año LXXXVIV ▪ N.° 992

INGENIERIA NAVAL

julio/agosto 2020

Revista del sector Marítimo

sociedades de clasificación • formación

sumario

INGENIERIA NAVAL
año LXXXVIV ▪ N.° 992
julio/agosto 2020

7 editorial / *editorial comment*

8 eventos / events

9 seguimos a tu lado

11 coyuntura del sector naval
shipping and shipbuilding news

"¡Caminante no hay camino, sólo estelas en la mar! ¿Estamos listos para tomar la estela correcta?", por José-Esteban Pérez García

27 observatorio / *observatory*

"¿Estancamiento del mercado de transporte de pasajeros?", por G. Polo y D. Díaz

32 construcción naval / *shipbuilding*

43 sociedades de clasificación
classification societies

47 industria auxiliar / *auxiliary industry*

52 propulsión / *propulsion*

54 formación / *training*

57 medio ambiente / *environment*

60 sector naval militar / *naval sector*

62 artículos de asociados

66 noticias / *news*

75 publicaciones / *publications*

76 nuestras instituciones / *our institutions*

Conoce la Exposición 250 Años de Ingenyo y la nueva web SomosIngenyo

79 Blog de Exponav: de Nereidas a Buques

"Un "MAL" a bordo de los buques: la "MAMPARITIS"", por R. Villa.

84 artículo técnico / *technical article*

""Propulsión a chorro en Proa: Eficiencia y Energía Renovable". Eficiencia Energética en Buques Proyecto de Investigación", por G. García Lage y R. Villa Caro

"Sistema de ciberseguridad gestionada embarcada", por J. M. Cejudo Gausí; S. Vilaseco Romero; A. Fierro Vaz; Mª. Ángeles Acosta del Pino; R. Calderón Álvarez.

105 clasificados / *directory*

DNV-GL

PRÓXIMO NÚMERO / COMMING ISSUE

Marina mercante. Puertos. Náutica. Habilitación. Ferries. Cruceros. Avance 59 Congreso de Ingeniería Naval
Merchant ships. Harbours. Pleasure craft. Accomodation. Ferries. Cruiseships. 59th Naval Architecture Congress Advance

Consejo Técnico Asesor

D. Francisco de Bartolomé Guijosa
D. Manuel Carlier de Lavalle
D. Diego Colón de Carvajal Gorosabel
D. Luis Francisco García de España
D. Víctor González
D. Rafael Gutiérrez Fraile
D. José María de Juan-García Aguado
D. José Antonio Lagares Fernández
D. Nandi Lorensu Jaesuria
D. Agustín Montes Martín
D. Francisco Javier del Moral Hernández
D. Miguel Ángel Palencia Herrero
D. José Esteban Pérez García
D. Gonzalo Pérez Gómez
D. Mariano Pérez Sobrino
D. Gerardo Polo Sánchez
D. José María Sánchez Carrión
D. Jesús Valle Cabezas
D. Fernando Yllescas Ortiz

Noticias

http://www.facebook.com/groups/ingenierosnavales

http://linkd.in/13n4zoS

http://twitter.com/ingnaval

"Servicios integrales de pruebas de mar", organizado por TSI S.L.

Desde Técnicas y Servicios de Ingeniería celebraron su último webinar enmarcado en su Aula Virtual, bajo el título "Servicios Integrales de Pruebas de Mar". Una sesión presentada por D. Publio Beltrán, director general y fundador de TSI S.L. además de experto en la materia. En este webinar se trataron los siguientes contenidos: Evaluación de Confort; Rendimiento de Operación; Integridad de Maquinaría; Monitorización de Buque; Ensayos No - Intrusivos de Detección de Cavitación; y, Medición de Ruido Radiado al agua y al puerto.

https://youtu.be/2uM6W3HDNuc

"La fabricación aditiva (AM - 3D Printing) en el sector naval. Presente y futuro", organizado por el CME

Una nueva e interesante conferencia online que el Clúster Marítimo CME impartida el pasado martes por nuestros socios DNV-GL y NAVANTIA bajo el título: "LA FABRICACIÓN ADITIVA (AM - 3D PRINTING) EN EL SECTOR NAVAL. PRESENTE Y FUTURO":

https://youtu.be/OvEA-are-qA

"Presente y futuro de la construcción naval militar", organizado por Navalia

La dirección de Navalia mantiene su apuesta por la celebración de jornadas virtuales para seguir analizando la recuperación del sector. Tras el éxito de los dos primeros seminarios online en los que se trató la situación actual del sector desde el punto de vista de la industria auxiliar y de los astilleros, en esta ocasión será el turno de la construcción naval militar, un segmento que en las últimas semanas ha propiciado muy buenas noticias y que se postula como un gran motor para la recuperación. Los ponentes de esta jornada fueron: Juan Carlos Díaz, director de Programa de Navantia, S.A., S.M.E; Manuel Antonio Martínez-Ruiz, Vicealmirante director de Construcciones Navales de la Armada Española; y, Javier Arnau. CEO de Navalia Exhibition.

https://youtu.be/SiCqgWv_mUc

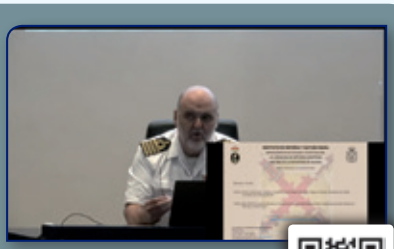
Mesas redonda: "Energías Renovables y la industria de la Bahía de Cádiz. Una mirada al futuro"

El proyecto "NEO CÁDIZ BAY" se ha adaptado a la nueva realidad. Han arrancado la iniciativa "webinar weeks": dos webinars donde expertos del sector expondrán la situación actual, así como una visión crítica y constructiva sobre los retos y conquistas de la industria en la Bahía de Cádiz en el sector energético. Un análisis de la situación mundial y de cómo afecta el mercado energético local es fundamental para trazar los planes de actuación en conjunto.

https://youtu.be/yCAMM7gMUps
https://youtu.be/ZY0jOEsNO3U

LXI Jornadas de Historia Marítima: "Historia de la Infantería de Marina", organizada por el DEI

El Departamento de Estudios e Investigación (DEI), perteneciente al Instituto de Historia y Cultura Naval (IHCN), ha celebrado varias conferencias en las que se abordaron asuntos tales como los valores tradiciones del Cuerpo de la IM, las acciones desempeñadas por Miguel de Cervantes en las galeras de España, los tercios del mar en los siglos XVI y XVII, el Cuerpo de Batallones de Marina en el siglo XVIII para concluir con la Infantería de Marina a partir del siglo XIX hasta llegar a nuestros días.



https://youtu.be/kd929e6xSYQ

staff

año LXXXVIV • N.º 992
INGENIERIA NAVAL
julio/agosto 2020

Revista editada por la Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España. Fundada en 1929 por Aureo Fernández Ávila, I.N.

Presidente de AINE y de la Comisión de la Revista
José de Lara Rey, Dr. I.N.

Vocales de la Comisión de la Revista
Raúl Villa Caro, Dr. I.N.
Jorge Pla Peralonso, I.N.

Asesor
Francisco Archanco Fernández, I.N.

Redacción
Verónica Abad Soto, I.N. (Redactora Jefe)

Publicidad
Dirección Comercial Baupress, S.L.
Rafael Crespo Fortún
Tels.: 915 102 059 / 609 117 340
Fax: 915 102 279

Administración
Noemí Cezón López

Dirección
Castelló, 66 - 28001 Madrid
Tels.: 915 751 024 / 915 771 678
e-mail: revista@sectormaritimo.es
www.sectormaritimo.es

Diseño y maquetación
DiseñoPar Publicidad S.L.U.
Tel.: 912 235 650 / 616 948 610
www.parpubli.com

Impresión
Imedisa Material de Oficina, S.L.
Tel: 914861606

Suscripción Anual / *Subscription Fee (2020)*:

Electrónica general	70,00 €
Electrónica estudiantes	35,00 €
Papel + electrónica (sólo España)	90,00 €

Notas:

No se devuelven los originales. La Revista de Ingeniería Naval es una publicación plural, por lo que no necesariamente comparte las opiniones vertidas por sus colaboradores en los artículos, trabajos, cartas y colaboraciones publicados, ni se identifica con ellos, y sin que esta Revista, por su publicación, se haga en ningún caso responsable de aquellas opiniones. Los firmantes de los artículos, trabajos, cartas y colaboraciones publicados son autores independientes y los únicos responsables de sus contenidos. Se permite la reproducción de nuestros artículos indicando su procedencia, pero no la distribución de la revista por ningún tipo de medio (electrónico y/o físico).

Publicación mensual
ISSN: 0020-1073
Depósito Legal: M 51 - 1958

"Propulsión a chorro en Proa: Eficiencia y Energía Renovable". Eficiencia Energética en Buques

Proyecto de Investigación

Gerardo García Lage[1] y Raúl Villa Caro[2]
[1] Arquitecto Naval (I.T. Naval), MSc (Energía). Traxanko Ingeniería Naval.
[2] Dr. Ingeniero Naval. Universidad de la Coruña.

Trabajo presentado en el 58º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, celebrado en San Fernando del 24 al 25 de octubre de 2019.

Índice

Resumen / *Abstract*

1. Introducción
2. Objetivo
3. Hipótesis planteadas
4. Método de diseño
5. Maniobra y eficiencia
6. Conclusiones
7. Bibliografía

Resumen

En la búsqueda de incrementar la Eficiencia en buques, se presenta un sistema en Proa mediante propulsores a chorro (Waterjet) que mejoran la maniobrabilidad y generan electricidad limpia. Abordar estas ventajas implica el análisis de diferentes hipótesis, por su interés técnico y teórico, al reducir costes, tiempos y distancias en las curvas de evolución, en las maniobras de atraque-desatraque o minimizar riesgos de colisión contra estructuras marinas, portuarias u otros buques.

El estudio parte de dos perspectivas clave para incrementar la eficiencia;

- La función principal, donde los nuevos propulsores a chorro en la proa desarrollan su función tradicional, auxiliando al buque, y
- Una función secundaria, reutilizándose el propulsor a chorro instalado en la proa como un sistema de recuperación de energía cinética. Es decir, como un generador, aportando electricidad limpia distribuyendose a diferentes sistemas del buque.

En este diseño disruptivo, la Inercia del Buque generada por los grandes desplazamientos sumada a la presencia de viento facilita generar electricidad limpia, incluso a altas velocidades, sosteniendo la potencia eólica las pérdidas por Resistencia al Avance. Se pretende con este trabajo proporcionar una alternativa diferenciadora en la Industria Naval capaz de generar empleo de alto valor añadido y multitud de sinergias.

Abstract

In the search to increase Efficiency in ships, a bow system is presented by means of jet propulsion that improve maneuverability and generate clean electricity. Addressing these advantages involves the analysis of different hypotheses - for its technical and theoretical interest- by reducing costs, times and distances in the evolution curves, in docking-undocking maneuvers or minimizing collision risks against marine structures, ports or other vessels.

The study starts from two key perspectives to increase efficiency:

- *The main function, where the new jet thrusters in the bow develop their traditional function, helping the ship, and*
- *A secondary function, reusing the jet propulsion installed in the bow as a system of kinetic energy recovery. That is, as a generator, providing clean electricity distributed to different ship systems.*

In this disruptive design, the Inertia of the ship generated by the great displacements added to the presence of wind facilitates the generation of clean electricity -even at high speeds- thus the losses produced by the Resistance to the Advance are sustained by the wind energy. The aim of this work is to provide a differentiating alternative in the Naval Industry capable of generating high added value employment and a multitude of synergies.

1. Introducción

Actualmente, en el mundo globalizado, independientemente el sector a tratar se está produciendo un cambio de paradigma en diferentes áreas de la industria, comercio o sociedad. Esta nueva visión de la realidad está enfocada, sobre todo, en el incremento de la Eficiencia Energética en todos los procesos u operaciones diarias desarrolladas en torno a la actividad humana. El buen uso y aprovechamiento de la energía se convierte en uno de los pilares para alcanzar cotas más altas de eficiencia.

Por todo ello, conceptos como "Smartcity", "Smartport" o "Smartship" están cada vez más presentes en las agendas políticas del panorama internacional con el objeto de legislar favoreciendo su impulso. Estos conceptos, comunes entre sí, precisan de un despliegue tecnológico alto al interactuar sobre los procesos conectados a la misma red de comunicación o energía.

En este sentido, la incorporación de Tecnologías de la Información y Control (TIC) serán imprescindibles para una buena gestión de los datos facilitando, así, la toma de decisiones de la organización donde aplica. Se establece, por tanto, un nuevo paradigma focalizando desde una visión global, o única, al integrar todas las variables posibles en la configuración de una nueva ciudad, puerto o buque con capacidad de interactuar entre ellos. Hoy en día, las redes de distribución de energía se orientan a la descentralización de la red general eléctrica buscando mayor autosuficiencia energética en el consumidor final al generar su propia energía de origen renovable, esto conlleva dos escenarios beneficiosos:

A. Abarata la factura energética.
B. Reduce la carga en la red general.

Figura 1. Imagen didáctica sobre el concepto Smart al implementar un sistema de la información TIC donde la información es volcada a una Nube (cloud) común disponible para los operadores integrados en el sistema. Puede observarse a modo orientativo los sistemas están conectados entre sí y serán dirigidos desde un Centro de Control encargado de la gestión de datos. Fuente: Google Images.

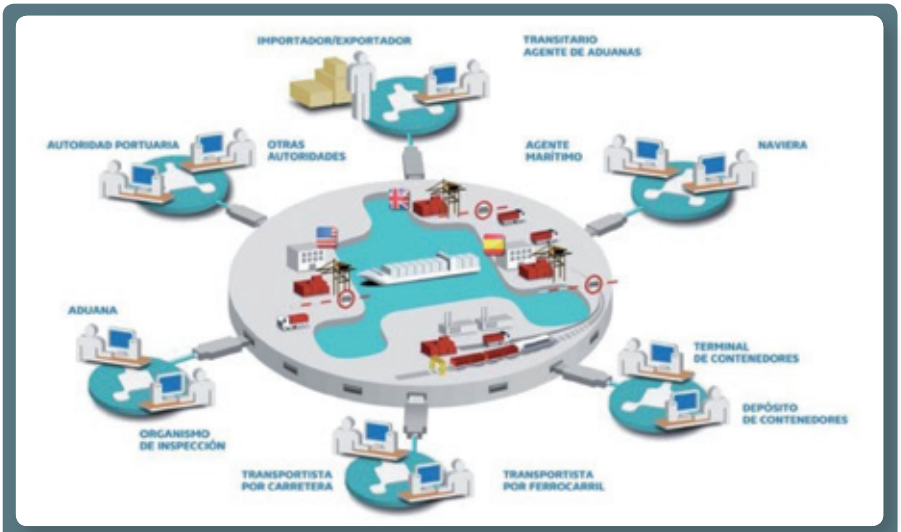


Figura 2. Plataforma digital "Port Community System" desarrollado por la empresa Belike específicamente para el Puerto de Valencia con la finalidad de mejorar los procesos y aumentar competitividad en la gestión de los tráficos marítimos y stock de mercancías. Modelo de gestión a través de las nuevas tecnologías de la información mejorando la conectividad entre todos los agentes implicados en un servicio de transporte "puerta a puerta" permitiendo a todos los operadores contar con información real en todo momento, e interactuar en el mismo instante, mejorando la velocidad de los tránsitos. Plan maestro diseñado para implementar en el Puerto de Valencia en la búsqueda de aumentar la competitividad y reducir costes. Fuente: https://www.valenciaport.com/

Una de las claves para una buena distribución de esta energía renovable y gestión de datos se basa en la incorporación de las mencionadas tecnologías TIC al facilitar la monitorización, análisis y gestión de los datos volcados a una nube común a todos los operadores de esa microrred, véase **Figura 1**, con el fin de agilizar los tráficos de mercancías, planificar mantenimientos o resolver incidencias en tiempo real.

Según lo explicado, los Puertos internacionales están transitando hacia el concepto Smartport y "Puerto Verde" produciéndose una transformación en el sector. Todas estas nuevas realidades nacen de diferentes acuerdos, pactos y legislaciones desarrolladas específicamente por diferentes organismos y países con el objeto de reducir las emisiones de CO_2 y bajar la presión, en definitiva, ejercida sobre el planeta.

Esta digitalización de los procesos repercute en el conjunto de la organización por sinergias, fortaleciendo todas las áreas implicadas. La relación ciudad-puerto se incrementa al interactuar entre ambos de una manera más estrecha redirigiendo todo tipo de recursos dentro de la red de distribución común evitando gastos o costes innecesarios en las distintas operaciones diarias.

A mayor abundamiento, en el Puerto de Valencia se desarrolló un Plan Director Tecnológico encaminado a facilitar la integración de las nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar su arquitectura de la red de información y energía en la búsqueda de aumentar la eficiencia en su red de transporte marítimo y por carretera. Esto repercute en el conjunto de la organización al disminuir tiempo en los procesos o costes de consumo en las activi-

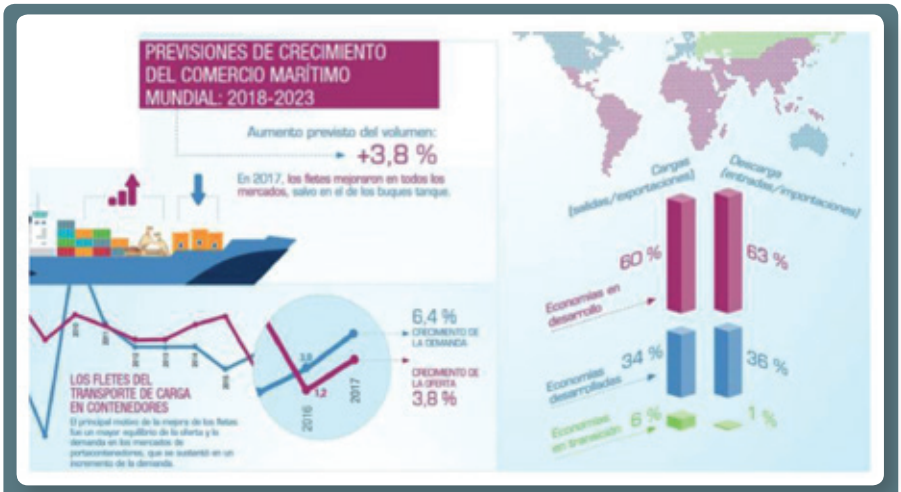


Figura 3. Previsión de incremento en el transporte marítimo y su incidencia sobre los países en desarrollo. Fuente: UNCTAD. https://unctad.org/es/PublicationsLibrary/rmt2018_es.pdf

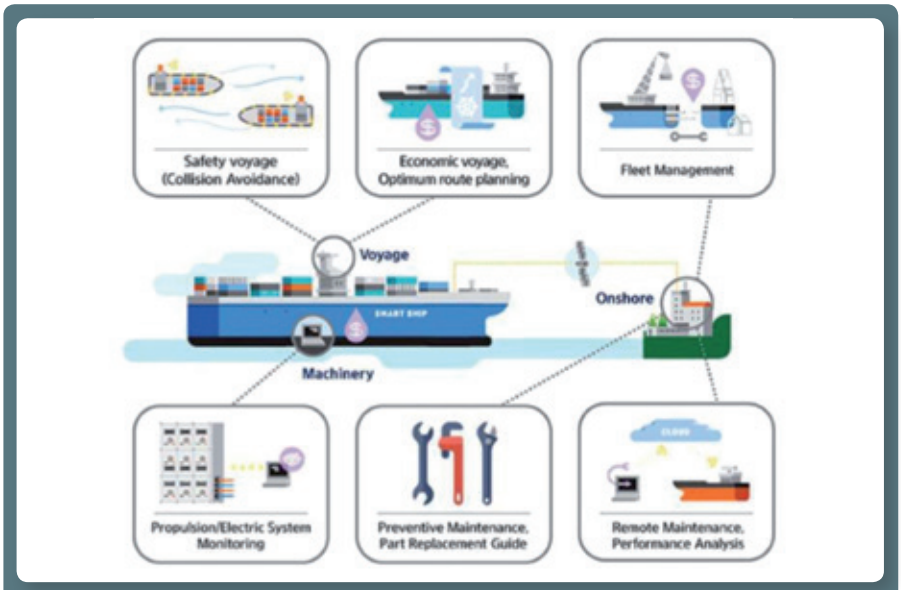


Figura 4. Sistema de gestión aplicado a los nuevos buques y basado en las nuevas tecnologías de la información. Esto incrementa la conectividad y autonomía de los buques mejorando su eficiencia, también facilita una perfecta coordinación con la Autoridad Portuaria al advertir con mucho tiempo de antelación los servicios específicos que precisa tras la navegación. Sistema denominado Integrated Smart Ship Solution (ISSS) y desarrollado por la empresa Hyundai Heavy Industries (HHI). Fuente: Lloyd´s Register
Enlace: https://www.lr.org/en/latest-news/hyundai-heav-industries-announces-integrated-smart-ship-solution/

dades del puerto en la gestión de mercancías, esto tiene una vital importancia en los nuevos escenarios de transporte intermodal que se avecinan en el futuro inmediato. En la **Figura 2**, se indica en qué consiste la plataforma digital implementada en el Puerto de Valencia.

Esta transformación tecnológica y energética está recogida en diferentes planes, acuerdos o legislación con el fin de ser implementados lo antes posible. Todas estas iniciativas, y acuerdos, buscan un descenso de porcentajes significativos de CO_2 -entorno al 20-30%- en las instalaciones portuarias y recogidas en el Documento EU COM (2013) Final la "*Integración de las emisiones procedentes del transporte marítimo en las políticas de reducción de gases de efecto invernadero de la UE*", estando asociadas a los planes europeos contra el cambio climático recogidos en sus directivas de Transición Energética (Directiva 2010/31/UE y Directiva 2012/27/UE), entre otras resoluciones.

Según la UNTACD (*Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo*) en su último informe[1] los puertos deben replantear su papel en la logística marítima mundial acometiendo una transición tecnológica y digital, tras reconocer el propio sector marítimo el incremento de la eficiencia de los puertos es crucial, para una buena planificación y el liderazgo portuario bajo los parámetros establecidos a nivel mundial con el Desarrollo Sostenible. Este organismo de vigilancia también prevé un crecimiento sostenido para los próximos años entorno al 4% en el comercio marítimo internacional como indica la **Figura 3**.

La Unión Europea contempla en sus planes de desarrollo sostenible incrementar el uso del transporte por ferrocarril estableciendo un sistema con nodos logísticos de mercancías, relegando, poco a poco, al tráfico por carretera a un segundo plano allí donde sea posible. Ante el aumento del tráfico de contenedores y una mayor especialización de los puertos junto a la aparición de un nuevo concepto de "Smart Ship" o Buques inteligentes, más eficientes y autónomos, la UNCTAD aconseja a los operadores portuarios se anticipen a los cambios para atender la creciente demanda ofreciendo una gama alternativa de servicios aún por explotar, o poco consolidados, posibilitando el aumento del *Hinterland* portuario.

A medida que pasa el tiempo y mejora la tecnología los grandes buques pasan menos tiempo en puerto pues se reducen las operaciones gracias a los procesos automatizados y los sistemas (TIC), ya mencionados, del "internet de las cosas" que facilitan mucho las tareas al proporcionar una información real permitiendo interactuar de inmediato dando solución a los posibles imprevistos.

Según lo explicado, la relación ciudad-puerto se ve incrementada, de igual modo la relación "puerto-buque" adopta otra dimensión en su manera de interactuar anticipando con mucho tiempo la entrega de información. Hoy en día, la Industria Naval, está desarrollando toda una nueva gama de procedimientos con el fin de reducir consumos y emisiones, esto se debe, en gran medida, al Índice IMO de Eficiencia Energética de los Diseños (EEDI) y el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética de los Barcos (SEEMP) que establece una serie de regulaciones en referencia a la eficiencia en las nuevas construcciones.

Por ello, todos estos esfuerzos facilitarán una dinamización sectorial en los puertos con el objetivo de resultar atractivo al nuevo modelo de buques inteligentes (Smartship) -con alta autonomía- que demandarán determinados servicios (véase **Figura 4**) hasta ahora no explorados por las Autoridades Portuarias. En 2019, y en línea con esta introducción, la OMI (*Organización Marítima Internacional*) introduce el concepto para un nuevo sistema de buques designado bajo el nombre ***e-Navigation*** con el objetivo de incrementar la seguridad de la navegación en los buques comerciales a través de una mejor organización con tecnologías TIC y mejorar la gestión de todo tipo de datos generados en las operaciones de los buques.

Llegados a este punto de la introducción, cabe mencionar, en los puertos del futuro el operador del buque, diferentes navieras, etc. están impulsando esta transformación con la implementación en sus buques de multitud de sistemas basados en aplicaciones digitales, energías renovables o sistemas de almacenamiento de energía con la intención de cumplir

con los objetivos fijados en los acuerdos internacionales (*Libro Blanco, Cumbre de Malta, Acuerdo de París, etc.*). En este sentido, la Comisión Europea, sitúa al Transporte Marítimo en uno de los pilares fundamentales de sus políticas e insta, a los Estados miembros, a seguir el plan marco Blue-Growth con el fin de reducir la contaminación en los océanos y los gases de combustión del transporte marítimo.

El Programa Marco -Our Ocean- emitido por la Unión Europea está siendo implementado por diferentes organismos y Autoridades Portuarias con la intención de adecuar sus instalaciones a las medidas establecidas para una gestión sostenible de los recursos y espacios, en paralelo, a la reducción de emisiones CO_2, NOx y SOX, entre ellos, puede destacarse, el *Puerto de Vigo* o la *Cámara de Navegación Internacional* al declarar su compromiso[2] formal de implementar medidas correctivas reduciendo en más de un 20% sus emisiones contaminantes, entre otras medidas en la misma línea de incrementar la eficiencia.

Por tanto, y a la vista de lo expuesto, diferentes Administraciones y entidades privadas se están viendo obligadas a una reestructuración rápida, a corto plazo, con la intención de no perder competitividad pudiéndose ver comprometida al no disponer de las herramientas necesarias, exigidas en el futuro inmediato, por conllevar el riesgo de aumentar el número de procesos diarios. Esto tiene su importancia a la hora de perder tráficos por no disponer de servicios de operación, por ejemplo, el sistema OPS -Onshore Power Supply- (véase **Figura 5**), sistemas de mantenimiento o avituallamiento adecuados, que serán clave y ya están siendo demandados por diferentes navieras al dotar a sus buques con tecnología de última generación en almacenamiento de energía, gestión eficaz de desperdicios o control remoto, entre otros. Exigiendo, además, una alta capacitación en el personal portuario pues deberá enfrentarse a operaciones, o trabajos, en muchas ocasiones aún no explorados en la industria.

En la **Figura 6** siguiente, se indica un prototipo basado en una nueva generación de buques por control remoto donde la tecnología digital de la información y la gestión de la energía a bordo serán clave para su desarrollo. Es por ello, la Industria Naval y las Autoridades Portuarias, junto a operadores privados, deben planificar códigos, pautas e integrar softwares con la capacidad de comunicarse entre ellos, mediante protocolos internacionales de comunicación SCADA, ICCP, CIM, OCPP, etc. regulados por la IEC TC 57 (*International Electro Technical Committee*).

Es preciso entonces, reorientar los diseños navales en la búsqueda de nuevas eficiencias no exploradas todavía por no disponer de la tecnología, o no contempladas en toda su dimensión. Ante esto, diferentes Ingenieros y Arquitectos navales están diseñando buques innovadores integrando sistemas que permitan mayor autonomía o generar su propia energía a partir de fuentes renovables.

En esta transición, y entrando en el fondo de este artículo, la nueva generación de buques irá dotado con sistemas altamente eficientes en el aprovechamiento de la energía, acondicionando espacios para equipos de distribución de energía y sistemas de almacenamiento acoplados. La empresa Rolls Royce, por ejemplo, presenta una serie de esquemas eléctricos y configuraciones dotando a los buques con baterías junto a un sistema de propulsión híbrido Diésel-Eléctrico (véase **Figura 7**), que reduce significativamente los excesos de potencia reduciendo los consumos.

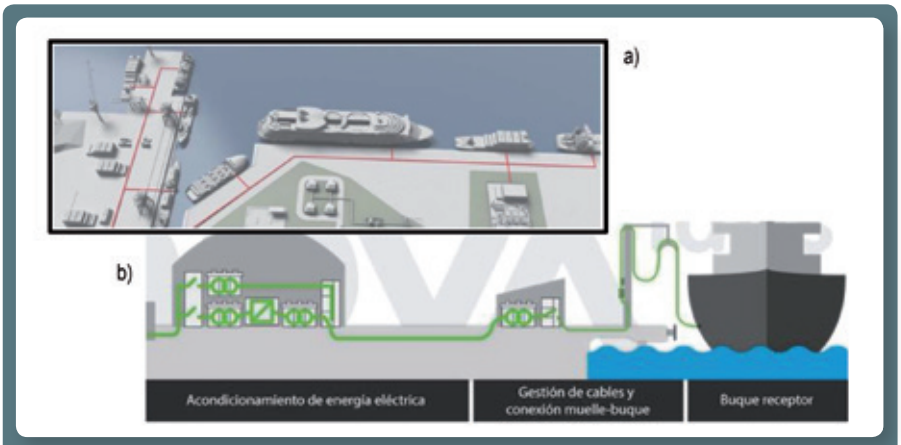


Figura 5. En la figura superior a) puede observarse diferentes tipos de buques conectados a una red de distribución eléctrica en una solución presentada por ABB. En la figura inferior b) se indica en qué consiste el sistema OPS donde el buque atracado a muelle se conecta al suministro eléctrico del puerto pudiendo apagar máquinas mientras esté en las instalaciones evitando la emisión de gases de los motores. Fuente: ABB y Google Images

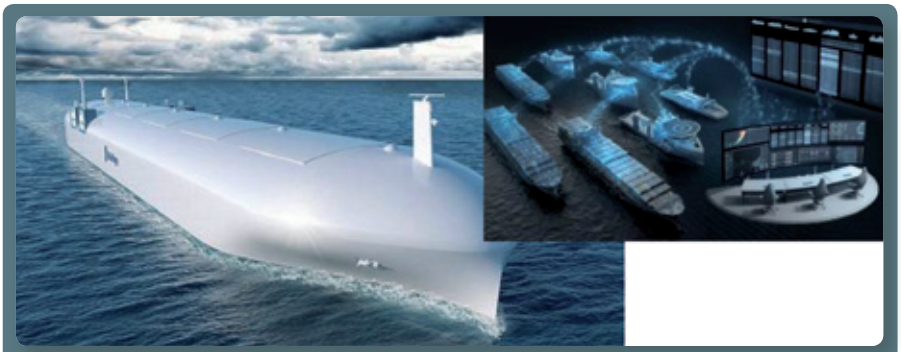


Figura 6. Prototipo de un buque "Smart" de mercancías autónomo dirigido a control remoto desde una Estación de Operaciones en tierra. Se indica también una ilustración con el volcado de datos de esta nueva generación de buques a una nube, siendo supervisada por la Autoridad Portuaria y gestionada, entre otros, por diferentes operadores privados implicados en el trasiego de la mercancía. Fuente: Rolls Royce. Enlace: https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/naval.aspxFuente: ABB y Google Images

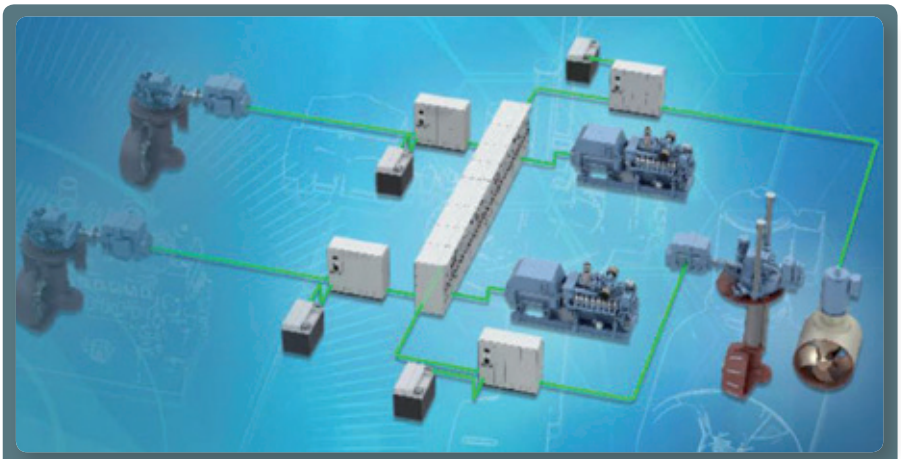


Figura 7. Esquema sistema propulsivo híbrido diésel-eléctrico propuesto por Rolls Royce con capacidad de almacenar energía al integrar un sistema de baterías de la familia Li-Ion. Este sistema permite ahorrar consumos de hasta un 30%. Fuente: Rolls Royce

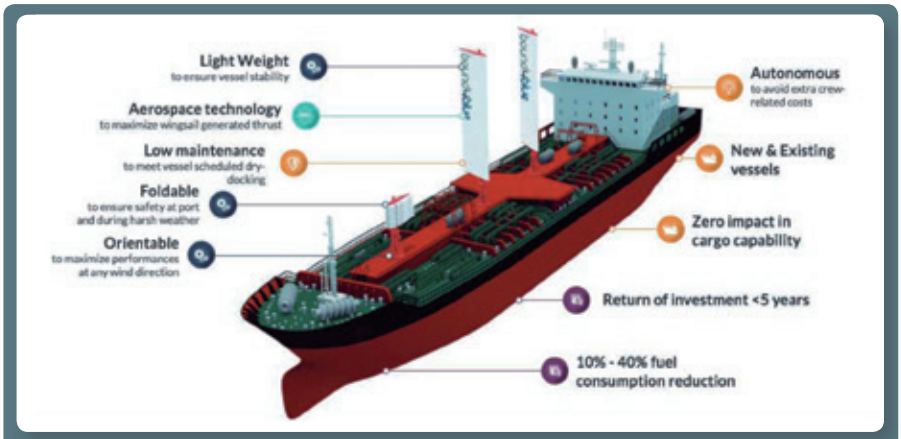


Figura 8. Buque propuesto por la empresa Bound4blue dotado con dos velas rígidas, un sistema de turbinas en la quilla y sistema de almacenamiento de gases capaz de reducir el consumo hasta un 40% según ensayos. Fuente: Bound4Blue Enlace: https://bound4blue.com/es/

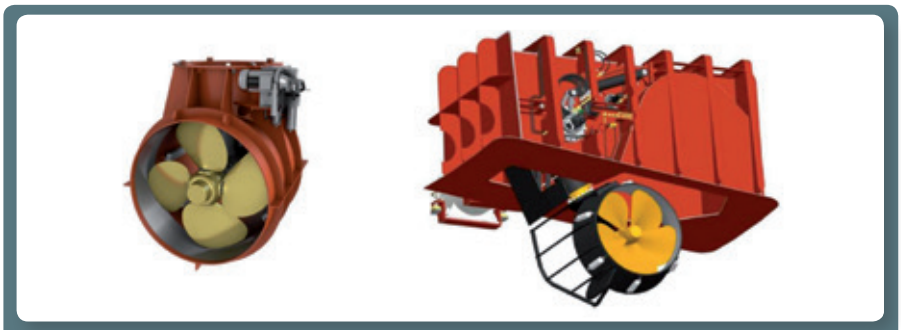


Figura 9. Dos tipos de propulsor auxiliar en proa. En la figura de la izquierda se encuentra un propulsor en túnel cuya instalación es fija en el bulbo de proa. En la derecha puede observarse un propulsor en proceso de situarse verticalmente tras desplegarse hidráulicamente de su ubicación en el interior de un recinto acondicionado para él. Fuente: Google Images.

Otras alternativas disruptivas se están imponiendo en una industria tan conservadora como la Naval pero que debe mantenerse abierta y flexible a los nuevos cambios. Multitud de sinergias entre diferentes disciplinas, procedimientos o sistemas están surgiendo gracias el desarrollo de la tecnología que impedía hasta ahora ciertas configuraciones por su excesivo tamaño, complejidad o coste.

Llegados a este punto, es necesario comprender, una multitud de opciones se abren ante la industria Naval con el objeto de reconfigurar los procedimientos de navegación, carga y descarga o maniobras del buque. Por ello, y a la vista de todo lo indicado, se expondrá en los siguientes apartados de este trabajo un nuevo sistema capaz de operar en sinergia con multitud de sistemas en el buque. A partir de la información disponible, y tras una serie de análisis, se considera preciso iniciar un trabajo de investigación riguroso basado en el incremento de la Eficiencia del buque en diferentes maniobras a partir del estudio de los propulsores auxiliares de proa.

Profundizando un poco más, con el fin de justificar este novedoso sistema, se aportarán una serie de indicaciones, recomendaciones y alternativas con la finalidad de sustituir los Bow Thrusters (hélice de maniobra) actuales en diferentes buques, siendo idóneos para ello, por un sistema de Propulsión a chorro -*Waterjet*- en la proa del buque. Mejorando así la maniobrabilidad del buque en las operaciones portuarias, o incluso en navegación, al reducir las curvas de evolución, evitar accidentes o colisiones. Todo ello sumado a un sistema de generación eléctrica que entrará en funcionamiento en maniobras programadas tras un estudio riguroso de la incidencia del nuevo sistema en navegación.

Estos sistemas *Waterjet*, con alto rendimiento a altas velocidades, también ofrecen altísimas prestaciones de empuje a bajas velocidades, o con el buque parado, proporcionando una serie de ventajas de operación muy beneficiosas en comparación con las hélices de maniobras actuales de proa, muy limitadas por esfuerzos estructurales, velocidad del buque o calado. Es importante indicar, el coste de la instalación, en determinados buques de gran eslora, se ve reducido considerablemente al sustituir dos hélices actuales, una con orientación babor y otra orientación estribor, por una sola unidad de Waterjet convenientemente dimensionado para ejercer el empuje suficiente demandado por el buque.

2. Objetivo

En este trabajo se pretende mejorar la eficiencia del buque al sustituir los actuales propulsores de proa por un sistema de propulsión a chorro. Con la peculiaridad de trabajar en dos condiciones:

- Auxiliando al buque en maniobras de todo tipo factibles para su activación.
- Produciendo electricidad en determinados momentos favorables de navegación.

El objetivo principal se enmarca en el incremento de la Eficiencia del buque al mejorar su maniobrabilidad y repercutir directamente en otros sistemas implicados en la navegación con una reducción de consumo asociada. La principal ventaja, a destacar, sobre los sistemas actuales es su función de apoyo al timón principal en popa evitando, así, un excesivo deterioro de éste por vibraciones excesivas o sobrepresión tras esfuerzos. Y esto tendrá su importancia en los mantenimientos futuros.

Se hará una propuesta integrando una doble configuración, atractiva desde un punto de vista económico, y que permitirá incrementar de manera notable la funcionabilidad del buque al generar electricidad en condiciones favorables para el diseño propuesto. Atendiendo a los sistemas de vela rígida planteado en la introducción se hace necesaria su inclusión en esta investigación por su capacidad de multiplicar los beneficios de la nueva propulsión propuesta para proa.

En la **Figura 9**, aparecen indicados sistemas auxiliares de propulsión en proa instalados actualmente en multitud de buques.

Esta funcionalidad captador-propulsor no está presente en ningún equipo en proa actual desperdiciándose multitud de energía en la navegación, sobre todo, por inercia y viento favorable de popa. Los actuales propulsores auxiliares de proa, como se comentó, tienen diferentes restricciones siendo una de las más importantes la velocidad de trabajo, no pudiendo superar en muchas ocasiones los 5 nudos por ser ineficaces. Esto limita considerablemente la capacidad de maniobra del buque.

En muchas ocasiones, estos propulsores auxiliares, no están fijos en la proa, sino que se encuentran escondidos en la estructura y son desplegados según necesidad, aunque también presentan diferentes problemas, entre otros, relativos al calado quedando limitada su operación a la profundidad de trabajo óptima. Por todo ello, es conveniente presentar alternativas que pueden ser muy beneficiosas para la industria si se desarrollan de una manera profesional con todas las garantías para alcanzar los más altos estándares en su diseño e integración en el buque.

Para una mayor comprensión del concepto planteado se indica, en la **Figura 10**, su dispo-

sición en el buque al ser relevante para apartados siguientes.

Presentado este actual sistema que será sometido a estudio, y que servirá de referencia para iniciar la hipótesis, en la **Figura 11**, se indica la función a desempeñar en el buque.

Sirviendo estas capacidades actuales del propulsor auxiliar, como referencia, es preciso explicar en qué consiste el Waterjet brevemente y cómo está instalado en el buque actualmente.

En la **Figura 12** se muestra un ejemplo del sistema donde una entrada en el fondo del barco aspira agua del mar dirigiéndola por un conducto hasta una hélice situada en una sección de la tubería más estrecha con el objetivo de impulsar el agua a presión en forma de chorro.

Es interesante mencionar, este sistema, es adaptable a equipos propuestos en trabajos propios anteriores trabajando en sinergia con las hélices de proa modificadas para trabajar en modo de recuperación de energía cinética generando electricidad, según se explicó al implementar un sistema KERS en las hélices actuales junto a una tubería específica desarrollada para buques de grandes inercias. En una integración paulatina, el Waterjet, también puede trabajar de manera conjunta con este sistema KERS incrementando la eficiencia.

Otro de los sistemas de interés para este estudio es el sistema de Schottel, representado en la **Figura 13**, con características similares, aunque siendo un concepto diferente.

Para una mayor aproximación del objetivo que se pretende alcanzar en este trabajo se presenta el mismo sistema Waterjet, pero reubicado en la proa del buque siendo en la actualidad el único sistema a chorro instalado en las proas de los buques y denominado Omni Thrusters. En base a este sistema, indicado en la **Figura 14**, comenzará el desarrollo de la nueva propuesta con diferentes ventajas operativas.

Tras esta recopilación de datos se pretende por tanto adaptar el Waterjet a la proa utilizando un concepto diferente y disruptivo que permita, además propulsar el buque, generar electricidad en diferentes momentos favorables.

Figura 10. Diferentes disposiciones de propulsores auxiliares en proa utilizados en trasatlánticos de gran eslora. Es importante para este trabajo el número y disposición de los propulsores, se puede observar cada buque está acondicionado con diferente número de hélices auxiliares, apareciendo 4 en la imagen superior izquierda, 3 en la derecha y 2 en la imagen inferior. Fuente: Google Images.Fuente: ABB y Google Images

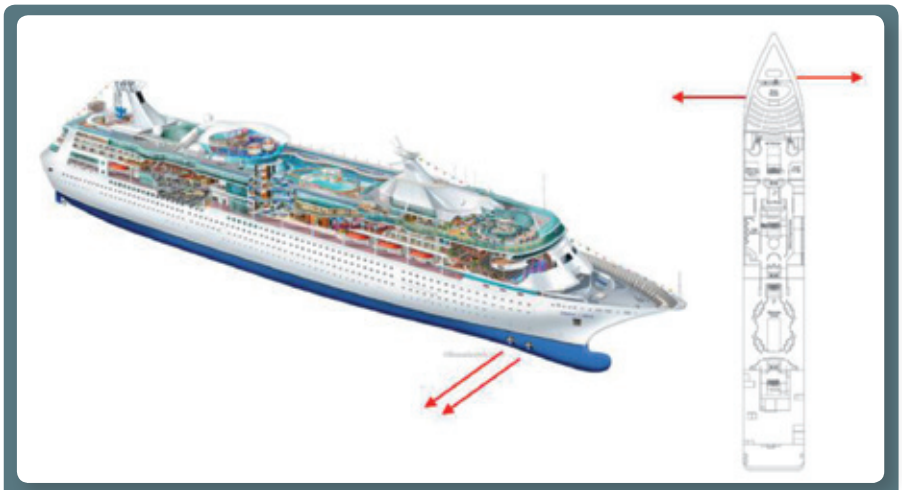


Figura 11. Buque en perspectiva con flechas indicando la dirección del vector que representa la fuerza de empuje del propulsor de proa. En el plano en planta se indica las opciones de empuje de la configuración actual del buque, con un propulsor empujando a babor y el otro a estribor. En ambos casos la fuerza de empuje es perpendicular al buque. Fuente: Google Images y elaboración propia.

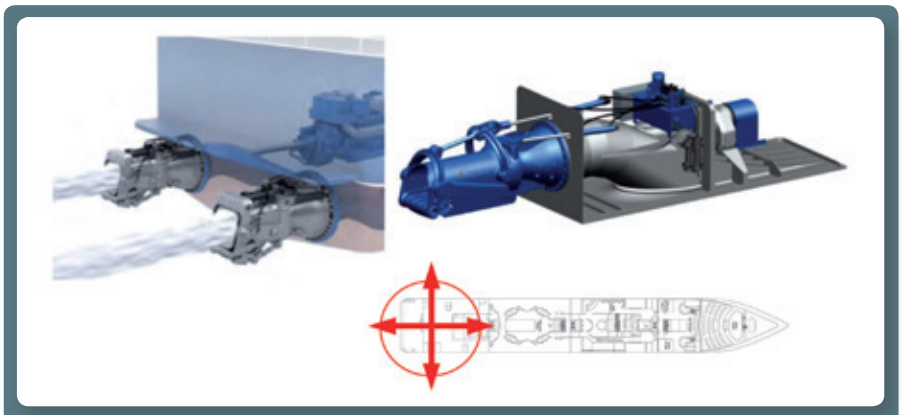


Figura 12. Sistema Waterjet instalado en popa. Este sistema ofrece diferentes ventajas a altas velocidades respecto a las hélices de popa convencionales como menor resistencia por apéndices. La maniobrabilidad permite giros de 360° al dirigir el chorro en cualquier dirección mediante unas salidas que recirculan el chorro según convenga. Fuente: Google images y elaboración propia.

Principalmente, y tras diferentes modificaciones para su adaptación, se pretende con este sistema novedoso evitar consumos innecesarios, mejorar la arrancada y freno del buque, reducir el número de colisiones minimizando el riesgo de accidentes por falta de maniobrabilidad en proa, entre diferentes ventajas que serán explicadas a lo largo de los siguientes apartados. Teniendo presente el propulsor a chorro es compatible con la producción eléctrica tras rediseño de su funcionalidad actual en popa y tras su reubicación en proa con el objetivo de potenciar su operatividad, según esto, y tras el citado sistema KERS se proyectan las modificaciones pertinentes para posibilitar la doble función de captador-propulsor, siendo el Alcance de este trabajo el planteamiento de una serie de propuestas encaminadas a mejorar el rendimiento del buque, en general, desde un punto de vista energético y operativo.

En base a lo expuesto en este apartado, en la **Figura 15**, se expone una comparativa de ren-

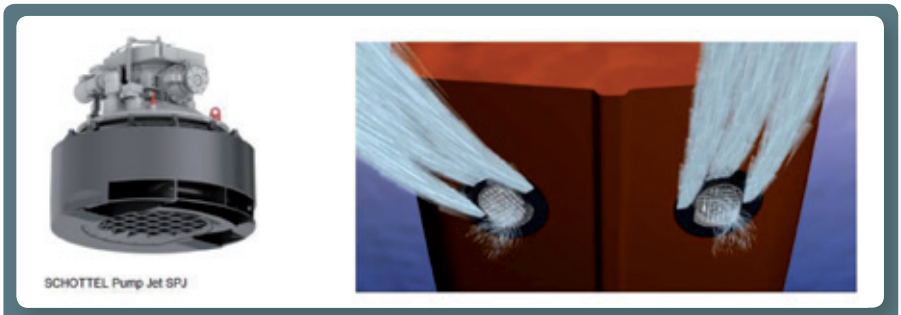


Figura 13. Sistema Waterjet en popa de Schottel con opción independiente de dirección en cada propulsor. Una bomba succiona el agua que es expulsada a chorro por unos conductos situados en la misma entrada de agua siendo un diseño más compacto. Fuente: Schottel. https://www.schottel.de/marine-propulsion/spj-pump-jet/

Figura 14. Sistema Waterjet desarrollado por Omnithruster JT. La aspiración se encuentra como el sistema de Schottel en el fondo del barco y las salidas están orientadas a los costados. Fuente: Omnithruster. http://www.omnithruster.com/jtbrochure.pdf

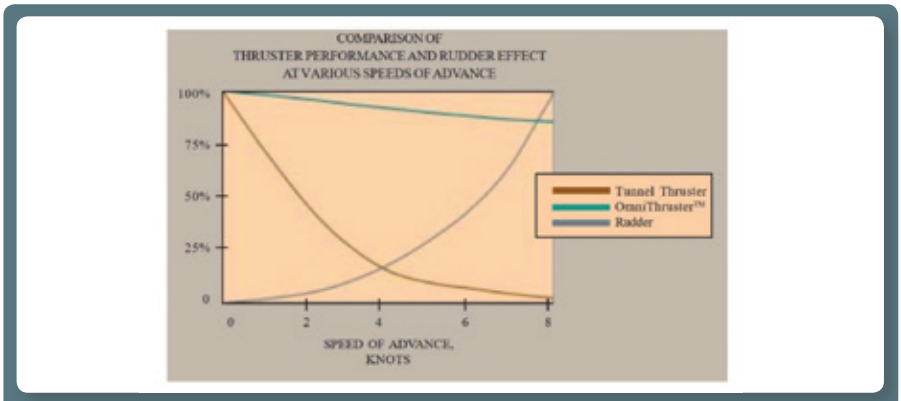


Figura 15. Comparativa entre sistema a chorro y convencional respecto al porcentaje de potencia y la velocidad. Se muestra también el efecto timón respecto a ambos propulsores. Fuente: Omnithruster. http://www.omnithruster.com/jtbrochure.pdf

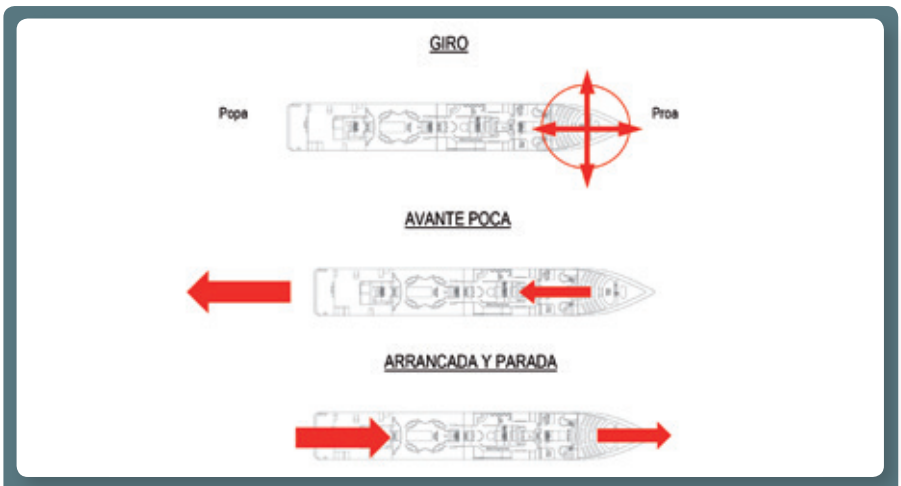


Figura 16. Representación de las fuerzas que actúan en el buque en las 3 condiciones planteadas. Las fuerzas en proa permiten un giro total, mientras en el inicio de la marcha con avante poca el motor principal dispone de una fuerza extra en proa en el mismo sentido que la propulsión principal. En la maniobra de arrancada y parada se produce el mismo efecto que en la Avante, en sentido contrario al avance, sumándose ambos vectores. Esto puede suponer una reducción del combustible en cada maniobra al precisar menor potencia en popa. Se supone en popa hay una hélice convencional. Fuente: Elaboración propia.

dimientos entre el sistema con bow thruster y Waterjet.

3. Hipótesis planteadas

En un contexto realizable, sujeto a crítica, se presentan una serie de hipótesis que necesitan ser verificadas lo antes posible por el método científico, es decir, tras su validación en diferentes ensayos de laboratorio e hidrodinámicos. Es conveniente, por tanto, introducir al lector en este apartado y disponga de la máxima información, con la exposición de los sistemas a tratar enfrentándolos a su nueva disposición tras incrementar su funcionalidad.

Hipótesis 1

Planteando la primera hipótesis desde un punto de vista funcional, un Waterjet en proa asegura unas ventajas de inicio que deben ser consideradas en profundidad. Es evidente, una de ellas, es la operatividad al disponer de un giro del propulsor de 360º aumentando considerablemente la capacidad de maniobra en la proa. En línea con este planteamiento el timón de popa tendrá una ayuda extra en multitud de instantes a diferencia de los actuales propulsores al no disponer de opción de variar la dirección. También, se advierte una mejora evidente en la arrancada al oponerse al avance, de igual modo, en avante poca o frenada ayudando a la máquina principal, esto entra en relación con el aumento de eficiencia al reducir el consumo del motor principal.

En la **Figura 16**, se plantea esquemáticamente estas aportaciones restringidas para los actuales propulsores de proa con empuje vertical al buque, en contraposición, el nuevo sistema está constantemente dando servicio a la máquina principal, trabajando en conjunto. Esto puede regularse mediante software respondiendo ambos propulsores a golpe de timón.

Siguiendo con el planteamiento de estas maniobras auxiliando al buque, y dentro de la primera hipótesis, el nuevo dispositivo permite otra posibilidad inalcanzable para los bow thrusters convencionales por su ineficacia, o en el caso de los desplegables por estar expuestos a grandes presiones. En esta nueva configuración el Waterjet trabaja en condiciones óptimas a altas velocidades, permitiendo controlar la cavitación y otros problemas asociados a las hélices típicas de manera más eficaz con mantenimientos menos costosos. En la **Figura 17** puede observarse el efecto que se produciría al evolucionar el buque sobre sí mismo y con máquina avante, el Waterjet funciona de segundo timón aliviando los esfuerzos en el principal.

Hipótesis 2

Desde un punto de vista de la seguridad en navegación, los buques, están bajo la influencia de multitud de riesgos que pueden propiciar un accidente. En la mayoría de los casos, y en relación con esta segunda hipótesis planteada, la inercia del buque es un factor fundamental en la mayoría de las colisiones contra diferentes estructuras u otros buques.

He aquí donde situamos el planteamiento de la nueva hipótesis, como elemento de auxilio del buque, incrementando cualitativamente la seguridad y minimizando riesgos, en la secuencia mostrada en la **Figura 18**, se indican las trayectorias con deriva a colisión, sin o con propulsión a chorro, vislumbrando el posible aporte del chorro a presión en proa.

En los grandes desplazamientos, los bow thrusters convencionales, no tienen operatividad para minimizar riesgos a velocidades superiores a 5 nudos, así, el efecto tractor del empuje queda limitado por la dirección del vector sin poder acomodar la trayectoria a la demandada por el timón en popa. La ventaja del sistema planteado en esta hipótesis versa sobre esa capacidad de ofrecer una componente en el ángulo preciso para minimizar lo máximo el consumo de combustible desarrollando unas nuevas curvas de evolución, bien estudiadas, adecuadas a la potencia del chorro en proa y la influencia en la metida del timón en popa. Incluso, si fuera preciso, disponer de una componente de la fuerza de empuje en dirección opuesta a la trayectoria del buque. Estas fuerzas propiciadas por la inercia de un gran buque originan las derivas hasta el impacto por malas decisiones del Capitán, o en último escenario, por entrada en avería con pérdida de motor o timón, según se representó en la hipótesis 2.

Si a partir de aquí, realizamos la misma metodología para las maniobras de atraque y desatraque, el buque gana en prestaciones con extra de potencia ganando velocidad más rápido y en su operatividad al reducir las curvas de evolución y las distancias de la parada total. Siendo importante en el análisis tanto el consumo por potencia entregada con o sin chorro de la máquina principal y el coste adicional por la presencia o no de remolcadores en las maniobras para situarlo en el muelle, pues un propulsor a chorro podría evitar menor número y tiempo de servicios de remolque.

Hipótesis 3

En este tercer planteamiento, se utilizará una propuesta basada en varias hipótesis conectadas entre sí en torno a la función secundaria, donde la generación de energía, inercia y la influencia de la resistencia al avance corregida

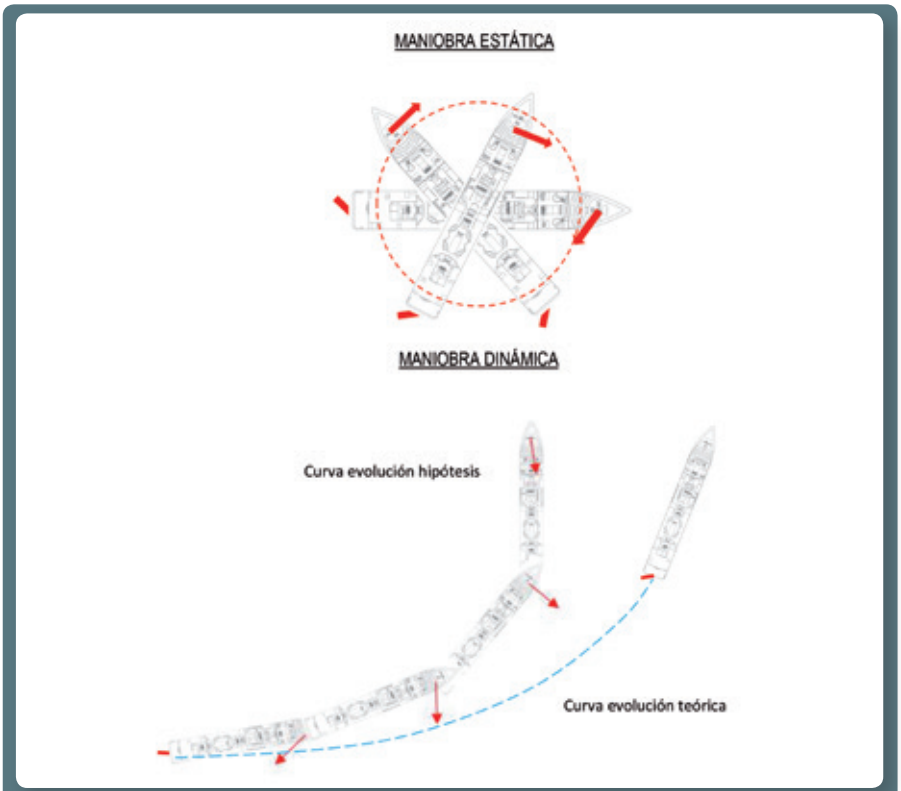


Figura 17. En el Giro estático el buque gira sobre sí mismo sin necesidad de remolcadores ayudando el propulsor de proa a la hélice de popa y aliviando esfuerzos en determinados momentos de máxima tensión al aumentar el empuje (flechas rojas) en proa facilitando la evolución. En la maniobra con velocidad alta, el buque, hace trabajar el timón para cambiar de rumbo mientras el Waterjet entrega la potencia necesaria para ir corrigiendo la metida de timón acortando la curva de evolución teórica. El timón no inclina tanto y sufre menos. Por el contrario, en la evolución teórica la metida del timón es casi máxima y sin empuje en proa. Fuente: Elaboración propia.

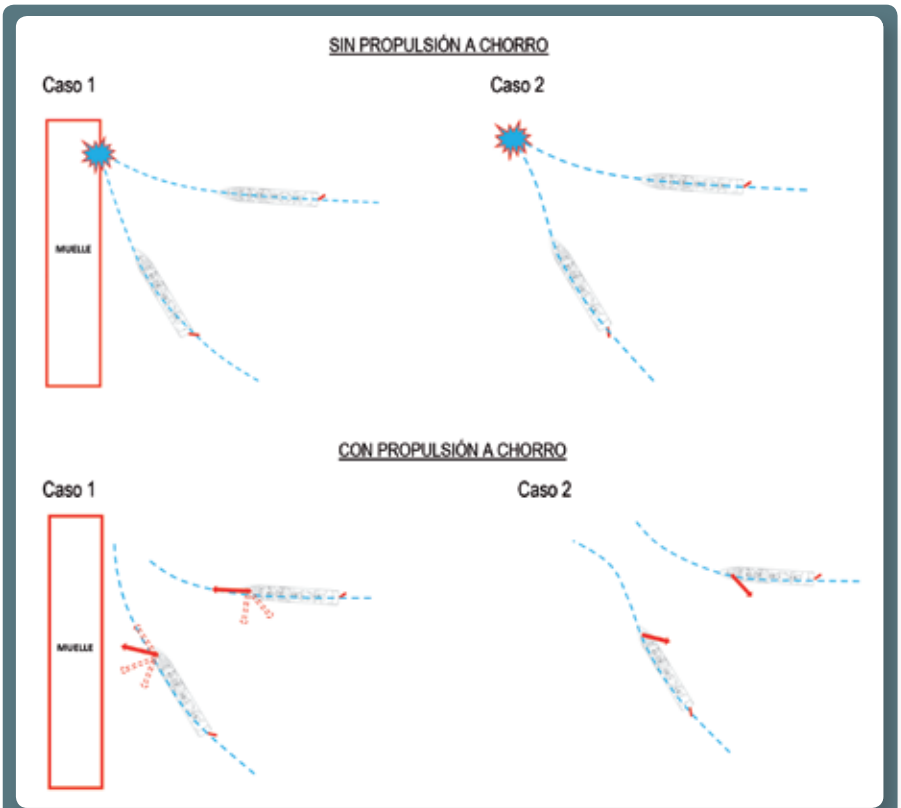


Figura 18. Representación esquemática de deriva del buque con o sin propulsor a chorro en proa. En la actualidad, existen diferentes ejemplos sobre colisiones como las detalladas en la explicación sin chorro. Sin embargo, la teoría física indica la evolución de la curva del buque con un chorro de alta potencia en proa interfiere en la trayectoria lógica modificando la deriva al dirigir el chorro en el ángulo preciso para cada tramo, incluso, enfrentándose al avance apoyando a la máquina principal al freno reduciendo cuantitativamente la distancia de parada. Por ello, se propone una investigación profunda y rigurosa capaz de despejar cualquier duda como la planteada en estas hipótesis. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19A. El buque está sometido a diferentes fuerzas en esta hipótesis, la Resistencia al Avance indicada en color azul marino, opuesta a las potencias entregadas por la máquina principal y el chorro de proa, indicadas con flechas rojas. La flecha azul cian indica la dirección del agua en la entrada hacia el Waterjet. En la figura inferior, se indica la trayectoria que sigue el agua tras pasar por el water jet transcurriendo por debajo de la quilla y empujando al buque (indicado con flechas negras) hacia arriba reduciendo posiblemente el consumo al exponer menos casco al rozamiento bajo el agua. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19B. En esta representación se indica cómo trabajaría el water jet produciendo electricidad, esta cualidad no está disponible en ningún propulsor a chorro o hélice de proa del mercado. Tras modificación de la caja de cambios y liberar la hélice, se distribuye la energía mecánica mediante engranajes hasta el motor eléctrico que podrá generar electricidad al funcionar como un generador. Esta representación indica el viento (flecha violeta) empuja de popa aportando unos nudos extra, esos nudos servirán a grandes velocidades para abrir el dispositivo en proa y generar electricidad aprovechando la alta velocidad del buque. En esta hipótesis, por tanto, se plantea una incidencia positiva de este sistema en presencia de viento con dos ventajas que pueden permitir su activación:

1. Una fuerza de viento capaz de sostener la resistencia generada a mayores por la apertura del sistema para generar electricidad.
2. Una fuerza de componente vertical y ascendente que levanta el buque mientras genera electricidad al desalojar el agua por la quilla.

Fuente: Elaboración propia

Figura 20. El buque está dotado con velas rígidas para aprovechar los vientos favorables, en esta condición, el sistema se vuelve muy favorable para la producción eléctrica sin apenas pérdidas que serán sostenidas por el viento en su totalidad al incrementar la superficie de incidencia. Esto sumado a la sustentación del buque por las fuerzas ascendentes generadas bajo el buque permitiendo ofrecer menos superficie mojada a la Resistencia al Avance parece indicar un efecto positivo en el incremento de la eficiencia durante la navegación, pudiendo incluso derivar la energía generada a la máquina principal quemándola directamente reduciendo en un % elevado la quema de combustible. Teniendo presente la frecuencia de vientos en rutas largas, la hipótesis planteada se vislumbra de alto rendimiento. Basado en concepto de Oliver Design y Bound4Blue. Fuente: Elaboración propia.

por el propulsor a chorro en proa, con o sin presencia de viento, tendrá una influencia importante en el comportamiento del buque en determinadas circunstancias óptimas al ayudar a la máquina principal a reducir potencia. Esto tiene una importancia vital para el buen funcionamiento de la tecnología en lo relativo a la generación eléctrica y la reducción de consumos con presencia de viento, puesto que la propuesta contemplada por Omni Thruster será incapaz de igualar con su actual diseño. Se plantea en la **Figura 19**, y basándose en estudios de José Ramón Larburu, la influencia positiva en la Resistencia al Avance al exponer menos obra viva bajo el agua. Este fenómeno se produce por empuje positivo del agua al ser desalojada bajo la quilla "levantando" el casco y ofreciendo menos resistencia al Avance.

Si en estas circunstancias favorables existe una ganancia capaz de generar electricidad en presencia de viento, y levantando el buque, es evidente, si el buque está preparado con sistemas de velas rígidas incrementará su eficacia reduciendo aún más los consumos y sosteniendo la generación eléctrica sin pérdidas por abertura del casco para entrada de agua hacia el water jet, y que se entenderá mejor en el apartado referente al Diseño. En la **Figura 20**, se introduce esta nueva hipótesis.

4. Método y diseño

Tras los planteamientos realizados en las hipótesis del apartado anterior se comienza en este punto la exposición de la metodología y el diseño asociado para conseguir un alto rendimiento. Antes de comenzar, será preciso recordar, la propuesta realizada para la conversión de los bow thrusters convencionales en generadores eléctricos y detallado en la investigación presentada en el Congreso de Ingeniería Naval en Barcelona (2017) titulado, "*Método y sistema de generación eléctrica en un buque*" fundamentándose en la recuperación de energía cinética en diferentes maniobras de aproximación a costa, o reducciones de velocidad donde las altas inercias están presentes.

En la **Figura 21**, se introduce a este sistema que estará relacionado directamente con la Hipotésis 3 del apartado anterior en presencia de viento o al programar las aproximaciones según la inercia generada por el desplazamiento del buque y la velocidad de navegación.

Atendiendo a esta metodología se plantea el nuevo diseño a partir del wáter jet y basándose en el mismo concepto de la figura anterior, con la salvedad de la evacuación del agua, que no será por los costados, sino que será dirigido al fondo del barco por la línea de crujía. Esto tiene sus ventajas como se explicó en las hipótesis desarrolladas en el apartado anterior al levantar el buque sobre el agua, mejorando, además, la maniobrabilidad en su conjunto. Se dispone por tanto una nueva configuración con el objeto de presentar alternativas capaces de incrementar la eficiencia del buque, no sólo desde un punto de vista de mejorar la maniobra sino ofreciendo una visión competitiva, realista y con gran potencial de producir electricidad tras mínimas modificaciones, sumando todo esto, al alto valor añadido generado en todas las etapas de su desarrollo y fabricación.

Llegados a este punto, y tras explicar la metodología, consistente en principios ya abordados se expone a continuación el nuevo prototipo proyectado para sustituir los

actuales Bow Thrusters por propulsores a chorro, debido a ciertas ventajas asociadas a una buena adaptación del water jet a la proa del buque para obtener todas las capacidades planteadas en este documento, y justificar, desde una perspectiva de la eficiencia su instalación, sin olvidar, el ahorro asociado en coste de todo tipo que conllevaría sustituir dos Bow Thrusters por un solo water jet que será capaz de realizar la misma función que los dos anteriores.

El nuevo Diseño adaptado con water jet y objeto de este trabajo, se presenta a continuación.

En la **Figura 22**, se presenta la nueva disposición del propulsor a chorro en proa realizando una integración similar a su disposición en popa.

En la **Figura 23**, se detalla un poco más este sistema por secciones.

Por terminar con este apartado, se expone ahora la modificación para calados bajos, indicado en la **Figura 25**.

5. Maniobra y eficiencia

Tras las diferentes hipótesis quedan muchas incógnitas por despejar, en esta investigación, aunque se propusieron soluciones para un alto rendimiento del dispositivo en diferentes maniobras en situación estática y dinámica. Se hace preciso profundizar en todas las condiciones de maniobra planteadas u otras que puedan surgir.

El papel de este artefacto en presencia de viento se vislumbra altamente competitivo si el buque está dotado de elementos de captación de vientos favorables de popa, favoreciendo la producción eléctrica a alta velocidad. Esto quedará mejor explicado con la aportación a esta investigación del compañero y Doctor Ingeniero Naval, Raúl Villa, al presentar un estudio sobre la influencia de los vientos en las popas de los buques mercantes en situación favorable. Por introducir en este estudio, solamente con las superficies de popa expuestas al viento ya se generan ganancias en la velocidad incrementando algunos nudos en la navegación que pueden ser clave en los grandes trasatlánticos con áreas en su superficie de popa muy amplias.

Esto tiene sus beneficios desde el punto de vista de la eficiencia pues esa ganancia aportada por el viento puede ofrecer dos escenarios favorables para el buque, siendo:

- Reduciendo las revoluciones del motor principal, y con ellos los consumos, dejando el viento sustituya esa entrega de potencia del motor mientras esté presente.

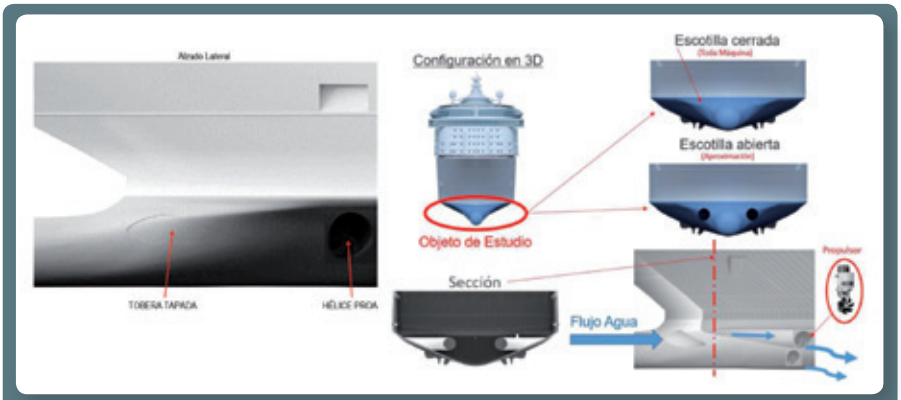


Figura 21. Investigación sobre el sistema KERS aplicado a las hélices de proa. La hélice de proa se reubica para permitir la instalación de una tubería que será abierta en diferentes maniobras favorables con el objeto de producir grandes cantidades de energía eléctrica, sobre los 3,3 MW a velocidad de 16 nudos por costado. Pudiendo aprovechar las aproximaciones a costa para su explotación. Fuente: Elaboración propia.

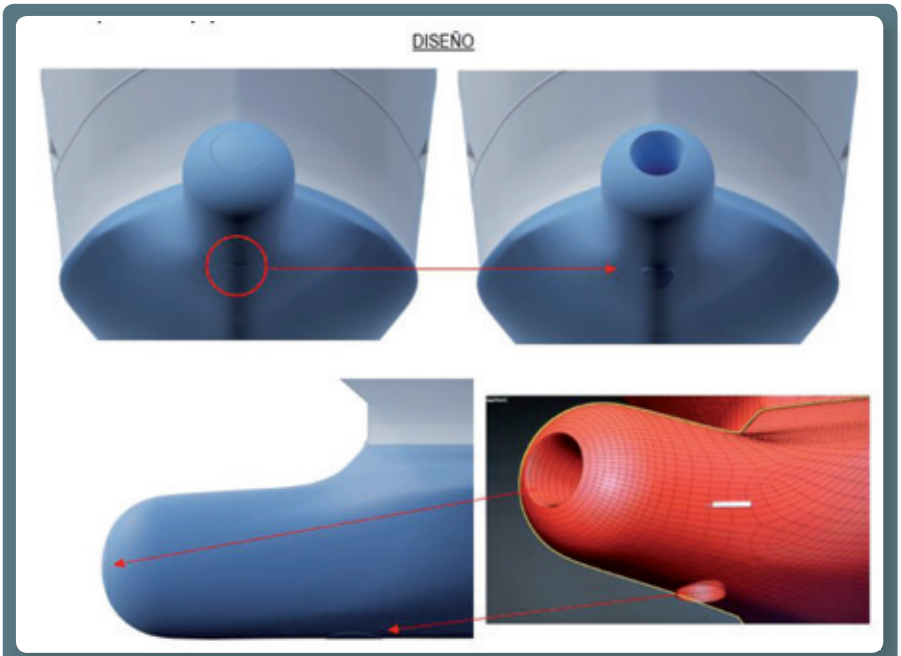


Figura 22. Vista frontal y desde abajo con el sistema abierto y cerrado. La entrada es diseñada para buques con calados constantes donde el bulbo siempre está en condición sumergida permitiendo trabajar perfectamente al wáter jet. En buques donde no existe esa posibilidad se desarrolla un sistema doble que será explicado a continuación.
Fuente: Elaboración propia con Eduardo Araujo.

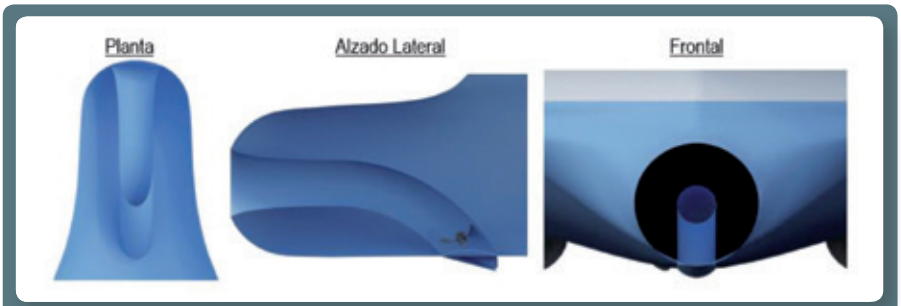


Figura 23. Secciones del sistema wáter jet en proa. Se indica sección en planta, sección del bulbo lateral y frontal mostrando la trayectoria de la tubería. Fuente: Elaboración propia con Eduardo Araujo.

- Aprovechando ese viento para empujar al buque, sosteniendo las pérdidas, mientras se abre el conducto del wáter jet permitiendo a la hélice girar libremente, tras el paso del agua, que a su vez moverá un eje conectado al motor eléctrico del propulsor que, en esta ocasión, funcionará como generador eléctrico.

Desde el punto de vista de la Eficiencia Energética el sistema propuesto sugiere una reducción de los consumos al incrementar la maniobrabilidad del buque, por ejemplo, reduciendo las curvas de evolución. En presencia de viento favorable es aprovechable para generación eléctrica a altas velocidades e incorporando un sistema de almacenamien-

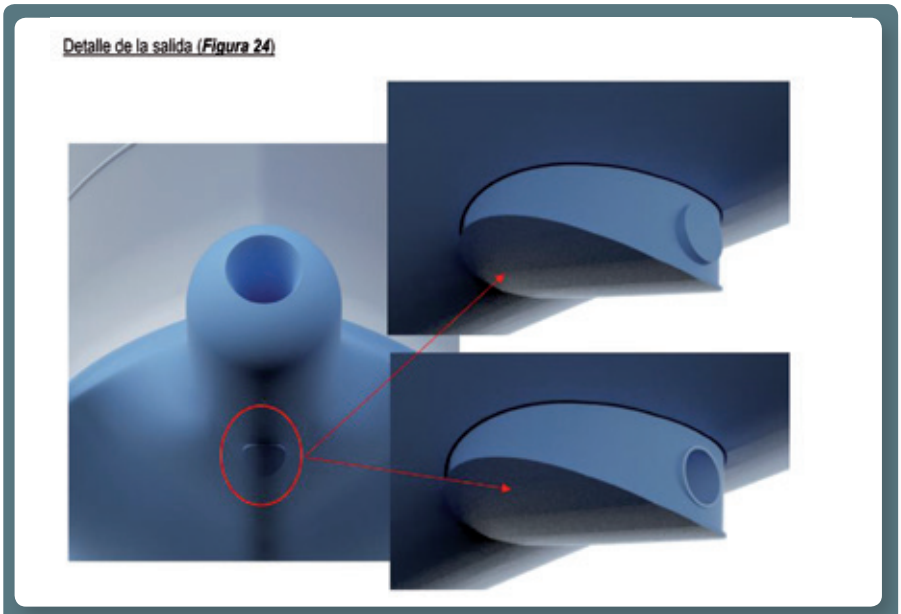


Figura 24. En esta figura se expone en detalle la salida del wáter jet. Se presenta desplegada y con el orificio de propulsión cerrado en la figura superior derecha, y abierto, en la figura inferior derecha. Este elemento puede abrirse por gravedad ante la presión del agua, o de manera automática en coordinación con la tapa de entrada del bulbo. La salida tiene la capacidad de girar sobre sí misma 360°, evacuando el chorro de agua en cualquier dirección. Fuente: Elaboración propia con Eduardo Araujo.

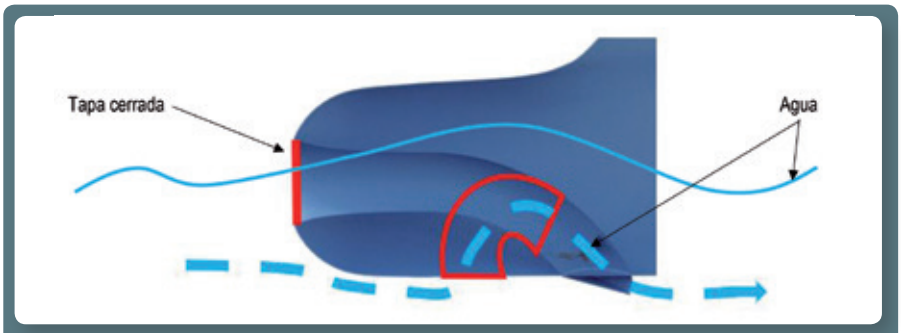


Figura 25. Sección lateral proa. Sistema Water jet con doble configuración para calados bajos. Se presenta tubería de aspiración en color rojo. No puede producir electricidad, pero sí ofrece las prestaciones en maniobras con bajos calados donde la tapa frontal no queda totalmente cubierta por el agua. Otra opción contemplada es bajar la entrada en el frontal quedando para investigaciones futuras. Fuente; Elaboración propia.

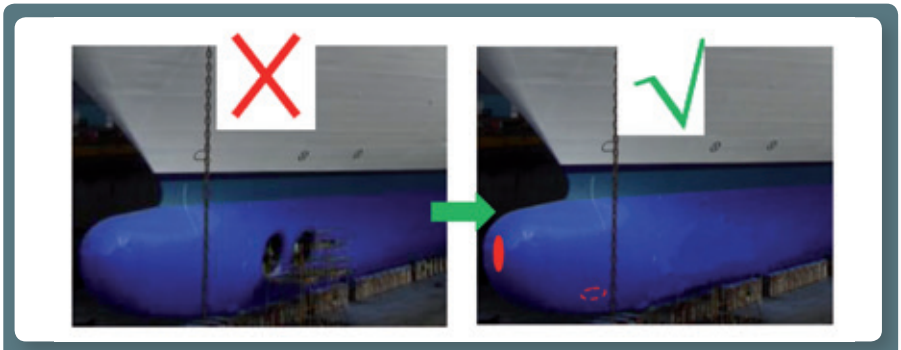


Figura 26. En esta secuencia de imágenes se muestra una posible justificación para instalar el water jet. En la figura de la izquierda se presentan dos hélices de proa convencionales, en la figura de la derecha se instala una única unidad de propulsor a chorro. Desde un punto de vista económico, un único propulsor realiza las mismas funciones que los convencionales con la importante reducción de coste en la compra y mantenimiento de las dos unidades Bow Thruster. Se incide en al apartado económico para demostrar el beneficio, y su rápida amortización, con la instalación de este sistema. Fuente: Elaboración propia.

to de energía este incremento de eficiencia podría elevarse un 40% más. Se explicó, detalladamente, los posibles beneficios a expensas de investigaciones más profundas, en la mejora de las maniobras y reducción de consumos asociados, pero también se presentó una serie de alternativas donde este sistema puede ayudar a tener buques más seguros ante colisiones contra diferentes estructuras.

Por todo ello, y recapitulando, se indica en la **Figura 26** una justificación para acometer su desarrollo.

Propulsión a Vela y viento de popa en buques.

La mayor parte de las mejoras en la eficiencia del consumo de combustible en los buques se han llevado a cabo a través de cambios en su forma de operar, mediante una navegación más lenta, o la reducción de la potencia instalada, en ambos casos respetando las exigencias del Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI). En cualquier caso, los buques de carga de línea regular todavía tienen que dar un salto tecnológico importante en aras de mejorar esa eficiencia.

Por todo ello han surgido un gran número de ideas tecnológicas de ahorro de energía, unas más innovadoras que otras, que persiguen la finalidad de poder obtener beneficios energéticos. Entre estas ideas, destacan las relacionadas con la propulsión asistida por el viento. El interés por este tipo de ideas nació en la década de 1980, motivado por la aparición de la crisis del petróleo de los años setenta. Actualmente la propulsión asistida por el viento ofrece la posibilidad de poder introducir las energías renovables en el transporte marítimo. Y por ello, varias empresas han comenzado a desarrollar diseños de velas rígidas que, además de aprovechar la fuerza del viento, sean capaces también de utilizar la energía solar. Para alcanzar este fin, las velas se recubren con paneles solares, que proporcionan un empuje propulsivo extra, y suponen una fuente útil de energía auxiliar, de modo que puedan ser utilizadas tanto durante la navegación, como en las estancias en puerto.

La propulsión asistida por el viento se basa en la utilización de un dispositivo para capturar la energía del viento y generar un empuje [1]. El empuje requerido para propulsar el buque a través del agua se obtiene de la combinación de este dispositivo con el motor del buque. Esto reduce la cantidad de energía propulsora efectiva necesaria para conseguir una velocidad dada. La propulsión asistida por el viento puede funcionar de dos formas. Bien para mantener la misma velocidad del buque para una potencia reducida del motor, lo que implica una reducción en el consumo de combustible, en los costes y en las emisiones de CO_2; o bien para incrementar la velocidad del buque para la misma potencia del motor, lo que supone reducir la duración de las travesías y, potencialmente, incrementar la rentabilidad del buque.

A diferencia de las velas flexibles tradicionales, las rígidas modernas son perfiles aerodinámicos (tipo NACA0030 en [2], NACA0021 y EPPLER420 en [3]) de placas metálicas o materiales compuestos, con diferentes geometrías y configuraciones. Además, dependiendo del tamaño del buque, del espacio disponible en cubierta y de otras restricciones, se pue-

Figura 27. Modelo a escala de la vela del proyecto "UT Wind Challenger".[4][5].

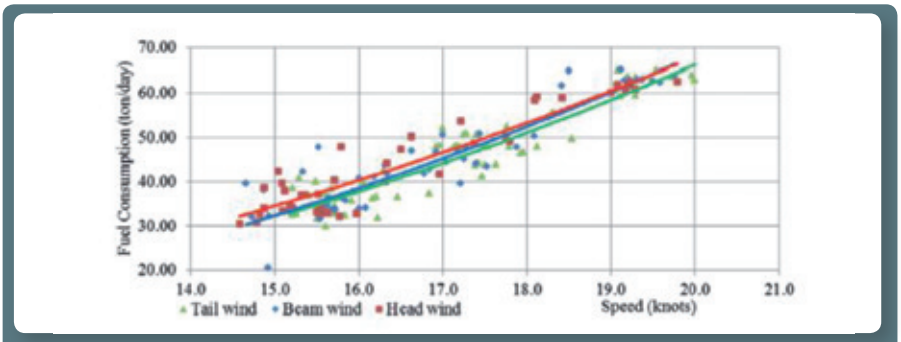


Figura 28. Efecto del viento VS Consumo combustible [7].

den disponer de variados juegos de velas. En cualquier caso, se basan en el mismo principio operativo que cualquier perfil aerodinámico, consistente en que la vela se mueve a través de un fluido que produce una fuerza aerodinámica que conlleva una sustentación y un arrastre.

Un requerimiento fundamental que se debe cumplir para que los sistemas de velas rígidas puedan ser implantados en los buques, es la de que los mástiles deben poseer la capacidad suficiente para que las velas puedan rotar sobre los mismos. De este punto dependerá el que la rotación del perfil se lleve a cabo de manera óptima para poder alcanzar el ángulo de ataque óptimo, que maximizará la sustentación.

El mecanismo de rotación debe estar totalmente automatizado, de modo que el sistema se ajuste en tiempo real con el viento actuante, siendo además dotado de un control desde el puente que le permita adoptar decisiones manualmente. En situaciones de fuertes vientos que puedan comprometer la integridad de la estructura, las velas deben ser orientadas hasta que opongan la mínima resistencia al viento. Una vela rígida puede producir empuje hasta un ángulo de ataque ligeramente superior a 30°, lo que significa que las velas podrían desarrollar empuje útil en la mayoría de las condiciones.

Otra característica clave para el éxito de los sistemas de propulsión asistidos por el viento, mediante el uso de velas rígidas, radica en que posean la capacidad de que sus velas puedan ser arriadas. Esta maniobra se podría llevar a cabo mediante un mecanismo telescópico vertical, con un diseño cuyas secciones fueran crecientes en sentido vertical, de manera que las piezas superiores envolvieran a las inferiores al arriarse, reduciendo notablemente el área expuesta y la altura de las velas. Esta característica es fundamental en condiciones de vientos muy fuertes, cuando la estructura puede estar en riesgo; durante las maniobras en puerto, facilitando las tareas de carga y descarga; y en canales con restricciones al tráfico aéreo, permitiendo al buque navegar evitando obstáculos, tales como puentes. Por el contrario, la solución retráctil incluye una complejidad añadida, motivada por la mecánica del dispositivo y, por el posible espacio invadido por las velas. Esta problemática podría interferir con las labores de carga y descarga, que al final perjudicarían a la rentabilidad del buque.

La efectividad de la propulsión asistida por el viento mediante velas rígidas estará fijada por la capacidad para aprovechar la máxima energía eólica posible y así poder evitar situaciones desfavorables. Un factor importante para tener en cuenta lo fijará el gradiente vertical del viento, ya que la velocidad del viento atmosférico disminuye al acercarse a la superficie, tanto en la mar como en tierra. Por lo tanto, el disponer una superficie vélica mayor en la parte superior de las velas, donde la velocidad del viento es más alta, supondrá mayor aprovechamiento de la energía.

Adicionalmente a la disposición de mayor superficie vélica, para poder obtener beneficio de la velocidad del viento atmosférico reinante en esa zona, el buque deberá ofrecer toda esa superficie vélica de una manera óptima. Esta situación óptima se consigue cuando un barco navega adrizado. Por el contrario, cuanta más escora presente el buque, más se reducirá la superficie útil, y menos cantidad de viento podrán aprovechar las velas, por lo que se reducirá la fuerza vélica, y, en consecuencia, el empuje. Este efecto es muy significativo en pequeñas embarcaciones de vela, mientras que se presenta de manera más tenue en buques de mayor porte.

VIENTO DE POPA

Llevada a cabo la introducción anterior, el siguiente paso consistiría en preguntarse si un buque podría aprovechar los vientos que impulsan su popa, para mejorar su eficiencia energética. Y para poder llevar a cabo un cálculo aproximado al respecto, una vez conocidos los valores de la velocidad de viento aparente □□, el siguiente paso consistiría en calcular el empuje que dicho viento podría generar sobre la superficie de la vela de popa de la superestructura. Según [4][5], el empuje T generado por las velas rígidas se puede expresar como:

$$T = 0{,}5 * \rho_a * V_A^2 * A * C_X \quad [kgf]$$

Donde "ρa" es la densidad del aire, "A" es superficie vélica total y" □□ " es el coeficiente de empuje (parámetro variable de acuerdo con el ángulo de viento aparente β). Empleando la fórmula anterior para tres diseños de velas y nueve alternativas de viento aparente diferentes, junto con una predicción de la resistencia al avance y la potencia necesaria para un buque granelero tipo, se obtuvieron velocidades adicionales gracias al empuje, de entre 4 y 6 nudos, para los diseños más tradicionales, y de hasta 11 nudos para los diseños más aerodinámicos. [6]

Por ello, sustituyendo "A" por la parte de popa del buque expuesta al viento (su superficie vélica en popa), se podrían obtener al menos 4 nudos adicionales, si la popa dispusiera de un área similar a la de las velas tratadas, que en este caso alcanzaban aproximadamente 300 metros cuadrados. La propulsión asistida por el viento mediante velas rígidas para proporcionar empuje al buque es una opción prometedora, que podría presentar resultados muy interesantes. A modo de ejemplo, tras estimar el empuje producido por las velas y aplicar los resultados a una predicción de la resistencia al avance y de la potencia propulsiva de un buque granelero de tamaño medio, se obtuvieron buenos resultados.

Por ello, aunque la aplicación de estos sistemas a un buque mercante todavía tendrá que

recorrer un largo camino, tal vez los buques podrían aprovechar sus formas de popa, es decir, su superficie vélica en popa, para por ejemplo navegar con arrancada avante, aprovechando el viento, y así poder mejorar su eficiencia energética. Se debe tener en cuenta que a este respecto ya existen investigadores que han destacado la importancia que posee el viento cuando actúa con estos ángulos desde popa (tail wind), en referencia a la reducción de consumo de combustible que provocan. [7]

Y todo esto sin olvidar que la resolución MEPC.213(63), adoptada el 2 marzo de 2012, "*Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP)*", ya indicaba que se debía valorar la posibilidad de que los buques se aprovecharán del viento para su propulsión. [8]

6. Conclusiones

- La eficiencia en buques está cada vez más presente en los diseños de los buques, integrando toda una variedad de medios tecnológicos y digitales con la finalidad de mejorar el trasiego de mercancías y las operaciones diarias en las instalaciones portuarias o en navegación. La relación puerto-buque se ve modificada a entrar en una estrecha comunicación bidireccional volcando a una nube una ingente cantidad de datos que permitirá imprimir mayor competitividad al tráfico marítimo.
- Desde esta perspectiva multitud de armadores y navieras están disponiendo en sus buques sistemas basados en energías renovables o almacenamiento de energía con la intención de reducir consumos fósiles y emisiones de gases efecto invernadero.
- Diferentes sistemas son hoy utilizados en las proas de los buques para su auxilio en determinadas maniobras, caracterizados por sus limitaciones a altas velocidad, o incluso, a bajas velocidades en lo que se refiere a capacidad de maniobra. Por tanto, se presentó en este artículo un nuevo dispositivo basado en el water jet que incrementa la eficiencia desde diferentes puntos de vista, con la diferenciación de producir electricidad según órdenes del Capitán y las condiciones sean favorables.
- Los sistemas propulsivos actuales situados en proa no son capaces de minimizar los riesgos de accidente o colisión de los buques, debido a sus grandes inercias y escasa capacidad de maniobra, por ello, se exponen una serie de hipótesis sostenidas en los beneficios de un sistema propulsor con la libertad de giro de 360º en la fuerza de empuje, pudiendo significar una reducción importante de los riesgos por colisión.
- La propulsión a vela presente desde prácticamente los inicios de la navegación está siendo ahora utilizada para reducir consumos en los buques de gran porte, utilizando dispositivos rígidos, y en muchas ocasiones en sinergia tras adaptar a ellos paneles solares. Todo ello beneficia al diseño aquí planteado a altas velocidades, pudiendo el viento fuerte en intensidad permitir abrir escotilla y generar electricidad a velocidades superiores a los 15 nudos, sin prácticamente pérdidas. Salvo las sostenidas por el viento.
- El coste de dos propulsores convencionales, Bow Thruster, puede ser sustituido por el de un solo propulsor water jet, sirviendo de justificación para atraer a posibles armadores interesados en nuevas alternativas disruptivas con los sistemas actuales.
- De igual modo, las características técnicas de los propulsores a chorro son altamente eficientes a altas y bajas velocidades, con mantenimientos más bajos. Se presenta, por tanto, en este artículo, una gama de configuraciones posibles fomentando la sinergia entre equipos e instalaciones con el objetivo de inyectar en la red eléctrica del buque energía renovable, según planificación, puede ser quemada directamente por la máquina principal, derivada a otras instalaciones o almacenada en baterías potenciando todo el sistema en su conjunto. Se contempla, además, una doble instalación.
- Se dejan sin resolver diferentes cuestiones que tendrán que ser resueltas en laboratorios y canales hidrodinámicos para descartar, o confirmar, las diferentes hipótesis aquí planteadas.

7. Bibliografía

[1] Lloyd's Register Marine, "Wind-Powered Shipping," 2015.
[2] T. Fujiwara, K. Hirata, M. Ueno, and T. Nimura, "On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail," Int. Offshore Polar Eng. Conf., vol. 5, pp. 326–333, 2003.
[3] L. Qiao, N. Yasunori, and I. Yoshiho, "A Study on Performance of Cascade of Wing Sails for Sail-equipped Vessels - Considering Their Aerodynamic Interaction," Isope, 2012.
[4] K. Ouchi, K. Uzawa, and A. Kanai, "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel *," no. June, pp. 1–5, 2011.
[5] K. Ouchi, K. Uzawa, A. Kanai, and M. Katori, "' Wind Challenger ' the Next Generation Hybrid Sailing Vessel," no. May, pp. 562–567, 2013.
[6] L. Cachaza, G. Pérez, R. Villa, J. Fraguela, "Reducción del consumo de combustible mediante velas rígidas y paneles solares". Uruguay. COPINAVAL 2015.
[7] N. Bialystocki, D. Konovessis, "On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach", Journal of Ocean Engineering and Science, p.162, 2016.
[8] Resolution MEPC.213(63), "Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP)", Annex 9- page 11, 2012.
[9] Schottel.com
[10] ABB.com
[11] Omnithrusters.com
[12] UNTACD (Naciones Unidas).2018. Capítulo: Puertos. Página 85. "Informe sobre el Transporte Marítimo".
[13] Our Ocean, Compromisos "OUR OCEAN 2017", página 76.
[14] RollsRoyce.com
[15] Bound4blue.com

[1] Informe: UNTACD (Naciones Unidas).2018. Capítulo: Puertos. Página 85. "Informe sobre el Transporte Marítimo".
[2] compromiso: objetivo fijado por las instituciones citadas en la Cumbre de Malta en 2017, datos extraídos del documento original "Compromisos OUR OCEAN 2017", página 76. Fuente: https://ourocean2017.org/sites/default/files/ooc-2017-list-of-commitments_es.pdf ■