

# LA HIDRODINÁMICA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PESQUEROS: RESULTADOS DEL PROYECTO SUPERPROP

Pelayo Álvarez Brasa\*, Joaquín Gallego García\*, Roque Serrano Cañada\*, Juan González Adalid\*\*, Julián Ga. Berrueto\*, Luis Pérez Rojas\*\*, José Luis Cercós Pita\*\*, Daniel Merino Hoyos\*\*, Antonio Souto Iglesias\*\*  
 \*PESCANOVA S.A.  
 \*\*SISTEMAR, S.A.  
 \*C.N.P. FREIRE, S.A.  
 \*\*Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINAV) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Trabajo ganador con el segundo premio en el 48 Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, celebrado en Vigo los días 25 y 26 de junio de 2009.

## Resumen

El proyecto SUPERPROP (*"Superior life-time operation of ship propellers"*) financiado por la Unión Europea dentro del 6º Programa Marco y el único del sector marítimo coordinado por un socio español dentro de este programa, ha llegado a su final. Ha incorporado participantes de diferentes países de Europa, 4 de los cuales son españoles: PESCANOVA, S.A., SISTEMAR, S.A., Astilleros Freire, y el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Creemos que experiencias que tienen que ver con la realización de actividades de I+D dentro de convocatorias competitivas a nivel europeo son acciones necesarias para la dinamización y modernización de la Industria Naval Española. Son por tanto "Actuaciones para ganar el futuro", lema de las jornadas a las que se presenta este trabajo. Se ha tratado en el proyecto SUPERPROP de estudiar, desde el punto de vista de la Hidrodinámica, las condiciones de trabajo de los buques pesqueros y remolcadores de mayor edad de la flota y estimar el impacto en costes de diferentes estrategias de mantenimiento, con el modesto objetivo de optimizar el consumo de combustible apoyándonos en mejores estrategias. En este artículo se documentarán las tareas realizadas para conseguir los objetivos del mismo, que van desde ensayos con modelos, CFD, pruebas de mar hasta la elaboración de un modelo tecno-económico que permita establecer el impacto de las diferentes estrategias de mantenimiento. SISTEMAR y sobre todo PESCANOVA han sido socios cruciales en el proyecto. Uno de los buques más representativos de la flota de PESCANOVA, el arrastrero congelador ILA, ha sido, junto con un remolcador propiedad de un armador de italiano, uno de los dos buques que se han estudiado de modo detallado en el proyecto. SISTEMAR diseñó para este buque una hélice CLT a colocar dentro de una tobera ya existente; se realizaron pruebas de mar antes y después de la instalación de la hélice. Se habían realizado además ensayos en canal tanto en aguas libres como en autopropulsión, y se modelizó computacionalmente la carena del ILA y su propulsor actual mediante CFDs. Con todo ello, se ha conseguido disponer de un banco de datos importante para entender las interrelaciones entre simulaciones, experimentación y plena escala para este tipo de buques. Con la intención de generalizar los resultados obtenidos a otros buques, se ha desarrollado un modelo tecno-económico predictivo y de monitorización. El artículo documentará todos estos aspectos del proyecto, así como impresiones sobre la experiencia de los socios españoles a raíz de su participación en el mismo.

## Abstract

*SUPERPROP project ("Superior life-time operation of ship propellers") financed by the European Union 6<sup>th</sup> Framework Program has come to an end. It has been the only one of the maritime sector coordinated by a Spanish partner within this Program. Partners from several european countries have participated in the project. Four of them are Spanish: PESCANOVA, S.A., SISTEMAR, S.A., Freire Shipyard and the Technical University of Madrid (UPM)*

## Índice

### Resumen / Abstract

- 1.- Introducción
- 2.- El proyecto SUPERPROP
  - 2.1.- Objetivos
  - 2.2.- Tareas
  - 2.3.- El consorcio
- 3.- Actividades Realizadas
  - 3.1.- General
  - 3.2.- WP0 - Gestión y Coordinación
  - 3.3.- WP1 - Análisis de la flota actual, selección de buques-ejemplo
  - 3.4.- WP2 - Estudio de los propulsores y las carenas de los buques ejemplo mediante CFD
  - 3.5.- WP3 - Diseño
  - 3.6.- WP4 - Ensayos de modelos de los propulsores y carenas
  - 3.7.- WP5 - Pruebas de mar.
  - 3.8.- WP6 - Análisis de resultados
  - 3.9.- WP7 - Realización de la actualización del sistema propulsivo de los casos estudiados
  - 3.10.- WP8 - Implementación y difusión de resultados
- 4.- Conclusiones
- 5.- Trabajo futuro
- 6.- Bibliografía

*model basin research group. The authors believe that activities concerning R+D in the framework of EU level calls are necessary actions for the dynamization and modernization of the Spanish Shipbuilding Industry. They are therefore "Actions to win the future", slogan of these technical sessions. One objective of SUPERPROP project has been to study the working conditions of ageing fleets of fishing vessels and tugs from the hydrodynamic point of view. A second objective has been to estimate the costs impact of different maintenance strategies, with the modest aim of optimizing the fuel consumption by applying better strategies. The tasks that have been carried out to achieve these goals will be documented in this article. Thy range model tests, CFD computations, propeller substitution, full scale trials and measurements, and the creation of a techno-economic model that helps in estimating the costs associated to a specific maintenance strategy. SISTEMAR and overall PESCANOVA have been crucial partners for the project. One of the most representative vessels of PESCANOVA fleet, the deepfreeze trawler ILA, has been, together with an Italian shipowner tug, one of the ships that has been deeply studied in the project. SISTEMAR has designed for ILA vessel a CLT propeller to be placed into an already existing nozzle. Full scale trials were performed before and after the propeller installation. Open water and self propulsion tests were also carried out. ILA propeller and hull flows were computationally simulated with CFDs. With all these materials, a very consistent set of benchmark data has been created, which will help to understand the relationships between CFD simulations, model tests and full scale trials for this type of ships. The aforementioned techno-economic model is expected to be useful to generalize the results obtained to other ships of the same kind. This article will document all these topics as well as impressions of the Spanish partners related to their participation in the project.*

## 1.- Introducción

SUPERPROP (*Superior Life-Time Operation Economy of Ship Propellers*) ha sido un proyecto de investigación y desarrollo con financiación por parte de la Unión Europea [6,7,2] que ha tenido lugar entre mayo de 2005 y diciembre de 2008. El proyecto surgió de modo natural a partir de la amplia relación entre el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINAV) de la ETSIN y la empresa PESCANOVA, que transmitió en su momento su preocupación por la situación de los buques de mayor edad de su flota (la mayor naviera privada del mundo en número de unidades) en lo que se refiere a su comportamiento hidrodinámico. Estos buques, debido al envejecimiento y ensuciamiento 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, hidrodinámica-mente 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 alternativas que minimicen el impacto de dichas subidas de precio. SUPERPROP se encuadra dentro de estas iniciativas, de un modo muy modesto, pues pretende no cambios radicales en el sistema propulsivo sino implementar metodologías que permitan tener en cuenta cómo afecta el modo de realizar el mantenimiento desde el punto de vista hidrodinámico a esos costes.

La preocupación general el consumo de los buques y la particular por colectivos específicos, como el mundo pesquero, para los cuales este factor es un porcentaje alto de sus costes operativos, y para el que además es difícil repercutir esos costes en precio, se ha extendido a raíz del incremento del precio del petróleo en los últimos 3 años. Esta subida ha sido parcialmente mitigada recientemente a raíz de la crisis financiera de alcance global que comenzó en septiembre de 2008, aunque la impresión de que esta bajada ha sido coyuntural es general en el sector. Como consecuencia de estas preocupaciones, en España han aparecido diferentes iniciativas para tratar de paliar lo que esa factura del combustible significa en la cuenta de gastos operativos de las empresas armadoras. Algunas de ellas fueron expuestas en la Jornada Técnica sobre Mejoras Tecnológicas y el I+D en la Propulsión de

Buques de Pesca durante la Exposición Internacional NAVALIA 2006 celebrada en Vigo en el mes de mayo de 2006 [6], o mucho más recientemente en la "Jornada sobre la Eficiencia Energética en Buques Pesqueros" realizada durante la feria internacional SINAVAL-EUROFISHING 2009.

La más importante de estas iniciativas por presupuesto, 17 millones de euros (M€), es el proyecto "Peixe Verde"<sup>1</sup>, que parte de la empresa Puerto de Celeiro, accionada por un grupo muy amplio de armadores de la zona. En el proyecto "Peixe Verde" se pretende sobre todo investigar la viabilidad de otros combustibles alternativos y más baratos en su utilización en buques pesqueros. El proyecto empezó en 2005 y tiene plan de trabajo definido hasta 2009. Tiene financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación, de la Consellería de Pesca de la Xunta de Galicia, del IDAE del Ministerio de Industria, etc. Cuenta además con la participación de un total de 25 socios entre empresas, universidades, etc. Otra iniciativa interesante, de ámbito autonómico, en la que el grupo del CEHINAV ha participado en el análisis de obra viva, ha sido el "Programa de eficiencia energética en pesca impulsado por la Fundación AZTI-Tecnalia dependiente del gobierno vasco. Asimismo, interesantísima también ha sido la iniciativa apoyada por la Generalitat Catalana en la misma línea, "Análisis de prácticas y mejoras operativas en pesqueros orientado a la mejora de la eficiencia energética del buque". Estos dos últimos proyectos potencian la idea de auditoría energética asociada a la operación de buques pesqueros. Nos parece importantísimo el tener la voluntad de formalizar estos aspectos en un sector muy profesionalizado pero quizá carente de una vocación clara de optimización del consumo de energía.

En la jornada realizada durante NAVALIA, más arriba referida, tuvimos la ocasión de exponer por primera vez el proyecto SUPERPROP [6]. En este proyecto nos centramos en las flotas más numerosas, la de buques pesqueros y la de remolcadores, los cuales, desde el punto de vista hidrodinámico tienen semejanzas significativas, dado que en ambos casos, el punto de proyecto a bajas velocidades de su sistema propulsivo es crítico. Más tarde publicamos dos referencias adicionales [7,2], que creemos muy interesantes, cubriendo el progreso del proyecto hasta el año 2007 y explicando una acción importante de medida del buque pesquero de referencia, el ILA mediante láser escáner en 3D.

Ha habido además foros internacionales donde presentar iniciativas y trabajos importantes relativos a este tema como la "Conference on Energy Efficiency in Fisheries" organizada por el Comisariado de Asuntos Marítimos y Pesqueros de la Comisión Europea, en mayo de 2006, en la que expertos de muchos países expusieron sus puntos de vista sobre la rentabilidad de empresas pesqueras. Enlazando con esta iniciativa, 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), ya extinguido. SUPERPROP ha estado encuadrado dentro de la prioridad de "Transporte de Superficie Sostenible", para la cual se ha dispuesto de 670 M€ para subvenciones a proyectos. Además, el sector pesquero en particular se puede beneficiar de la prioridad "Calidad y Seguridad de los Alimentos" para la cual se disponían de 735 M€. En el FP7, la prioridad de transporte tiene asignados aproximadamente 1.512 M€ y la alimentaria 1.935 M€. Estos números nos dan una idea de lo importante que puede ser participar en estos proyectos. La participación española está en torno al 5 % del presupuesto total, baja en relación con el peso del país en la UE. Los proyectos STREP, tipología en la que se encuadra SUPERPROP, se caracterizan por tener un objetivo muy específico que se encuadra dentro de unas áreas que la Unión considera prioritarias. Aunque ha habido otros proyectos STREP dentro del FP6, SUPERPROP es el único dentro del ámbito puramente naval liderado por un socio español. La lista completa de proyectos es accesible a través de las páginas de EurOcean (European Centre for Information on Marine Science and Technology). Creemos que experiencias que tienen que ver con la realización de actividades de I+D dentro de convocatorias competitivas a nivel europeo son acciones necesarias para la dinamización y modernización de la Industria Naval Española. Son por tanto "Actuaciones para ganar el futuro", lema de las jornadas a las que se presenta este trabajo. Han sido también ac-

ciones integradoras, afectando al sector naviero, ingeniería, construcción naval propiamente dicha y universidad.

El proyecto SUPERPROP ha incorporado participantes de diferentes países de Europa, 4 de los cuales son españoles: PESCANOVA, S.A., SISTEMAR, S.A., Astilleros Freire, y el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). El proyecto ha tenido un presupuesto total de 2 M€ y una financiación UE de 1 M€. Se ha tratado en este proyecto de estudiar, desde el punto de vista de la Hidrodinámica, las condiciones de trabajo de los buques pesqueros y remolcadores de mayor edad de la flota y estimar el impacto en costes de diferentes estrategias de mantenimiento, con el modesto objetivo de optimizar el consumo de combustible apoyándonos en mejores estrategias. En este artículo se documentarán las tareas realizadas para conseguir los objetivos del mismo, que van desde ensayos con modelos, análisis CFD, diseño y manufactura de nuevos propulsores, instalación de los mismos y pruebas de mar. Uno de los buques más representativos de la flota de PESCANOVA, el arrastrero congelador ILA, ha sido uno de los dos buques que se han estudiado de modo detallado en el proyecto. SISTEMAR diseñó para este buque una hélice CLT a colocar dentro de una tobera ya existente; se realizaron pruebas de mar antes y después de la instalación de la hélice. Se habían realizado además ensayos en canal tanto en aguas libres como en autopropulsión, y se modelizó computacionalmente la carena del ILA y su propulsor actual mediante CFDs.

Con la intención de generalizar los resultados obtenidos a otros buques, se ha desarrollado un modelo tecno-económico predictivo y de monitorización. Desde el punto de vista del armador pesquero, el modelo tecno-económico que ha surgido de SUPERPROP puede ser la herramienta para conocer más detalladamente el perfil operacional del buque y elaborar estrategias de mantenimiento más económicas. Para ello, el armador podrá hacer uso del modelo económico desarrollado como conclusión del proyecto y trabajar con él a partir de una serie de variables que moni-

torizará en la flota. Este artículo documentará también como usando las herramientas que nos proporciona el modelo desarrollado por el proyecto se puede llegar a elegir entre varias estrategias de mantenimiento; 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. El proyecto dispone de una página web en la que se puede encontrar la información que se ha hecho pública relativa al mismo: <http://canal.etsin.upm.es/superprop/>

Este artículo está organizado como sigue: describiremos primeramente las características generales de SUPERPROP, incluyendo una descripción del consorcio y de la estructura de trabajo del sistema. Se entra en la siguiente sección en detalles sobre las actividades realizadas en los paquetes de trabajo, con especial énfasis en el análisis de los resultados relativos al buque ejemplo estudiado, ILA. Finalmente propondremos diferentes líneas de trabajo para el futuro.

## 2.- El proyecto SUPERPROP

### 2.1.- Objetivos

Ante las circunstancias descritas sobre el incremento de costes, el objetivo fundamental de SUPERPROP es elaborar estrategias de mantenimiento de buques relativas a aspectos hidrodinámicos de la propulsión, estimando el impacto en costes de las mismas. Definir las estrategias de mantenimiento en buques pesqueros es al menos tan complejo como hacerlo para buques mercantes convencionales. Para casi todos los buques es un problema de lucro cesante y de no respetar compromisos comerciales el varar para hacer una puesta a punto. Para los buques pesqueros el problema es similar con complejidades adicionales debidas a la variabilidad de su perfil operacional. Para minimizar el impacto económico de operaciones de mantenimiento hay que tener en cuenta hitos importantes en los buques que navegan bajo pabellón de la UE como los reconocimien-

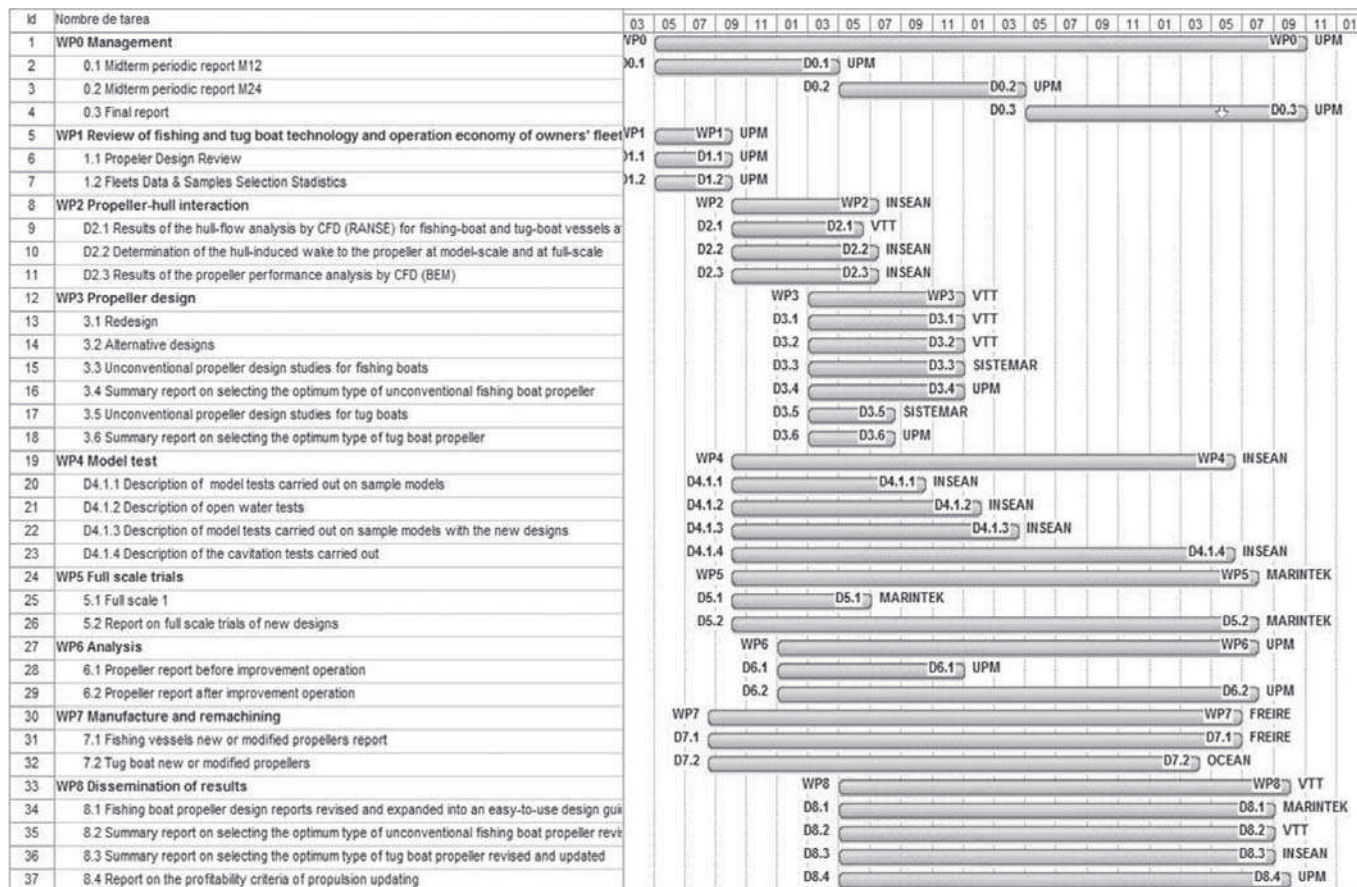


Fig. 1. Distribución de paquetes de trabajo y "deliverables".



tos periódicos obligatorios de la obra viva que se exigen para obtener sus certificados de navegabilidad o similares. A raíz de la relación que existía entre el grupo de investigación CEHINAV de la UPM y PESCANOVA, 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 planta propulsora [5]. A este primer borrador, que contemplaba buques pesqueros y remolcadores, las flotas más numerosas, se unieron varios socios europeos que describiremos más adelante. Los objetivos, de modo más concreto se definieron como:

1. Desarrollo de estrategias y análisis de tipo económico para predecir y mejorar la rentabilidad de operaciones de actualización en las flotas.
2. Mejorar el conocimiento de los sistemas propulsivos operando con envejecimiento sustancial.
3. Impulsar el conocimiento de las técnicas de extrapolación desde escala modelo escala buque.
4. Aplicar códigos CFD para predecir el comportamiento del propulsor, para impulsar el trabajo conjunto de técnicas numéricas y experimentales y para estimar la precisión de ambas técnicas.

## 2.2.- Tareas

El proyecto se ha organizado en una serie de paquetes trabajo (WP – “*working packages*”):

- WP0 - Gestión y Coordinación.
- 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 - Difusión de resultados.

La relación con la UE se establecía a través de la entrega de una serie de documentos (“*deliverables*”) utilizados para la documentación de las actividades correspondientes a los diferentes paquetes de trabajo. Una lista temporalizada de los paquetes de trabajo y “*deliverables*” se muestra en la figura 1. A estos *deliverables* hay que añadir que cada 3 meses hay que elaborar un informe de gestión recopilando datos sobre los esfuerzos en personal utilizados, cada 6 meses se ha de presentar un informe técnico sobre el estado de ejecución del proyecto y cada año se ha de preparar una documentación muy completa de justificación de costes, plan de explotación actualizado, etc.

En general, los objetivos del proyecto se persiguieron eligiendo dos casos tests con los que probar los procedimientos de actualización que fueron seleccionados para dichos casos tests. Esta es una estrategia muy habitual en grandes proyectos de investigación, cuando se trata de sumar las acciones coordinadas de un grupo numeroso de socios. A partir de los análisis de flotas y de los casos tests, se trató de establecer un procedimiento de generalización de resultados.

## 2.3.- El consorcio

Como se ha indicado anteriormente, el consorcio final fue liderado por el grupo de investigación CEHINAV-ETSIN-UPM, 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 [7]. Es de destacar que para los 4 socios españoles, esta ha sido la primera experiencia de participación en un proyecto europeo. Se presenta a continuación una descripción breve de la vinculación de cada socio con las tareas y *deliverables* referidos en la figura 1, así como las impresiones de los socios nacionales al respecto de la participación en el proyecto.

### • CEHINAV-ETSIN-UPM

El grupo de Investigación CEHINAV-ETSIN-UPM, realiza sus actividades en varios paquetes de trabajo, liderando específicamente el paquete de coordinación (WP0), el de “Análisis de la flota actual y selección de buques-ejemplo” (WP1), y el de “Análisis de Resultados” (WP6).

El proyecto SUPERPROP ha supuesto para el grupo de investigación CEHINAV de la ETSIN-UPM un reto tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista de gestión de un proyecto europeo [1]. El nivel de fiscalización que se asume al coordinar un proyecto europeo es alto. La UE asigna un funcionario supervisor (*officer*) a cada proyecto, el cual realiza un seguimiento continuo de la ejecución del mismo. Como se deduce de la figura 1 y de comentarios anteriores, la cantidad de documentación a generar es enorme. A ello hay que unir que se tienen 2 reuniones anuales a las cuales puede asistir el “*officer*”. O sea, que gestionar toda esta documentación es en sí mismo una tarea de grandes proporciones, que ha puesto a prueba nuestra estructura de gestión de proyectos.

### • PESCANOVA, S.A.

PESCANOVA es uno de los principales suministradores de pescado congelado a nivel mundial, y también la primera flota pesquera privada, con algo más de 120 barcos pesqueros, cuya edad media ronda los 27 años por lo que se beneficia directamente de las conclusiones obtenidas por Superprop. La flota opera en África, América y Oceanía y está constituida por buques arrastreros, palangreros, tangoneros, naseros y poteros que operan en el Océano Pacífico, Atlántico e Indico. Asimismo dispone de algún buque especializado en el transporte de pescado vivo (*well boat*). El grueso de la flota lo componen buques arrastreros y tangoneros, cuya edad y características técnicas los convierten en beneficiarios directos de las conclusiones obtenidas por SUPERPROP. 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 que sirve de modelo en el programa. PESCANOVA ha participado en los paquetes de trabajo 1, 5, 7 y 8. PESCANOVA tiene una impresión positiva de la experiencia aunque se piensa que se tenía que haber sido quizá más ambicioso en el planteamiento inicial del proyecto. En cualquier caso, el incremento de know-how en diferentes aspectos ha sido muy significativo y valioso para el equipo técnico de flota de la empresa.

### • CONSTRUCCIONES NAVALES P. FREIRE, S.A.

Astilleros FREIRE ha sido el líder del paquete de trabajo 7, “Realización de la actualización del sistema propulsivo de los casos estudiados”. El hecho de que su participación estuviese restringida a un único paquete de trabajo ha facilitado su participación. Su impresión ha sido positiva y les ha permitido además estrechar los lazos comerciales con PESCANOVA.

### • SISTEMAR

Diseñador español de referencia de propulsores y propietarios de la patente CLT. Ha liderado a efectos prácticos el paquete de trabajo de Diseño (WP3), y participado además en el paquete de “Análisis” (WP6), y “Difusión de Resultados” (WP8). Su experiencia en el proyecto ha sido positiva permitiéndoles incrementar de modo notable su know-how en aspectos de correlación numérica y experimental relativos a sus propulsores CLT.

### • INSEAN

INSEAN es administrativamente el equivalente italiano al Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Ha liderado los paquetes de trabajo 4 (Ensayos a Escala) y 2 (simulación con CFD) y ha participado además en los paquetes 3 y 8. Ha sido uno de los socios más importantes del proyecto, y una experiencia muy importante para CEHINAV el poder realizar ensayos en paralelo con ellos de modelos de hélices y buques.

## • OCEAN

Una de las navieras de remolcadores más importantes de Italia. Ha participado en los paquetes 1, 5, 7 y 8.

## • FUNDILUSA

Compañía portuguesa con reconocido prestigio internacional como fabricante de hélices tanto de paso fijo como variable, y con una cuota de mercado que la sitúa entre los primeros puestos de las fundiciones europeas. FUNDILUSA ha tomado parte en los paquetes 3 y 7, encargándose de la fabricación de los propulsores.

## • VTT

Centro multidisciplinar de investigación en Finlandia. Ha liderado formalmente el paquete de trabajo 3 (Diseño) y el 8 (Difusión de resultados).

## • MARINTEK

Compañía noruega de capital público y privado dedicada a la investigación y desarrollo en las actividades marinas. Ha liderado el paquete de trabajo 5 (Pruebas de Mar) y ha participado además en los paquetes 6 y 8.

### 3.- Actividades realizadas

#### 3.1.- General

En el momento en que escribimos este artículo, todas las actividades del proyecto han concluido; sólo quedan aspectos relativos a recepción de informes por parte del UE, y consiguiente redistribución de la parte final de la financiación, la cual se recibe una vez terminado el proyecto. Pasamos a describir las actividades realizadas, poniendo énfasis en aquellas que juzgamos de mayor interés para los objetivos de estas sesiones.

#### 3.2.- WP0 - Gestión y Coordinación

Coordinar un proyecto europeo es, como se comentaba en la sección anterior un esfuerzo enorme. Es todavía más grande si se hace la primera vez que se participa, ya que lo habitual es primero entrar en algún proyecto como participante, pero dado que eso no sucedía, CEHINAV-UPM tuvo que dar el paso. A pesar de las dificultades, desde el CEHINAV creemos que hemos realizado una labor buena, presentando en plazo la documentación de gestión y con pequeños retrasos parte de la documentación técnica. De todos modos, corresponde al resto de los socios sobre todo el dar su opinión al respecto.

#### 3.3.- WP1 - Análisis de la flota actual, selección de buques-ejemplo

##### 3.3.1.- General

Este WP se completó en Octubre de 2005. Se seleccionaron dos buques ejemplo para el proyecto. Para ello, se realizaron las siguientes acciones:

1. Los armadores PESCANOVA y OCEAN proporcionaron la información necesaria para la selección de estos casos.

- Consumo de combustible a lo largo de la vida de los buques.
- Estimaciones sobre la vida operativa.
- Costes de mantenimiento.
- Costes de reparación.
- Estancias en astilleros.
- Problemas habituales en el sistema propulsivo.
- Datos de actividad, estancia en puerto, y tiempos operativos reales.

2. Se realizó un estudio del proceso de diseño y del estado del arte a mediados de los años 70, época en la que la mayor parte de la flota objeti-

vo fue construida. También se realizó un estudio en las causas principales de envejecimiento para buques pesqueros y remolcadores, con especial atención en los siguientes efectos:

- Erosión.
- Corrosión.
- Colisiones.
- Fouling.
- Cavitación

3. Se elaboró una lista de soluciones posibles:

- Limpieza del casco con agua presurizada. No tiene inconvenientes en lo que respecta al medio ambiente.
- Limpieza del casco con arena.
- Corrección de la hélice por reducción de diámetro.
- Corrección de la hélice por reducción de paso o corte del borde de salida.
- Instalación de un nuevo propulsor.
- Modificación de las formas de popa, mediante la introducción de flaps o modificación de apéndices para mejorar el sistema propulsivo.
- Limpieza del propulsor mediante técnicas erosivas.

4. Se detectaron mejoras viables en el sistema propulsivo. Para ello, se reunió información sobre como se había diseñado el propulsor original, diseño en el que se habían utilizado las series sistemáticas Wageningen 19A+Ka.

5. Se elaboraron perfiles operacionales de los buques de las flotas de PESCANOVA.

6. Se elaboraron tablas de comparación estadística entre los casos test seleccionados y los correspondientes a las flotas europeas, utilizando la información disponible en la UE y a nivel nacional.

7. Se elaboró un informe detallado en aspectos económicos de la propulsión de los casos de referencia elegidos en la línea de lo señalado en el punto 1.

8. Se seleccionó a partir de esta información un buque pesquero de referencia (y un remolcador), cuyas características son las siguientes (figs. 2, 3).

- Arrastrero congelador ILA.
- Número IMO: 6819104.
- Año de construcción: 1969.
- Eslora total: 77,1 m.
- Eslora entre perpendiculares: 67,0 m.



Fig. 2. El buque ILA en la Ría de Vigo durante las pruebas de mar finales de SUPERPROP. Durante la realización del WP1 se trataron de modo indirecto diferentes asuntos importantes para el desarrollo del proyecto, los cuales pasamos a comentar.

- Manga: 12,0 m.
- Calado: 7,5 m.
- GT: 1395.
- MCR: 1990 kW a 375 rpm. Factor de Reducción 1.5.
- Tipo de propulsor: Paso fijo con tobera. Rpm nominales: 250
- 4 palas.
- Diámetro: 2.600 mm.

3.3.2.- Herramientas de monitorización existentes

En el gráfico 4 podemos observar los diferentes factores que afectan la eficiencia del buque. El modelo tecno- económico que ha surgido de SUPERPROP tiene la opción de estudiar la eficiencia del buque a partir de la monitorización y estimación de la evolución de los parámetros y fenómenos, que aparecen en dicha figura, calculando la rentabilidad de una estrategia de mantenimiento cuya bonanza medirá el modelo utilizando el valor actualizado neto. Dada la diferencia de perfiles operacionales que encontramos en los buques pesqueros, se hace realmente difícil relacionar el aumento del consumo de combustible con el aumento de resistencia añadida y la pérdida de eficiencia del buque.

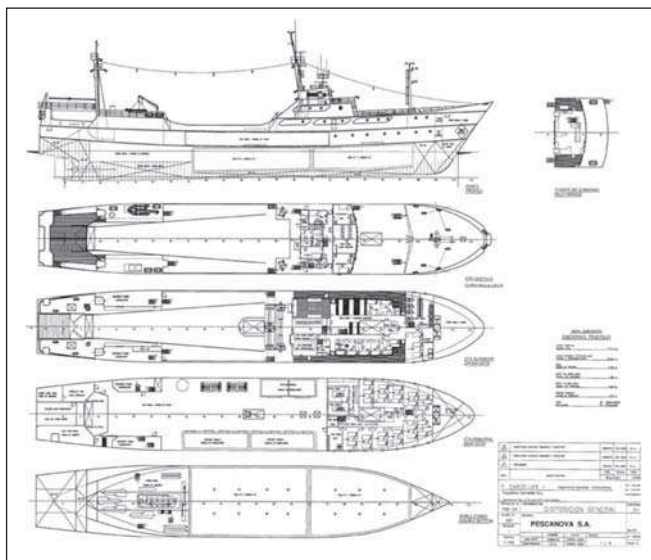


Fig. 3. El buque ILA (disposición general)

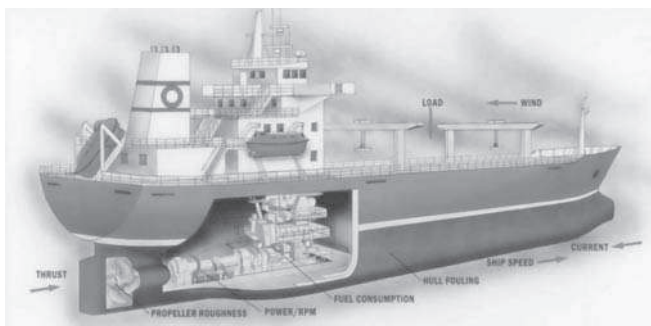


Fig. 4. Factores que afectan a la eficiencia hidrodinámica

En el caso de los pesqueros es difícil discernir qué consumo de combustible corresponde al motor principal y cual a los auxiliares. El uso de caudalímetros en motor principal y auxiliares podría acercarnos a conocer mejor cual es el perfil operacional del buque. Si logramos conocer dicho reparto de consumos y ligarlo con los perfiles operacionales de navegación libre, pesca, estancia en puerto y reparaciones, podremos desarrollar un período estadístico para pesqueros.

Durante la fase inicial del proyecto SUPERPROP se estudiaron otras herramientas de monitorización existentes en el mercado, especialmente las que

facilitan los fabricantes de pinturas, la herramienta CASPER de Propulsion Dynamics (fig. 5), que ayuda en el seguimiento de la evolución de la rugosidad o el potente "SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CONSUMOS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN BUQUES" P&EMS, creado por la empresa gallega VICUS, que permite centralizar la información procedente de multitud de sensores en el buque (torsiómetros, caudalímetros, etc.).

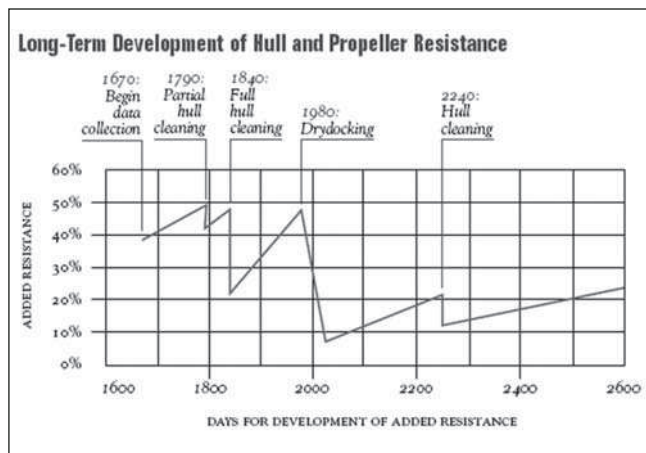


Fig. 5. Salida de la herramienta de monitorización CASPER

3.3.3.- Control de consumos mediante caudalímetros

Aunque en este proyecto no se han implementado, es de crucial importancia para que el modelo siga creciendo monitorizar el consumo de combustible a bordo. Una forma de hacerlo sería integrando caudalímetros en motor principal y auxiliares, calculando el consumo real, es decir, el diferencial entre consumo total y pérdidas por reboses. Para minimizar los costes de integrar los caudalímetros, debíamos instalar caudalímetros no invasivos (proporcionan medidas fiables y tienen un coste bajo de instalación) y tratar de relacionar las medidas que obtengamos con los períodos operacionales que nos ofrece el modelo, pudiendo conocer así como afectan los consumos al buque en cada uno de los períodos y que incidencia tienen sobre los mismos. Este tema queda como trabajo futuro.

3.3.4.- Fouling

El ensuciamiento o *fouling* es uno de los factores que mayores problemas supone, puesto que tiene un efecto muy importante sobre la resistencia del casco (entre el 9 y 29 % de acuerdo con Holm et al.[3] 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. Es difícil establecer su impacto en la operación de buques pesqueros y remolcadores pero sería muy importante elaborar herramientas y técnicas sistemáticas para su monitorización, y su influencia en la operación de los buques a estudiar. Se han tratado de establecer controles durante las varadas pero este tema, muy relacionado con los esquemas de pintado quedará para investigaciones futuras.



Fig. 6. ILA, información del scanner 3D.



3.3.5.- Cambio de la condición de carga

Durante la etapa inicial del proyecto se valoró la importancia del cambio de la condición de carga de diseño durante la vida útil del buque, 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 [4].

3.3.6.- Modificación de la rugosidad

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 [5]. Además, la rugosidad afecta de modo significativo los coeficientes propulsivos, en particular el coeficiente de estela [5]. 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. En el modelo tecno-económico se han considerado diferentes posibilidades para tener en cuenta la evolución de la rugosidad.

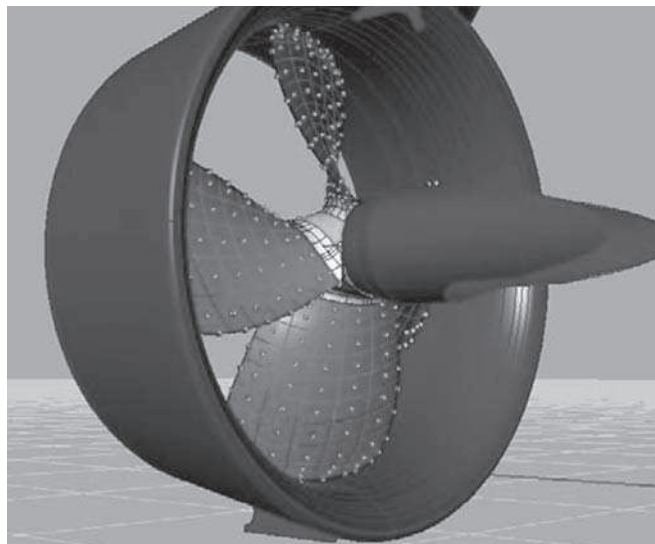


Fig. 7. ILA, modelado de la hélice y tobera a partir del scaneado 3D.

3.3.7.- Definición de formas

Con buques de cierta edad, suele suceder que la definición de formas está incompleta. Eso sucedió con el buque ILA y realizamos un escaneado en 3D completo del buque (figs 6, 7) en colaboración con la universidad de Vigo. Una descripción de estas acciones se encuentra en la referencia 2.

3.4.- WP2 - Estudio de los propulsores y las carenas de los buques ejemplo mediante CFD

3.4.1.- General

La importancia de la simulación numérica en Hidrodinámica es creciente. Se ha convertido en una herramienta muy competitiva para solucionar muchos problemas durante el diseño. En el caso de la definición de formas y comportamiento del propulsor, esto es más importante todavía dada la dificultad de la física de estos problemas. La precisión de los CFDs ha de ser comprobada comparando mediante resultados experimentales o analíticos. Como en este proyecto se han realizado pruebas a escala y pruebas de

mar, se dispone de un banco de datos para realizar esas comparaciones, las cuales, con esta triple vertiente son poco habituales en buques pesqueros. Se han utilizado dos tipos de códigos durante el proyecto:

- BEM (*Boundary Element Method*)

Se ha utilizado de modo satisfactorio un código BEM desarrollado por INSEAN para el cálculo de propulsores en tobera. Utiliza flujo potencial con configuraciones 3D en flujos uniformes o no uniformes. Es un código rápido. La precisión de los resultados para el propulsor del ILA fue muy buena (figura 8).

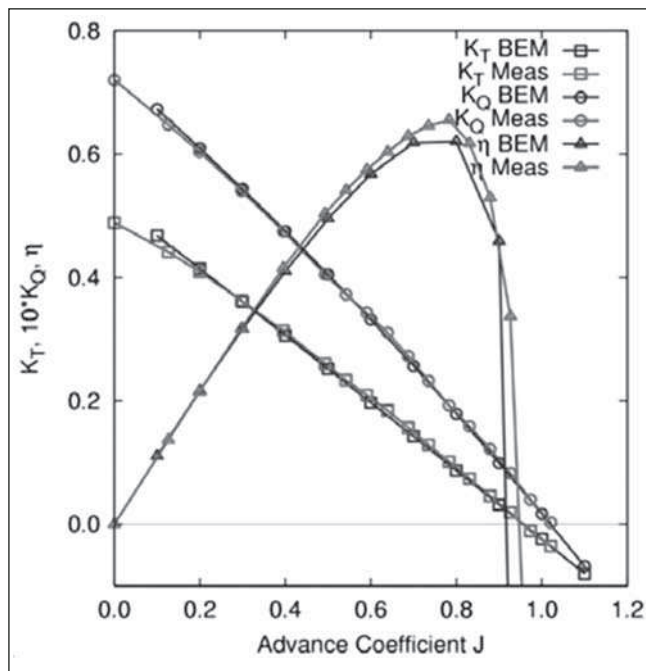


Fig. 8. Curva de propulsor aislado del ILA (experimentos INSEAN y resultados BEM)

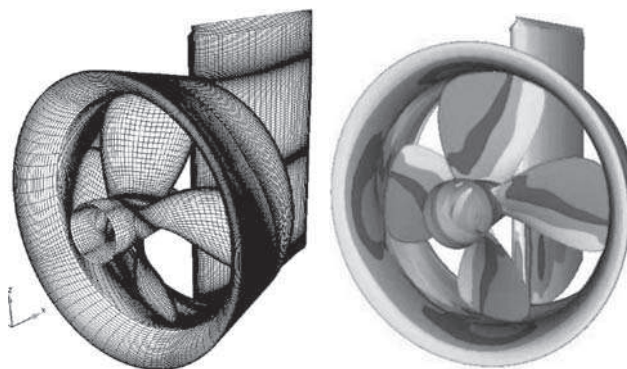


Fig. 9. Análisis RANS del propulsor original del ILA por parte de VTT FINNFLO

- RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*)

Se han utilizado códigos RANS para el estudio detallado del propulsor, pero sobre todo para las estimaciones de resistencia al avance, incorporando un modelo de turbulencia. Para el ILA, se ha utilizado el código FINNFLO de VTT. El análisis ha proporcionado suficiente información como para identificar los aspectos a tener en cuenta para el nuevo diseño. En particular, se han identificado áreas de bajas presiones y otras áreas de interés desde el punto de vista de la cavitación, como zonas de desprendimiento de flujo y zonas de alta vorticidad. Los cálculos revelaron la aparición de un fuerte efecto de bloqueo del propulsor debido al efecto del timón (figura 9).

Para diseños nuevos, cuantificar este efecto de bloqueo es muy importante para la realización de un buen diseño.

Los resultados de estos cálculos se presentaron de modo detallado en las referencias 8 y 9.

**3.4.2.- Medida de la resistencia mediante CFD**

VTT realizó cálculos muy interesantes relativos al buque ILA que mostraron muy buena precisión al comparar los resultados con los de los modelos a escala, como se puede observar en la tabla siguiente:

Velocidad (kn)	4	14
CT CFD VTT * 10 <sup>3</sup>	4,76	5,93
CT EXPERIMENTOS	4,92	6,11

Tabla 1: Coeficiente de resistencia total del ILA

También se compararon cortes de ola, con datos experimentales, con buenos resultados en amplitud de ola y dispersión (fig. 10)

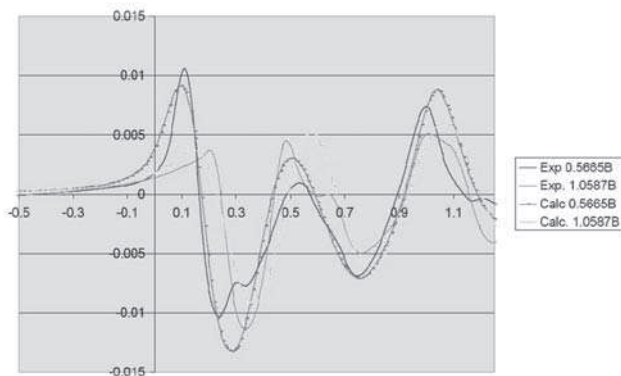


Fig. 10. Cortes de ola del ILA por parte de VTT FINNFLO y experimentos en UPM

**3.4.3.- Análisis de cavitación**

INSEAN realizó simulaciones con códigos BEM relativos a inyección de cavitación demostrando que los nuevos propulsores tienen una mejor distribución de presiones, y por tanto, menor riesgo de cavitación. En la figura 11 se puede observar el patrón de presiones en el propulsor original y modificado, pudiéndose comprobar cómo la extensión de cavitación es inferior.

**3.5.- WP3 – Diseño**

**3.5.1 General**

A raíz de las pruebas de mar, las cuales se documentarán más adelante, se acordó que la solución hidrodinámica de actualización más adecuada era

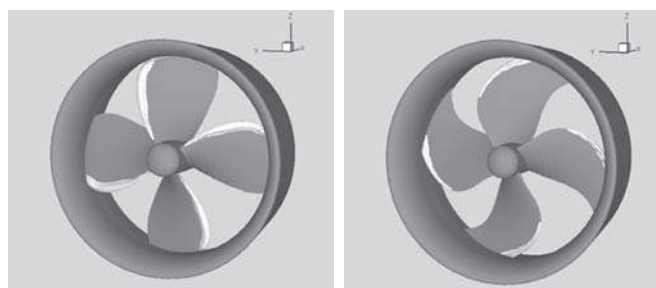


Fig. 11. Simulación de inyección de cavitación en propulsor original y modificado

el diseño de un nuevo propulsor, actividad realizada dentro del WP3. Este WP fue liderado formalmente por VTT pero las actividades de diseño fueron sobre todo realizadas por SISTEMAR. Para el buque ILA, con vocación de probar soluciones innovadoras, se instaló una hélice CLT. Aunque en un primer intento se obtuvieron mejoras en lo que respecta a cavitación, las mejoras en rendimiento no existían. Debido a ello, se corrigieron algunos aspectos del diseño para tener la solución final. Pasamos a describir algunos aspectos de la misma.

**3.5.2.- Diseño de la hélice para el buque ILA**

Después de analizar las pruebas de mar con el propulsor original (2006) se dedujo que el propulsor estaba trabajando con exceso de paso, debido a sobrecarga por envejecimiento combinada con un diseño original quizá no muy adecuado. Esta deducción se basaba en que el propulsor estaba trabajando a rpm muy inferiores a sus nominales.

Por tanto se cambió el punto de funcionamiento para realizar el nuevo diseño. Se decidió, para proteger el motor, que el nuevo propulsor absorbería el 85 % MCR (0.85\*1.990=1.691kW) a sus rpm nominales (250) en marcha libre. Debido a estas condiciones operativas, no pueden esperarse grandes mejoras en marcha libre, pero sí mejoras sustanciales en cavitación y funcionamiento del motor. Los resultados en rendimiento no fueron satisfactorios y se decidieron pequeños cambios en el punto de funcionamiento y valor de la relación área disco para corregir los mismos, procediéndose a la realización de un nuevo diseño (fig. 12), que es el que finalmente construido a plena escala. Los valores de los parámetros de los tres propulsores se pueden observar en la tabla 2.

MAIN CHARACTERISTICS		Existing	New design	New design
		propeller (E.1622)	1st release (E.1625)	2nd release (E.1627)
Number of blades	Z	4	4	4
Propeller diameter	D (m)	2,6	2,57	2,56
Boss diameter	d (m)	0,516	0,5	0,52
Pitch at 0.7R	p (m)	2,463	2,29	2,528
Chord length at 0.75R	c (m)	1,09	0,98	0,99
Boss diameter ratio	d/D	0,198	0,1949	0,2028
Pitch ratio	p/D	0,947	0,893	0,986
Projected blade area ratio	AP/A0	-	-	-
Expanded blade area ratio	AE/A0	-	0,6784	0,7

Tabla 2: Características de las hélices originales y modificadas para el ILA

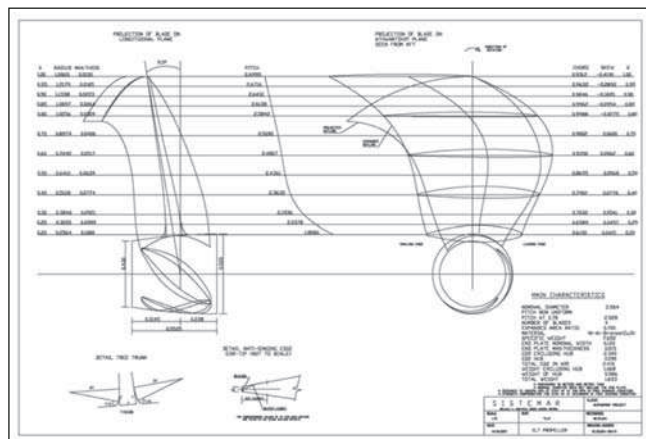


Fig. 12. Diseño final de la hélice CLT para el ILA



### 3.6.- WP4 - Ensayos de modelos de los propulsores y carenas

#### 3.6.1.- General

El papel de los ensayos con modelos es fundamental para entender el funcionamiento y eficiencia de los modelos de propulsores. En el proyecto SUPERPROP se ensayaron los propulsores originales y dos alternativas para cada uno de los casos test. La mayoría de los ensayos fueron realizados por INSEAN, y consistieron en resistencia, propulsión, arrastre, tiro a punto fijo, aguas libres, y aguas libres con tobera. UPM realizó también aguas libres y aguas libres con tobera, así como un ensayo de resistencia a otra escala, para estudiar los efectos de escala durante los ensayos. Pasamos a describir los resultados de dichos ensayos para el buque pesquero de referencia.

#### 3.6.2.- Remolque

En la figura 13 se muestran los resultados de los ensayos de remolque realizados a escala 12 en INSEAN (fig. 14) y a escala 25 en el canal CEHINAV-UPM. La coincidencia de resultados extrapolados a plena escala es muy alta, lo que demuestra la capacidad de CEHINAV-UPM para realizar este tipo de ensayos.

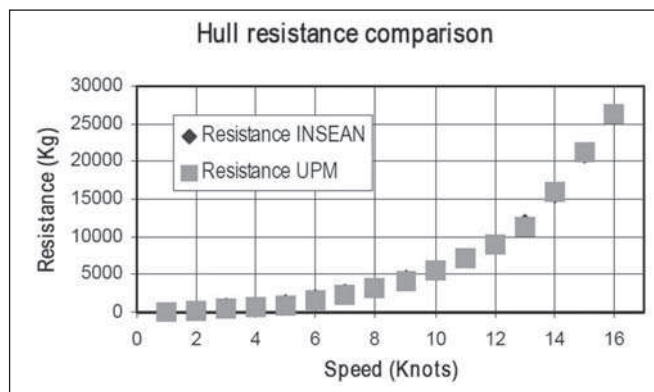


Fig. 13. Ensayos de resistencia realizados en INSEAN y en CEHINAV-UPM

En las figuras 15 y 16 se muestran los modelos del propulsor original y del diseño final. En la 17 se observan los resultados obtenidos en paralelo para el propulsor original por parte de la UPM y de INSEAN, tanto en aguas libres como en tobera.

Estos resultados nos han permitido calibrar nuestro recientemente instalado nuevo ensayador de aguas libres, aunque UPM no ha podido llegar a un número de Reynolds tan alto como INSEAN. En la figura 18 se muestran los resultados de los tres propulsores, donde se aprecia el efecto de aligeramiento de los nuevos propulsores.

También es interesante comprobar la buena correlación en los ensayos a punto fijo. Se ha discutido en el proyecto sobre un aspecto muy importante como es la extrapolación de resultados correspondientes a una CLT. El tema no está claro y menos cuando es una CLT en tobera. Este es un tema que quedará abierto a raíz de este proyecto.



Fig. 14. Modelo del ILA en INSEAN y en UPM

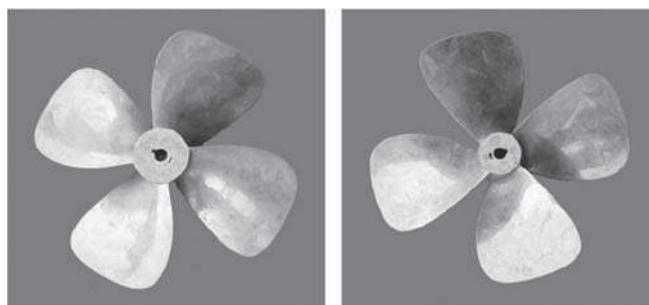


Fig. 15. Modelo de la hélice original del ILA (caras presión y succión)

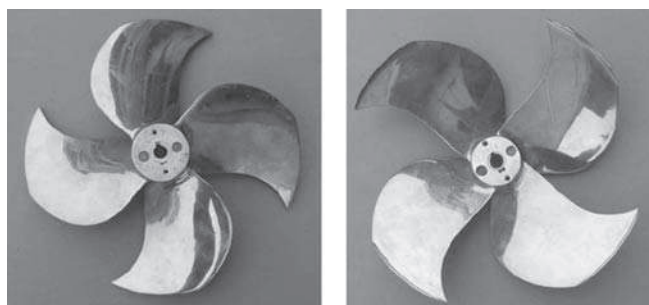


Fig. 16. Modelo de la hélice CLT para el ILA (caras presión y succión)

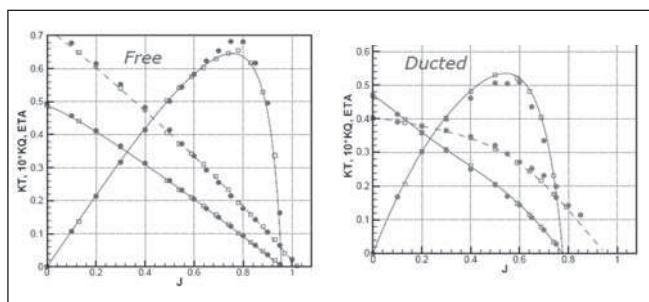


Fig. 17. Ensayos de aguas libres del propulsor original del ILA en UPM (puntos llenos) e INSEAN

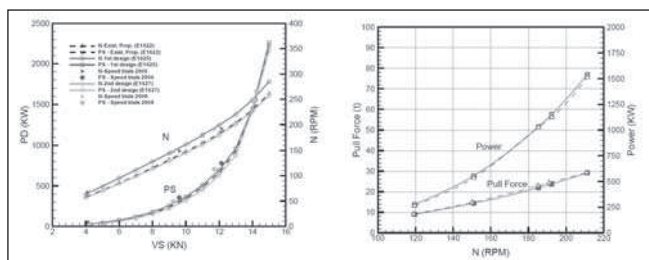


Fig. 18. Resultados para el segundo diseño (E1627), primer diseño (E1625) y existente (E1622)

A la derecha, resultados de tiro a punto fijo con el propulsor original

### 3.7.- WP5 - Pruebas de mar

#### 3.7.1.- General

Para la realización de estas pruebas, el ILA se varó y se limpió en el astillero C.N. FREIRE, con lo que se fijó de este modo una condición de pruebas que pudiese ser repetida después de las transformaciones. El responsable de las pruebas de mar fue MARINTEK. Las pruebas fueron el hito inicial a partir del cual empezar a pensar mejoras al sistema propulsivo, y proporcionaron información crucial para establecer la calidad de las acciones realizadas. Aunque son muy importantes, su altísimo precio las hace prohibitivas. Deberían ser desarrolladas técnicas más sencillas para su realización. Las pruebas iniciales fueron realizadas en octubre de 2005 y las finales en

junio de 2008. Dichas pruebas incluían pruebas de arrastre, velocidad y tiro a punto fijo. Se siguieron los protocolos ITTC correspondientes.

En la prueba de velocidad, el barco navega a diferentes regímenes de velocidad durante los cuales se monitorizan potencia en el eje y vueltas del propulsor. En la prueba de arrastre, se registran igualmente potencia en el eje y vueltas del propulsor con el buque arrastrando la red a diferentes regímenes de velocidad. En la prueba de tiro a punto fijo, el buque realiza tiro a punto fijo a diferentes regímenes de velocidad registrando, aparte de los parámetros anteriores también la fuerza de tiro, medida mediante un dinamómetro. Se trata de que las condiciones de medida sean lo más similares posible entre las dos pruebas. Los presentamos en la tabla 3.

	Oct 2005	Jun 2008
Temperatura del agua:	16 °C	16,5 °C
Densidad del agua:	1.026 kg/m <sup>3</sup>	1.029 kg/m <sup>3</sup>
Calado marcas proa:	2,45 m	2,40 m
Calado marcas popa:	4,75 m	5,10 m
Profundidad en la prueba a punto fijo.	15 m	20 m
Profundidad en arrastre:	157 m	160 m
Profundidad en pruebas de velocidad:	37 m	40 m

Tabla 3: Condiciones de las pruebas de mar del ILA

La diferencia en calado entre las dos pruebas podría no ser despreciable. Supone un aumento del desplazamiento del 6.9%. Es posible estimar su efecto en la potencia mediante el Coeficiente de Almirantazgo CA. Si D1, D2 son respectivamente los coeficientes durante las pruebas, este coeficiente se puede calcular del siguiente modo:

$$CA = (D2/D1)^{2/3} = (1834,5/1716,1)^{2/3} = 1.0455$$

La potencia medida en las segundas pruebas debería ser de este modo reducida en un 4,55 %. Se valoró incluso hacer ensayos de remolque para valorar su influencia, lo cual al menos exigía MARINTEK para modificar las conclusiones de sus pruebas de mar pero esto quedará como trabajo futuro. Además, se dispondrá de información durante la vida útil del buque (de alguna se dispone ya que luego comentaremos). En la figura 19 se presenta una comparación de resultados para la prueba de velocidad, en la cual se aprecia que prácticamente se alcanzaron las revoluciones nominales, con una potencia similar a igualdad de velocidad. El barco lleva ya 10 meses navegando desde la realización de las pruebas y la impresión general por parte de la tripulación es muy positiva. Uno de los coautores (Roque Serrano Cañada) acaba de estar 3 semanas de prueba con el barco en alta mar y

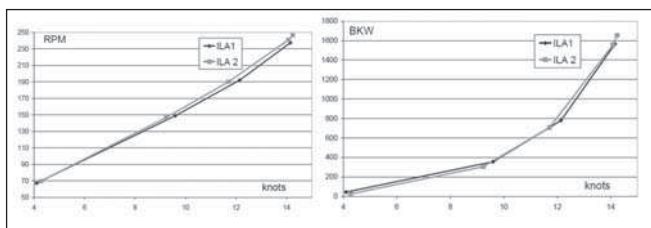


Fig. 19. Pruebas de mar del ILA (velocidad - RPM), (velocidad - BKW)

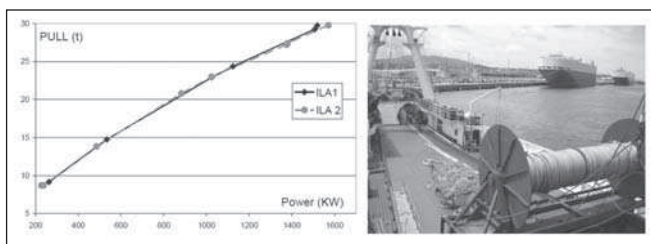


Fig. 20. Pruebas de tiro a punto fijo del ILA.

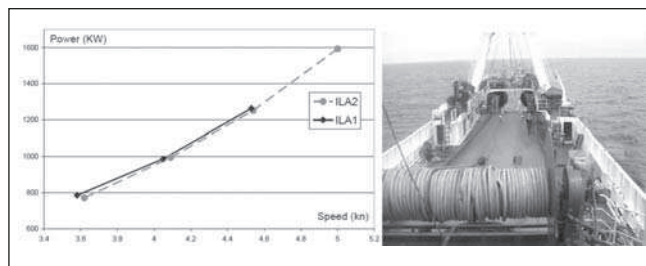


Fig. 21

el barco está funcionando mejor en marcha libre y en arrastre. Estamos documentando estos aspectos de modo riguroso. Las pruebas de tiro, arrojaron resultados también muy similares (figura 20). Finalmente, se realizaron también pruebas de arrastre en las que se puede observar una ligera mejoría (figura 21). En general en las segundas pruebas, el motor se comportó de modo más suave, mostrando un mejor acoplamiento con el nuevo propulsor. No se tomaron en cualquier caso medidas de vibraciones y ruido, algo que hubiese sido muy interesante para el proyecto.

### 3.8.- WP6 - Análisis de resultados

#### 3.8.1.- General

El paquete de análisis, liderado por UPM, contribuyó a mejorar las actividades de coordinación, y permitió establecer objetivos científicos y técnicos razonables durante la vida del proyecto. Sus resultados se reflejan en el presente artículo en el que se presenta una visión general del mismo, y en las conclusiones finales del proyecto, redactadas principalmente a partir de los trabajos de este WP6.

### 3.9.- WP7 - Realización de la actualización del sistema propulsivo de los casos estudiados

#### 3.9.1.- General

Las operaciones de actualización se organizaron en tres grandes etapas:

1. Varada inicial para limpiar el casco, el propulsor, y medir el casco y propulsor existentes (septiembre 2005). No fue necesario pintar el buque pues había sido pintado recientemente.
2. Construcción del nuevo propulsor.
3. Varada final para limpiar el casco nuevamente, pintarlo, instalar los nuevos propulsores y dejar el buque en condiciones similares a las iniciales para pruebas de mar.

Las repasamos ahora mostrando aquellas especialmente interesantes.

#### 3.9.2.- Actualización del buque ILA

En septiembre de 2005 se varó el ILA en C.N.P. FREIRE para ser pintado, limpiado y caracterizado en 3D [2]. La tobera tuvo que ser sustituida más tarde



Fig. 22. Propulsor CLT nuevo para el buque ILA

en Montevideo debido a un incidente durante operaciones de pesca en la zona de Malvinas. La nueva tobera se midió en Montevideo, con medidas de no muy buena calidad. El propulsor nuevo fue construido por FUNDILUSA y entregado en Vigo en Febrero de 2008 (figura 22). Había sido inspeccionado previamente por BV en Portugal antes de ser transportado a Vigo.

Como suele ser habitual hubo un problema inesperado relativo a la medición de la tobera del ILA y el propulsor no pudo ser encajado, con las holguras mínimas necesarias. Se realizaron mediciones más precisas y el propulsor tuvo que ser recortado en una operación muy delicada por parte de Fundiciones ADRIO. En la figura 23 se muestra el propulsor durante la etapa de transformación y ya instalado.



Fig. 23. Propulsor CLT nuevo para el buque ILA durante modificación y huelgas finales

### 3.10.- WP8 - Implementación y difusión de resultados

#### 3.10.1.- General

Las actividades del WP8 fueron realizadas sobre todo durante la etapa final del proyecto. Se ha tenido activo desde el principio del proyecto un sitio en Internet que ha servido a los socios para centralizar la información, pero que también contempla aspectos de difusión, con una interesante galería de imágenes y las referencias de los artículos que han sido publicados relativos al proyecto. La dirección es: <http://canal.etsin.upm.es/superprop/>.

Las lecciones aprendidas en el proyecto han sido puestas en forma que puedan ser usadas sin ser grandes expertos en herramientas de diseño. Una de las herramientas más importantes en este sentido es el modelo tecno-económico SUPERPROP, el cual pasamos a describir brevemente.

#### 3.10.2.- Modelo Tecno-económico SUPERPROP

El modelo tecno-económico es la herramienta que nos va a permitir establecer cuál es la mejor de las diferentes alternativas de mantenimiento (figura 24). Este modelo tiene una serie de entradas (figura 25) 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 pun-

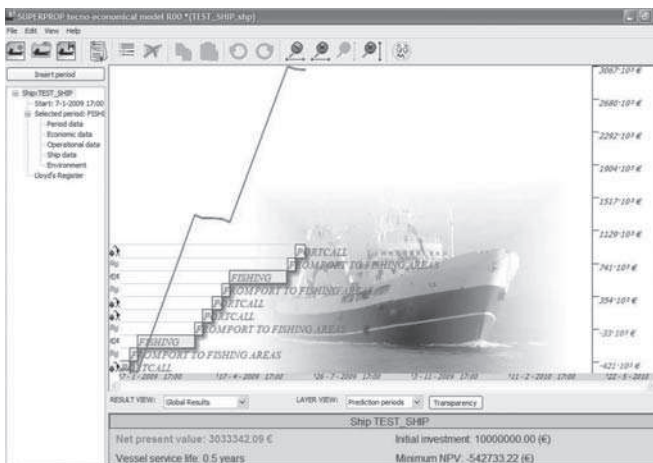


Fig. 24. Interfaz del modelo tecno-económico SUPERPROP.

to 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. El NPV (Net Present Value) 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, 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, el NPV, por su simplicidad, es la mejor opción.

Las entradas necesarias para el modelo utilizado incluyen 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.

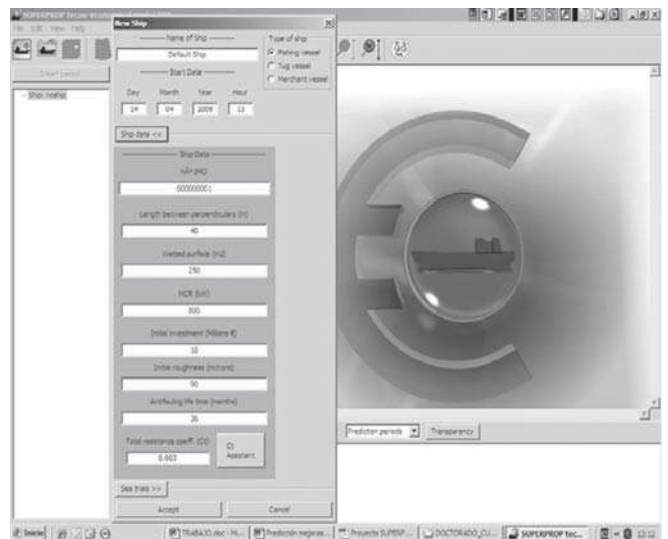


Fig. 25. Interfaz del modelo tecno-económico SUPERPROP (introducción de datos)

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. 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.



El panel de control es la interfaz de definición de parámetros, donde las características de cada período pueden ser modificadas. El programa, define las características de cada período aunque algunas de ellas podrían definirse con algo más de precisión según el buque que estuviéramos tratando.

### 3.10.3.- Posibles mejoras del modelo tecno-económico SUPERPROP

En la actualidad existen diferentes herramientas de monitorización en el mercado, siendo el modelo SUPERPROP novedoso en el sentido de poder integrar todas ellas, y utilizar el resultado de esas lecturas para establecer una herramienta predictiva que nos ayude a elegir la mejor alternativa de mantenimiento. En una primera aproximación el modelo puede resultar algo generalista. Para mejorar la potencia del modelo habría que definir con mayor precisión los datos de entrada en el modelo, con el fin de conseguir una combinación de predicción de funcionamiento y monitorización más precisa de la flota analizada, y poder comparar así, consumos calculados con los reales, minimizando el error en los resultados obtenidos.

El modelo podría mejorarse desde varios frentes. El principal debiera ser el de integrar lecturas lo más detalladas posibles, para lo cual tendríamos que estudiar la posibilidad de mejorar la instrumentación a bordo, monitorizando todos los consumos a bordo, tanto en motor principal como en auxiliares. Monitorizando consumos y reboses de combustible y tratando de ligar estos con el perfil operacional que tenga el buque en cada momento. Interesa que el proceso de monitorización de consumos este lo más automatizado posible, sin interrumpir el desarrollo de la actividad normal del personal empleado a bordo.

Por otro lado, el modelo podría incluir un desglose más detallado de los costes generados en cada período de actividad del buque. Especialmente en lo que respecta a los períodos de reparación y estancia en puerto. En primera aproximación, el modelo no incluye muchos de los costes que realmente soporta el buque.

## 4.- Conclusiones

Se ha presentado en esta ponencia el proyecto SUPERPROP, coordinado por el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos (CEHINA) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) y en el que han participado 9 socios europeos, 4 de ellos españoles. Se han descrito las actividades realizadas en los diversos paquetes de trabajo. Pasamos a enumerar las conclusiones generales del proyecto.

Los objetivos contractuales del proyecto se centran en obtener un método optimizado para la actualización de la propulsión de buques de una cierta edad teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos, con vistas a reducir costes de combustibles y de mantenimiento. Las conclusiones relativas a estos objetivos pueden ser resumidas como las siguientes:

1. Se han documentado casos de referencia mostrando procedimientos para recuperar rpm's en propulsores estándar, calculados usando códigos CFD, ensayos a escala, y sobre todo, pruebas a plena escala.
2. Se han realizado predicciones de cavitación como parte de estos estudios.
3. Se ha trabajado sobre el desarrollo de una estrategia para predecir la rentabilidad de acciones de actualización de la flota. Una de los resultados del proyecto es un modelo tecno-económico que realiza dicha actividad.
4. El incremento de conocimiento sobre el estado del arte de la propulsión de buques con cierta edad y de los efectos debidos al envejecimiento ha sido considerable. Se han realizado publicaciones al respecto.
5. Se ha incrementado el conocimiento sobre técnicas de extrapolación a plena escala, sobre todo para propulsores no convencionales como CLT en tobera.
6. Se han usado códigos CFD para predecir el comportamiento de los propulsores, y para correlacionar sus resultados con los obtenidos de ensayos con modelos.
7. El proyecto ha mostrado que existe una gran necesidad para monitorizar los consumos (automatización, instalación de caudalímetros, sensores para condición de carga, etc.).
8. Si surgiese una continuación del proyecto SUPERPROP, los socios industriales han destacado que deberíamos ser más ambiciosos la próxima vez, cubriendo no solo el diseño de propulsores sino otros aspectos como las toberas, interacción de propulsores y timones, pinturas, etc. También se deberían usar indicadores más completos como extensión de la cavitación y niveles de vibraciones y ruidos.
9. Un enorme banco de datos (experimentos, simulaciones y pruebas a plena escala) se ha obtenido durante el proyecto que sean útiles para estudios de validación.
10. Ha habido 6 nuevos socios en proyectos EU a raíz de este proyecto. Creemos que incorporar a estas empresas a la cultura de investigación e innovación en el marco de proyectos EU es un resultado importante del proyecto.
11. Las impresiones de los socios industriales tras su participación en el proyecto han sido positivas.
12. Se ha incrementado el know-how de los socios de un modo considerable, lo que significará para ellos una ventaja competitiva considerable en el futuro.
13. Otro valor importante el proyecto es el haber trabajado mucho a plena escala. Se han utilizado técnicas numéricas y experimentales (CFD y EFD) para intentar mejorar buques reales y se ha comprobado el éxito o fracaso de dichas acciones.
14. Para poder caracterizar los buques a plena escala, se realizó una campaña muy importante de medida de buques y propulsores.
15. El potencial del modelo tecno-económico SUPERPROP está relacionado con su uso en aplicaciones reales por parte de los socios industriales.
16. No ha sido fácil generalizar los resultados del proyecto. Estos resultados se han incorporado, de modo incipiente todavía, al modelo tecno-económico como mejoras/pérdidas asociadas a operaciones de mantenimiento (substitución de propulsores).
17. A veces, mejorar los propulsores en funcionamiento no es fácil. Solían ser propulsores muy cargados (mejores rendimientos) al precio de tener problemas de cavitación y vibraciones habituales.

## 5.- Trabajo futuro

Una vez terminado el proyecto procede pensar en qué aspectos no han quedado cerrados con el proyecto y que sugieren la necesidad de acciones futuras de I+D:

1. La mayoría de los operadores de buques mercantes han establecido procedimientos para monitorizar sus buques en lo que respecta a velocidad, potencia, consumos, etc. Los operadores de pesqueros necesitan de procedimientos similares que les permitan detectar resistencias añadidas y disminución de la eficiencia hidrodinámica. Aunque hemos hecho una revisión somera de estas técnicas, hay que dejar claro el estado del arte de estos aspectos.
2. No es fácil para las tripulaciones con los medios actuales monitorizar y documentar los procesos de envejecimiento: las medidas de rugosidad son caras y poco sistematizables, los históricos de consumos son poco fiables, etc.
3. Por tanto, se puede trabajar en futuras investigaciones en mejorar las técnicas de monitorizado automático del funcionamiento del buque y de la eficiencia de su sistema propulsivo, teniendo en cuenta la condición de carga, el consumo de combustible, etc.
4. Como comentábamos en las conclusiones, el proyecto ha mostrado que existe una gran necesidad para monitorizar los consumos (automatización, instalación de caudalímetros, sensores para condición de carga, etc.).
5. Las pruebas de mar han proporcionado información crucial sobre las actividades de actualización.  
Es el momento de tratar de comparar aspectos operativos con los de otros buques similares de las flotas.
6. Es muy importante para los armadores y operadores establecer el punto de operación de los buques mediante pruebas de mar. Estas son sin

embargo muy caras. Se necesitarían técnicas equivalentes más sencillas y baratas.

7. Como comentábamos en las conclusiones si surgiese una continuación del proyecto SUPERPROP, los socios industriales han destacado que deberíamos ser más ambiciosos la próxima vez, cubriendo no solo el diseño de propulsores sino otros aspectos como las toberas, interacción de propulsores y timones, pinturas, etc.... También se deberían usar indicadores más completos como extensión de la cavitación y niveles de vibraciones y ruidos.
8. Se ha discutido en el proyecto sobre un aspecto muy importante como es la extrapolación de resultados correspondientes a una CLT. El tema no está claro y menos cuando es una CLT en tobera. Este es un tema que quedará abierto a raíz de este proyecto.
9. Una vez realizadas las pruebas de mar del buque ILA, equipado con una hélice CLT en tobera, sería importante tener datos operacionales reales durante la vida del buque y realizar ensayos de canal comparativos.
10. Se han proporcionado líneas de trabajo para mejorar el modelo SUPERPROP, con desgloses más detallados de costes, aplicación de costes a diferentes periodos, usabilidad del modelo, etc.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo continuo de Angel Rodríguez Llerena, el "oficer" asignado por la UE al proyecto. Su comprensión, dada nuestra escasa experiencia en proyectos de este calibre, y su ayuda con los problemas con los que nos hemos encontrado han sido fundamentales para la finalización del proyecto.

## 6.- Bibliografía

- [1] Andino, R., Gestión de Proyectos Europeos de I+D, Revista Madri+d, 25, Sept 2004, Madrid, España.
- [2] Fernández Gutiérrez, D., Ga.Berrueto, J., Leal, H., Cercós Pita, J.L., Souto Iglesias, A. Modelado 3D de una carena, apéndices y propulsor de un arrastrero de 67m de eslora. El proyecto SUPERPROP, *Ingeniería Naval*, 840, pp. 892-898, 2006.
- [3] 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.
- [4] Holtrop, J. 1982. *A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data*, International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No. 335, Jul 1982.
- [5] 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.
- [6] Pérez-Rojas, L., Alvarez-Brasa, P., Gallego-García, J., Souto-Iglesias, A., López-Pulido, R., Miguel Montero, F., Molina Torres, A., *Un proyecto europeo de I+D: El Proyecto SUPERPROP*. 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. También en *Ingeniería Naval*, 839, July-August 2006.
- [7] Pérez-Rojas, L., Souto-Iglesias, A., Alvarez-Brasa, P., Gallego-García, J., La eficiencia energética en pesqueros y remolcadores en servicio. *El proyecto SUPERPROP*, XLV SESIONES TÉCNICAS de Ingeniería Naval, Madrid, Octubre, 2006, Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España. (Seleccionado por *Ingeniería Naval* para su publicación, número 849, Junio 2007, pp 698-706).
- [8] Sánchez-Caja, A. and Pykkänen, J.V. Prediction of Effective Wake at Model and Full Scale Using a RANS Code with an Actuator Disk Model, 2nd International Conference on Maritime Research and Transportation, Ischia, Italy, 28-30 June, 2007.
- [9] Sánchez-Caja, A. Pykkänen, J.V. and Sipilä, T. P. Simulation of the Incompressible Viscous Flow around Ducted Propellers with Rudders Using a RANSE Solver. 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 5-10 October 2008.