

artículo técnico

Un proyecto europeo de I+D: El Proyecto SUPERPROP

Luis Pérez Rojas, Doctor Ingeniero Naval (1)
 Pelayo Álvarez Brasa (2)
 Joaquín Gallego García (2)
 Antonio Souto Iglesias (1)
 Rubén López Pulido (1)
 Francisco Miguel Montero (1)
 Alejandro Molina Torres (1)

(1) Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINAV), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN), Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
 (2) Pescanova S.A.

Trabajo presentado en la Jornada Técnica sobre Mejoras Tecnológicas y el I+D en la Propulsión de Buques de Pesca. *International Shipbuilding and Maritime Industry Exhibition*, NAVALIA. Vigo (España), 23-25 de mayo, 2006.

Resumen

Ante la subida continuada de precios del combustible y ante el deterioro del comportamiento hidrodinámico de los buques a medida que su edad aumenta, la Universidad Politécnica de Madrid, junto con otros 8 socios de 5 países europeos, está realizando el proyecto SUPERPROP. Se trata en este proyecto de estudiar, desde el punto de vista de la Hidrodinámica, las condiciones de trabajo de los buques de mayor edad y adaptar el sistema propulsivo a estas condiciones. El objetivo último es desarrollar un modelo tecno-económico completo para el mantenimiento de pesqueros y remolcadores en lo que se refiere al comportamiento hidrodinámico de su sistema propulsivo. El proyecto está cofinanciado por la Unión Europea en el sexto programa marco (FP6) dentro de una convocatoria STREP. El consorcio está compuesto por: UPM, Pescanova, Construcciones Navales Freire y Sistemar (España); INSEAN y Ocean (Italia); VTT (Finlandia); Marintek (Noruega) y Fundilusa (Portugal). Hasta el momento se han analizado las condiciones de trabajo de las flotas y se han seleccionado dos buques ejemplo. Sobre estos buques se han realizado pruebas de mar y se están llevando a cabo ensayos en canal y cálculos mediante CFD. Estas actuaciones servirán para adaptar el sistema propulsivo a las nuevas condiciones de trabajo.

Abstract

As a response to the continuous increases of fuel prices and the hydrodynamic penalties of ageing ships, Technical University of Madrid (UPM), along with other eight partners from 5 different European countries, is carrying out the SUPERPROP project. The aim of this project is to study, from a hydrodynamic point of view, the work conditions of the elder vessels and to adapt their propulsive system to these new conditions. The ultimate objective is to develop a complete techno-economic model for fishing and tug vessels maintenance, considering the hydrodynamic performance of their propulsive system. This project is partially funded by the European Union, within the Sixth Framework Programme (FP6) under a STREP (Specific Targeted Research Project) call. The consortium is formed by UPM, Pescanova, Construcciones Navales Freire and Sistemar (Spain); INSEAN and Ocean (Italy); VTT (Finland); Marintek (Norway) and Fundilusa (Portugal). To the date, the working conditions of targeted fleets have been analyzed and two sample vessels have been selected. Sea trials have been performed on these vessels, and towing tank and CFD tests are being conducted at the moment. These actions will help to adapt the propulsive system to the new working conditions of ageing vessels.

1-Introducción: contexto y objetivos de SUPERPROP

El proyecto SUPERPROP (*Superior Life-Time Operation Economy of Ship Propellers*) surge a raíz de la preocupación de Pescanova y UPM por la situación de los buques de mayor edad de la flota pesquera en lo que se refiere a su comportamiento hidrodinámico. Estos buques, debido al envejecimiento del casco, la hélice y de la propia planta propulsora, y al cambio de condiciones de trabajo por la modificación de las condiciones de carga, tienen un punto de funcionamiento, hidrodinámicamente diferente para aquel para el que fueron proyectados. Esto provoca una pérdida de rendimiento, y un aumento de emisiones, vibraciones y costes de mantenimiento del motor. Estas circunstancias producen un aumento en los consumos, que, si bien hasta este momento había sido asumido como un hecho normal e inevitable, el alza de los precios del petróleo ha obligado a los armadores a plantearse las posibles soluciones a esta situación.

Ante esta circunstancia, la UPM elaboró un primer borrador del proyecto que consistía fundamentalmente en analizar las posibilidades de modificación del propulsor para aligerarlo y mejorar las condiciones de trabajo de la

Índice:

Resumen / Abstract

1-Introducción: Contexto y objetivos de SUPERPROP

2-Proyectos STREP

3-El consorcio

4-Modelos tecno-económicos

5-Tareas realizadas

6-Próximas tareas

7-Conclusiones

Agradecimientos

Bibliografía

planta propulsora. A este proyecto sobre buques pesqueros y remolcadores (las flotas más numerosas) se unieron varios socios europeos, y el consorcio final está liderado por la Universidad Politécnica de Madrid, Pescanova, Astilleros Freire y Sistemar de España; INSEAN (canal de Roma) y el grupo Ocean de Italia; Fundilusa de Portugal; VTT de Finlandia y Marintek de Noruega.

Las principales características innovadoras de SUPERPROP son:

- El estudio de la viabilidad económica de flotas de mayor edad: Uno de los fines últimos del proyecto es la elaboración de un modelo tecno-económico que analice las diferentes alternativas de mantenimiento de los buques de pesca y remolcadores en lo que se refiere a su comportamiento hidrodinámico.
- Estudio de las posibles mejoras en consumos de combustible, emisiones y vibraciones.
- Uso de medidas a escala real sobre los buques ejemplo para mejorar el rendimiento de la planta propulsora.
- Desarrollo de una estrategia para reutilizar hélices antiguas con bajo coste. El proyecto no sólo analizará la posibilidad de un cambio de propulsor, sino también la modificación de la hélice antigua con el objetivo de aligerarla. Esto se puede conseguir mediante la reducción del paso, la reducción del diámetro o el recorte del borde de salida de las palas.

El proyecto está documentado online en <http://canaletsin.upm.es/superprop/> y se divide en varios paquetes de trabajo (*work packages*, WP) en los que se realizan las siguientes tareas:

- WP1 - Análisis de la flota actual y selección de buques-ejemplo.
- WP2 - Estudio de los propulsores y las carenas de los buques ejemplo mediante CFD.
- WP3 - Diseño de las nuevas hélices.
- WP4 - Ensayos de modelos de los propulsores y carenas.
- WP5 - Pruebas de mar de los buques ejemplo antes y después de la actualización del sistema propulsivo.
- WP6 - Análisis de resultados.
- WP7 - Realización de la actualización del sistema propulsivo de los casos estudiados.
- WP8 - Diseminación de resultados.

Las tareas se coordinan entre sí como se muestra en la figura 1.

Con esta distribución de trabajo se busca mejorar el conocimiento del funcionamiento del buque a lo largo de toda su vida útil y desarrollar un plan óptimo de mantenimiento.

Es de destacar que el proyecto SUPERPROP supone para el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINAV) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) de la UPM el reto más importante al que ha hecho frente a nivel de proyectos de I+D. Es el primer proyecto financiado por la UE en el cual ha conseguido subvención, lo cual es realmente complicado por ser convocatorias competitivas. Lo ha hecho dentro de una convocatoria STREP, cuyas características se presentan más adelante. Además lidera un consorcio de 9 participantes de diferentes países para realizar actividades de I+D enfocadas al sector marítimo y muy centradas en subsectores de éste, fundamentales para el estado español como el pesquero y el de los remolcadores. Esto es un valor importante pues apenas se consiguen subvenciones en convocatorias competitivas para dinamizar el sector.

En este artículo se describen primeramente las características generales del tipo de proyecto en el que se enmarca el aquí presentado. Después se hace una descripción del consorcio. Una vez presentado el tipo de proyecto y el consorcio se entra en detalles sobre el modelo tecno-económico a desarrollar. A continuación se detallan las actividades ya realizadas y las previstas para finalmente extraer las conclusiones que surjan de todo este estudio.

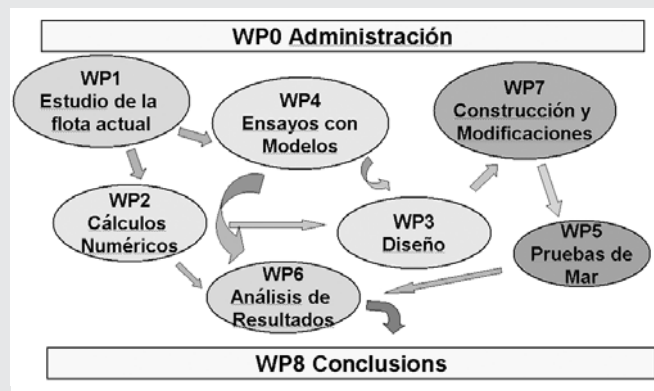


Fig. 1. Organización de los paquetes de trabajo

2- Proyectos STREP

El proyecto SUPERPROP corresponde a las convocatorias STREP (*Specific Targeted Research Project*) y ha sido financiado parcialmente por la Unión Europea dentro del Sexto Programa Marco (FP6). Este programa pretende mejorar la competitividad y el nivel científico europeo mediante el fomento de la cooperación entre las universidades, los centros de investigación y la industria. No sólo comprende a países de la Unión Europea, sino que la participación en el FP6 está abierta a cualquier país, si bien se aplican distintas modalidades de participación y financiación.

Los proyectos STREP son proyectos con un objetivo muy específico que se encuadra dentro de unas áreas que la Unión considera prioritarias. Los proyectos STREP tienen como objetivo mejorar la competitividad europea o simplemente responder a una necesidad de la sociedad o de las políticas de la Unión Europea; y pueden tener la forma de investigación y desarrollo tecnológico para mejorar los productos, procesos o servicios actuales; o bien proyectos de demostración de nuevas tecnologías sin aplicación directa. Los consorcios para la realización de estos proyectos deben constar de al menos tres entidades diferentes de distintos países, de los cuales al menos dos deben ser estados miembros o candidatos asociados. La duración de estos proyectos suele ser de dos o tres años; si bien excepcionalmente la duración del proyecto podrá exceder de los tres años.

En cuanto a la financiación de estos proyectos, la Unión Europea paga parte de los gastos generados por el proyecto, siempre que estos costes sean debidamente justificados, y hasta un tope pactado en el momento de hacer el contrato. En función de las actividades desarrolladas, la Unión Europea financia hasta:

- El 50 % de los costes de actividades de investigación y desarrollo tecnológico.
- El 35 % de los costes de actividades de demostración de nuevas tecnologías.
- El 100 % de los costes de las actividades de administración del consorcio, siempre y cuando el total de estos costes no sea más del 7 % de la contribución total de la UE.

En nuestro caso, SUPERPROP está encuadrado dentro de la prioridad de "Transporte de Superficie Sostenible", y el área de actividad: "desarrollo sostenible, cambio global y ecosistemas". El objetivo es "diseño y técnicas de producción avanzadas". Los resultados de SUPERPROP contribuyen al desarrollo sostenible dado que al mejorar el rendimiento de la Hidrodinámica de los buques, también se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, contribuye a mejorar las técnicas de producción puesto que las conclusiones del proyecto pueden ser utilizadas para mejorar la vida útil del barco desde las primeras etapas del diseño inicial. Por otro lado contribuye a las políticas de la Unión Europea en cuanto a que se mejora la competitividad del sector naval y las condiciones del transporte marítimo. Finalmente, al estar compuesto el con-

sorcio por socios de cinco países distintos, se fomenta la cooperación entre países europeos.

Hay otros proyectos STREP en marcha dentro del sexto programa marco de la EU. Sin embargo, SUPERPROP es el único dentro del ámbito tecnológico marítimo liderado por un socio español. La lista completa de proyectos está accesible en las páginas de EurOcean (*European Centre for Information on Marine Science and Technology*). Se pueden destacar de entre ellos:

- SHIPMATES. El proyecto está diseñado para proporcionar un entendimiento claro de las mejores prácticas en el sector de la reparación naval y para estimular y trazar un mapa de las actividades de los astilleros de reparaciones y conversiones, con la excepción de las actividades de pintado del casco.
- SHIPDISMANTL. Este proyecto de investigación tiene como objetivos el desarrollo de procedimientos innovadores para el desguace y reciclaje de buques, y desarrollar un sistema de apoyo de decisiones (DSS, del inglés *Decision Support System*) para la industria del desguace de buques. Al final, las herramientas y metodologías propuestas serán validadas mediante el estudio de un caso real.
- SAFETOW. Proporcionará a los capitanes de buques con problemas de gobierno y a los de remolcadores de altura una herramienta de apoyo que les habilitará para tomar decisiones en tiempo real con la mejor información disponible sobre las consecuencias de sus acciones.
- SAFECRAFTS. Investiga nuevos conceptos para la evacuación segura de pasajeros de buques ferry y de cruceros. El objetivo es mejorar los equipos de seguridad existentes así como diseñar nuevos equipos teniendo en cuenta no sólo los factores técnicos, sino también el factor humano.
- ADOPT. El proyecto ADOPT se concentra en la mejora de la seguridad mediante un sistema que analice los datos reales del entorno y realizando una predicción de los movimientos del buque en consecuencia; asegurando, por tanto, un rendimiento óptimo de la tripulación, confiando en una herramienta informática de apoyo de decisiones con una interfaz para ser utilizada a bordo.

3- El consorcio

Como se ha indicado anteriormente, el consorcio final está liderado por la Universidad Politécnica de Madrid, y los socios son: Pescanova, Astilleros Freire y Sistemar de España; INSEAN (canal de Roma) y el grupo Ocean de Italia; Fundilusa de Portugal; VTT de Finlandia y Marintek de Noruega. Se presenta a continuación una descripción breve de la actividad de cada socio y de sus responsabilidades generales en el proyecto:

UPM

El grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la ETSIN, realiza sus actividades en tres campos:

- Investigación y desarrollo. Es el núcleo de la actividad del canal, trabajando sobre códigos CFD para modelar fenómenos hidrodinámicos y validando los resultados mediante la experimentación.
- Formación de ingenieros navales.
- Labores de transferencia tecnológica, participando en proyectos de investigación con diversas empresas del sector naval.

Las tareas de la UPM en SUPERPROP consisten en coordinar todas las actividades, analizar los resultados de los diferentes socios y realizar ensayos numéricos y con modelos físicos.

VTT

VTT es un centro multidisciplinar de investigación en Finlandia, y constituye la organización investigadora más importante de los países nórdicos. La

sección de buques y estructuras marinas ha participado en numerosos programas de investigación europeos. Los objetivos de la sección de Hidrodinámica cubren la resistencia al avance, propulsión, maniobrabilidad, simulación y comportamiento en la mar. Para ello usan códigos numéricos y ensayos con modelos. En este proyecto, VTT se encarga de ensayos con CFD y del diseño de las modificaciones al sistema propulsor.

INSEAN

INSEAN es un canal de experiencias hidrodinámicas italiano. Es un centro público de investigación y depende de los ministerios de Transporte y Defensa italianos. Su principal tarea es el ensayo teórico y práctico de modelos de buques y propulsores. La investigación está orientada al desarrollo e implementación de nuevas técnicas teóricas y experimentales. Sus instalaciones constan de dos canales de ensayos, uno de los cuales está entre los más grandes del mundo, y un túnel de cavitación. INSEAN está implicado en numerosos programas de investigación, tanto nacionales como internacionales. En SUPERPROP, INSEAN se encarga de ensayos con modelos y mediante CFD de las carenas y propulsores de los buques ejemplo.

Marintek

Marintek es una compañía noruega dedicada a la investigación y desarrollo en las actividades marinas. Marintek colabora con la Universidad de Trondheim, y está involucrada en diversos programas de investigación. Las instalaciones del área de Hidrodinámica incluyen diversos canales de ensayos, un túnel de cavitación y un laboratorio de cibernética marina. En este proyecto, se encargan de la realización de las pruebas de mar de los buques ejemplo.

Sistemar

Sistemar S.L. Es una pequeña consultoría especializada en el campo de la resistencia al avance y la propulsión de buques. Proporciona asistencia técnica a diversos astilleros españoles. Sistemar es un líder en el diseño de hélices CLT, habiendo desarrollado una base teórica para el procedimiento de diseño de este tipo de hélices. Esta empresa posee una gran experiencia en el campo de la propulsión, lo que es de gran utilidad para el presente proyecto. Su principal tarea en este proyecto es colaborar con VTT en el diseño de las modificaciones al sistema propulsivo de los buques.

Ocean

Ocean es una de las navieras de remolcadores más importantes de Italia. Su flota incluye remolcadores y buques contra incendios tanto de puerto como de altura, y también poseen instalaciones para el mantenimiento de buques. Algunos de estos remolcadores superan los 30 años de servicio, por lo que la empresa tiene gran interés en el proyecto. La aportación de Ocean a SUPERPROP será su experiencia sobre remolcadores y el propio remolcador ejemplo; así como datos sobre la explotación de estos buques.

Pescanova, S.A.

Pescanova es uno de los principales suministradores de pescado congelado a nivel mundial, y también la primera flota pesquera privada, con más de 120 barcos alrededor de todo el mundo, de los cuales unos 40 tienen una antigüedad suficiente como para beneficiarse de las acciones de mantenimiento a estudiar en este proyecto. Pescanova aporta al proyecto su experiencia en la explotación de buques pesqueros y datos sobre su funcionamiento, además de poner a disposición el pesquero representativo.

Construcciones Navales P. Freire, S.A.

Los astilleros Freire pueden construir buques de hasta 150 metros de eslora, y también realizan mantenimiento y conversiones de buques. En los últimos años se han especializado en el mercado de los grandes buques

pesqueros; y en el de los remolcadores de puerto ha alcanzado las cotas más altas de tecnología con los buques *Spirit* y *Magic*. Freire se encarga en el proyecto de la modificación de los sistemas propulsores y de la limpieza del pesquero ejemplo antes de las pruebas de mar.

Fundilusa

Fundilusa es una compañía portuguesa dedicada a la propulsión naval con reconocido prestigio internacional como fabricante de hélices de calidad; lo que la ha llevado a ser una de las compañías líderes mundiales en este campo. Fundilusa se encargará en SUPERPROP de la modificación o la construcción de nuevos propulsores de acuerdo con las conclusiones del paquete de trabajo de diseño.

4- El modelo tecno-económico

4.1 General

El modelo tecno-económico es la herramienta que nos va a permitir establecer cuál es la mejor de las diferentes alternativas de mantenimiento. Este modelo tiene una serie de entradas (Svensen [16]) a partir de las cuales se estiman las magnitudes económicas asociadas a la explotación del buque desde el punto de vista operacional. A partir de estos valores, se puede evaluar la calidad de las alternativas de mantenimiento desde el punto de vista hidrodinámico en lo que se refiere a rendimientos de las inversiones de mantenimiento. El criterio más usado para establecer la rentabilidad de una inversión frente a otras posibles es el que proporciona el cálculo del valor actual neto o alguna de sus variantes [2] (en adelante, NPV, del inglés *net present value*). El NPV nos da una idea de lo que costaría la explotación del buque en términos de dinero actual, teniendo en cuenta los tipos de interés y la inflación. Existen otros criterios para comparar inversiones con distintos grados de complejidad [4], ya que el NPV presenta problemas con inversiones de diferente duración y de distinta cuantía inicial. Sin embargo, en este caso, dado que lo que se pretende comparar son diferentes estrategias de mantenimiento de un mismo buque, creemos que el NPV, por su simplicidad, es la mejor opción (ver [5] con interesantes ejemplos).

Las entradas necesarias para el modelo utilizado deberían incluir todos los factores que puedan afectar al consumo de combustible y, por tanto, al coste de explotación del buque. Entre estos factores, se pueden distinguir:

- Características del buque, como por ejemplo la velocidad de servicio, las dimensiones, la potencia de la planta propulsora y los servicios que cubre, etc.
- Costes y efectos sobre el rendimiento de las diferentes tareas de mantenimiento.
- Variables económicas como puede ser el precio del combustible o los tipos de interés.
- Consumos de combustible. Esta es la parte más compleja del modelo, puesto que los consumos deben ser calculados a partir de un gran abanico de variables que no se pueden obtener fácilmente, y cuya evolución forma de hecho parte del modelo tecno-económico. De estas variables, las más importantes son la rugosidad del casco y de la hélice, el ensuciamiento o "*fouling*", la condición de carga, la velocidad real del barco, las corrientes y las condiciones meteorológicas y el perfil de la actividad del buque. A continuación, se describe con más detalle algunos de estos elementos, centrándose en el *fouling*, que quizá sea el más crítico, y lo será más en los próximos años.

4.2 Fouling

El ensuciamiento o *fouling* (ver figura 2) es uno de los factores que mayores problemas presenta, puesto que tiene un efecto muy importante sobre la resistencia del casco (entre el 9 y 29 % de acuerdo con Holm et al. [11] para casos muy específicos) y el rendimiento de la hélice y a su vez depende de varios factores como la temperatura del agua, la velocidad del buque y de las características del agua de los puertos en que el barco hace escala.



Fig. 2 Fouling masivo (tomada de [8])

Hasta el año 2003, las pinturas anti-*fouling* más habituales eran las autopolimentantes basadas en el polímero trybutil tin (TBT-SPC). Debido a los efectos colaterales contaminantes de este compuesto [6,19], la Organización Marítima Internacional (IMO) decidió en octubre de 2001 prohibir la aplicación de TBT-SPCs a partir de 2003 y eliminar completamente su uso a partir de 2008.

Existen al menos en principio dos alternativas en el mercado que pueden ofrecer características similares a las de las pinturas con TBT: aquellas que utilizan un principio tóxico basado en cobre y las que son antiadherentes al *fouling* sin ningún principio químico biocida y sí físico [7], tratando de evitar que las incrustaciones se adhieran a las superficies. Las primeras, serán muy posiblemente en un futuro próximo objeto de regulaciones restrictivas similares a las que ahora son objeto las basadas en TBT. Las segundas, a pesar de las continuas referencias a las mismas en la literatura [7,1], no parecen ser muy eficientes desde el punto de vista económico, dada la dificultad de su aplicación y lo frágiles que son a roces y contactos. Pero además, estas pinturas son eficientes solamente para buques de media y alta velocidad y que pasan poco tiempo en puerto; en esta categoría no entran precisamente buques pesqueros y remolcadores, los cuales son el objetivo de este proyecto. Por tanto, parece que el futuro plantea interrogantes difíciles en el tema de los recubrimientos anti-*fouling*, coincidiendo con la escala de precios de combustible, a pesar de las soluciones con agentes anti-*fouling* de origen natural que son objeto de investigación ahora mismo y de resultados prometedores [8].

Además, en el caso del ensuciamiento de origen biológico, o biofouling, como suele ser debido a varias especies distintas, no existe todavía ninguna forma de realizar una cuantificación del mismo que se pueda correlacionar con la pérdida de rendimiento tanto del casco como de la hélice (Townsin [18]), y mucho menos en buques pesqueros o remolcadores.

El *fouling* puede afectar en gran medida a los remolcadores puesto que son buques que pasan la mayor parte de su vida útil amarrados al muelle, y a buques pesqueros, sobre todo a aquellos que operan en aguas cálidas. Los armadores de buques pesqueros afirman que las actuales pinturas anti-*fouling*, a pesar de la prohibición del TBT, son capaces de evitar el *fouling* macroscópico en el casco, limitando el *fouling* a una capa de bacterias que forman un fango que cubre toda la obra viva. Este fango se forma en el plazo de unas semanas y puede tener un efecto importante sobre la resistencia al avance (Bohlander [3]). También es un elemento a tener en cuenta el *fouling* en la hélice, que normalmente no va pintada y produce un doble efecto de disminución del empuje y aumento de la resistencia.

4.3 Otros efectos

Hay al menos dos efectos adicionales importantes que deben ser incluidos en el modelo tecno-económico:

- Cambio en la condición de carga de diseño afectando a la curva de resistencia-velocidad. En buques arrastreros es muy habitual el cambio de aparejos por otros de mayor capacidad, o la introducción de nuevos equipos en cubierta o en el parque de pesca. Esto cambia normalmente de modo significativo los calados y por tanto la curva de resistencia-velocidad del buque, afectando a todo el sistema propulsivo. Estos cambios pueden ser previstos en el modelo, y ponderados con las correspondientes estimaciones [12].

- Modificación de la rugosidad tanto de la carena como de la hélice. La rugosidad afecta a la resistencia del buque y a pesar de la calidad de la limpieza y repintado en las varadas, el buque nunca recupera ya su curva de remolque original [14]. Además, la rugosidad afecta de modo significativo los coeficientes propulsivos, en particular el coeficiente de estela [14]. En la hélice, el cambio de rugosidad por envejecimiento o fenómenos cavitantes locales, modifica no tanto su empuje como que produce un aumento en la absorción de par necesario para conseguir ese empuje, y por tanto, reduce su rendimiento. Sin embargo, se sabe poco sobre cómo es la topografía a nivel de rugosidad de las hélices y menos todavía sobre su evolución con el tiempo.

4.4 Resultados

Para obtener o estimar todas estas variables se puede realizar una monitorización de la flota en la cual habría que tomar datos de todo lo anterior y de consumos de combustible que permitan comparar los consumos calculados con los reales y realizar las correcciones oportunas. Estas correcciones deben tener especialmente en cuenta las condiciones de mar, viento y corrientes, que pueden dar lugar a grandes errores en los resultados. El efecto de las corrientes se puede corregir fácilmente suponiendo que estas sean conocidas. Townsin [17] sugiere que se tomen datos sólo los días en los que las condiciones de mar y viento estén dentro de unos ciertos límites, puesto que es muy difícil cuantificar exactamente el efecto que tienen.

La salida del modelo utilizado, como ya se mencionó anteriormente, es el NPV de dos o más estrategias de mantenimiento. La determinación exacta de cómo van a evolucionar las variables económicas durante un periodo largo como puede ser la vida útil de un buque está más allá de los objetivos del presente proyecto, y por tanto es muy difícil obtener un solo valor del NPV. Una solución a este problema es representar en una gráfica los valores del NPV respecto al valor de una tasa de descuento que incluya el efecto conjunto de los tipos de interés y la inflación. Un ejemplo de estos gráficos se puede ver en la Fig. 3. De esta manera, el armador tiene una idea de a partir de qué valores de esta tasa, una opción es preferible a las demás, y elegir en base a sus propias predicciones. Hay que aclarar que este modelo trabaja con unos planes de mantenimiento fijos, pero que en la realidad, en función de la evolución de la Economía, se puede cambiar el plan inicial de mantenimiento.

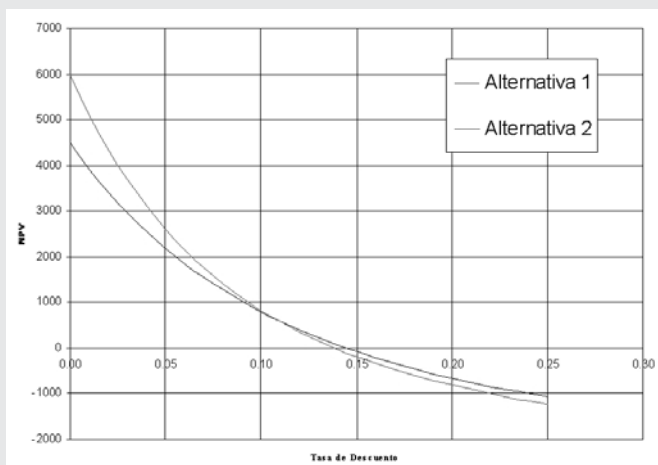


Fig. 3 Gráfico de NPV frente a la tasa de descuento (miles de euros), para dos estrategias de mantenimiento de un mismo buque

5-Tareas ya realizadas

En este momento del proyecto, final del primer año, se ha completado el primer paquete de trabajo WP1, consistente en el análisis de la flota actual y la selección de los buques de referencia, con lo que se han completado los informes 1.1 y 1.2 del proyecto. Los pesqueros y los remolcadores presentan ciertas particularidades que impiden analizarlos como buques convencionales. Así por ejemplo, en el caso de los remolcadores, estos pasan gran parte de su vida amarrados a puerto, lo que provoca un elevado nivel de *fouling*, que además es asimétrico dado que la mayoría de estos barcos atracan siempre por la misma banda. En el caso de los pesqueros, los problemas vienen dados por los cambios en la condición de carga, por lo variado de sus perfiles operacionales a lo largo de su vida, por estar sujetos a condiciones estacionales de veda y control de licencias, etc.

Dentro del WP1 también se analizaron las principales causas del deterioro del rendimiento de los buques antiguos, a algunas de las cuales se ha referido ya. Estas causas son, fundamentalmente, la corrosión, la erosión, las colisiones con distintos objetos flotantes (o los propios aparejos, en el caso de los pesqueros), los procesos de *fouling* y los fenómenos de cavitación. Todo esto contribuye a un aumento de la rugosidad del casco y de la hélice, que es en definitiva lo que hace que aumente la resistencia al avance. Otro factor importante es el propio deterioro de la planta propulsora (de menor importancia dado lo riguroso del mantenimiento), aunque este proyecto se centra sólo en los aspectos hidrodinámicos del problema.

Dado que los fenómenos de cambio de punto de operación son sufridos con más intensidad por buques que monten hélices de paso fijo, el proyecto se ha centrado en este tipo de propulsión. Teniendo en cuenta los datos de la flota, se eligieron dos barcos ejemplo, un pesquero, el *ILA* y un remolcador, el *VAL*. Estos barcos se escogieron porque se consideraron representativos de las características generales de la flota a estudiar y por su disponibilidad para la realización de diferentes pruebas.

El *VAL* (figura 4) es un remolcador de puerto de 27,8 metros de eslora que opera en Trieste-Italia, y fue elegido debido a que la mayor parte de la flota de remolcadores es de puerto, tiene una relación potencia-eslora y potencia-velocidad que se corresponden a las características generales de la flota de Ocean (importante compañía de remolcadores de la zona del mar Adriático), y porque su sistema propulsor es de hélice de paso fijo con tobera, que se corresponde al objetivo de este proyecto. Además, es un barco construido en 1967, por lo que se considera que se podrá beneficiar significativamente de un análisis y puesta a punto de su sistema propulsivo.



Fig. 4 VAL, remolcador representativo, en el puerto de Trieste.

El *ILA* (figura 5) es un arrastrero congelador de 77,1 metros de eslora, y de acuerdo con Pescanova, uno de los barcos más característicos de su flota en Namibia (aunque ahora mismo opere en Malvinas). Además, presentaba ciertas facilidades para la realización de las pruebas de mar ya que está con-

trolado desde la matriz en Vigo. Su sistema de propulsión también es de hélice de paso fijo con tobera, si bien originalmente no tenía tobera y se hizo una modificación para añadirse posteriormente. Este barco se construyó en 1969 y la modificación se hizo en 1982; por lo que también es bastante probable que tenga un margen de mejora significativo. Pertenece a una generación de grandes buques arrastreros similares a él, construidos por Astilleros y Construcciones S.A. a finales de los años sesenta, con unos coeficientes de forma que los hacen buques muy esbeltos para su clase.



Fig. 5 El I/LA, pesquero de referencia, atracado en el muelle de Bouzas-Vigo.

De estos buques se han construido modelos del casco, la hélice y las toberas para ser ensayados en los canales de la UPM y de INSEAN (figuras 6 y 7). La idea es poder comparar los resultados con los que se obtengan tras la actualización del sistema propulsivo. También se han realizado modelos computacionales para realizar estudios mediante CFD, los cuales son responsabilidad de INSEAN y de VTT.

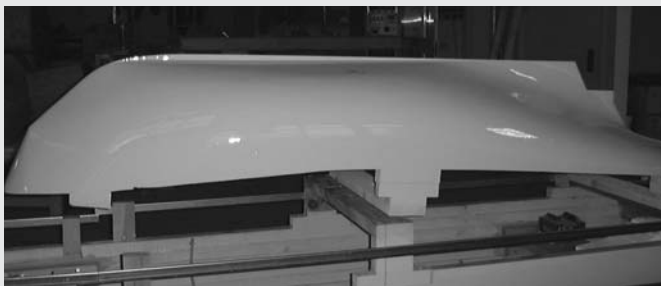


Fig. 6 Modelo del buque VAL



Fig. 7 Modelo de la hélice del buque I/LA

La hélice del I/LA, con y sin tobera, ya ha sido ensayada en aguas libres en el canal de ensayos hidrodinámicos de la ETSIN (figura 8) y tanto la hélice como la tobera serán enviados a Italia para que INSEAN complete los ensayos restantes. El modelo de la hélice del VAL está siendo ensayado en Italia, y al finalizar los ensayos, será enviada a la UPM para realizar los ensayos de aguas libres. En cuanto a los modelos de los cascos, en un principio iban a ser construidos únicamente uno de cada barco en INSEAN, pero se decidió que la UPM construya un segundo juego de modelos para analizar los efectos de escala, dado que serán modelos de distintos tamaños.

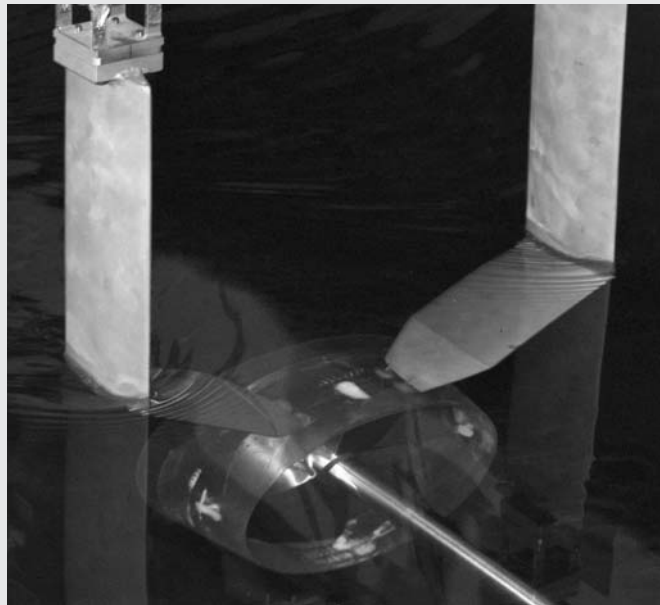


Fig. 8 Ensayo de aguas libres del sistema hélice-tobera del I/LA

Del I/LA se han hecho ya las pruebas de mar, y las del VAL se harán antes del final de mayo de 2006. Para la realización de estas pruebas, el I/LA se varó y se limpió en el astillero C.N. Freire, lo que permitió hacer una primera valoración del impacto del *fouling*. En la figura 9 y en la figura 10, se puede observar la hélice antes y después de la limpieza.



Fig. 9 La hélice del I/LA antes de la limpieza y durante desmontaje.

Uno de los grandes problemas que se plantearon en la fase inicial del proyecto fue la definición de la hélice del I/LA, puesto que no existían planos tras la modificación que sufrió en 1982. Fue enviada a Vilanova da Cerveira al norte de Portugal, donde fue medida en las instalaciones de Fundilusa y después instalada nuevamente en el buque. La medición se realizó tomando

puntos seleccionados en diferentes estaciones radiales, que llevados al modelador 3D Rhino por parte de la UPM permitieron construir un modelo 3D de la misma aunque con una definición insuficiente de los bordes de entrada y de salida (figura 11).

Al realizar la varada del *ILA*, se hizo también una medición del casco y de la hélice mediante láser escáner tridimensional, dado que no se disponía de una definición adecuada de las formas tanto del buque como del propulsor como se ha comentado. Para realizar esta medición, se contactó con el Centro de Ingeniería Mecánica y Automoción de la Universidad de Vigo. Los resultados se muestran en la figura 12.



Fig. 10 Hélice del *ILA* después de limpieza y durante medición en Fundilusa

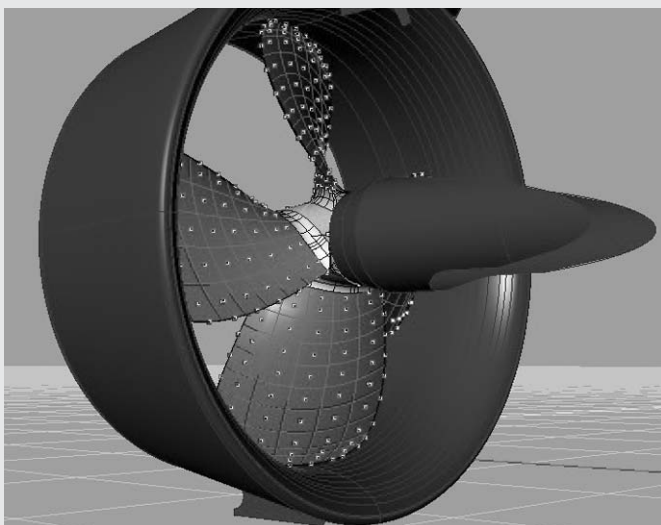


Fig. 11. Modelado de la hélice del buque *ILA*

Por otro lado se ha empezado a trabajar en el desarrollo del modelo tecno-económico, realizando una primera clasificación de las variables que intervienen y se ha empezado a elaborar un pequeño programa en MATLAB que realiza los cálculos económicos. Este programa recibe como entradas los datos económicos de la vida del buque, como pueden ser los costes de mantenimiento y las pérdidas anuales de dinero debido al envejecimiento (entradas que deberían salir de la otra parte del modelo, el análisis técnico del buque en cuestión); y puede trazar curvas como la mostrada anteriormente en la sección de modelos tecno-económicos.

6- Próximas tareas

Una vez que se hayan completado todos los ensayos, se analizarán los resultados comparando los ensayos en canal y numéricos con los resultados de las pruebas de mar. El objetivo de este análisis es la determinación exacta de las condiciones de trabajo de nuestros buques ejemplo. Una vez determinadas las condiciones de trabajo, se analizarán las condiciones de trabajo y se seguirán tres líneas de trabajo. Una consiste en plantear modificaciones a las hélices que puedan mejorar su rendimiento. Estas modificaciones pueden consistir fundamentalmente en disminuir el diámetro de las hélices,

recortar los bordes de salida o disminuir el paso mediante la torsión de las palas [13,14]. En nuestro caso, la disminución del diámetro no parece viable dado que implicaría también una modificación de la tobera. La otra línea de trabajo consiste en el diseño de propulsores completamente nuevos, incluyendo los diseños más innovadores (van Haaren [9, 10]). Finalmente, la tercera línea consiste en diseñar modificaciones locales de bajo coste de la zona de popa para corregir aspectos del flujo que condicionen un incorrecto funcionamiento del propulsor.

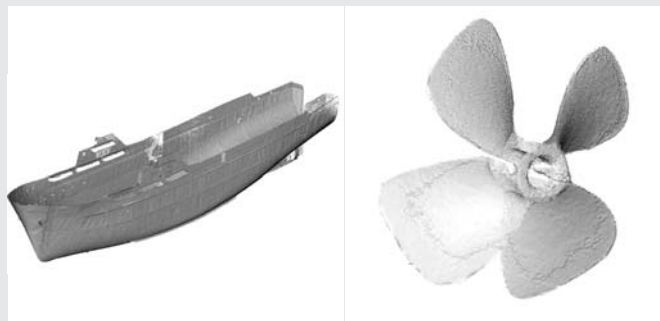


Fig. 12. Representación 3D del casco y de la hélice del *ILA* mediante láser escáner

Una vez completadas las líneas de trabajo, se evaluarán las soluciones propuestas, no sólo desde el punto de vista técnico, sino que también se tendrán en cuenta los costes de las alternativas y su estrategia de mantenimiento futuro. Las alternativas se ensayarán en canal y se estudiarán mediante CFD para validar los diseños, y se procederá a su construcción (o modificación de los antiguos) e instalación en los buques ejemplo. Unas segundas pruebas de mar servirán para cuantificar la mejora del rendimiento del sistema propulsor. Esta información es fundamental para la realización y mejora del modelo tecno-económico.

7- Conclusiones

El proyecto SUPERPROP supone para el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINAV) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) de la UPM el reto más importante al que ha hecho frente a nivel de proyectos de I+D. Es el primer proyecto financiado por la UE en el cual ha conseguido subvención y lidera un consorcio de 9 participantes de diferentes países para realizar actividades de I+D que afectan a sectores de gran importancia para el estado español, como son el de buques de pesca y remolcadores.

La complejidad este proyecto es uno de los grandes desafíos a los que hace frente la UPM, y si bien los problemas no escasean a nivel sobre todo de coordinación y de planificación de los diferentes esfuerzos, en este momento el proyecto está avanzando rápidamente, y es de esperar que en el plazo de seis meses se haya completado toda la fase de ensayos y proyecto de actualización de los sistemas propulsores.

Se espera que los resultados de los ensayos y de la toma de datos en los buques ejemplo permitirán realizar una primera aproximación a lo que será un modelo tecno-económico completo del mantenimiento de buques pesqueros y remolcadores desde el punto de vista hidrodinámico; lo que podría ser de gran utilidad para los armadores ante el escenario energético en el que estamos inmersos y las expectativas en el mismo para los próximos años.

Agradecimientos

Los autores del artículo están especialmente agradecidos a Raimundo Calviño Garrido, concejal de asuntos marítimos y rurales del ayuntamiento de Marín, a Celestino Pastoriza, inspector de Copemar, y a José García y Ricardo Santiago Parada, armador e inspector del Piscator, así como a otros muchos con los que hemos mantenido interesantes conversaciones al respecto durante el último año.

Bibliografía

- [1] Atlar M., Glover, E.J., Candries, M., Mutton, R.J. and Anderson C.D., 2002, *The Effect of a Foul Release Coating on Propeller Performance*, ENSUS 2002: International Conference on Marine Science and Technology for Environmental Sustainability, University of Newcastle-upon-Tyne, 16-18 December 2002, Newcastle-upon-Tyne.
- [2] Benford, H., 1982, *A second look at measures of merit for ship design*. Report, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan.
- [3] Bohlander G. S. 1991. *Biofilm effects on drag: measurements on ships. Polymers in a Marine environment*, 23-24 October 1991.
- [4] Buxton, L., 1972, *Engineering economics applied to ship design*. Trans. RINA, Vol. 114, London.
- [5] Byrne, D. & Ward, G. 1982. *The cost of hull roughness versus the cost of hull smoothness*. Conference on Priorities for Reducing the Fuel Bill. Trans ImarE, 1982. Institute of Marine Engineers. Ref. Paper C98.
- [6] Callow ME, Callow JE., 2002, *Marine biofouling: a sticky problem*. *Biologist*. 49(1):10-4.
- [7] Candries, M., Atlar, M., Mesbahi, E. and Pazouki, K. (2003), *The measurement of the drag characteristics of Tin-free Self-Polishing Co-polymers and Fouling Release coatings using a rotor apparatus*. *Biofouling*, Vol. 19 Supplement: Papers of the 11th International Conference on Marine Corrosion and Fouling, San Diego, Cal., 21-26 July 2002, pp. 27-37.
- [8] Clare, A., 1995, *Natural Ways to Banish Barnacles*. *New Scientist* Feb 18: 38-41.
- [9] Haaren, M.J. van. 2002. *Replacement of fixed pitch propellers*. *Marine News* No. 1-2002, pp 26-31.
- [10] Haaren, M.J. van. 2005. *Replacing fixed pitch propellers - more possibilities for improvements*. *Marine News* No. 1-2005, pp 34-38.
- [11] Holm, E.R., Schultz, M.P., Haslbeck, E.G., Talbott, W.J., Field, A.J., 2004, *Evaluation of Hydrodynamic Drag on Experimental Fouling-release Surfaces, using Rotating Disks, Biofouling*, vol. 20, 4-5.
- [12] Holtrop, J. 1982. *A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data*, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 29, No. 335, Jul 1982.
- [13] Kaizu, G., 1992. *Propeller Modification for Recovery of Decreased Propeller Shaft Speed*. *Bulletin of the M.E.S.J.*, Vo1. 20, No.2, 1992.
- [14] Kresic, M. & Haskell, B. 1983. *Effects of Propeller Design-Point Definition on the Performance of the Propeller/Diesel Engine System with Regard to In-Service Roughness and Weather Conditions*. *SNAME Transactions*, Vol. 91, pp.195-224.
- [15] O'Dogherty, García-Gómez, 1976. *Modificación de hélices, para una utilización satisfactoria a lo largo de la vida del buque*. *Ingeniería Naval*. October 1976, p. 628.
- [16] Svensen, T. 1982. *Techno-economic reasons for selecting fuel saving priorities. Paper presented at the Conference on Priorities for Reducing the Fuel Bill*. Institute of Marine Engineers.
- [17] Townsin, R.L. et Svensen, T. 1980. *Monitoring speed and power for fuel economy*. *Shipboard Energy Conservation '80 Symposium SNAME*, 22-23 Sept. 1980.
- [18] Townsin, R. 2002 *The Ship Hull Fouling Penalty*. *Biofouling* 2003 Vol.19 pp 9-15.
- [19] Uenoa, D., Inouea, S., Takahashia, S., Ikedab, K., Tanakab, H., Subramanianc, A. N., Fillmannd, G., Lame, P.K.S., Zhenge, J., Muchtarf, M., Prudenteg, M., Chunggh, K., Tanabe, S., 2004, *Global pollution monitoring of butyltin compounds using skipjack tuna as a bioindicator*, *Environmental Pollution*, Vol 127, Issue 1, January 2004, Pages 1-12.