

XX COPINAVAL

Sao Paulo, Octubre 2007

Sobre la optimización de la propulsión en pesqueros y remolcadores en servicio.

*Luis Pérez Rojas**, *Antonio Souto Iglesias**, *Juan González-Adalid***, *Pelayo Alvarez Brasa****, *Daniel Merino Hoyos** y *Jose Luis Cercós Pita**.

(*) CEHINAV, E.T.S.I. Navales (Universidad Politécnica de Madrid). Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid (España) [luis.perezrojas@upm.es]

(**) SISTEMAR, S.A.

(***) PESCANOVA, S.A.

Resumen: Ante la escalada de precios del carburante y la disminución del rendimiento de los buques en servicio, este trabajo presenta las actuaciones llevadas a cabo hasta la fecha en un Proyecto de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, el proyecto SUPERPROP con la idea de estudiar las nuevas condiciones de trabajo y adaptar el propulsor a estas condiciones. El objetivo último sería desarrollar un modelo tecno-económico completo para el mantenimiento de pesqueros y remolcadores.

El proyecto está integrado dentro de los proyectos STREP (Specific Targeted Research Project) financiados por la Unión Europea. El consorcio de investigación está compuesto por: Universidad Politécnica de Madrid, PESCANOVA, FREIRE y SISTEMAR (España); INSEAN y OCEAN (Italia); VTT (Finlandia); MARINTEK (Noruega) y FUNDILUSA (Portugal).

Una vez seleccionados unos barcos reales tipo se ha procedido al estudio de su propulsión mediante pruebas de mar, ensayos de canal y estudios numéricos mediante CFD. Estos trabajos han propiciado el diseño de nuevos propulsores para ambos buques.

1.- INTRODUCCIÓN.-

La eficiencia energética y el ahorro de energía constituyen hoy en día uno de los objetivos no sólo de las industrias sino de las Administraciones e incluso de la Sociedad. La “sociedad del bienestar” ve con preocupación el agotamiento de las fuentes tradicionales de energía y la degradación del medio ambiente que el mal uso de esta energía está originando en algunas ocasiones.

En el sector marítimo, existe una gran sensibilidad por el consumo de los buques y en particular en colectivos específicos, como el mundo pesquero, para el cual este factor es un porcentaje alto de sus costes operativos, y que además es difícil de repercutir esos costes en el precio del producto obtenido, el pescado. Esta preocupación se ha extendido a raíz del incremento del precio del petróleo en los últimos tiempos.

Con respecto a la subida de los precios del petróleo, conviene analizar las cifras desde una perspectiva más amplia que la evolución desde el año 2003, para darse cuenta de que en el fondo, la actual subida está actuando de alguna manera como la gota que colma el vaso de los problemas de algunas empresas armadoras. Así, recurriendo a la “Energy Information Administration” americana para obtener series temporales del precio del petróleo, se encuentra (fig. 1) que aunque el precio real, descontada la inflación, del petróleo es ahora todavía más bajo que en su máximo en 1980/81, las perspectivas son de una subida permanente en los próximos años, en donde además, la rentabilidad de muchos caladeros estará muy por debajo de la correspondiente a aquellos años.

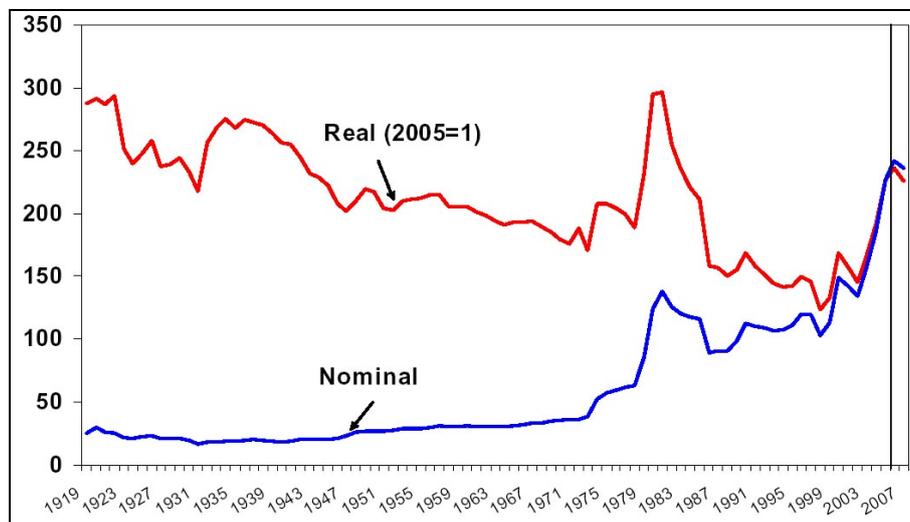


Fig. 1. Evolución del precio del petróleo (en centavos de dólar USA/galón¹); valor nominal y real referido a 2005 descontando la inflación.

El presente trabajo aborda la presentación de las actividades llevadas a cabo hasta la fecha dentro de un proyecto financiado por la Comunidad Europea, el Proyecto SUPERPROP (Superior Life-Time Operation Economy of Ship Propellers). Este proyecto surge de modo natural a partir de la amplia relación entre el Grupo de Investigación del Canal de Ensayos Hidrodinámicos(CEHINAV) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN),

¹ Un barril de petróleo contiene 42 galones.

perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid, y la empresa PESCANOVA, que transmitió su preocupación por la situación de los buques de mayor edad de su flota 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, 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 alternativas que minimicen el impacto de dichas subidas de precio.

El proyecto 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.

El proyecto se ha estructurado en una serie de “paquetes de trabajo”, tal y como se recoge esquemáticamente en la figura 2.

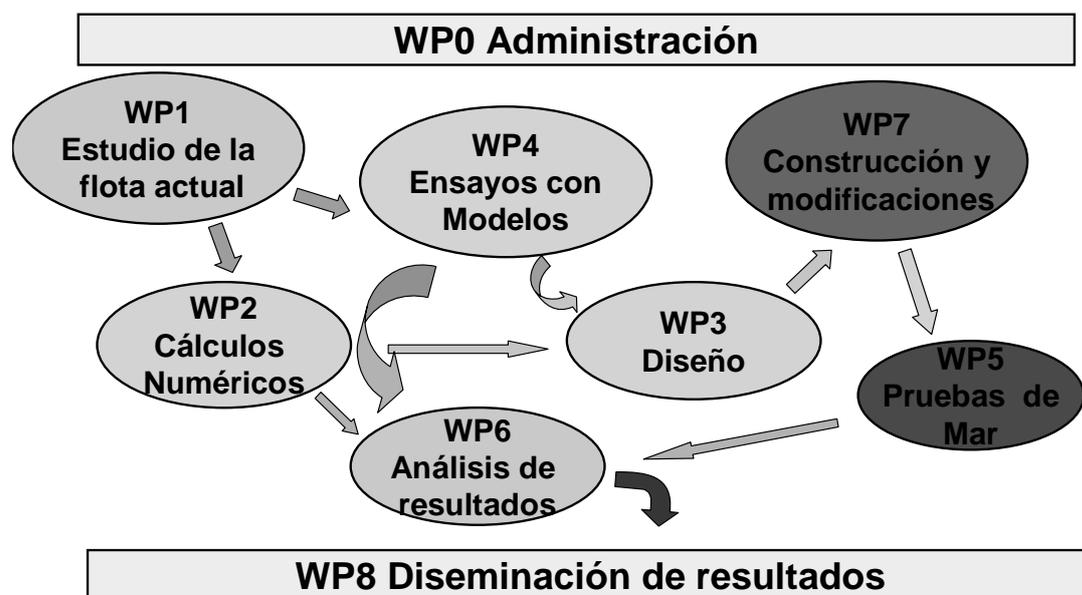


Fig. 2. Organización de los paquetes de trabajo

Inicialmente, el proyecto analiza la situación de las flotas actuales de buques pesqueros y remolcadores y trata de encontrar y definir unos buques tipo en donde focalizar los estudios de optimación propulsiva. Uno de los elementos primordiales de dicha elección es su disponibilidad para realizar “pruebas de mar” y sustituir o actualizar eventualmente el equipo propulsor.

Los “buques tipo” han sido sometidos a un profundo estudio hidrodinámico tanto bajo un aspecto numérico como experimental mediante modelos. Igualmente han sido sometidos a “pruebas de mar” para validar tanto los valores numéricos como experimentales.

El análisis de esta información permite el enfoque de nueva soluciones propulsivas sujetas nuevamente a un profundo estudio numérico y experimental. Paralelamente, se

pretende que toda esta información alimente el modelo tecno-económico que permita establecer cuál es la mejor de las diferentes alternativas de mantenimiento. Este modelo tiene una serie de entradas (Svensen [1]) 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 en lo que se refiere a rendimientos de las inversiones de mantenimiento en aspectos relativos a la Hidrodinámica del buque. 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 da una idea de lo que supone la operación-explotación del buque en términos de dinero actual, teniendo en cuenta los tipos de interés y la inflación.

2.- EL TIPO DE PROYECTO Y LOS MIEMBROS DEL PROYECTO.

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.

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

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.

3.- ELECCIÓN DE LOS BUQUE TIPO.

La pesca es una actividad importante en la Unión Europea(UE). Aunque la contribución del sector al PIB de los estados miembros no es mucho mayor que el 1%, su

importancia en ciertas zonas es crucial, al no existir alternativas a esta actividad en las mismas. Además, proporciona productos al mercado europeo, uno de los más grandes del mundo. El sector pesquero en la UE emplea de modo directo a 190.000 personas, comprende casi 90.000 buques con una potencia total instalada en torno a los 7.000Mw, con un tonelaje capturado anual cercano a los 6 millones de toneladas y con una distribución regional² como la que se muestra en las figuras 3 y 4 [3].

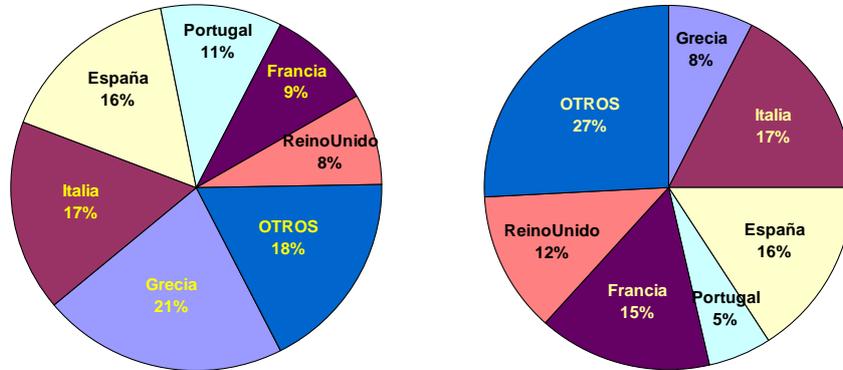


Fig. 3. Sector Pesquero en la UE, Distribución por número de buques y potencia.

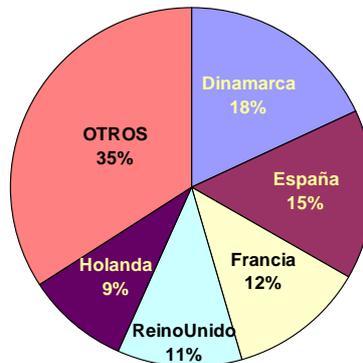


Fig.4 Sector Pesquero en la UE, distribución por capturas.

En la figura 5, se recoge un gráfico en donde se compara el buque pesquero seleccionado como tipo para el presente proyecto en relación con otros buques obtenidos de los datos de la flota pesquera de la UE. El buque pesquero seleccionado “ILA” es un arrastrero de popa que puede verse en la figura 6 y cuyas características se señalan en la siguiente tabla 1

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Número IMO | 6819104 |
| Año de construcción | 1969 |
| Eslora total | 77,1 m |
| Eslora entre perpendiculares | 67 m |
| Manga | 12 m |
| Puntal | 7,5 m |
| Arqueo bruto | 1395 GT |
| Potencia propulsora-MCR | 1990 kW a 375 RPM |
| Tipo de propulsor | Paso fijo con tobera |
| Número de palas | 4 |
| Diámetro del propulsor | 2600 mm |

² Datos de 2003. Fuente: Comisariado de Política Pesquera Comun, Comisión Europea.

Tabla 1.- Características del buque “ILA”

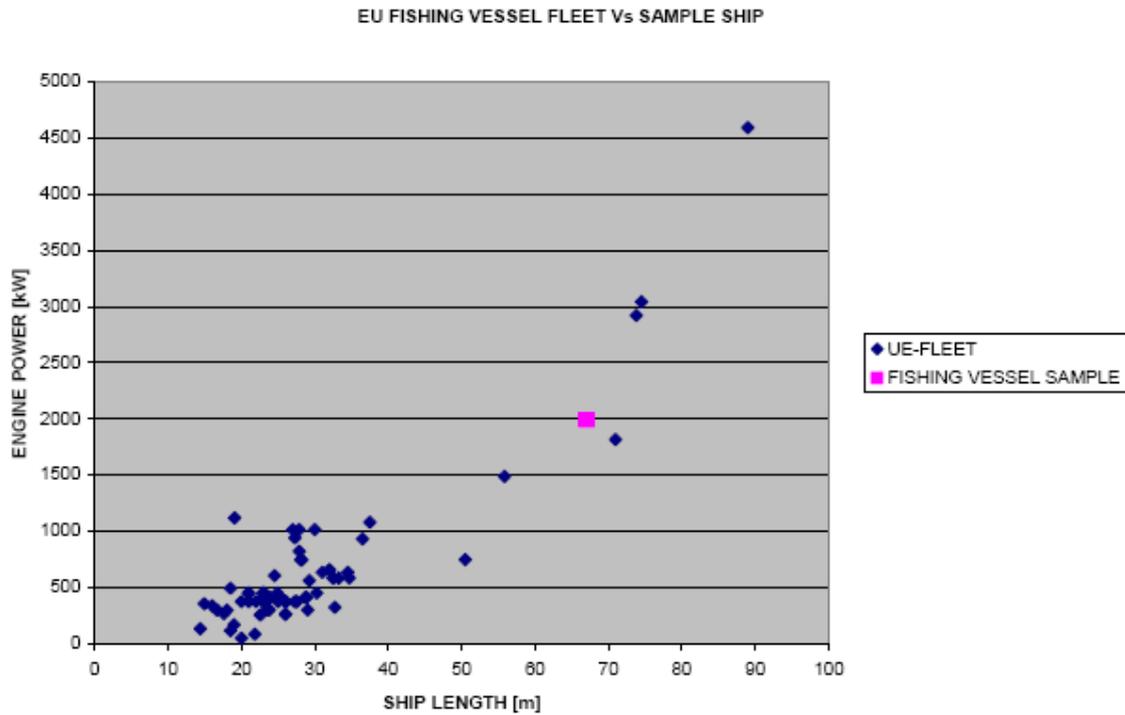


Figura 5.- Pesquero tipo versus flota UE

Las razones para su elección son las siguientes:

- Es un arrastrero de popa como la mayoría de los buques pesqueros existentes (FAO, 1998)
- Sus relaciones Eslora/Potencia encajan en los valores existentes en la flota de la UE.
- Tiene un sistema propulsivo constituido por un propulsor de paso fijo en tobera, dentro de los objetivos del proyecto.
- Fue construido en el año 1969 y por la tanto susceptible de mejorar su comportamiento hidrodinámico
- Constituye un buque representativo en la flota de PESCANOVA, una de las flotas más significativas a nivel mundial.
- Está disponible para realizar pruebas de mar y posibles cambios propulsivos durante el periodo de vigencia del proyecto.
- La tobera instalado no corresponde al proyecto inicial



Figura 6. El buque pesquero “ILA”

Como representante de la flota de remolcadores, fue seleccionado el buque “VAL” (figura 7). Igualmente, la figura 8 representa la comparación del buque elegido frente a la flota europea y la tabla 2 recoge sus características principales

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Número IMO | 6917592 |
| Año de construcción | 1967 |
| Eslora total | 27,8 m |
| Manga | 7,5 m |
| Puntal | 4,5 m |
| Arqueo bruto | 139,68 GT |
| Potencia propulsora-MCR | 762kW a 410 RPM |
| Tipo de propulsor | Paso fijo con tobera |
| Número de palas | 3 |
| Diámetro del propulsor | 2300 mm |

Tabla 2.- Características del buque “VAL”



Figura 7.- Remolcador “VAL”

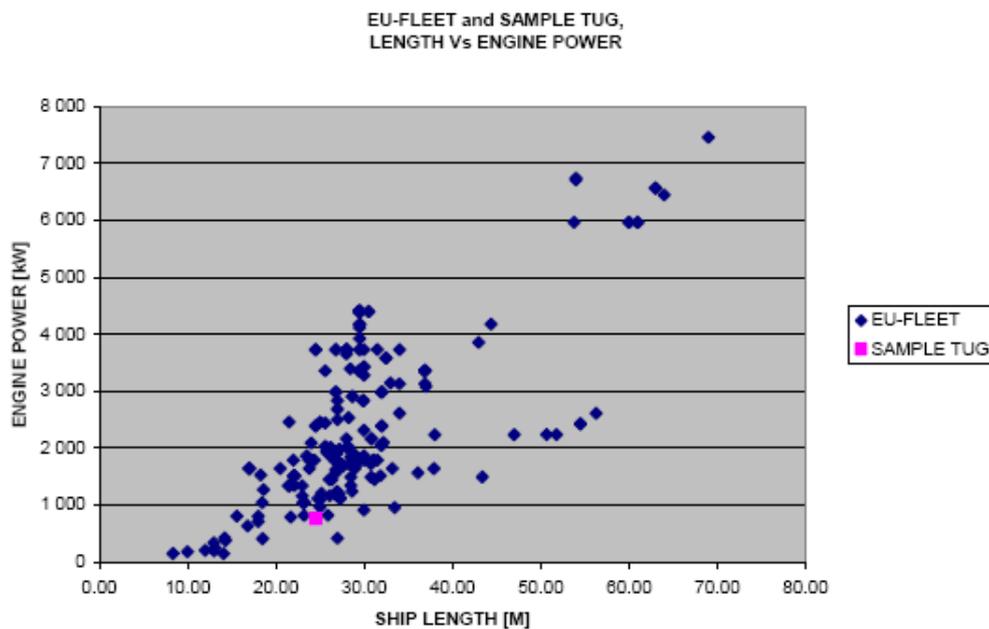


Figura 8.- Remolcador tipo versus flota UE

La elección de este buque estaba apoyada en:

- Es un buque remolcador de puerto como la mayoría de los existentes
- Su relación eslora/potencia está acorde con la de buques existentes en la UE
- Su sistema de propulsión, hélice de paso fijo en tobera está línea con los objetivos del proyecto
- Es un buque del año 1967 y por lo tanto susceptible de mejoras hidrodinámicas
- Es uno de los buques representativos de la flota de OCEAN
- Está disponible para las pruebas de mar y posibles cambios del sistema propulsor.

4.- ESTUDIO DE LOS BUQUES EXISTENTES.

El estudio hidrodinámico de los buques tipo se ha llevado a cabo bajo tres vertientes: cálculos numéricos mediante programas de ordenador tipo CFD (“Computational Fluid Dynamics”), ensayos experimentales mediante modelos físicos en “canales de ensayo” y pruebas de mar.

4.1.- Análisis numéricos.

Las formas de los dos buques fueron analizadas mediante programas de ordenador basados en las ecuaciones de Reynolds promediadas (RANS Codes). El buque remolcador fue analizado con el código desarrollado por INSEAN, el denominado χ - *Navis*, utilizando el modelo de turbulencia de Spalart & Allmaras, tratando la superficie libre mediante la técnica “level-set” y utilizando como técnica de mallado la “Cimera” (figura 9) [5]. El buque pesquero fue calculado mediante al código FINFLO, desarrollado por VTT, basado en volúmenes finitos y con el modelo de turbulencia Baldwin-Lomax.

El objetivo de estos cálculos era el de obtener una detallada caracterización del flujo en la estela del buque en el plano de la situación del propulsor con el fin de obtener la información necesaria para el diseño de los nuevos propulsores. Inicialmente, los cálculos se realizaron sin la presencia del propulsor, obtenido lo que se denomina “estela nominal”. Ambos buques se analizaron en dos condiciones de navegación, 14 nudos para el pesquero y 11,5 nudos para el remolcador y luego 4 nudos para ambos, simulando operaciones de arrastre para el caso del pesquero y de tiro/empuje para el remolcador. Los modelos considerados tenían una escala de 1:10,75 para el “VAL” y 1:12 para el buque “ILA”.

La figura 10 recoge la representación de la superficie libre del buque “VAL” para la velocidad de 11,5 nudos a escala real. La tabla 3 recoge los valores obtenidos a escala real y a escala modelo de este buque.

| | Full scale | | Model scale | |
|------------------|------------|-------|-------------|-------|
| speed [kn] | 4.0 | 11.5 | 4.0 | 11.5 |
| $C_X \cdot 10^3$ | 1.076 | 6.680 | 1.796 | 7.220 |

Tabla 3.- Coeficiente de resistencia total del buque “VAL”

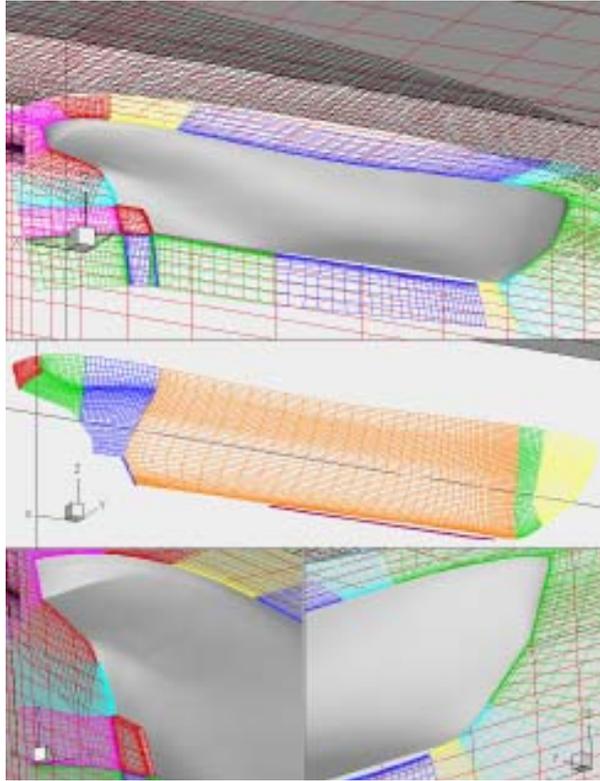


Figura 9.- Mallado tipo “Cimera” para el buque remolcador

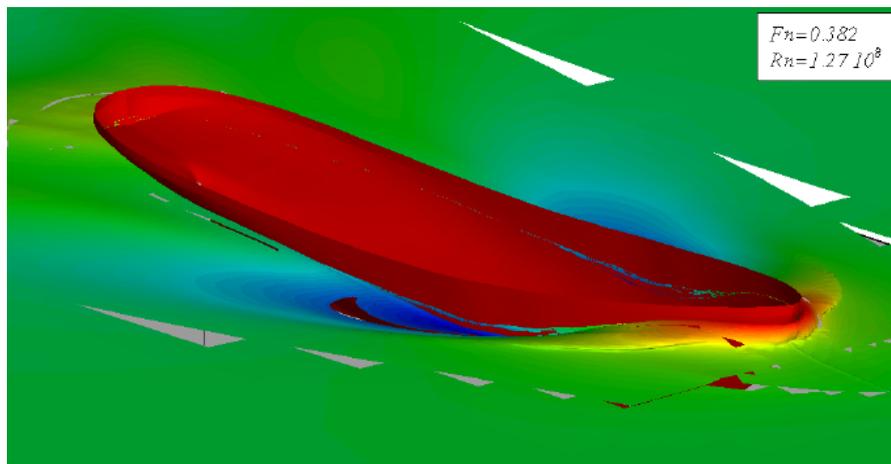


Figura 10.- Representación de la superficie libre del buque remolcador

La figura 11 presenta la simulación de la distribución de presiones en el caso del buque pesquero “ILA” y la figura 12, la altura de ola para la velocidad de 14 nudos y escala modelo. Los resultados del coeficiente de resistencia total para este buque se reflejan en la tabla 4

| | Full scale | | Model scale | |
|------------------|------------|------|-------------|------|
| speed [kn] | 4.0 | 14.0 | 4.0 | 14.0 |
| $C_X \cdot 10^3$ | 2.20 | 3.22 | 3.64 | 4.86 |

Tabla 4.- Coeficiente de resistencia total del buque “ILA”

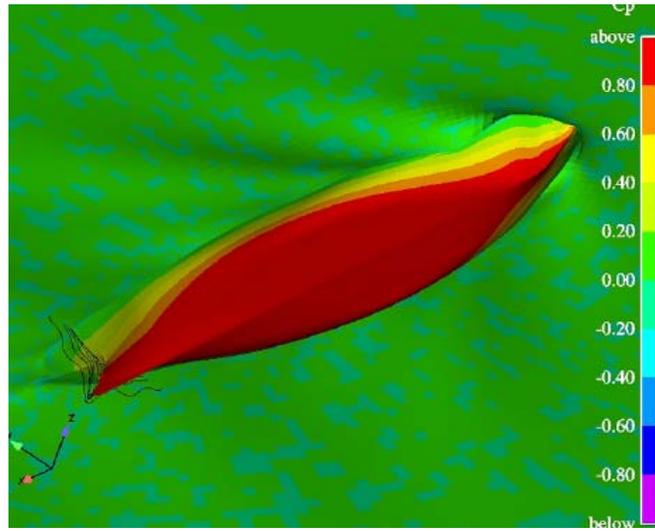


Figura 11.- Distribución de presiones para el buque pesquero

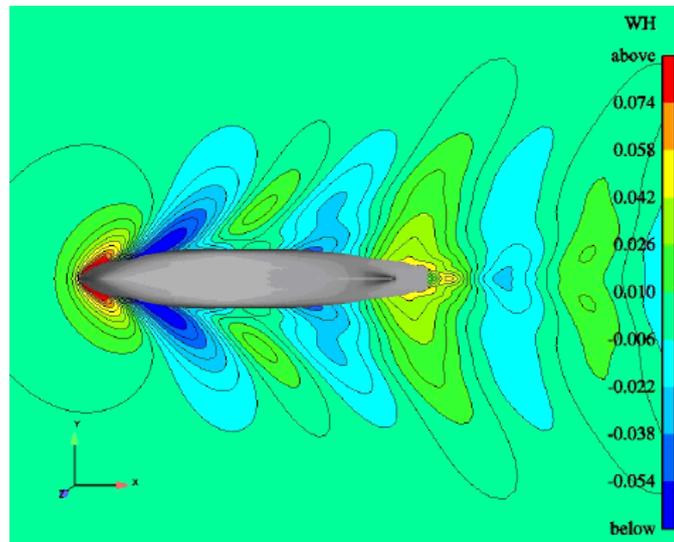


Figura 12.- Mapa de altura de olas del buque "ILA"

Estos trabajos concluyeron que en ambos casos la descripción del desarrollo de la "capa límite" había sido suficientemente correcta y que los efectos de escala debido al distinto número de Reynolds entre modelo y buque habían sido razonablemente reflejados. Otra importante conclusión de estos resultados numéricos fue el efecto relevante de la superficie libre en el campo de velocidades en el plano de la hélice. Este hecho se pone más claramente de manifiesto a altas velocidades donde se observa un tren de olas fuertemente afectado y donde la distancia entre la superficie libre y la tobera es limitada.

La consideración de la "estela efectiva", con la presencia del propulsor, se realizó en ambos casos modelizando dicho propulsor mediante el "disco actuador". La figura 13 recoge la estela nominal (derecha) y la estela efectiva (izquierda) para el caso del ILA, para 14 nudos y escala de buque real.

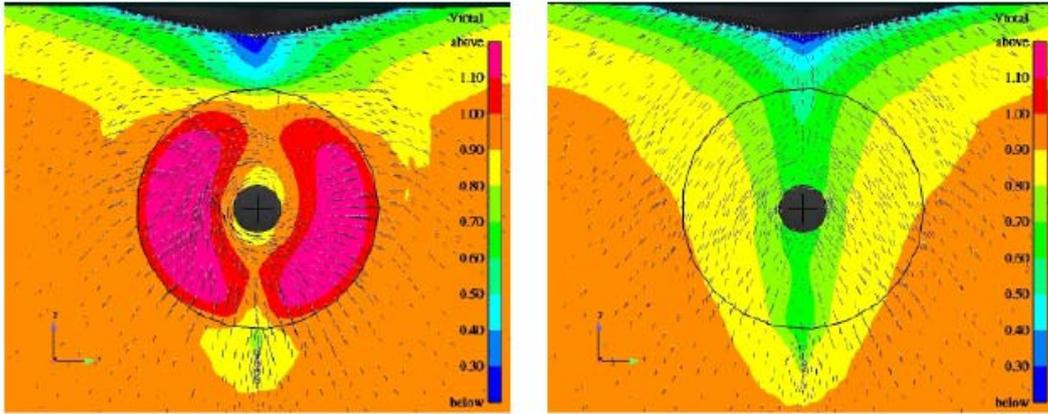


Figura 13.- Estelas calculadas para el buque “ILA”

Los cálculos numéricos concluyeron con el análisis del comportamiento del propulsor mediante un método de paneles (BEM = Boundary Element Methodology) [6], realizado por INSEAN. La discretización en este enfoque puede verse en la figura 14. La figura 15 recoge la comparación para los cálculos de “propulsor aislado” entre los datos numéricos y los experimentales obtenidos en la ETSIN para el propulsor del buque “ILA”

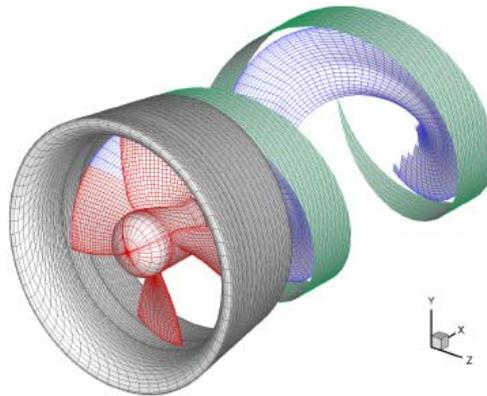


Figura 14. Discretización mediante el método de paneles

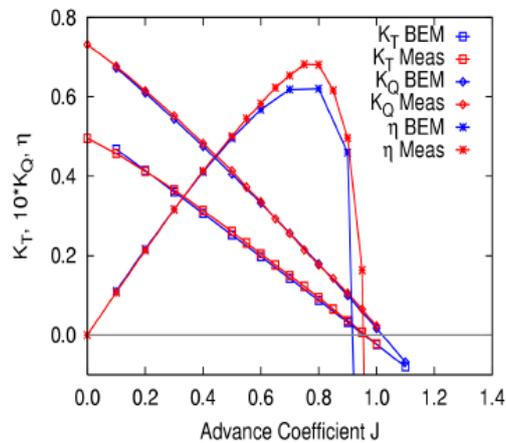


Figura 15.- Comparación de resultados para el propulsor del “ILA”

4.2.- Análisis experimentales mediante modelos.

Paralelamente a los desarrollos numéricos, en los “canales de ensayos” de INSEAN y ETSIN, se llevaron a cabo los trabajos experimentales de ambos modelos, en sus facetas de ensayos de remolque, propulsor aislado y autopropulsión. La figura 16, representa el modelo del buque VAL ($\lambda = 10,75$) durante su construcción, y la figura 17 la del modelo del buque “ILA” ($\lambda = 12$) durante la fase de lijado. Los modelos de los propulsores de ambos buque se presentan en la figura 18, el del “Val” con 3 palas y el del “ILA”, con 4 palas.



Figura 16. Modelo del buque “VAL”



Figura 17. Modelo del buque “ILA”



Figura 18. Modelos de los propulsores utilizados

Las figuras 19 y 20, representan los resultados de predicción de potencia para ambos buques basados en los ensayos anteriores.

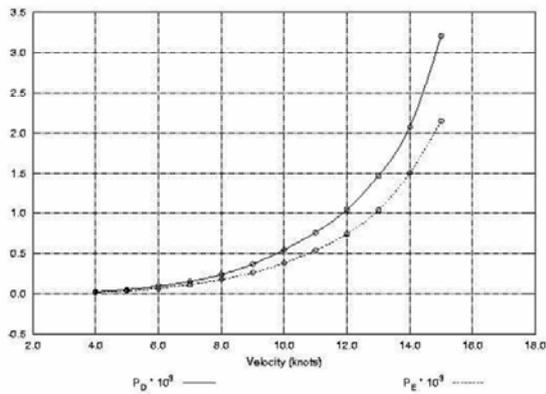


Figura 19. Buque "ILA"

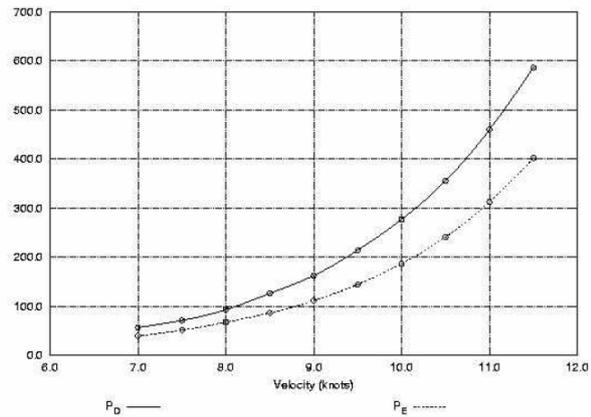


Figura 20.- Buque "VAL"

Con el fin de analizar efectos de escala, un modelo del buque "ILA" fue realizado y ensayado en las instalaciones de la ETSIN. Los resultados comparativos para el coeficiente de resistencia total se presentan en la figura 22. Las diferencias a bajas velocidades puede achacarse a fenómenos de relaminarización en el modelo más pequeño de la ETSIN



Figura 21.- Ensayos del "ILA" en la ETSIN

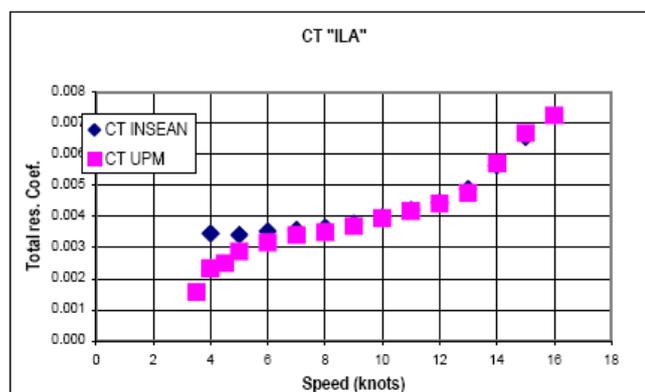


Figura 22. Efecto de escala en los modelos

4.3.- Pruebas de mar.

Bajo la responsabilidad de MARINTEK, se han llevado a cabo las pruebas de mar de ambos buques. La figura 23, recoge la prueba de tracción a punto fijo del buque “VAL”. Los resultados correspondientes al buque pesquero se recogen en la tabla 5 y los del buque remolcador en la tabla 6. La medida del par se llevó a cabo por un equipo diseñado por MARINTEK basado en galgas extensiométricos, las revoluciones a través de un medidor óptico y el tiro mediante un instrumento compacto (“Dynafor”) que comunica mediante radio los datos al sistema de medida. La velocidad y el rumbo del buque se realizó mediante GPS.

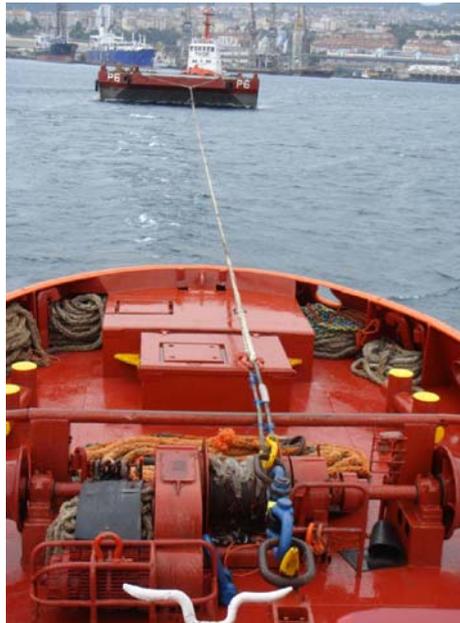


Figura 23. Tracción a punto fijo del buque “VAL”

| Propeller RPM | Shaft power (kW) | speed (knots) |
|---------------|------------------|---------------|
| 237.47 | 1566.00 | 14.16 |
| 191.84 | 779.85 | 12.14 |
| 148.89 | 355.30 | 9.60 |
| 67.15 | 43.20 | 4.10 |

Tabla 5. Resultados del buque “ILA”

| Speed (knots) | Propeller RPM | Shaft power (kW) |
|---------------|---------------|------------------|
| 4.97 | 76.10 | 23.10 |
| 7.51 | 116.76 | 81.46 |
| 9.31 | 150.92 | 184.20 |
| 9.98 | 168.48 | 275.76 |
| 10.86 | 189.03 | 393.55 |

Tabla 6. Resultados del buque “VAL”

La figura 24, compara los resultados extrapolados de los ensayos experimentales de canal con los obtenidos en las pruebas de mar, para el caso del buque “ILA”.

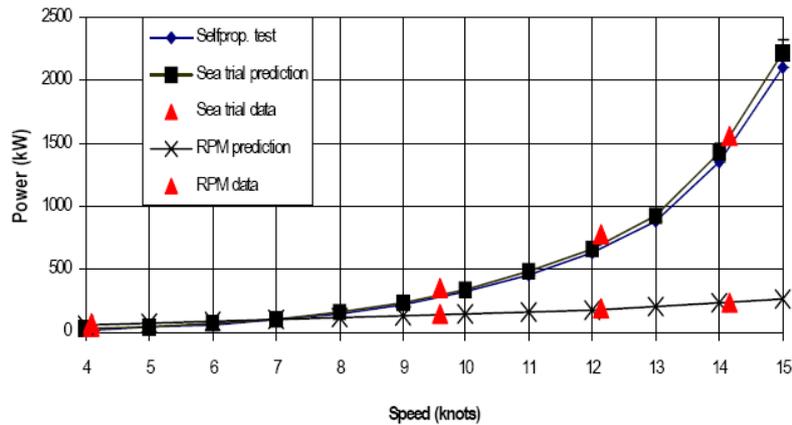


Figura 24. Resultados del buque “ILA”

5.- NUEVOS DESARROLLOS.

Los análisis anteriores han permitido proponer nuevos propulsores. En el caso del buque “ILA”, se puso de manifiesto un importante “efecto de bloque” debido a la presencia del timón. Tanto en la cara de succión como de presión se encontraron zonas de baja presión y en Genaro se consideró que el propulsor existente tenía un paso mayor del óptimo en la condición de diseño.

Ante esta situación se consideraron dos alternativas, adecuar el propulsor existente recortando las palas y cambiando el paso o el diseño de un nuevo propulsor. La condición de diseño se conseguía recortando el borde de salida de las palas en un 20% de la cuerda lo que reduciría sensiblemente el área expandida con los subsiguientes problemas de cavitación. El corte de las puntas de la pala, otra posible solución, incrementaría la distancia a la tobera y por consiguiente el adecuado comportamiento de la tobera. El cambio de paso, problemas mecánicos aparte, pareció una posible solución.

No obstante lo anterior, un nuevo proyecto de hélice convencional basado en perfiles NACA con una cierta curvatura ($a = 0.8$) y con los espesores del perfil NACA 16. Se consideró que bajo el punto de vista de resistencia hidrodinámica y cavitación esta solución era adecuada.

Su definición se “encajó” con códigos basados en los conceptos de líneas y superficies sustentadoras para utilizar para el último desarrollo el código anteriormente mencionado de FINFLO. La figura 25 recoge esta propuesta del propulsor de carácter convencional.

Alternativamente, una hélice no convencional, del tipo CLT [7], fue propuesta por SISTEMAR, recogida en la figura 26. La elección entre estas dos alternativas se decantó por la CLT, entendiéndose que un proyecto de investigación es una buena base para probar nuevas tendencias. La figura 27 presenta el modelo de dicho propulsor.

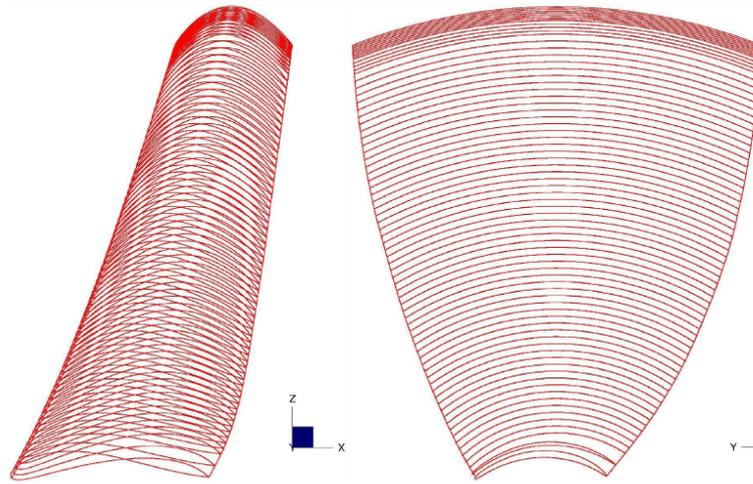


Figura 25.- Propuesta convencional para el buque “ILA”

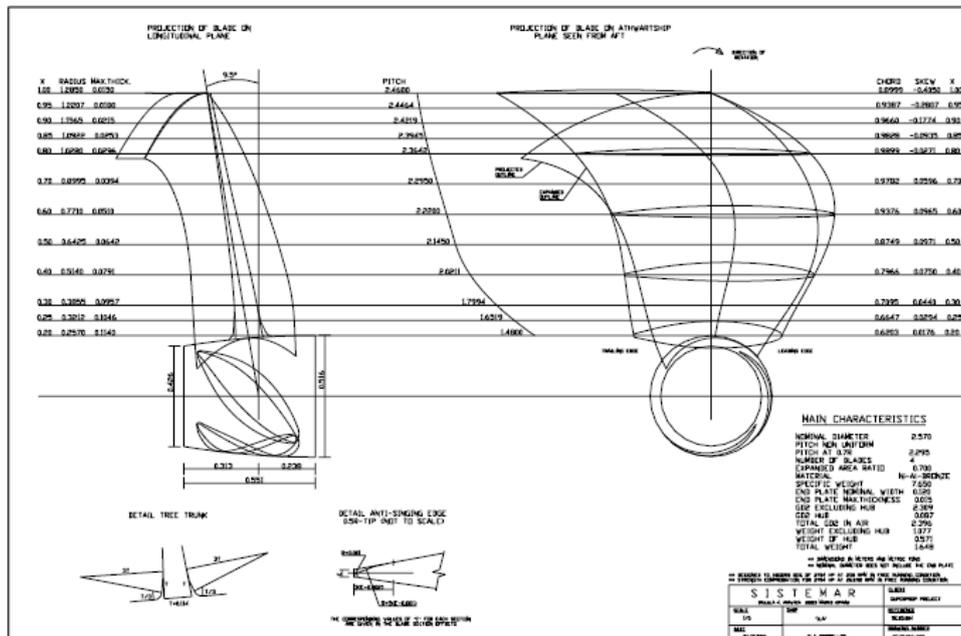


Figura 26.- Propuesta no convencional para el buque “ILA”.



Figura 27.- Modelo de la hélice CLT para el buque “ILA”

El enfoque del buque “VAL” fue semejante, proponiendo un propulsor tipo CLT. La tobera existente demostró no ser compatible con los propulsores CLT por lo que se eligió otra alternativa que se presenta en la figura de 28. El punto de diseño se ajustó a la situación de tiro a 4 nudos. El modelo correspondiente se presenta en la figura 29.

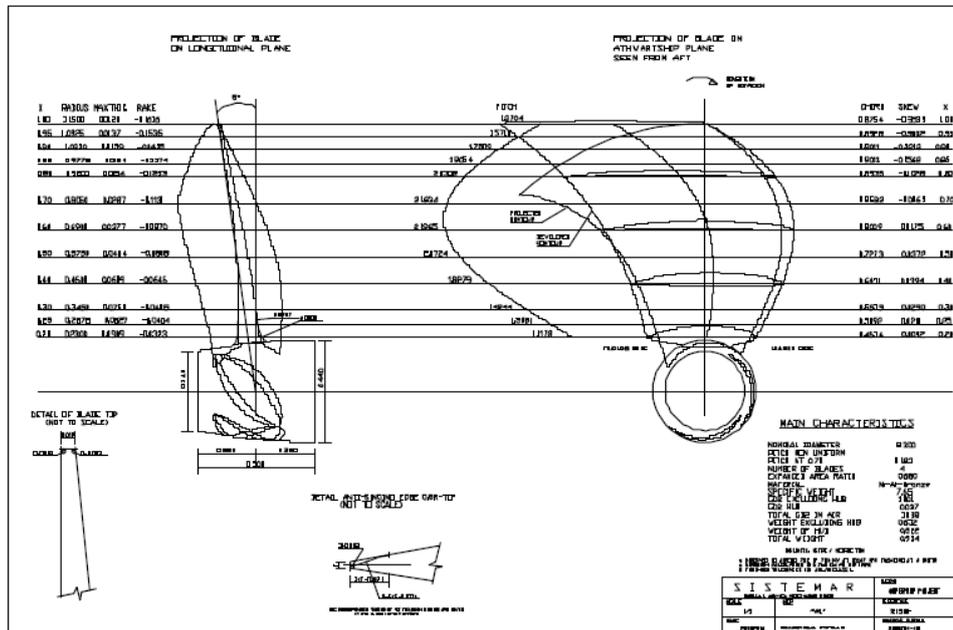


Figura 28.- Propuesta no convencional para el buque “VAL”



Figura 29. Modelo de la hélice para el buque “VAL”

6.- MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO.

6.1.- General

El proyecto no sólo se centra en el análisis del equipo propulsor sino que pretende tener una utilidad más allá de hacer mejoras o sustituir el equipo propulsor. Uno de los resultados visibles del proyecto, englobado dentro del paquete de trabajo relacionado con la

diseminación de los conocimientos adquiridos, es el modelo tecnoeconómico. Se trata de una aplicación informática que, de un modo sencillo, estima los beneficios esperados que se pueden obtener fruto de la explotación del barco. Para ello, no sólo se tienen en cuenta los parámetros técnicos, sino que también hace uso de las herramientas económicas disponibles.

La finalidad del programa es que sea una herramienta más a la hora de establecer cuál es la estrategia de mantenimiento del barco óptima, aquella que reportará mayores beneficios.

Hasta el momento la aplicación se ha centrado en los dos tipos de barcos que son objetivo del proyecto: pesqueros y remolcadores. El funcionamiento básico del programa es el siguiente: el usuario introduce un esquema de cómo va a ser la explotación del barco dividida en períodos de distintos tipos (estancia en puerto, navegación libre, faenando,...), dentro de cada uno de estos períodos, se ha de introducir una serie de parámetros que se emplearán para calcular los costes de explotación del barco. Estos costes, junto con los ingresos del proyecto, se traducen en un resultado económico. Debido a la depreciación del dinero, con el fin de hacer comparables las distintas situaciones, es necesario hacer uso de la tasa de descuento (índice que engloba el tipo de interés, los costes de oportunidad, la inflación,...) para convertirlo en el Valor Actualizado Neto (NPV), valor del barco a la fecha de inicio de la explotación.

Uno de los puntos en los que se centra el programa es en el incremento de la rugosidad del casco [8]. Este supone una de las causas del aumento de demanda de potencia del propulsor que lo saca de su punto de diseño, sobrecargándolo y haciendo caer su rendimiento. Es por ello que el buque ha de ser regularmente reacondicionado. Establecer qué política de reparaciones[9] es más apropiada para el buque es el principal fin de este modelo, la estrategia óptima será aquella cuyo resultado sea un NPV máximo.

6.2.- Aspectos económicos

El NPV es el principal término económico que se emplea en el programa. Su valor es la cantidad de dinero que se podría haber obtenido habiendo invertido en otro tipo de explotación, ya que para ello estamos teniendo en cuenta los costes de oportunidad.

Actualmente, la tasa de descuento se introduce como un valor para cada período, pero se espera que en futuras versiones del programa, tanto la tasa de descuento como la evolución del precio del combustible podrán ser introducidas como una curva de variación de su valor con el tiempo, que puede ser extraída de cualquier previsión económica. El valor del NPV se puede calcular con la siguiente expresión:

$$NPV = \frac{I}{(1 + i_m)^n}$$

Hay que mencionar que este modelo no tiene en cuenta ni los riesgos de la inversión ni los posibles seguros.

6.3.- Características informáticas

El modelo tecnoeconómico del proyecto SUPERPROP, en su versión 0.2.0, está preparado para trabajar en sistemas operativos Windows, está optimizado para versiones NT o superior, aunque no hay razones para creer que no deba funcionar en 98, aunque si puede ser problemática en 95 o anterior.

La resolución óptima es de 1280x1024, no obstante no hay razones para creer que no pueda funcionar a resoluciones superiores a 800x600.

Se ha trabajado intensamente para tratar minimizar el efecto “windows rot”, que provoca que la ejecución de programas provoque una progresiva degradación de la velocidad del equipo. En este aspecto, el programa es muy estable, y no monopoliza recursos activamente, se han optimizado los tiempos de pintado en pantalla para evitar el efecto “flicker”, que nunca se llegó a producir, pero que en grandes archivos puede llegar a sobrepasar la barrera crítica.

6.4.- Interfaz gráfica

El código del programa se ha escrito basado en el lenguaje C/C++, haciendo uso de las librerías wxWidgets, que incluyen rutinas de fácil uso a la hora de implementar aplicaciones en multitud de plataformas.

A modo de ejemplo de las capacidades de la versión 0.2.0, se incluye a continuación una captura de la pantalla de la nueva interfaz (ver Figura 30). Como se puede apreciar, la pantalla se divide en cuatro secciones: la parte superior se destina al panel del menú y los botones básicos; el panel de control se encuentra en la parte izquierda de la ventana. Desde él se realiza todo el control de los períodos. La interfaz avanzada se sitúa en la zona media, describe de un modo gráfico la distribución de los períodos en los que se divide la vida útil del barco, y la gráfica de evolución del NPV con el paso del tiempo. En la parte baja podemos ver la pantalla de resultados, que mediante un selector permite ver la gráfica de evolución temporal de la rugosidad, los resultados propios del período, los parámetros introducidos de este último o bien los resultados globales del buque. Es en esta pantalla en la que se vuelcan los esfuerzos en la actualidad.

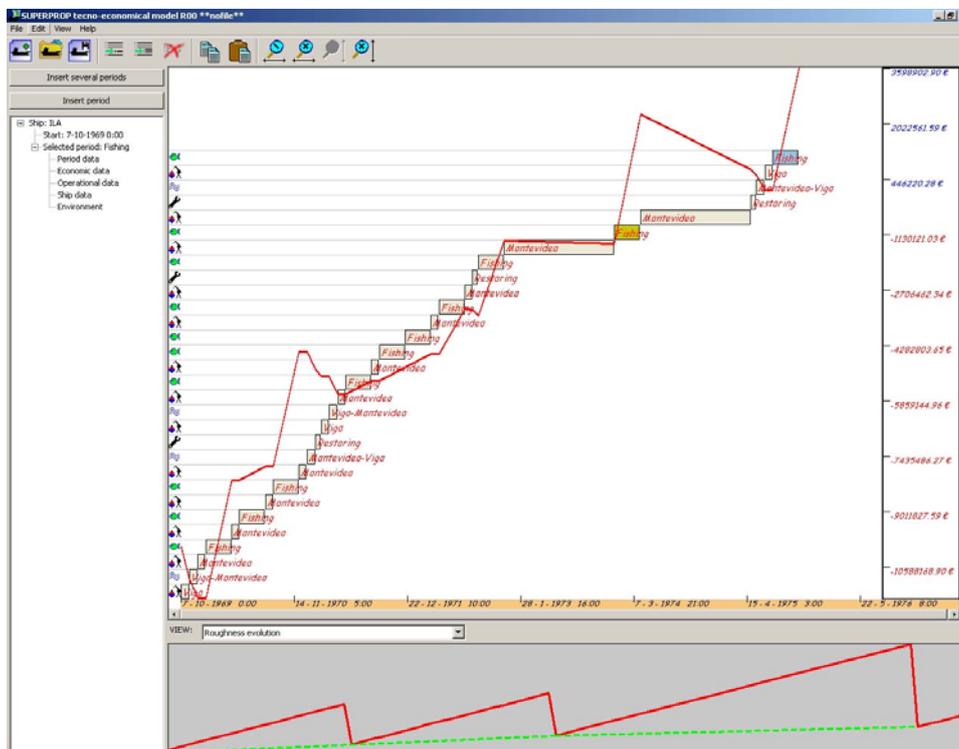


Figura 30: Modelo tecnoeconómico del proyecto SUPERPROP v0.2.00

7.- CONCLUSIONES.

De lo expuesto en los párrafos anteriores pueden deducirse los siguientes comentarios finales:

- El Proyecto SUPERPROP, objeto del presente trabajo, aborda uno de los temas más actuales del mundo marítimo, el ahorro energético basado en la optimización propulsora del buque en cada momento de su vida útil.
- Está representando un gran reto para el Grupo Investigador CEHINAV, coordinando un Proyecto Europeo de 11 participantes de 5 países europeos.
- La utilización de herramientas numéricas ha permitido la actualización de algunas de ellas como es el hecho de tener que contemplar un nuevo elemento como es la tobera así como propiciar la colaboración entre distintos Grupos de Investigación con diferentes herramientas matemáticas.
- Significativa aportación al mundo de la validación de resultados contando con valores numéricos, experimentales de los “canales de ensayos” y reales de las “pruebas de mar”.
- Gestación de un programa informático para el mantenimiento óptimo de los buques pesqueros y buques remolcadores basado primordialmente en un cierto esquema de varadas.

AGRADECIMIENTOS

Un proyecto de investigación de la envergadura del Proyecto SUPERPROP supone el esfuerzo y la aportación de muchas personas que merecerían estar en el encabezamiento de este artículo. El número significativo de las ya incluidas hace imposible tal merecimiento. Su relación en este apartado sería muy prolija y seguramente pecaría de injustos olvidos. Para todos ellos el agradecimiento de los usuarios que esperemos se beneficien de los resultados de este proyecto.

No obstante, quisiéramos señalar nuestro agradecimiento al actual “EU officer” del proyecto, Angel Rodríguez-Llerena, contribución sudamericana al proyecto, siempre dispuesto a una frase de apoyo y en algunas ocasiones con más fe en el mismo que los propios participantes.

REFERENCIAS

[1] 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.

[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] Salz, P, 2006, Annual Report '*Economic Performance of Selected European Fishing Fleets*', Ed: 2005, Agriculture Economics Research Institute (LEI-DLO), Netherlands.
- [4] Spalart, P.R. and Allmaras, S.R. (1994). *A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows*. La Recherche Aéronautique, 1:5-21
- [5] Muscari, R. and Di Mascio, a (2005). *Simulation of the flow around complex hull geometries by an overlapping grid approach*. In Proc. 5th Osaka Colloquium, Osaka, Japan
- [6] Greco, L., Salvatore, F., Di Felice, F, (2004). *Validation of a Quasi-potential Flow Model for the Analysis of marine Propellers Wake*. 25th. ONR Symposium on Naval Hydrodynamics
- [7] Pérez Sobrino, M., Minguito Cardaña, E, García Gómez, A, Masip Hidalgo, J., Quereda Laviña, R, Pangusión Cigales, L. y Gonzalez-Adalid, j. *Scale effects in model tests with CLT propellers*". 27th Motor Ship Marine Propulsion Conference, Enero 2005.
- [8] Townsin, R., 2003, *The Ship Hull Fouling Penalty*. Biofouling Vol.19 pp 9-15
- [9] Munk, T., 2006, *Measuring Hull Resistance to Optimize Cleaning Intervals*, Journal of Protective Coatings and Linings, Vol. 23 No. 7, pg 46-51.