN.

Para el desarrollo de esta normativa, se ha adoptado una estructura piramidal en la que se incorpora los puntos críticos, basados en los objetivos y las técnicas de evaluación de riesgos. Se comienza en un nivel cero en el que se fijan los principios generales del NSC y se termina en un sexto bloque donde se realizan declaraciones para justificar el texto.

Figura 6. Objetivos para desarrollar el "NSC"

Cuando un buque de guerra es dañado, dicho daño tiene que clasificarse en la llamada *Extensión del daño*. Se trata de formas definidas:

- *Esfera*. Se utilizará para las explosiones. Detonante de las explosiones contra la parte exterior del casco, la mitad de la esfera que se utilizará.
- *Cubo*. Se utiliza para definir los volúmenes directamente afectados por el fuego y que pueden cambiar de forma para encajar el
- compartimiento.
- *Raking/grounding.* Se utilizará en la orientación horizontal apropiada para describir la magnitud de los daños al rastrillar, varar, encallar o abarrancar la tierra, que representa el ápice de la máxima penetración.
- *Colisión.* Que se utilizará en la orientación vertical correcta para describir el alcance de una avería de colisión de la proa del otro buque, el vértice que representa la máxima penetración.

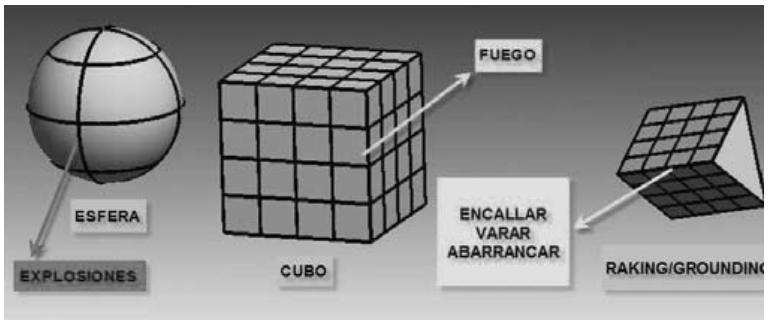

Figura 7. Formación de daños

Además, se clasificará con una categoría de daño en la que principalmente dependerá de la longitud en metros que ha sido dañada.

Se propone que, a la hora de estudiar la estabilidad de un buque de guerra, en vez de hacerlo solamente por un estudio determinístico, se haga una combinación de varios métodos.

Como idea principal, el buque en situación de emergencia debe ser abandonado y evacuado, con garantía de que la crítica situación permita con total seguridad:

- El buque debe tener una flotabilidad suficiente que permita la evacuación.
- La evacuación de las personas debe hacerse sin que grandes escoras puedan hacerla inviable.
- Los medios de salvamento deben estar disponibles y poder utilizarse en su totalidad.

Para comenzar, se realizaría un estudio a partir de la formulación propuesta por el método probabilístico. Seguido del criterio SOLAS. Las averías expuestas en este convenio son basadas en estadísticas definidas con una longitud igual al 3% de la eslora más tres metros, una penetración de avería igual a B/5 y una altura sin límites. Una vez estudiada las averías con el convenio SOLAS, se estudiaría la peor avería de la DDS americana, dependiendo en todo momento de las características del buque. Y para finalizar se estudiaría a través del convenio establecido por la Armada británica. El cual las peores averías son:

- Aquellas en la que el ratio de daño es igual a diez metros y provocado por una explosión. Se representa con una esfera.
- Un incendio es causa de hundimiento y en este caso, aquel que provoca un daño de veinte metros de lados. Se representa con un cubo.
- Averías causadas por un encallamiento y/o colisión. Representadas con un prisma.

5. Conclusiones

Destacar que el SOLAS inunda sólo un compartimento en los buques mercantes y en los regidos por la DDS norteamericana tres. A su vez, la NSC clasifica las averías en diferentes grados de daños por lo que es bastante interesante para describir con detalle la avería obtenida.

Para la creación de este trabajo se han realizado diferentes estudios de las diferentes metodologías existentes en el mercado tanto civil como militar. Entre todos los criterios existentes, nombrar que el criterio de la Armada británica es más restrictivo que el de la norteamericana, si tenemos en cuenta el *Acuerdo de Estocolmo* al SOLAS, se tiene que este convenio es el más restrictivo de todos.

El NSC constituye un importante paso en la unificación de criterios de seguridad en los buques de guerra de los países miembros de la OTAN y sus aliados, lo que sin duda facilitará a proyectos internacionales y ser pioneros en I+D.

A lo largo de los años, se han perdido numerosas vidas debido a hundimientos de los buques de guerra, y la gran mayoría por desconocimiento de que la estabilidad de un buque es primordial para su supervivencia. Cabe destacar que el causante de la creación de la normativa civil para la construcción de un buque fue el «RMS Titanic» puesto que con anterioridad no existía ningún reglamento para la construcción de un transporte marítimo.

En la DDS la normativa existente y demás criterios, tienen en cuenta los escenarios bélicos por lo que habrá más factores externos que influyan en la flotabilidad a parte del estado de la marea y de relación de pesos, consiguiendo así una visión más amplia sobre la estabilidad de un buque.

6. Referencias bibliográficas

(1) Doctor Ingeniero Naval Rodrigo Pérez Fernández. Doctor Ingeniero Naval José María Riola Rodríguez. (2012). *Criterios de estabilidad en averías en buques de guerra*.
(2) Bureau Veritas. (2021). *Rules for the Classification of Steel Ships*. Part B, Hull and Stability.
(3) Department of the Navy. (1975). *Stability and buoyancy of U.S*. Naval Surface ships.
(4) Organización Marítima Internacional. (2004). *Goal-based new ship construction standards. IMO, working group on goal-based standards at MSC 79*.
(5) *Design Data Sheet*. (2009). Revista Ingeniería Naval Julio/Agosto.

ANÁLISIS DE RIESGOS BASADO EN LA OPERACIÓN, MEDIANTE METODOLOGÍA SORA, PARA LOS RPAS EN DOTACIÓN DE LA ARMADA

GM1 (CIA) FRAGUAS VELASCO, MARCELO
Ingeniero Aeroespacial
Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales (ETSIAN)
C/Arturo Soria, 287, 28033 Madrid.
mfrave1@mde.es

Resumen

Históricamente, la industria aeroespacial ha destacado por unos altos estándares de certificación que permiten garantizar el cumplimiento de los criterios de seguridad establecidos. Para la certificación de aeronaves tanto militares como civiles se debe aportar evidencias basadas en ensayos, cálculos o declaraciones aceptadas por las Autoridades según lo dispuesto en los requisitos que deben cumplir para ser consideradas aeronavegables.

En términos generales, tanto las aeronaves como RPAS civiles siguen un proceso de certificación exhaustivo que culmina con la emisión del certificado de tipo (CT). Una vez obtenido el CT, cada aeronave o RPAS es certificado para poder operar con seguridad, mediante el certificado de aeronavegabilidad.

Por otro lado, la certificación de UAS militares requiere que en un principio el CAD (Consejo de Aeronavegabilidad) apruebe las bases de certificación propuestas por el solicitante del CT y acordadas con el OTC (Órgano Técnico Competente). Una vez expedido el CT, los Ingenieros Aeronáuticos Habilitados del usuario son los encargados de expedir el certificado de aeronavegabilidad.

En el caso de los RPAS de bajo peso (inferior a 25kg) de los que dispone la Armada, existe una gran dificultad a la hora de obtener el CT y por lo tanto no pueden disponer de certificado de aeronavegabilidad, ya que necesariamente requiere ampararse en la expedición previamente del CT.

Es por ello que se plantea una vía para la generación de una prueba equivalente al CT para RPAS militares de MTOW no superior a 25kg. Esto es algo que está reflejado en el artículo 41.2 del RAD, donde se indica que el Consejo de Aeronavegabilidad determinará la prueba equivalente que deberá ser aportada. Dentro de toda la documentación necesaria para la validez de esta prueba equivalente, se incluye la posibilidad de aplicar la metodología SORA de análisis de riesgos, que se detalla en este artículo.

1. Conceptos clave

1.1. Certificado de Tipo (CT)

Documento con el que se hace constar que una aeronave ha sido diseñada y ensayada siguiendo las normas y procedimientos aprobados, por lo que se considera segura para el vuelo.

1.2. Certificado de Aeronavegabilidad

Documento que certifica que la aeronave está en condiciones de aeronavegabilidad conforme al diseño de tipo. Se definen sus características y calificaciones tras las correspondientes inspecciones y pruebas, tanto en tierra como en vuelo.

1.3. Reglamento de Aeronavegabilidad de la Defensa (RAD)

Reglamento que define y regula los certificados que garantizan la seguridad en vuelo de aeronaves militares (no aplica a las aeronaves con matrícula civil) pilotados por control remoto. Se encarga de establecer los procedimientos, requisitos y las normas que se han de seguir para mantener su vigencia y conseguir su renovación.

Para que una aeronave sea autorizada para el vuelo debe disponer del certificado de aeronavegabilidad correspondiente.

1.4. Consejo de Aeronavegabilidad

El Director General de Armamento y Material es la autoridad de aeronavegabilidad de la defensa. El Consejo de Aeronavegabilidad es el órgano técnico de trabajo del Director General de Armamento y Material.

De entre sus funciones destaca que es el órgano encargado de aprobar bases de certificación para la obtención de CT y CA, proponer las directivas de aeronavegabilidad necesarias, informar sobre la habilitación de los ingenieros aeronáuticos que expiden CA o establecer los procedimientos de aprobación de los documentos de procedencia extranjera relativos al mantenimiento de la aeronavegabilidad, entre otras.

1.5. Modelo semántico de SORA

De cara a facilitar la comunicación entre los diferentes integrantes de SORA, es necesario establecer una terminología para las fases de la operación, procedimientos, etc. Por ello, el modelo semántico proporciona una manera consistente de utilizar todos los términos presentes en SORA. En la imagen 1, se puede observar la representación gráfica de la terminología de SORA.

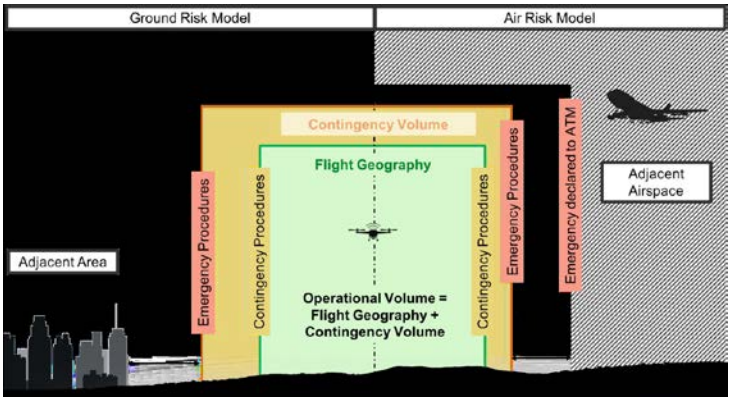

Figura 1 - Representación gráfica del modelo semántico de SORA

1.6. Concepto de Robustez

Para poder aplicar correctamente la metodología SORA, es imprescindible conocer y entender el concepto de robustez, así como su aplicación. Básicamente, cualquier propuesta enfocada en la mitigación de un riesgo dado, se debe demostrar e incluir dentro de uno de los niveles de robustez (bajo, medio y alto).

La determinación del nivel de robustez está asociada al nivel de integridad proporcionado por cada mitigación, y al nivel de garantía. Ambos están basados en el análisis de riesgo.

El nivel de integridad indica el nivel de seguridad que otorga cada mitigación.

El nivel de garantía es la manera de justificar que se ha alcanzado el nivel de seguridad requerido. Hay hasta tres niveles de garantía. Un nivel bajo indica que el operador declara que se ha alcanzado el nivel de integridad necesario. Un nivel medio se alcanza cuando el operador muestra evidencias del nivel de integridad logrado. Para conseguir un nivel alto de garantía, una tercera parte competente debe validar la integridad lograda.

Tabla 1 - Nivel de Robustez

	Low assurance	Medium assurance	High assurance
Low integrity	Low robustness	Low robustness	Low robustness
Medium integrity	Low robustness	Medium robustness	Medium robustness
High integrity	Low robustness	Medium robustness	High robustness

1.7. Tipos de operaciones de UAS

Las operaciones de UAS se clasifican en tres categorías diferentes: *open*, *specific* y *certified*, según lo establecido en la Regulación 2019/947.

1.7.1 Categoría abierta

Para pertenecer a esta categoría, los UAS deben tener un MTOW inferior a 25kg, no deben sobrevolar personas o transporte de mercancías peligrosas durante su operación y esta debe realizarse en condiciones VLOS.

Esta categoría se divide en tres subcategorías, dependiendo del tipo de UAV, los requisitos del piloto, etc.

1.7.2 Categoría Específica

Cuando una operación de UAS no puede pertenecer a la categoría abierta por razones de seguridad, se considera que es de la categoría específica.

En algunos casos será necesario que el operador tenga autorización operacional o que presente una declaración respecto a una operación en un escenario estándar.

Un escenario estándar es un tipo de operación sobre el que se ha determinado una lista de medidas de atenuación.

En el caso de que el operador posea un certificado LUC (UAS ligeros) no se exigirá una autorización operacional.

El certificado LUC acredita que el operador está capacitado para realizar el análisis de riesgos asociados a una operación por sí mismo

1.7.3 Categoría Certificada

Los UAS incluidos en esta categoría necesitan estar certificados cuando la operación implica sobrevolar concentraciones de personas o transporte de mercancías peligrosas con alto riesgo a terceros en caso de accidente.

2. Introducción

El análisis de riesgos SORA está basado en el documento desarrollado por JARUS (*Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*), que proporciona una visión sobre cómo crear, evaluar y llevar a cabo una operación de un UAS (*Unmanned Aircraft System*) de manera segura. Se trata de una metodología encaminada a asesorar tanto al operador del UAS como a la autoridad competente de cara a determinar si una operación concreta se puede llevar a cabo de forma segura.

Sin embargo, este documento no debe utilizarse como una checklist, ni tiene como objetivo resolver todos los desafíos relacionados con la integración del UAS en el espacio aéreo. La metodología SORA debe actuar como una guía flexible que permita encontrar la mejor forma de mitigar y reducir los riesgos hasta un nivel aceptable. Por ello, no establece requisitos, sino una serie de objetivos de seguridad que se deben cumplir para diferentes niveles de robustez, acorde al nivel de riesgo.

2.1. Aspectos Generales

El propósito de SORA es proporcionar una metodología que sirva como método válido para demostrar el cumplimiento del artículo 11 de la Regulación 2019/947 sobre las normas y procedimientos para la operación de UAS, que consiste en evaluar los riesgos y determinar la viabilidad de una determinada operación de un UAS, dentro de la categoría «específica».

Debido a las diferencias existentes entre categorías y a los distintos niveles de riesgo a considerar, no se puede asumir automáticamente que un UAS dentro de la categoría «específica» cumple con los requisitos de seguridad y rendimiento de los UAS de la categoría «abierta». Para ello, SORA proporciona una aproximación consistente para incluir aquellos riesgos asociados a la operación de UAS que no están dentro de la categoría «abierta».

Esta metodología está basada en el principio de un modelo holístico de análisis de riesgo, utilizado para evaluar los riesgos asociados a una operación de UAS determinada. El modelo considera la naturaleza de todas las amenazas asociadas a un riesgo y propone las mitigaciones a llevar a cabo durante dicha operación. Ayuda a analizar los riesgos de manera sistemática y determina los límites adecuados para una operación segura.

2.2. Aplicación

La metodología SORA está desarrollada específicamente para aquellas operaciones en las que es necesario un análisis de riesgos.

Dentro de los riesgos a analizar, se encuentran aquellos relacionados con la colisión entre un sistema tripulado y otro no tripulado o un impacto contra el terreno. Sin embargo, el caso de accidente de un sistema

no tripulado que transporte carga de pago o pasajeros, aún no está contemplado en esta metodología, ya que presenta otro tipo de riesgos adicionales que se escapan del marco de análisis actual.

Esta metodología podría aplicarse en aquellos casos en los que los UAS han sido diseñados sin seguir lo establecido en los STANAG de referencia, por lo que no pueden obtener el Certificado de Tipo. En esos casos, se procede a la realización de una Prueba Equivalente. Dentro de toda la documentación necesaria para obtener esta Prueba Equivalente, entra un análisis de riesgos intrínsecos a la operación desarrollada y el estudio de las mitigaciones existentes para ser capaces de establecer el riesgo asumido.

3. SORA

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la metodología SORA se basa en el análisis de riesgos para determinar si una operación es segura.

El riesgo se puede definir según SAE ARP 4754A / EUROCAE ED-79A como «la combinación de la frecuencia de que un incidente tenga lugar y su nivel de gravedad».

La consecuencia de un incidente se evalúa como algún tipo de daño, que quedan identificados de la siguiente manera:

- Lesiones fatales a terceras partes en tierra.
- Lesiones fatales a terceras partes en aire.
- Daños a infraestructuras críticas.

3.1. Proceso SORA

La metodología SORA consiste en un proceso lógico enfocado en el análisis del Concepto de Operación (ConOps) y establece si la operación se puede llevar a cabo bajo un nivel de riesgo aceptable.

Existen un total de diez pasos sobre los que se apoya esta metodología, que preceden a una evaluación cuyo objetivo es verificar que la operación propuesta es viable.

3.1.1 Paso 1 – Descripción ConOps

El primer paso consiste en recopilar y proporcionar toda la información técnica, operacional y de sistemas necesaria para llevar a cabo el análisis de riesgos que está asociado a la operación de un UAS. La descripción del Concepto de Operación debe ser tan precisa como sea posible. El ConOps no debe describir únicamente la operación, sino que debe proporcionar una visión sobre la cultura de seguridad operacional.

El desarrollo del Concepto de Operación puede ser un proceso iterativo. Además, al aplicar el proceso SORA se deben aplicar limitaciones y mitigaciones adicionales, lo que requiere detalles técnicos adicionales, así como procedimientos y otra información que debe ser actualizada en el ConOps.

3.1.2 Paso 2 – Determinación del riesgo intrínseco de impacto en tierra (GRC)

El índice GRC representa el riesgo de que una persona sea golpeada por un UAS fuera de control. Para establecer dicho índice, es necesario conocer las características dimensionales del UAS, así como el escenario operacional.

De esta manera, se establecen una serie de clases de riesgo en función de la operación prevista, la dimensión y energía cinética del UAS, a través de un método cualitativo.

Tabla 2 - Índice GRC

Índice Ground Risk Class intrínseco del RPAS				
Dimensiones máximas del RPA	1m/ aprox. 3ft	3m/ aprox. 10ft	8m/ aprox. 25ft	>8m/ aprox. 25ft
Energía cinética típica esperada	< 700 J	< 34KJ	< 1084 KJ	< 1084 KJ
Escenarios Operacionales				
VLOS y fuera de aglomeraciones de edificios o personas	1	2	3	5
BVLOS y fuera de aglomeraciones de edificios o personas	2	3	4	6
VLOS en zonas de aglomeraciones de edificios	3	4	6	8
VLOS sobre aglomeraciones de personas	7			

Para la mayor parte de UAS, el área de impacto se puede aproximar partiendo del tamaño y la energía esperada en el GRC. Sin embargo, hay algunos aspectos del diseño del UAS como la cantidad de combustible, hélices o materiales que pueden influir significativamente en el área letal del UAS pero que no están incluidos en la tabla de GRC. Este tipo de consideraciones puede llevar a una variación en el índice GRC. Por ello, el uso de estándares fijados por la industria, así como una mayor investigación proporcionaría una forma más sencilla de llevar a cabo este análisis.

3.1.3 Paso 3 – Determinación del GRC final

El riesgo intrínseco presente durante una operación puede controlarse y reducirse mediante el empleo de mitigaciones.

Las mitigaciones que se usan para modificar el GRC intrínseco tienen un efecto directo sobre los objetivos de seguridad asociados a una operación en particular y por lo tanto es importante asegurar su robustez.

En este paso se realiza una corrección del índice GRC basándose en las medidas de mitigación posibles para una operación dada. Dependiendo de la robustez asociada a cada mitigación se modificará de una u otra manera el índice GRC.

Un ejemplo del efecto de las mitigaciones es la Tabla 3, donde se muestran diferentes mitigaciones y cómo variarían GRC.

Tabla 3 - Efecto de mitigaciones en GRC

		Robustez		
Mitigación número	**Adaptación del GRC**	**Baja/ ninguna**	**Media**	**Alta**
M1	Se dispone de un Plan de Respuesta a la Emergencia (ERP, del inglés *Emergency Response Plan)* efectivo, disponible y validado	1	0	-1
M2	Se dispone de sistemas que reducen los efectos del impacto en tierra sobre personas	0	-1	-2
M3	Se dispone de sistemas de contención técnica implementada y efectiva	0	-2	-4

Para que la operación se pueda llevar a cabo mediante la metodología SORA, el GRC final debe ser inferior a 7.

3.1.4 Paso 4 – Determinación del riesgo inicial de colisión en aire

Además de determinar el riesgo de impacto en tierra, también es necesario establecer lo que se denomina Clase de Riesgo en Aire (ARC, *Air Risk Class*). Las mitigaciones en este caso son estratégicas y tácticas.

El ARC establece una clasificación cualitativa sobre la probabilidad de que un UAS se encuentre con una aeronave tripulada dentro de un espacio aéreo típico. Básicamente, el ARC aporta una idea inicial sobre el riesgo de colisión dentro del espacio aéreo, antes de aplicar las mitigaciones.

Para determinar el ARC es necesario establecer la Categoría de Encuentro en un Espacio Aéreo (AEC) que se entiende como la clasificación de los distintos volúmenes de espacio aéreo donde pueden tener lugar las operaciones de UAS. El espacio aéreo está dividido en categorías de riesgo. Dichas categorías están caracterizadas por los siguientes aspectos: altitud, espacio aéreo controlado o no controlado, entorno aeroportuario o de helipuertos, entornos rurales o urbanos y si se trata de espacios aéreos típicos o atípicos.

A pesar de que el riesgo representado por ARC es conservativo, podría darse el caso de que esa medida conservativa no sea suficiente en determinadas situaciones. Por ello, tanto la autoridad competente como el operador deben cooperar y comprender el volumen operacional y bajo qué circunstancias quedarían invalidadas las categorías mostradas anteriormente.

3.1.5 Paso 5 – Aplicación de mitigaciones estratégicas para determinar el ARC

Una vez se han determinado los valores de ARC, es momento de aplicar las mitigaciones pertinentes para tratar de reducir el riesgo de colisión en el aire. Las mitigaciones pueden ser estratégicas o tácticas.

En el caso de las mitigaciones estratégicas, el objetivo es anticiparse al riesgo de la operación, de forma que se reduzca hasta un valor residual. Se pueden distinguir restricciones operacionales o por estructuración y reglas. Un ejemplo de mitigación estratégica es la generación de un plan de vuelo.

Por otro lado, las mitigaciones tácticas buscan reducir el riesgo durante la operación hasta un nivel razonable. Un ejemplo de mitigación táctica es volar por encima del obstáculo más alto en un radio de 150 metros desde la aeronave.

3.1.6 Paso 6 – Requisitos de rendimiento de las mitigaciones tácticas (TMPR) y niveles de robustez

Las mitigaciones tácticas se aplican con el objetivo de reducir todo lo posible aquellos riesgos residuales que queden tras la aplicación de las mitigaciones estratégicas, con el objetivo de alcanzar el requisito de seguridad del volumen de espacio aéreo en el que se desarrolla la operación. Las mitigaciones tácticas pueden ser de la forma *See and avoid* en operaciones VLOS (Visual Line of Sight) o si requieren un método alternativo para cumplir con el objetivo de seguridad del espacio aéreo, basado en sistemas *detect and avoid*.

3.1.6.1 Operaciones “See and Avoid” VLOS/EVLOS

Una operación realizada bajo condiciones VLOS supone por sí misma una mitigación táctica válida para todos los niveles de ARC. No obstante, es recomendable utilizar medidas adicionales para incrementar el conocimiento de la situación respecto al tráfico aéreo operando dentro del volumen operacional.

Las operaciones VLOS no tienen la necesidad de cumplir con los requisitos TMPR ni de robustez. Las restricciones para las operaciones EVLOS son similares, siempre que se asegure que los tiempos de verificación entre piloto y observadores es inferior a 15 segundos.

Además de lo anterior, el operador debe tener la documentación pertinente para poder resolver cualquier conflicto VLOS. Debe recoger los métodos y criterios que se siguen.

3.1.6.2 Operaciones diferentes a *See and Avoid*

Para aquellas operaciones que difieran del VLOS, es necesario tener en cuenta el nivel de riesgo de la operación. La metodología SORA establece una serie de requisitos para las mitigaciones tácticas, conocidos como TMPR.

Tabla 4 - Asignación de TMPR y nivel de robustez

ARC Final	TMPR	Nivel de robustez de TMPR
ARC-d	Alta	Alta
ARC-c	Media	Media
ARC-b	Baja	Baja
ARC-a	Sin requisitos	Sin requisitos

- ARC-d: la posibilidad de aplicar mitigaciones estratégicas es baja debido a la alta tasa de encuentros con aeronaves tripuladas. Por lo tanto, el riesgo de colisión residual es alto.
- ARC-c: el TMPR para este caso sería medio debido a la posibilidad moderada de encontrarse con una aeronave tripulada y las mitigaciones estratégicas disponibles también son medias.
- ARC-b: baja posibilidad de producirse un encuentro con una aeronave tripulada, por lo que el TMPR es bajo. Esto implica que el riesgo de colisión residual sea también bajo.
- ARC-a: tasa de encuentro con aeronaves tripuladas tan baja que se puede asegurar un nivel de riesgo aceptable sin necesidad de emplear mitigaciones.

3.1.7 Paso 7 – Determinación de SAIL

El parámetro SAIL se utiliza para consolidar el análisis de riesgo tanto en tierra como en aire. Representa el nivel de confianza de que el nivel de riesgo permanecerá bajo control durante la operación de un UAS. A pesar de no tratarse de un parámetro cuantitativo, se corresponde a:

- Determinar los objetivos de seguridad operacional a cumplir.
- Las actividades con las que cumplir dichos objetivos.
- Pruebas de que los objetivos se han cumplido.

Tabla 5 - Determinación de SAIL

Determinación del SAIL				
	ARC Final			
GRC Final	a	b	c	d
1	I	II	IV	VI
2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
>7	Categoría certificada			

3.1.8 Paso 8 – Identificación de los Objetivos de Seguridad Operacional (OSO's)

El último paso de SORA consiste en utilizar el parámetro SAIL para evaluar las defensas ante las posibles amenazas en cada objetivo de seguridad operacional, así como determinar el nivel de robustez asociado a cada uno de ellos. Existen diferentes niveles de robustez del SAIL.

- O: opcional
- L: baja robustez
- M: media robustez
- H: alta robustez

A su vez, los OSO's se pueden clasificar entre los objetivos de seguridad operacional que se han utilizado de manera histórica en las operaciones de UAS. Esta lista está consolidada gracias a la experiencia de expertos, lo que sirve como punto de referencia para establecer los objetivos de seguridad para una operación específica. La autoridad competente podría definir OSO's adicionales para un SAIL y nivel de robustez dados.

3.1.9 Paso 9 – Consideraciones del espacio aéreo adyacente

Este paso tiene como objetivo analizar el riesgo que representa ocasionar una infracción de las áreas adyacentes, ya sea en tierra o el espacio aéreo colindante, como consecuencia de la pérdida de control de la operación.

Uno de los requisitos fundamentales es que ningún fallo del UAS provoque que la operación se salga de los límites del volumen operacional definido.

En el caso de que el ARC sea de nivel ARC-d no hará falta aplicar medidas adicionales. Sin embargo, para un ARC diferente del ARC-d, si el espacio aéreo colindante es ARC-d se aplicarán medidas de alta robustez, pero si no es ARC-d, el nivel de robustez será bajo.

3.1.10 Paso 10 – Informe exhaustivo de seguridad

Por último, se elabora un documento que recoja la información obtenida en los sucesivos pasos descritos anteriormente.

Este documento debe incluir todas las mitigaciones empleadas, ya sean estratégicas o tácticas. También deben aparecer los objetivos establecidos.

En el caso de que todo lo anterior esté correctamente justificado, se obtendrá el permiso para realizar la operación de manera segura.

4. Conclusiones

La metodología SORA se plantea como una alternativa al certificado de tipo para aquellas aeronaves no tripuladas de bajo peso que no cumplen con los requisitos para obtenerlo. Este es el caso de los UAS de la Armada, que se diseñaron sin códigos de aeronavegabilidad.

El proceso a seguir para obtener la prueba equivalente al CT, necesaria para operar un UAS militar, está formado por un gran número de documentos. Entre ellos destaca el Concepto de Operación y Análisis de Riesgos de la Operación que justifiquen la categorización del RPAS, que se podría llegar a justificar a través de la metodología SORA que consta de varios pasos. Sin embargo, no basta con simplemente cumplirlos, sino que las decisiones que se van tomando influyen y alteran el estudio de seguridad. Se deben detallar y justificar las medidas de mitigación para los riesgos que puedan surgir durante la operación hasta poder demostrar que la operación es segura. Sin embargo, el operador no es el único involucrado en el proceso. Debe contar con la aprobación de la autoridad en cada paso.

Es entonces cuando la autoridad competente otorgará el permiso de vuelo al operador para llevar a cabo la operación.

5. Referencias bibliográficas

1. *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU)* 2019/947.
2. *Procedimiento para la certificación de aeronavegabilidad de sistemas aéreos militares pilotados de forma remota (RPAS/UAS)*.
3. *Ley 48 de Navegación Aérea de 1960*.
4. *Reglamento de Aeronavegabilidad de la defensa*.

EL BUQUE MILITAR EN EL RENACIMIENTO DE LA VELA

D. JAIME PÉREZ-MARTÍNEZ
Ingeniero Naval y Oceánico
Royal Institution of Naval Architects / ETSI Navales (UPM)
Dr. RODRIGO PÉREZ-FERNÁNDEZ
Doctor Ingeniero Naval
ETSI Navales (UPM)

Resumen

Las necesidades energéticas de los buques, en particular la propulsión, están siendo sometidas a un creciente escrutinio para alcanzar los objetivos de descarbonización que cimientan las políticas de economía azul. Para ello, se están buscando alternativas que incluyen el diseño de formas, *Energy Saving Devices* (ESD), combustibles alternativos, medidas operativas y sistemas de propulsión. Es en este último en el que las tecnologías de propulsión con asistencia eólica están recibiendo un mayor interés debido a su potencial ahorro de energía, habiendo sido incluidas en las reglas de las diferentes sociedades de clasificación, distanciándose del uso educativo, deportivo y cultural al que había sido relegado durante este último siglo. Este artículo tiene como objetivo introducir las normativas internacionales en el contexto de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de los buques y discutir las dos tecnologías de propulsión por asistencia eólica que se consideran de mayor aplicabilidad para los buques de guerra.

Abstract

The energy requirements of ships, in particular the propulsion, are coming under increasing scrutiny to achieve the decarbonisation targets underpinning blue economy policies. To this end, alternatives are being sought, including hull design, Energy Saving Devices (ESD), alternative fuels, operational measures and propulsion systems. It is in the latter that wind-assisted propulsion technologies are receiving the most interest due to their energy saving potential, having been included in the rules of the different classification societies, shifting away from the educational, recreational and cultural use to which they had been relegated during the last century. This article aims to present the international regulations in the context of reducing greenhouse gas emissions from ships and discuss the two wind-assisted propulsion technologies considered to be most applicable to warships.

1. Introducción

En la ruta hacia la descarbonización, una tecnología que nos trae a los origines de la navegación está tomando fuerza desde la última década. La propulsión a vela, conocida por sus siglas en inglés WASP, que corresponden a *Wind Assisted Ship Propulsion*, vuelve a formar parte de una conversación que parecía extinta desde los últimos buques tipo clíper que cruzaban el atlántico y experimentaron su ocaso durante la segunda mitad del siglo XIX. En este caso su reintroducción no responde a razones de velocidad, si no a su capacidad de reducir el consumo de combustible, y por tanto contribuir a la limitación de las emisiones y la mejora de la eficiencia energética de la flota. El uso de energía para el transporte de materias primas a los lugares de

producción es inevitable, mientras que el transporte de los productos manufacturados es una cuestión que requiere un debate más profundo.

El cuarto estudio de emisión de gases de efecto invernadero de la *Organización Marítima Internacional* (OMI) destacó un incremento del 2,76% a 2,89% de emisiones globales debidas al transporte marítimo entre 2012 y 2018. Y una proyección de crecimiento de 90%-130%, con base en 2008, de las emisiones para 2050 (IMO, 2020). Dentro del marco del ***Acuerdo de París*** de 2015, ese posible crecimiento (figura 1) es insostenible más aún con el compromiso de la IMO a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 50% para 2050 y las emisiones de CO_2 por carga transportada en al menos un 40% para 2030 y un 70% para 2050 en comparación con el nivel de 2008.

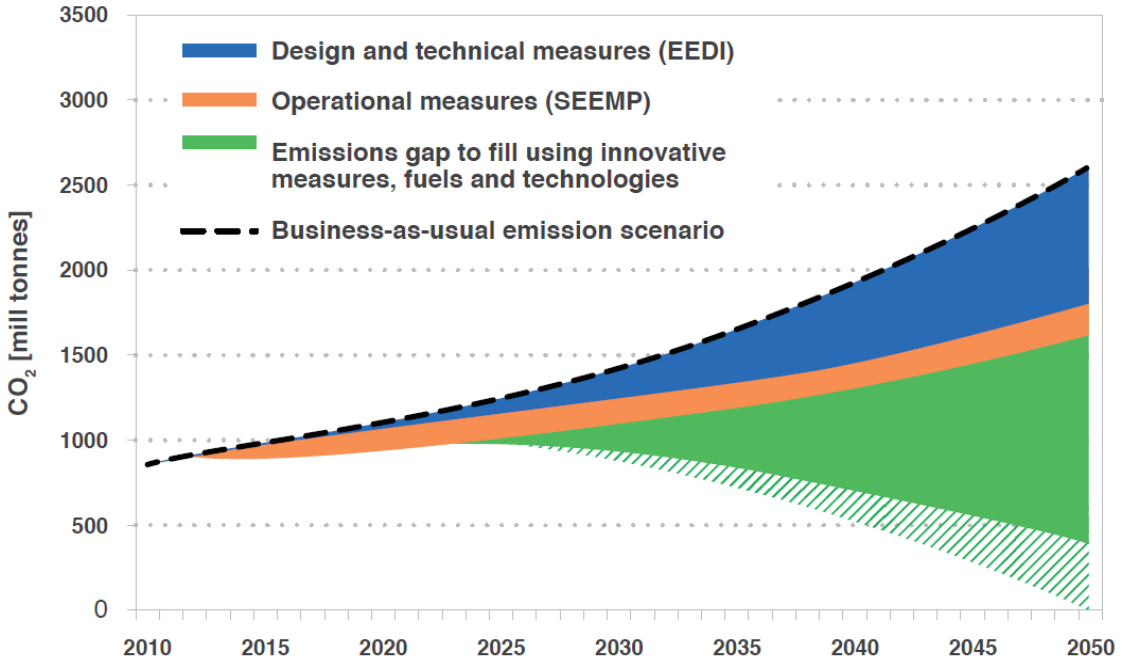

Figura 1. Estrategia de la IMO para reducir la emisión de GEI. Fuente: IMO.org

Es por tanto que la OMI ha puesto un especial interés en el *Anexo VI* perteneciente al *Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques* (MARPOL). Su aplicación a los buques de guerra ha sido tratada en anteriormente en este boletín (Pernas Urrutia, 2021), por lo que no nos detendremos a hacer un análisis exhaustivo. El anexo tiene como objetivo dar una serie de provisiones para la prevención de contaminación atmosférica, aunque su complimiento sea voluntario para los buques de guerra. No obstante, su complimiento tiene una ventaja medioambiental, económica, política y de imagen que no deben ser ignoradas. Los buques militares, en su función de embajadas flotantes, son los representantes de una nación, es decir, de su gente y sus intereses. Y una vez visto el interés generado por la última *Cumbre del Clima* COP26 en noviembre de 2021, la importancia de la percepción de la consciencia medioambiental es aún más trascendente. A las disposiciones de MARPOL habría que añadir las estrategias y normativas nacionales e internacionales de diferentes estados de bandera, que tienen un interés en la protección de su área marítima dentro de las iniciativas de economía azul. Para evaluar la eficiencia de los buques el *Marine Environment Protection Committee* de la OMI introdujo durante su sexagésima segunda sesión (MEPC 62) el *Energy*

Efficiency Design Index (EEDI), de aplicación a buques de nueva construcción, y el *Plan de gestión de la eficiencia energética del buque* (SEEMP) para todos los buques mayores de 400 GT. El citado *Anexo VI* fue nuevamente actualizado en 2021 con el *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI), que afectará a algunos buques ya en operación, y el *Carbon Intensity Indicator* (CII) que entrarán en vigor en 2023. Es necesario matizar que tanto el EEDI como el EEXI son indicadores técnicos o de diseño, por tanto, indiferentes de la operación del buque.

En este contexto, se están desarrollando fuentes de energía alternativas para la propulsión de los buques, que puedan reducir el consumo de energía y las consecuencias medioambientales. Estas son juzgadas desde un enfoque multicriterio al necesitar cumplir con objetivos económicos, sociales y medioambientales o, al menos, alcanzar un equilibrio entre ellos (Ren & Lützen, 2017). En general, en esta búsqueda se podría diferenciar entre combustibles alternativos y energía. Agrupando en la primera *Gas Natural Licuado* (GNL), biodiésel entre otras (figura 2). Y en las energías, la eólica y la nuclear, siendo esta última utilizada casi exclusivamente por portaviones, submarinos y rompehielos.

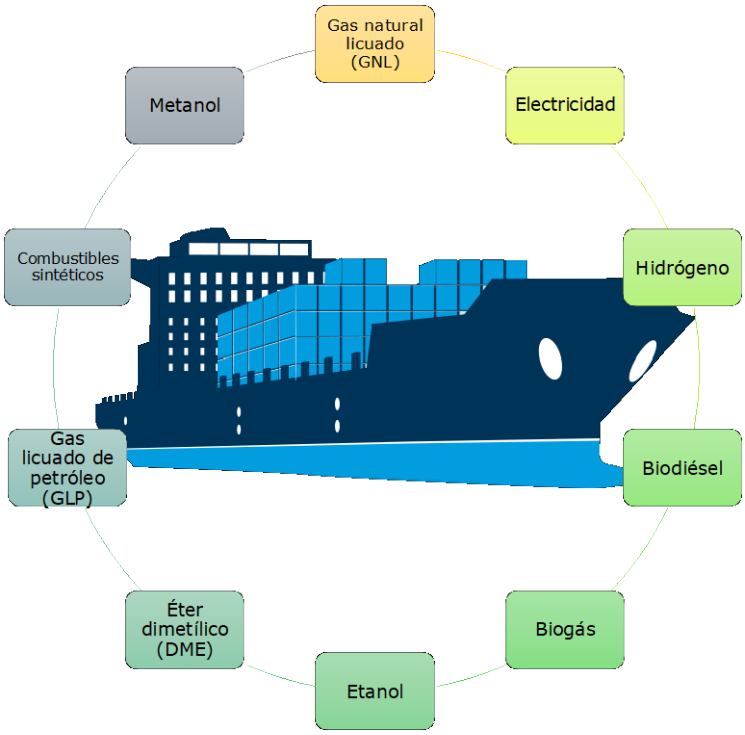

Figura 2. Combustibles alternativos. Elaboración propia.

La propulsión de origen eólico, en particular la vela está aún embebida en la formación de miembros de las diferentes armadas, desde los buques escuela a las regatas. Aun así, debido a los evidentes requisitos propulsivos de las unidades navales, están limitados a una navegación con objetivo educativo o deportivo. En el contexto de la navegación comercial, las sociedades de clasificación como *Lloyd's Register* (LR)[1], *Bureau veritas* (BV)[2], *Det Norske Veritas* (DNV)[3], *American Bureau of Shipping* (ABS)[4] han desarrollado sus propias reglas adelantándose a la regulación de la IMO, que en el año 2022 ha dado pie a la obtención de status

[1] Lloyd's Register (2021) Rules for Sail-Assisted Ships .
[2] Bureau veritas (2021) Wind propulsion systems - NR206 R01.
[3] Det Norske Veritas (2019) Wind assisted propulsion systems - DNVGL-ST-0511
[4] American Bureau of Shipping (2021) Guide for Wind Assisted Propulsion System Installation.

consultivo de la *International Windship Association* (IWSA) una organización que ha recibido apoyo tanto de la industria naval como de instituciones internacionales como la *Royal Institution of Naval Architects* (RINA).

Entre las alternativas se encuentran:

- Rotores Flettner.
- Cometas.
- Velas:
    - Flexibles.
    - Rígidas.
- Alas (Suction Wings).
- Aerogeneradores.

Su uso, actualmente minoritario, es dependiente las interferencias en la operación de los buques, tanto durante la carga y descarga como en las diferentes condiciones de navegación. Destacando el impacto del tipo de barco, velocidad y la ruta que realizan. A pesar de ello, en estos últimos años se está viendo una creciente adopción de estos sistemas debido al potencial ahorro de combustible y, por tanto, de una reducción del impacto medioambiental. Es importante destacar que la denominación WASP ya infiere su empleo como propulsión auxiliar, por lo tanto, en sistemas híbridos. Para este artículo, se ha decidido presentar las dos tecnologías que los autores consideran más apropiadas para su instalación en los buques de guerra, debido a su madurez, eficiencia, tamaño y versatilidad.

2. Rotores Flettner

La tecnología más empleada en la actualidad para la propulsión asistida es la de los rotores Flettner. Estos se basan en el *efecto Magnus* (figura 3), que permite la aparición de una fuerza de sustentación perpendicular a la dirección del viento.

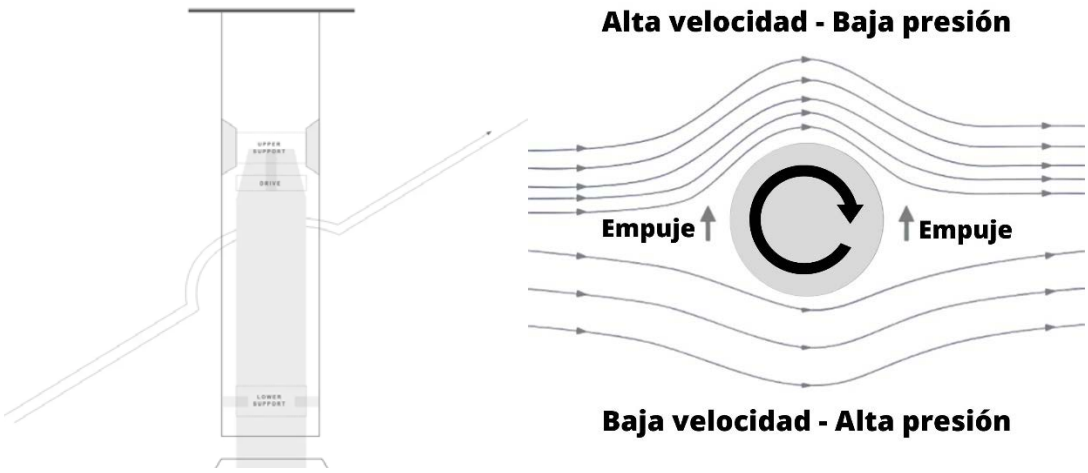

Figura 3. Rotor Flettner Izq y Efecto Magnus Dcha. Fuente Norsepower

En los rotores Flettner la sustentación generalmente aumenta con la relación de giro, mientras que el coeficiente de arrastre es relativamente insensible a este (Carlton, 2019).

Al ser instalado en la cubierta de los buques, se requiere un estudio de interferencias, especialmente si se emplean varias unidades. También, una velocidad nula del viento relativo o de rotación del rotor causarán una sustentación nula.

3. Cometas

Las cometas son también una alternativa interesante debida a su menor tamaño disponiendo de un número limitado de componentes que en su mayoría pueden dividirse en:

- Sistema de vuelo: Incluyendo la cometa, la cometa, el módulo de control y la cuerda de remolque.
- Sistema de sistema de lanzamiento y recuperación: Incluyendo un mástil telescópico y máquina de enrollamiento.
- Sistema de control.

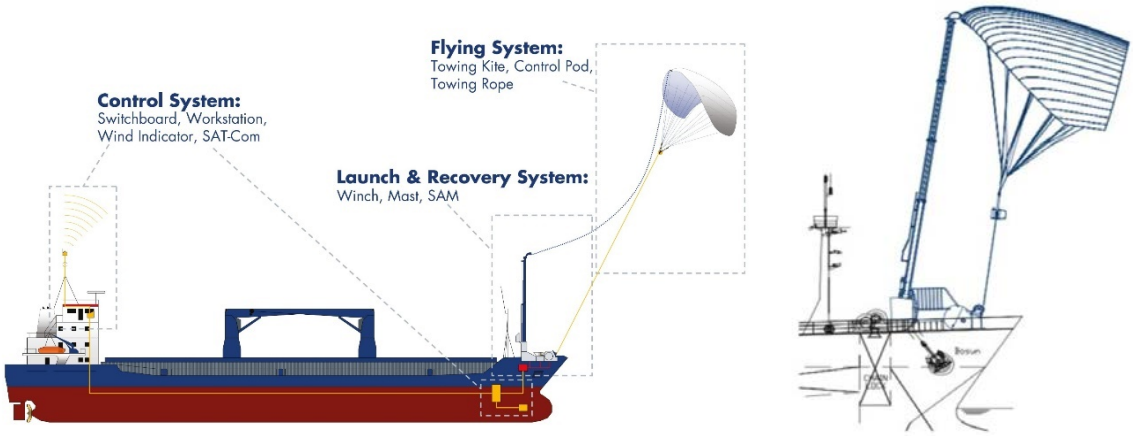

Figura 4. Componentes de cometa y sistema de Fuente: SkySails-marine

Estas, al igual que los rotores Flettner, suelen mostrar rendimientos mayores que otras alternativas eólicas como las velas (figura 4). Aunque su tamaño y, por tanto, empuje, es menor (Bertram, 2012). Aunque el coste de adquisición es bajo para estos sistemas, comparativamente con otras soluciones, el coste de operación es alto por el desgaste que sufren. Aunque pueden beneficiarse de un mayor grado de automatización. También existe el riesgo de pérdida de la unidad si se precipita al agua por falta de sustentación o escaso viento.

4. Propuesta

Para determinar las unidades que potencialmente podrían emplear sistemas de propulsión con asistencia eólica, primero se requiere una división general entre submarinos y buques de superficie, descartando los primeros. Por tanto, el empleo de estos sistemas se considera de aplicabilidad para las siguientes unidades:

- Buques estratégicos y de asalto anfibio
- Fragatas
- Buques Logísticos
- Buques Medidas contra Minas
- Patrulleros y Buques de Cooperación Pesquera

- Buques de Acción Marítima
- Buques Auxiliares
- Buques Oceanográficos e Hidrográficos
- Buques Escuela
- Unidades de Buceo

Para realizar la selección de los sistemas propuestos para este trabajo, se empleará las características analizadas por Frederik C. Gerhardt, en las que se desarrollan los conceptos de madurez, comerciales, tecnológicos y operación.

Tabla 1. Características de rotores Flettner y cometa. Fuente: (Gerhardt & al., 2021)

	Características	Rotores Flettner	Cometa
Madurez	Tecnología probada	*Desde 1920. La más aceptada en el mercado.*	*Algunos ensayos en buques comerciales.*
Comercial	Disponibilidad	*Solución Comercial*	*Solución Comercial*
	CAPEX	*Alto*	*Bajo*
	OPEX	*Bajo*	*Alto*
Técnico	Tiempo de instalación	*Semanas*	*Días/Semanas*
	Área de cubierta	*Cubierta libre*	*Área pequeña a proa*
	Dirección del viento	*Óptimo entre 90° -150°*	*Rango amplio a sotavento*
	Parámetros	*Ajuste de RPM*	*Patrón de vuelo ajustable*
Operativos	Restricciones en la manipulación de la carga	*Abatibles y móviles*	-
	Altura máxima (Guinda)	≈35 m (Abatibles)	*Durante navegación*
	Climatología adversa	*Perfil fino y robustez*	*Recogida*
	Operación	*Reducción visibilidad* *Estabilización giroscópica del balanceo.* *Afecta maniobrabilidad*	*No afecta a la escora* *Evitar zonas con tráfico denso*

La tabla anterior responde a los aspectos comerciales y técnicos, debido a que se aceptan sus méritos bajo los criterios medioambientales (reducción de SO_X, NOX, GEI y PM) y sociales.

Para un análisis de viabilidad de las tecnologías expuestas, ambas requerirán de:

- Estructura: La estructura del buque requerirá un análisis de los nuevos esfuerzos.
- Estabilidad: Efecto en la escora y la estabilidad en general. La fuerza de empuje se genera en un punto elevado de la cubierta.
- Maniobrabilidad: Analizar el momento de guiñada y efectos de los propulsores, timones y otros apéndices.
- Rutas: Vientos y tráfico.

Y en particular los rotores Flettner:

- Área de cubierta: Flujo de viento relativamente ininterrumpido
- Operaciones en cubierta: Interferencia con maquinaria de cubierta.
- Visibilidad: Dependiendo de la localización la visión pude quedar restringida.

El ahorro logrado por la instalación de tecnologías WASP está en la actualidad siendo debatido debido a la notable sensibilidad de los resultados a elementos propios del buque (estructurales, tamaño del buque, espacio de cubierta, apéndices…) como externos a él (rutas, climatología…). Así mismo, factores hidrodinámicos, debido a la resistencia a la deriva, deben ser debidamente analizados al ser instalados en buques con un diseño que responde a las necesidades de propulsión mecánica. El espectro de valores de ahorro potencial es considerablemente amplio, con algunos supuestos que sugieren hasta un 50% en cometas y rotores, y un 60% en velas. Esto es común que aparezca en publicaciones en las que se discuten las áreas de mejora de la eficiencia energética de los buques (Bouman & al., 2017). Aun así, trabajos más recientes sugieren ahorros más moderados que en los rotores van de 10-14% (Tillig & Ringsberg, 2021) a valores más bajos como 4% (Werner & al, 2021) que entran en conflicto con los suministradores que aseguran un 25% en los rotores (caso particular ro-ro SC Connector, dos rotores de 35x5m Norsepower) o un 10-15% en el caso de las cometas (por la experiencia de buques como MS Beluga SkySails). Es por tanto que estos estudios dan valores potenciales poco concretos, que para los dos sistemas analizados pueden ser para un mismo buque de carga general y ruta de 2–24% para un único rotor Flettner y de 1–32% empleando una cometa (Traut & al., 2014). Es por ello, que para el ejemplo utilizado en este trabajo, no se considerará un valor mayor de un 10%.

Para monitorizar la eficiencia energética de los buques, la OMI emplea el *Energy Efficiency Operational Indicator* (EEOI) cuyo cálculo básico se muestra a continuación (IMO, 2009):

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j x C_{Fj}}{m_{cargo} x D}$$

- j: tipo de combustible empleado en la navegación (Uso de tablas)
- FC_{ij}: masa de combustible j consumido
- CFj: factor de conversión de la masa de combustible j en masa de CO2
- m_{cargo}: carga transportada (toneladas) o transporte desarrollado (Número de TEU o pasajeros) o toneladas de registro bruto en buques de pasaje.
- D: distancia recorrida en el viaje en millas náuticas (nm).

Aplicando este cálculo para una fragata de la clase «Álvaro de Bazán»[5]. El combustible empleado será *Distillate Fuel Marine* (DFM) F-76, con un factor[6] de conversión CO_2 de $C_{Fj} = \frac{t-CO_2}{t-Fuel} = 3{,}206$. Empleando datos de navegación de 2014 (Carrasco Pena, 2019), resulta un consumo de 3.247 toneladas de combustible para 33.957 millas navegadas durante 154 días. Considerando una dotación de 202 personas y un desplazamiento de 5.600 toneladas, el EEOI resultante es de 51,15. Este trabajo considera un valor de EEOI de entre 40 a 80, producto de un análisis de 72 viajes.

De estos, el aporte en navegación de la planta propulsora puede estimarse de 85%, siendo el 15% restante para la planta generadora. Dicho esto, podemos indicar que empleando un sistema eólico de asistencia a la

[5] Los datos recogidos responden a la Fragata F-105 "Cristóbal Colón"
[6] MEPC.1/Circ.684 17 August 2009

propulsión del que se obtuviese un 10% de la propulsión requerida se podría obtener una reducción teórica del consumo de combustible y EEOI de un 8,5%.

Evidentemente, estos valores quedan sujetos al perfil operativo del buque, especialmente al reparto entre los consumos en puerto y en navegación. Si consideramos un 45% de tiempo en puerto frente a un 55% de navegación. Para el combustible estimado el trabajo, 3247 toneladas anuales, con una aportación del valor teórico de 8,5% resultaría en una reducción del combustible anual en navegación FC_{Red}= 151,80 ton (4,7%). Con la consecuente reducción de CO_2, otros gases de efecto invernadero y contaminantes.

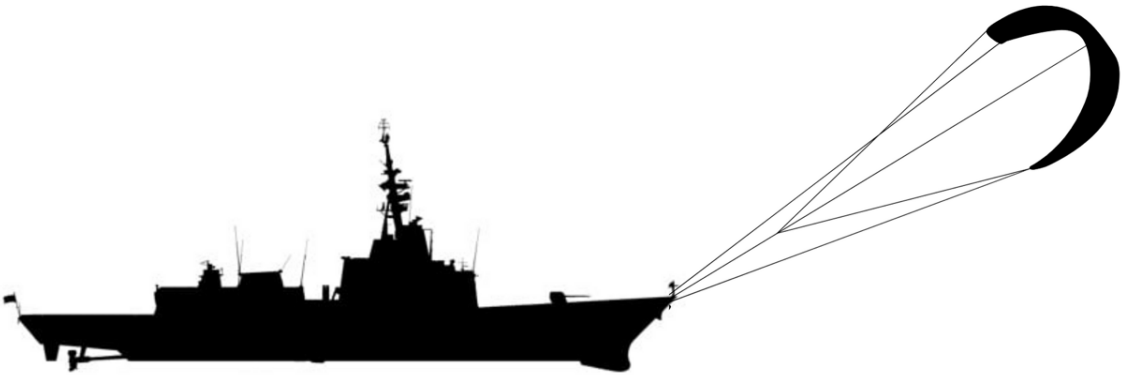

Figura 5. Fragata empleando asistencia por cometa (sin escala). Silueta Fuente: Navantia

Se han mencionado las principales limitaciones de estas dos tecnologías, que en el caso de los buques de guerra destacan a sensibilidad a las rutas y la maniobrabilidad. Debido a las restricciones que existen en algunas unidades de la flota, principalmente el área y operaciones en cubierta, se ha determinado proponer el empleo de los rotores Flettner para las unidades auxiliares, en particular los buques logísticos, y las cometas para unidades multipropósito como las fragatas (figura 5). El empleo de la cometa no es excluyente en otras unidades que podrían beneficiarse de una solución, que a pesar de tener una variabilidad mayor que los rotores, permite el almacenamiento y lanzamiento en un área relativamente menor a otras alternativas. Esta línea de investigación se beneficiará de un análisis de la influencia en la firma del buque, que aunque existirá una reducción de la firma infrarroja estas tecnologías podrán comprometer la firma visual y magnética.

5. Conclusiones

La tecnología WASP no ofrece un ahorro energético significativo a los buques militares debido, entre otras razones, a los largos periodos en puerto de estas unidades y al embrionario estado de la técnica actual. A pesar de ello, los barcos de guerra se encuentran en una posición privilegiada para la experimentación de los sistemas de propulsión por asistencia eólica en situaciones de baja intensidad pudiendo tanto reducir su impacto medioambiental como aportar a la investigación de esta tecnología. A su vez, como embajadas flotantes, subscribirse al compromiso con los objetivos de reducción de contaminación del estado y el conjunto de la nación.

6. Referencias bibliográficas

Bertram, V. (2012). *Practical ship hydrodynamics, second edition.* Amsterdam: Elsevier.

Bouman, E. A., & al., e. (2017). *State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 52, Part A,*, 408-421.

Carlton, J. (2019). *Marine Propellers and Propulsion.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

Carrasco Pena, P. J. (2019). *Análisis y control estadístico de la calidad aplicado a la eficiencia energética de sistemas embarcados en buques de guerra.* Valencia: Universitat Politècnica de València .

Gerhardt, F., & al. (2021). *Horses for Courses: How to Select the "Right" Wind Propulsion System and How to Make the Business Case.* Wind Propulsion Conference (pp. 7-16). London: *The Royal Institution of Naval Architects.*

IMO. (2009). *Guidelines for voluntary use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI).* London: International Maritime Organization.

IMO. (2020). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study. London: International Maritime Organization.*

Pernas Urrutia, J. M. (2021). Aplicación del Anexo VI del Convenio MARPOL al Buque de Guerra. *Boletín Técnico de Ingeniería. Armada Española. Ministerio de Defensa*, 21-31.

Ren, J., & Lützen, M. (2017). *Renewable and Sustainable Energy Reviews Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74*, 1003-1019.

Tillig, F., & Ringsberg, J. W. (2021). *Performance prediction and design of wind-assisted propulsion systems. Wind Propulsion Conference* (pp. 43-47). *London: The Royal Institution of Naval Architects*.

Traut, T., & al. (2014). *Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. Applied Energy, vol. 113* , 362-372.

Werner, S., & al. (2021). *Speed Trial Verification for a Wind Assisted Ship*. *Wind Propulsion Conference* (pp. 61-72). *London: The Royal Institution of Naval Architects*.

BIOGRAFÍA[1]

Antonio de Ulloa y de la Torre-Giral (1716-1795)

Nace en Sevilla en 1716 y muere en la Isla de León, Cádiz en 1795.

Científico, militar y marino español. Realizó sus primeros estudios en Sevilla, en el Colegio Mayor de Santo Tomás. De constitución débil y enfermiza, su padre lo embarcó a los trece años en el galeón San Luis, para que se fortaleciese con el cambio de aires y de vida, navío en el que zarpó de Cádiz rumbo a Cartagena de Indias, y con el cual regresó a Cádiz en septiembre de 1732.

Tras esto, se presentó a examen en la Academia de guardiamarinas de Cádiz, consiguiendo una plaza el 28 de noviembre de 1733, y un destino en el navío Santa Teresa, el cual, junto a otros, debía de escoltar las tropas de infantería que salían de Barcelona en 1734 para auxiliar al Infante de Nápoles don Carlos (Carlos III) que se encontraba en guerra con el imperio austriaco.

La Academia de París quiso zanjar el problema de las dimensiones de la Tierra, y para ello nombró dos comisiones, una que iría a Laponia y otra a Ecuador, con el objetivo de medir un arco de meridiano. La segunda comisión fue autorizada por Felipe V por solicitud del monarca francés, Luis XV. Los oficiales españoles que habían de acompañar a la misión francesa fueron Antonio de Ulloa y Jorge Juan, con 19 y 21 años de edad respectivamente, y que fueron elevados al rango de tenientes de fragata.

Se embarcaron el 28 de mayo de 1735, con la misión añadida de conducir al virrey, marqués de Villagarcía, con quien llegaron a Cartagena de Indias el 9 de julio de 1735. Allí formaron la comisión junto a los científicos franceses Godin, Bouguer y La Condamine, e iniciaron los estudios el 29 de julio. Las experiencias de este viaje se registraron en la Relación histórica del viaje a la América meridional, que contiene mapas, descripciones de países y noticias del virreinato del Perú, y que se tradujo a casi todas las lenguas europeas.

De regreso a España, y habiendo embarcado en un navío francés, fue apresado por los ingleses. Tras una serie de dificultades, al llegar a Inglaterra fue puesto en libertad y se le restituyeron sus papeles. En Inglaterra, Ulloa aprovechó su estancia para completar sus conocimientos y, por medio del ministro de Estado, conde de Harrington, que había sido embajador en Madrid, fue presentado a Martin Folkes, presidente de la Royal Society. Ulloa asistió a las reuniones de la Sociedad y fue propuesto socio de la misma, el 15 de mayo de

[1]*FUENTE: Texto extraído de www.biografiasyvidas.com*

1746. El 29 del mismo mes, el presidente comunicó un largo extracto de las Observaciones de Ulloa en el Perú, y el 11 de diciembre fue elegido miembro.

Poco después volvió a España, y se reunió en Madrid con Jorge Juan. Tras vencer la indiferencia inicial de la corte y conquistar el interés del marqués de la Ensenada, Juan y Ulloa prepararon la publicación de las memorias e informes del viaje. Jorge Juan se encargó de redactar las Observaciones astronómicas y físicas, y Ulloa de la Relación histórica del viaje a la América meridional.

Terminada ya la edición del tomo de las Observaciones y de los cuatro de la Relación histórica, en 1749 el marqués de la Ensenada envió a Ulloa a un largo viaje por Francia, Suiza, Flandes, Holanda, Alemania, Rusia y los países del Báltico, con instrucciones reservadas relativas a la adquisición de todo tipo de informes técnicos y científicos. En París, asistió a las reuniones de la Academia de Ciencias, de la que era correspondiente y estudió la organización y funcionamiento de dicha institución. En Suecia trató a diversos científicos y al rey Adolfo Federico II, y fue nombrado posteriormente miembro de la Academia de ciencias Sueca. En Berlín conoció a Pierre Moreau de Maupertuis, entonces presidente de la Academia de Ciencias.

En 1758 fue nombrado gobernador de Huancavélica (Perú) y superintendente de su célebre mina de mercurio, en la que pretendió aplicar sus conocimientos y experiencias e introducir reformas administrativas, pero sus consejos no fueron escuchados, viéndose, además, obligado a defenderse de acusaciones de abuso de autoridad. Durante este período, realizó una Relación y superintendencia de la Real mina de azogues de la villa de Guancavélica (1758).

Cuando, por el tratado de Fontainebleau, se cedió a España la soberanía de la Luisiana Meridional, Ulloa, por orden de Carlos III, fue designado gobernador de este territorio (1765), puesto en el que luchó con grandes inconvenientes y en el que permaneció poco tiempo. Se le nombró, asimismo, gobernador de Florida occidental en 1766. Diez años después fue nombrado comandante de la flota de Nueva España, cargo que Ulloa desempeñó por última vez. Durante el tornaviaje a la península, que tuvo lugar en 1778, observó en alta mar un eclipse total de sol, que dio lugar a la oportuna publicación.

La guerra de la Independencia de Estados Unidos, a la que España acababa de sumarse, supuso de nuevo su salida a la mar al mando de otra flota. Fue ésta una campaña desgraciada que costó a Ulloa un largo expediente y un consejo de guerra y, a consecuencia de ello, aunque fue declarado inocente, nunca se recuperó del todo su prestigio militar. Volvió a España en 1772, y en esa época preparó para la imprenta las Noticias americanas, que tuvieron gran aceptación en Europa. El resto de su vida transcurrió en Cádiz de modo casi ininterrumpido. En 1779 fue ascendido a teniente general de la Armada, y realizó dos cruceros, uno a Azores y otro al cabo Espartel.

PUBLICACIONES DE DEFENSA

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE DEFENSA
SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL

02222
9 772659 645000