



## **Auditorias energéticas de arrastreros del mediterráneo**

**Autor:** Juan Manuel Liria

**Institución:** Confederación Española de Pesca (CEPESCA)

**Otros autores:** Maria Santos (CEPESCA); José Fernando Núñez Basáñez

## Resumen

La investigación objeto de esta Comunicación se enmarca en la línea de actuación de Auditorías Energéticas, contemplada en la Orden ARM/1193/2009, así como en el artículo 9-a) del Reglamento (CE) nº 744/2008 de 24-7-08, referido a Auditorías energéticas en buques de pesca.

El proyecto ha sido liderado por CEPESCA (Confederación Española de Armadores de Pesca) y sus asociaciones, mientras la ETS de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid, ha sido la encargada de la realización del Trabajo Científico y de las Actuaciones de Campo.

Debido a la larga vida que tiene un buque, la mejor forma de conseguir un ahorro significativo y duradero de energía en una flota, pasa por mejorar la eficiencia de los que están ya en operación. Por ello, el objetivo inmediato del proyecto, ha sido buscar fórmulas para conseguir una mejor eficiencia energética, - con la consiguiente reducción de la generación de Gases de efecto invernadero (GHG) -, mediante actuaciones directas sobre una muestra de 32 buques. Junto a este objetivo se sitúa el más general, de fomentar una cultura de eficiencia energética en toda la flota de buques arrastreros del Mediterráneo.

La investigación se centra pues en la realización de auditorías energéticas individuales sobre esos 32 buques y se completa con propuestas de soluciones personalizadas para cada uno y también globales para la mejora de la eficiencia energética de todo el segmento de flota.

El trabajo de campo contempla un reconocimiento completo de las unidades seleccionadas, e incluye, además, pruebas reales de velocidad y de tiro a punto fijo, más un estudio posterior en el que se determinan las condiciones de trabajo del equipo propulsor, se simula el comportamiento del buque en la mar mediante técnicas de CFD, y se analizan la gestión de la energía a bordo, y la viabilidad económica y financiera de las actuaciones propuestas, derivadas de esta investigación.

**Palabras claves:** eficiencia, energetica, flota, pesca, buque, motor, carburante

## 1. INTRODUCCIÓN

El precio del gasóleo pesquero se triplicó entre 2006 y 2011, creando un problema mayor en las flotas que pescan al arrastre, en las que esta partida ha pasado a suponer entre el 35 y el 50% del coste de explotación. La larga vida útil que tienen los buques obliga a buscar soluciones válidas que mejoren la eficiencia energética de las flotas existentes.

El proyecto se centra en una de ellas, la de arrastre del mediterráneo, que cuenta con 700 buques, en todo el litoral mediterráneo español repartidos entre un gran número de puertos de 5 diferentes CCAA: Cataluña, Valencia, Murcia, Andalucía y Baleares. La falta de rentabilidad derivada de este problema está acelerando la reducción progresiva de esta flota, cuyo censo ha disminuido en un 25% en el período anteriormente indicado.

Se trata de empresas pequeñas, casi todas ellas familiares. Los buques tienen una eslora de entre 12y 24m, y un tonelaje de entre 40 y100 GT. La mayoría son de poliéster, relativamente modernos, aunque hay un 30% que son aún de madera y unos 20-30 de acero, todos ellos más antiguos.



*-Figura 1. Arrastreros del mediterráneo en puerto -*

Pescan solamente 5 días a la semana, lo que supone entre 180 y 200 días al año de actividad, con un máximo de 11 horas al día, entre la salida y la llegada a puerto. Arrastran a profundidades de entre 50 y 1000m, a velocidades de entre 2 y 4 nudos. Una parte de la flota trabaja al marisco (a más fondo) y otra parte se dedica a la pesca de merluza y otras especies demersales.

El proyecto se inició en 2009, con el Acuerdo de Colaboración entre CEPESCA y algunas de sus asociaciones con la UPM y ha durado tres años. El objetivo final es buscar fórmulas para conseguir una mayor eficiencia energética en la flota de referencia, que permita a los buques conseguir un ahorro significativo y duradero de energía, y les ayude a remontar la crisis de rentabilidad que padecen, a la vez que se reducen las emisiones a la atmósfera y con ello el impacto, mejorando su sostenibilidad medioambiental.

CEPESCA es una Entidad Asociativa sin ánimo de lucro del sector pesquero extractivo, de carácter nacional, que cuenta entre sus asociados con tres Asociaciones empresariales que agrupan buques de arrastre de diferentes puertos del Mediterráneo, y que se han prestado voluntariamente a participar en el proyecto, que son: la Asociación Provincial de Empresas de la pesca de Almería (ASOPESCA), la Asociación Local de Empresarios de Pesca Litoral de Castellón de la Plana y la Organización de Productores Pesqueros de la Marina Alta OPP-60 (Denia, Calpe y Javea).

La parte técnica del Proyecto ha corrido a cargo del Departamento de Sistemas Oceánicos y Navales (DEPSON), adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), cuyo personal, se ha encargado de la realización del trabajo científico y de las actuaciones de campo.

## **2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### ***2.1. Objetivos científico-tecnológicos***

Un primer objetivo tecnológico claro es suministrar a la industria herramientas que permitan la incorporación de una mayor cultura de eficiencia energética y ambiental, mediante la consolidación del procedimiento de auditorías energéticas, tal como el que se plantea aquí, de forma que, en el futuro, sean los actores del propio sector quienes lo demanden a corto plazo para identificar soluciones de mejora.

La utilización de tecnologías avanzadas para la realización de análisis hidrodinámicos que se ha incorporado al proyecto, y los métodos para comprobar la eficiencia con la que están trabajando realmente en el mar las plantas propulsora y generadora, pueden ser muy útiles igualmente en el futuro para contrastar la eficacia de las medidas aplicadas.

## **2.2. Objetivos económicos**

Dado que el consumo de combustible representa la partida más importante en los costes de explotación del tipo de buques a estudio, el objetivo primordial del proyecto ha sido el proponer soluciones de mejora de la eficiencia energética que puedan ser aplicadas de forma económica por la flota existente y que permitan mejorar directamente la cuenta de resultados de los buques con un período de retorno de la inversión reducido.

La comparación de los resultados de las auditorías energéticas entre buques, que aun dedicándose a la misma pesquería, son de diferente tamaño y construcción, permitirá comparar la eficiencia energética entre unos y otros, posiblemente revelando al armador que la inversión en buques más eficientes y menos contaminantes es posible y rentable.

La aplicación de estas soluciones de mejora repercutirá en la I+D y la industria naval española así como en otras flotas con similares problemas, y se estima que es posible alcanzar reducciones de consumo de entre un 5% y un 25% en función de la inversión y alcance de las soluciones implementadas.

## **2.3. Objetivos medioambientales**

El objetivo de reducción del consumo a través de una mayor eficiencia energética, es dual ya que, junto a la componente de ahorro económico, conlleva un objetivo ecológico igualmente importante, que es la reducción de todo tipo de emisiones contaminantes, lo que supone una importante contribución a la mejora del medio ambiente.

## **3. CONTRIBUCION DEL PROYECTO A LOS OBJETIVOS DE LA PPC**

Los objetivos generales de la PPC están enunciados en el Artículo 33 del Tratado y quedaron reformulados en el Reglamento (CE) no 2371/2002, de 20 de diciembre de 2002, sobre la conservación y la explotación sostenible de los recursos pesqueros en virtud de la Política Pesquera Común, como: "La explotación sostenible de los recursos acuáticos vivos y de la acuicultura, en el contexto de un desarrollo sostenible, y teniendo en cuenta de manera equilibrada los aspectos medioambientales, económicos y sociales.

La situación creada, por los sucesivos incrementos de los precios del gasoil, que se iniciaron a partir de la primavera de 2004 y desembocaron en la crisis de primavera-verano de 2008, produjo graves y generalizadas dificultades económicas y sociales en todo el sector pesquero, y llevó a la UE a la aprobación del Reglamento 744 de 24 de julio de 2008, por el que se establece una acción específica temporal para promover la reestructuración de las flotas pesqueras de la Comunidad Europea afectadas por la crisis económica.

En el mismo se establecían medidas temporales para fomentar nuevas técnicas de pesca que consuman menos energía, así como la posibilidad de contribuir con fondos comunitarios a acciones colectivas para la realización de **auditorías energéticas** de grupos buques. Es claro pues que el tipo de medidas contemplado en el presente proyecto para un grupo de buques de un segmento determinado, están encuadradas en el cumplimiento de los objetivos de la PPC.

#### **4. PLAN DE TRABAJO**

A continuación se resumen las principales tareas y acciones desarrolladas:

##### **4.1. SELECCIÓN DE LAS FLOTAS OBJETO DEL TRABAJO**

###### ***a) Selección de los buques que han participado en el proyecto***

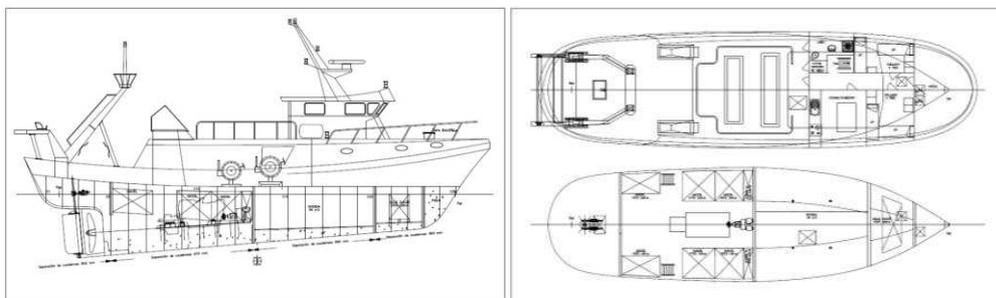
La fase de selección de los buques y de los puertos objeto de las auditorías ha corrido a cargo de CEPESCA, y de las Asociaciones de Armadores afectadas, buscando un equilibrio entre sus asociaciones y teniendo en cuenta la existencia de proyectos similares. Por razones prácticas, se han concentrado las actuaciones en un número limitado de puertos (5) para así poder alcanzar con el mismo esfuerzo un mayor número de buques y llegar a los 32 arrastreros que se fijaron como objetivo.

La selección de los buques individuales dentro de cada puerto fue realizada por las propias asociaciones entre los armadores que se ofrecieron voluntarios, dando preferencia a los más modernos, al suponerse que les queda una mayor vida útil y que, por tanto, en ellos podrá ser más rentable efectuar las reformas que se deriven de la auditoría.

###### ***b) Obtención de la documentación técnica de los buques seleccionados.***

Esta tarea, aparentemente sencilla ha presentado dificultades de cierta importancia y ha requerido la convergencia de los esfuerzos de todos los participantes ya que, por sus características, esta flota tiene un nivel organizativo relativamente bajo, lo que implica una mayor dificultad para conseguir y contrastar datos técnicos, especialmente en buques de una cierta edad, de forma que, en

muchos casos, ha sido necesario recurrir a los astilleros constructores (aquellos que todavía no han cerrado), o a los fabricantes de equipos y, muchas veces, ni aun así ha sido posible reunir toda la información necesaria.



- *Figura 2. Disposición General de un arrastrero -*

La información requerida por buque ha sido:

- Plano de Disposición General, Formas e información de características hidrodinámicas
- Experiencia de Estabilidad, Condiciones de Carga, Hidrostáticas, Curvas KN, etc.
- Equipo propulsor: Motor Principal, Hélice, Tobera, etc.
- Maquinaria Auxiliar: Generadores, Alternadores, Compresores, Equipo de Frío, etc.
- Información disponible de consumos.
- Equipamiento de pesca.

#### **c) Análisis de la información.**

La información recopilada ha sido supervisada y analizada por el Grupo de Trabajo de la ETSIN que, en algunos casos, ha necesitado completarla por medio de gestiones directas con astilleros y talleres. Toda la información ha sido tratada de forma confidencial, con total respeto a la legislación vigente relativa a la protección de datos.

#### **d) Reconocimiento a flote del buque.**

Como complemento a esta tarea, antes de las pruebas se ha realizado un reconocimiento a flote del buque, - y en algún caso en seco-, prestando especial atención a la carena, al sistema propulsor y la maquinaria y equipos instalados a bordo.

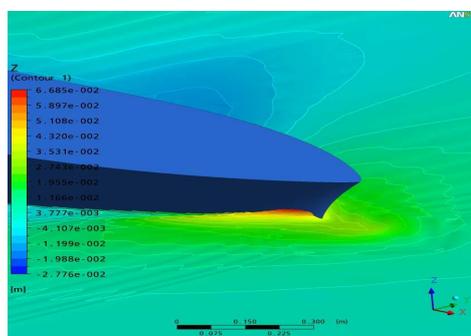


- *Figura 3. Arrastrero en seco-*

#### 4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO. DEL COMPORTAMIENTO DEL BUQUE MEDIANTE CFD.

Los avances numéricos e informáticos copan cada día parcelas en donde la metodología experimental era su único ocupante. El mundo hidrodinámico no es ajeno a esta tendencia y los desarrollos de los denominados CFD (Computational Fluid Dynamics) son ya capaces de dar resultados de tanta fiabilidad como los tradicionales ensayos hidrodinámicos.

En este contexto, el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la ETSIN dispone del programa CFX de ANSYS para resolver problemas hidrodinámicos mediante la utilización de la ecuación de Navier-Stokes promediada (RANS). El programa ha sido validado en la ETSIN con cascos de otros pesqueros, modelos similares a los que se estudian en este trabajo.



- *Figura 4. Aplicación de CFD. Entrada de olas -*

La actuación ha consistido en reproducir numéricamente la carena de los buques, mediante CFD, de tipo potencial y viscoso, y analizar su comportamiento en la mar. Con ayuda de este método pueden optimizarse los trimados del buque. El estudio detallado de los trimados más adecuados en las diferentes situaciones de carga, puede dar resultados positivos con mejoras entre un 2 y un 3% en el consumo en navegación.

#### **4.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO DEL EQUIPO PROPULSOR.**

Los buques arrastreros trabajan durante su operación en dos condiciones diferentes: *en arrastre* y *navegando*. La hélice, tanto en carga como en grado de avance, tiene un comportamiento diferente en cada una. Aunque la determinación del ajuste del propulsor, y de la potencia absorbida en cada caso, puede calcularse teóricamente, es más exacto y preferible realizar pruebas de mar. Se han realizado dos pruebas por buque:

- **Tracción a punto fijo.** En la que se determina el tiro que es capaz de desarrollar el motor y las revoluciones correspondientes, al par máximo con el buque en estación, y tirando por medio de una estacha normal al muelle.
- **Navegación libre.** La velocidad del buque en esta condición se ha determinado, mediante el empleo del GPS y el radar. Conociendo las revoluciones desarrolladas durante la prueba, la temperatura de los gases de escape y la posición de la cremallera, se puede estimar con bastante precisión la potencia desarrollada.

Conociendo el ajuste de la hélice en estas dos condiciones, es relativamente sencillo determinar la condición de **Arrastre a velocidad reducida (3 ó 4 nudos)**. Con esta información, que ha sido recogida in situ, por equipos desplazados al efecto a los puertos por la ETSIN, se ha analizado la idoneidad del proyecto del propulsor y los puntos de funcionamiento y carga del motor en cada condición.

#### **4.4. ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA A BORDO.**

En esta actuación se ha buscado optimizar la utilización de la energía a bordo de los barcos pesqueros, y podría ser considerado como un elemento integrador y racionalizador de la actividad pesquera, si consideramos ésta como una concurrencia de energías, que deben ser aplicadas de la mejor manera posible para conseguir la máxima eficiencia.

Las máquinas y motores que se emplean a bordo suelen tener, normalmente, un rendimiento muy bajo. Esto unido a la deficiente información de que se puede disponer respecto a la carga y los consumos en tiempo real, es una dificultad para un mayor desarrollo de una gestión energética satisfactoria.



- *Figura 5. Grupo electrógeno* -

Durante las visitas a bordo para las pruebas de mar, se ha recabado toda la información sobre el funcionamiento de la maquinaria auxiliar con objeto de establecer un diagnóstico de la adecuación de su punto de funcionamiento y tamaño ante la demanda eléctrica real y sus posibles mejoras.

#### **4.5. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA**

En esta tarea se ha analizado la viabilidad económica y financiera de cada una de las actuaciones recomendadas en esta investigación, con el fin de evaluar la inversión necesaria para su implementación, y se ha hecho una estimación de la amortización de esta inversión y la reducción de costes que su implementación supondrá. En el estudio particularizado de cada buque se utiliza un sistema simplificado que permite realizar las estimaciones de costes necesarias, validadas mediante los datos de casos reales.

Contra esta inversión se coloca el ahorro de combustible esperado, que implicará unos menores costes de explotación anuales y así se calcula el período de amortización de la inversión. Debe prestarse especial atención en cada caso a la vida útil que le queda al buque que, en definitiva, es el tiempo de que dispone el armador para amortizar la mejora.

## 5. METODOLOGÍA

Con la Auditoría se pretende, en primer lugar, realizar un **análisis crítico** y exhaustivo de la situación en que se encuentra el buque, desde los tres puntos de vista enunciados: El hidrodinámico, el propulsivo y el energético.

El trabajo de campo encaminado a conseguir la información técnica y datos requeridos, ha consistido básicamente en:

- Reconocimiento a flote de cada buque, prestando especial atención a la carena, al sistema propulsor y la maquinaria y equipos instalados a bordo.
- Realización de Pruebas de Tiro a Punto Fijo, utilizando un dinamómetro electrónico especial para ello, y Pruebas de Mar en Navegación Libre (velocidad y consumos).

En el análisis posterior se han ponderado las diferentes mejoras potenciales, en función del tamaño del buque y su antigüedad, para recomendar la incorporación de aquellos avances tecnológicos que puedan suponer una mejora en su comportamiento y prestaciones.

Una vez completado el trabajo de campo y el análisis posterior, como se ha indicado más arriba, se ha procedido a realizar las **recomendaciones técnicas** y el estudio de **viabilidad económica**.

### 5.1. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.

En este apartado se hacen en primer lugar unas consideraciones generales de los aspectos que ha sido preciso tener en cuenta al hacer el análisis Hidrodinámico en este proyecto específico, para luego pasar a los principales grupos de medidas y recomendaciones.

### **5.1.1. Consideraciones generales sobre las formas de los buques pesqueros**

Aunque no pueden darse normas rígidas para el proyecto de las formas de los buques pesqueros, por los numerosos condicionantes que imponen el diseño y las condiciones de servicio a este tipo de buques, sí es posible establecer recomendaciones generales o márgenes de amplitud apropiados, para muchos de los coeficientes de la carena o las relaciones que estos deben guardar entre sí, para un buen comportamiento hidrodinámico.

Al trabajarse en este proyecto con buques ya existentes, todos estos factores vienen ya dados y la mayoría de ellos no son fácilmente modificables. Por otra parte al tratarse de buques muy diferentes entre sí, hechos en astilleros y momentos distintos, los valores encontrados presentan un abanico muy amplio.

La actuación ha consistido pues en primer lugar en recabar información caso por caso, sobre las características hidrodinámicas de cada carena, para poder compararlas con los valores más recomendables y a la vez comprobar si la situación actual de explotación comprobada "in situ" durante los trabajos de campo revela cambios apreciables.

A partir de este punto se puede hablar de medidas recomendadas que mejoren el comportamiento hidrodinámico o corrijan los defectos encontrados, y de los métodos que pueden emplearse para predecir los efectos que dichas medidas van a producir.

### **5.1.2. Consideraciones sobre la Resistencia a la Marcha de Buques Pesqueros.**

Una característica importante y bastante común en esta flota, es la importancia que sus armadores han dado tradicionalmente a la velocidad en navegación, ya que, esta característica es un factor de competitividad, al permitirles alcanzar el caladero y regresar de él en el menor tiempo posible, optimizando así la utilización del tiempo de pesca.

A este respecto, conviene recordar que lo que define si una embarcación es o no rápida es, precisamente, una relación adimensional entre dicha velocidad, en valor absoluto, y la eslora del buque, que se conoce como Número de Froude (Fn), cuya expresión es:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L_{pp}}}$$

Cuando un barco de pesca navega a números de Froude próximos o superiores a 0,40, - y esto ocurre en bastantes de los buques analizados-, la componente de la resistencia al avance debida a la formación de olas del buque tiene un valor significativo.

La magnitud relativa de cada una de las componentes de la resistencia al avance de un barco depende de la velocidad a la que se mueve – y en particular del número de Froude - y de las formas de la carena. Para valores pequeños de la velocidad, la resistencia ocasionada por la viscosidad predomina sobre la resistencia por formación de olas, pudiendo llegar a ser hasta un 80 % de la resistencia total.

A medida que la velocidad crece, la resistencia por formación de olas también lo hace, mientras que la resistencia de origen viscoso crece más despacio. Cuando la velocidad del buque llega a ser suficientemente alta, el valor que toma la resistencia debida a la formación de olas es tan alto que supone una barrera infranqueable para carenas de formas convencionales.

La primera consecuencia de lo anterior es que, con independencia de la valoración estratégica subjetiva que los operadores hacen de la velocidad en navegación, la recomendación general para mejorar la eficiencia energética de todos los buques estudiados va hacia la necesidad de reducir esta velocidad.

En el trabajo de campo realizado se ha visto que, con los elevados valores actuales del precio del petróleo, muchos operadores se han dado ya cuenta de esta necesidad, y la reducción de la velocidad de navegación en la flota es hoy un hecho constatado.

### **5.1.3. Predicción de Resistencia al Avance de Buques Pesqueros.**

Aunque uno de los objetivos del trabajo de campo es establecer la curva potencia – velocidad, para poder concretar las mejoras a proponer, es necesario retener la posibilidad de hacer predicciones de la resistencia al avance individuales para cada buque, que servirán también para validar y contrastar los valores obtenidos en las pruebas.

En la Investigación de la Referencia se pusieron a punto y mecanizaron los cálculos necesarios para la predicción de la resistencia al avance de buques pesqueros, de acuerdo con tres métodos que han demostrado a lo largo de los años su utilidad:

1. Método de Van Oortmerssen (Referencia), de aplicación para buques pequeños como arrastreros, etc.
2. Método de García Gómez (Referencia), de aplicación para buques pesqueros, con o sin bulbo de proa, con esloras entre 25 y 60 metros.
3. Método de Calisal y McGreer, (Referencia), de aplicación para buques pesqueros, arrastreros y cerqueros, de baja relación eslora/manga.

Basados en los métodos de predicción de resistencia al avance descritos más arriba, se propone una herramienta auxiliar que es de utilidad para realizar una estimación de la oportunidad de montar un bulbo de proa en un proyecto nuevo, o de añadirlo en un buque existente cuyas prestaciones se quieran mejorar.

Hay que indicar que este tipo de herramientas debe utilizarse teniendo en cuenta sus rangos de aplicación y comprobando que las características del buque que se está proyectando o analizando quedan dentro de las consideradas durante el desarrollo de la herramienta empleada. Esa es la razón por la que se han propuesto tres procedimientos para predecir la resistencia al avance de los buques pesqueros y no uno solo.

#### **5.1.4. Oportunidad de la Instalación de Bulbos de Proa.**

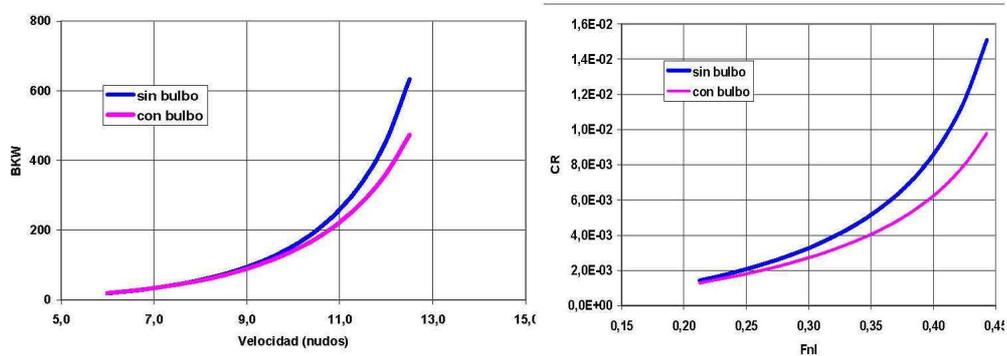
La mayoría de los buques analizados no tienen bulbo de proa. Con los métodos de construcción actuales, en los buques de poliéster es relativamente sencillo y económico y da buenos resultados instalar un bulbo de proa no integrado. Usando el método expuesto en la Referencia de este Estudio se está en condiciones de estimar la oportunidad o no de instalarlo. Basta con aplicarlo a un pesquero sin y con bulbo y comparar los resultados.



- *Figura 6. Bulbo de proa no integrado* -

Aunque, antes de proceder a la instalación de un bulbo es necesario un estudio detallado particularizado para ese buque concreto, con cierta aproximación se puede decir que las ventajas estimadas de esta reforma son:

- Aumento de Velocidad (+ 0,2-0,4 kn)
- Ahorro de Combustible (- 5 a 7 %)
- Mejor Comportamiento en la mar



- Figura 7 - Ejemplo de predicción del efecto del bulbo de proa

La cuantificación fiable, global y final de los efectos, beneficiosos o perjudiciales, del bulbo, deberá ser confirmada experimentalmente y dependerá, en gran medida, de los asientos del buque y los calados de proa correspondientes a las condiciones de carga más frecuentes.

### 5.1.5. Consideraciones sobre la Operación del Buque.

Los buques se diseñan para obtener las máximas prestaciones el día de las pruebas de mar en aguas tranquilas y con el casco limpio, recién pintado y nada más salir de dique y, así, satisfacer al armador con los menores gastos posibles.

Con el uso, el buque se va ensuciando y encontrará en la mar olas y vientos que aumentan su resistencia al avance, con lo que la hélice funciona fuera del punto para el que fue diseñada, trabajando por lo tanto con un rendimiento no óptimo. La potencia necesaria para trabajar a la velocidad especificada es mayor y el consumo aumenta de combustible porque:

- Ha aumentado la resistencia al avance del buque debido a las olas, al viento y a la mayor rugosidad del casco.
- Ha disminuido el rendimiento cuasi propulsivo porque la hélice ya no trabaja en el punto óptimo y, porque la rugosidad en las palas de las hélices ha aumentado.

En realidad, las condiciones de servicio del buque varían de día en día ya que las intensidades y direcciones del viento, y las alturas, rumbos y características de las olas lo hacen, aunque se pueden paliar sus efectos si en el proyecto se han tenido en cuenta, los rumbos, alturas y periodos de las olas más probables en la zona prevista de operación

En cualquier caso, el armador siempre tiene algunos recursos para tratar de reducir el incremento del consumo de combustible de su buque debido a estas causas:

### ***Optimizar el Asiento del Buque***

Las condiciones de carga del buque, desplazamiento y trimados, son variables, y la forma en que el armador o patrón pueden actuar para ahorrar combustible, es procurando que navegue con un trimado seguro y que sea favorable en cuanto a rendimiento propulsivo. Está demostrado que el asiento afecta de forma importante al rendimiento propulsivo por lo que, a igualdad de desplazamiento, se puede ahorrar combustible si se lleva el buque a su trimado más favorable desde el punto de vista de su resistencia al avance.

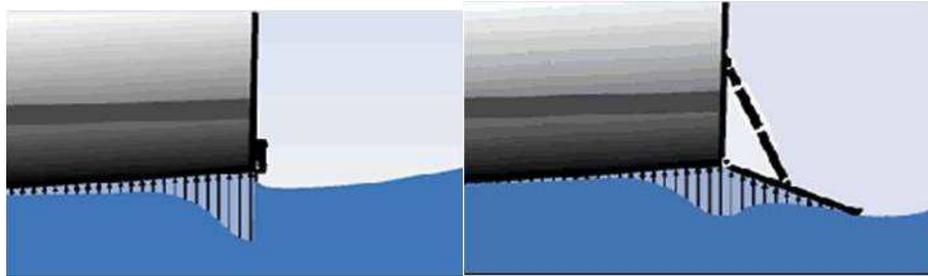
Para conocer qué trimados son más recomendables y cuales menos, se pueden hacer una serie de ensayos en canal cuyo coste se amortiza en buques nuevos a los pocos meses de haber puesto al buque en operación.



*-Figura 8. Ensayo en el CEHINAV (ETSIN-UPM)-*

Los asientos de mínimo consumo de combustible se pueden alcanzar alterando la disposición de pesos a bordo o mediante dispositivos especiales.

Una forma muy común de corregir los asientos dinámicos, y en general de disminuir los calados en popa, es haciendo reformas locales en el codaste para conseguir pequeños aumentos de la eslora del buque o mediante la adaptación de cuñas fijas adosadas en la popa. También se pueden disminuir los asientos dinámicos en popa montando flaps o interceptores regulables.



-Figura 9. Flaps y cuñas

### **Rugosidad del Casco y de la Hélice**

Pasado un cierto periodo de tiempo, después de que el buque sale del varadero recién pintado, la protección de la pintura va debilitándose y, empieza a aumentar la rugosidad del casco debido a la fijación en él de distintos organismos, primero microscópicos, y luego ya visibles como algas, moluscos, etc., que producen un notable incremento de la resistencia de fricción del buque, y en consecuencia aumentan el consumo necesario de combustible, para mantener las prestaciones del barco y, con ello, los costes de operación.

La velocidad con la que se produce esta adherencia de organismos y, por lo tanto, el aumento de rugosidad del casco depende, básicamente, de dos componentes: La rugosidad temporal provocada por la incrustación de organismos vivos y la permanente debida a la acumulación excesiva de capas de pintura.

A partir de los estudios realizados por la British Ship Research Assotiation (BSRA), que llevó a cabo un amplio programa de investigación al respecto que se cita, por ejemplo, en la referencia [27], J.R. Scott y Lanckenby llegaron a unas conclusiones prácticas aproximadas muy concretas en las que afirman que:

1. Para mantener una velocidad dada, un aumento de rugosidad del casco de 10 micras, hace necesario un aumento de potencia de 1 %.
2. A igualdad de potencia, un aumento de rugosidad de 10 micras, implica una disminución de velocidad del 0,3 %.

Aunque depende de la calidad de producción del casco y de los métodos constructivos del astillero, se suele considerar como un valor medio aceptable, una amplitud de rugosidad media aparente (MAA), basada en una longitud de 50 mm, de 150  $\mu$ m. Durante la operación del buque, esta rugosidad aumenta y aunque se limpien los fondos se reducirá, nunca volverá a alcanzar su valor inicial.



*-Figura 9. Pintura anti-fouling con siliconas y polímeros de flúor*

Desde la aparición de las primeras pinturas anti-incrustantes sin biocidas para embarcaciones rápidas en 1996, se ha progresado mucho y hoy día se dispone de pinturas basadas en el uso de siliconas y de polímeros de flúor que, mejoran enormemente las prestaciones incluso para los buques menos rápidos. Algunos fabricantes prometen ahorros de los costes de combustible de hasta el 6%, dependiendo de las condiciones de servicio de los buques.

La ausencia de biocidas proporcionará también ahorros en las entradas en dique ya que el tratamiento de residuos y de las aguas de lavado del casco será más barato.

Aunque este tipo de pinturas son más caras hay que contar con que sus características de durabilidad, flexibilidad y resistencia frente a la abrasión, permiten alargar los periodos entre las entradas en dique hasta dos años o más.

## **5.2. ANÁLISIS DE LA PROPULSIÓN.**

En el análisis del comportamiento de la propulsión hay que responder a preguntas como:

- ¿Es adecuado el equipo propulsor instalado?
- ¿Es adecuada la situación de la hélice en el codaste del buque?
- ¿Es adecuado el diámetro de la hélice?
- ¿Es adecuada la elección de la velocidad de giro de la hélice (RPM)?
- ¿Son adecuadas las restantes características principales de la hélice?

Para algunos buques, la respuesta a las preguntas anteriores no será la deseada, y ello indicará que, en la decisión correspondiente, prevalecieron en su día criterios no hidrodinámicos y como consecuencia el consumo de combustible es inadecuado.

Hace años podría ser aceptable seleccionar un reductor desfavorable desde el punto de vista del rendimiento de la hélice, para obtener por ejemplo, un coste de adquisición menor. Hoy en día, el mayor coste de un reductor más adecuado desde el punto de vista de rendimiento de la hélice, queda fácilmente compensado a los pocos años de operación del buque.

Por otra parte, la geometría de las hélices que montan este tipo de buques pesqueros está generalmente basada en series sistemáticas, que si bien proporcionan normalmente prestaciones satisfactorias, pueden mejorarse significativamente con un diseño ad hoc.

### **5.2.1. Consideraciones sobre la Adecuación de la Hélice**

A continuación se exponen muy brevemente las consideraciones que se deben hacer sobre la bondad de una hélice que ya funciona en un barco en operación y las posibles respuestas a cada una de las preguntas.

#### ¿Es adecuado el tipo de propulsión instalado?

En el caso de pesqueros la disyuntiva es montar hélices de paso fijo o de paso controlable, y en ambos casos decidir si la hélice va libre o en una tobera. La mayoría de los buques estudiados tienen instalada actualmente una hélice fija libre, mientras que, los mejores resultados en cuanto a eficiencia energética se obtienen con paso variable y tobera.

Un cambio en el sistema propulsor tiene muchas implicaciones, y es necesario sopesar con mucho detalle los “pros y contras” oportunos y las soluciones alternativas, ya que los costes implicados, tanto de adquisición de nuevos equipos como de instalación, son considerables y se han de justificar a partir del perfil operativo previsto para el buque.

#### ¿Es adecuada la situación de la hélice?

El funcionamiento de la hélice será tanto mejor cuanto más uniforme sea el flujo que le llega. Se deben evitar por lo tanto codastes demasiado cerrados y hélices con sus puntas de pala muy cercanas al casco.

Se deben reducir al mínimo los apéndices del casco situados aguas arriba de la hélice y distanciarlos cuanto sea posible de ella. Si el flujo que llega a la hélice no es uniforme, el riesgo de que ésta cavite y de que se produzcan ruidos y vibraciones será alto por muy experimentado que sea el proyectista del propulsor.

El calado de la hélice también juega un papel importante: a mayor columna de agua sobre la hélice menor será su tendencia a la cavitación. Además, cuanto más sumergida esté menor será la probabilidad de que emerja cuando se navegue en estados severos de la mar.

En muchos de los buques estudiados los huelgos en el codaste son escasos, y las soluciones a estos casos son bastante problemáticas.

¿Es adecuado el diámetro de la hélice?

¿Es adecuada la elección de la velocidad de giro de la hélice?

La respuesta a estas dos preguntas ha de ser simultánea, pues el diámetro de mayor rendimiento de la hélice está íntimamente ligado a la elección de su velocidad de giro. Una vez conocida la resistencia al avance del buque es cuando se puede seleccionar la hélice más adecuada que entregue el empuje necesario con el mayor rendimiento posible.

Normalmente, las hélices de mayor diámetro girando a las menores RPM son las de mayor rendimiento. Sin embargo, el tamaño del codaste del buque limita el diámetro máximo de la hélice compatible con unas ciertas claras mínimas entre ella, el casco y el timón.

Por otro lado, el conseguir las RPM óptimas para la mayor hélice que quepa en el codaste del pesquero puede requerir relaciones de reducción de las RPM del motor excesivas. Ni el peso ni el empacho de estos reductores, ni el coste de fabricar un reductor ex profeso para cada buque harían viable su adquisición.

Por lo tanto, una vez más, se debe buscar una solución de compromiso en cada caso, analizando las opciones disponibles para optimizar el sistema instalado y seleccionando la combinación de diámetro y RPM de la hélice de mejor rendimiento, dentro de las restricciones impuestas por las características particulares de cada buque.

¿Son adecuadas las restantes características principales de la hélice?

La relación de áreas de la hélice vendrá determinada por su tendencia a la cavitación. Este fenómeno es siempre indeseable y cuanto mayor sea el riesgo de cavitación mayor será la relación de áreas necesaria, con lo que aumentará la resistencia de fricción al avance de las palas, disminuyendo así su rendimiento.

### **5.2.2. Condiciones de Mantenimiento.**

El estado de mantenimiento del casco y de la hélice del buque afectan al comportamiento hidrodinámico y, por lo tanto, a la eficiencia energética. Se incluyen aquí unos algunos comentarios relacionados con los aspectos propulsivos que se pueden ver más afectados.



*-Figura 10. Varada de mantenimiento-*

Durante la vida del buque, para una misma potencia absorbida por la hélice, las RPM del motor sufren una disminución gradual que llega a valores entre el 3 % y el 6 % de los nominales, y que se recupera sólo parcialmente cuando el buque entra en dique.

A par constante, es decir, a igualdad de consumo de combustible, esta disminución de RPM reduce la potencia propulsora y la velocidad del buque. Para mantener las RPM nominales del motor, hay que aumentar el par del motor, es decir, la presión media efectiva en los cilindros lo que, además de aumentar el consumo de combustible, sobrecarga el motor.

El incremento de la resistencia al avance que causa este “apesantamiento” de la hélice es debido, como ya se ha dicho, al aumento de la rugosidad del casco, desperfectos en la protección, abolladuras del mismo, etc.

La rugosidad también aumenta gradualmente en las palas de la hélice deteriorándolas. Ello trae consigo una pérdida del rendimiento con el consiguiente aumento del consumo de combustible necesario. Ello favorece también la aparición de la cavitación que, además de ruidos y vibraciones produce pérdidas del rendimiento y erosión de las palas que, a su vez aumenta aún más su rugosidad.

Por otra parte, la suciedad de la carena aumenta el espesor de la capa límite, lo que se traduce en un aumento del coeficiente de estela, que disminuye la velocidad de entrada del flujo a la hélice, alterando su punto de funcionamiento.

Un buen mantenimiento con entradas a varadero, programadas en las que, además de limpiar los fondos y las palas de las hélices, se compruebe que la protección catódica en el codaste de los buques funciona adecuadamente, que la superficie y volumen de los ánodos de sacrificio es la adecuada, y que estos no alteran el flujo que llega a la hélice, consigue reducir estos efectos hasta un límite razonable.

Además, resulta inevitable que, a lo largo de la vida del buque, su planta propulsora se deteriore debido a desgastes de las camisas de los cilindros, calentamientos excesivos de las partes móviles, rozamientos elevados en los apoyos y en las transmisiones, etc. Todos estos factores suponen, al final, además de un aumento del consumo de combustible a igualdad de potencia entregada a la hélice, un mayor “apesantamiento” de la misma.

Estas circunstancias desfavorables deben tenerse controladas, realizando los trabajos de mantenimiento preventivo recomendados tanto para el motor principal como para los servicios auxiliares, y en las visitas realizadas a los buques en puerto se ha tratado de establecer la situación real de cada uno.

En cualquier caso, por bien mantenido que esté el buque, cuando ya tiene algunos años es necesario valorar la necesidad de tomar alguna de las medidas que se analizan en los puntos siguientes.

### **5.2.3. Recorte o sustitución de las hélices**

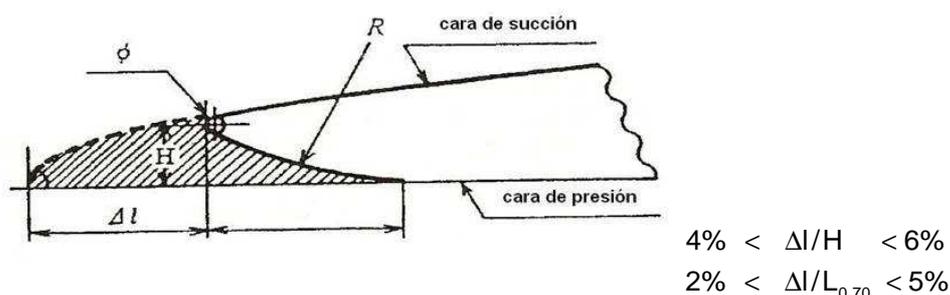
La predecible variación progresiva y continua a lo largo de la vida del buque de las condiciones de servicio del conjunto hélice – motor obliga al diseñador a tomar precauciones, que se traducen en proyectar, la hélice, en un cierto grado de ligereza que puede variar entre el 3 % y el 6 %, de forma que aquella absorba en pruebas del 85 % al 90 % de la potencia nominal al 100 % de las RPM.

Las pruebas realizadas en los trabajos de campo permiten evaluar la situación real de funcionamiento en que se encuentra y la necesidad o no de hacer cambios. La modificación de una hélice para aligerarla y ajustarla a sus condiciones reales de servicio tiene el objetivo de reducir su paso medio efectivo y puede hacerse de tres maneras:

1. **Recortando el diámetro:** Es el sistema más drástico, rápido y fácil de llevar a cabo, y se puede realizar sin desmontar la hélice, pero reduce bastante el rendimiento y altera el momento de inercia polar de la hélice pudiendo aparecer vibraciones torsionales que antes no existían. Además, reduce el área de las palas lo que aumenta considerablemente el riesgo de cavitación.
2. **Modificación del paso en caliente.** Consiste en aplicar calor a las palas hasta que se puedan retorcer controladamente las secciones cilíndricas más exteriores para reducir así el paso medio y conseguir el aligeramiento de la hélice. Es un trabajo delicado, que exige desmontar la hélice y trasladarla al taller. No se puede garantizar un acabado perfecto y pequeñas diferencias entre las distintas palas pueden dar lugar a fluctuaciones de par y de empuje y a vibraciones inexistentes antes de la modificación. Además, si la reducción de paso es elevada, el paso de punta de pala puede quedar pequeño, lo que aumenta el riesgo de cavitación, que puede provocar erosión en las palas, y una caída importante del rendimiento.



La figura 12, muestra el detalle de un recorte como los descritos, y cómo se altera la geometría del perfil de cada sección cilíndrica y se aprecia cómo se consigue levantar el borde de salida una distancia "H" reduciendo la longitud de la sección una distancia " $\Delta l$ "; el nuevo borde de salida se remata con un radio de acuerdo correspondiente. Es obvio que ni la planificación de un recorte de este tipo, ni su ejecución deben dejarse en manos de gente poco experta.



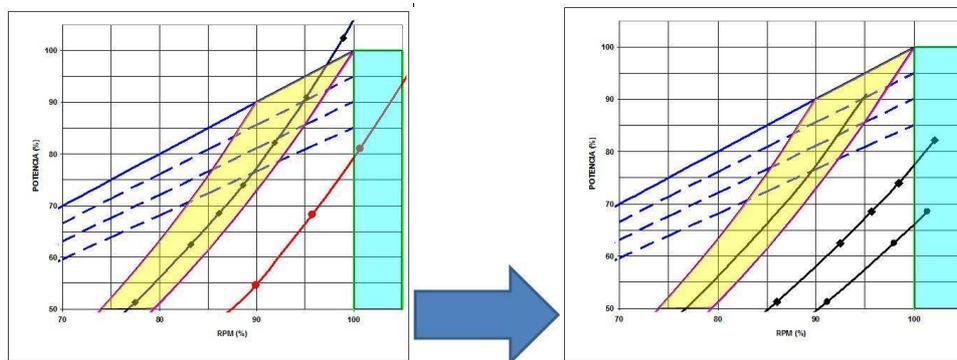
-Figura 12. Detalle del recorte del borde de salida de un perfil-

Si la obra se proyecta y ejecuta adecuadamente, se pueden conseguir con este método aligeramientos de las hélices entre, aproximadamente, un 1.5% y un 4.5%. Con carácter orientativo, se puede decir que las magnitudes indicadas en las figuras, para la sección cilíndrica a  $x = r/R = 0.70$ , pueden oscilar entre los valores dados.

#### 5.2.4. Reductor de dos Velocidades.

Una solución intermedia interesante que ya funciona en alguno de los buques estudiados, consiste en montar una hélice de palas fijas accionada a través de un **reductor que dispone de dos relaciones distintas de reducción**, es decir, se trata de montar un cambio de marchas mucho más sencillo de los que se usan corrientemente en la industria de la automoción. Dado que normalmente existen en un pesquero dos condiciones de trabajo claramente diferenciadas, buque arrastrando o en tránsito, parece suficiente que estos reductores dispongan sólo de dos ruedas reductoras.

Dado que la potencia propulsora instalada en los buques pequeños es considerable, el empacho de estos reductores limita la diferencia entre la velocidad de giro a su salida. Lo habitual es que esta diferencia sea entre el 10 % y el 15 %.



-Figura 13. Diagrama de funcionamiento de un motor propulsor diesel-

En la figura 13, el diagrama de la derecha muestra un esquema típico del funcionamiento de un motor diesel marino y en ella la curva roja, con marcadores circulares corresponde al funcionamiento del motor navegando en lastre con el buque nuevo en condiciones de pruebas; el motor va desahogado y la hélice resulta ligera y sólo absorbe, el 79 % de la potencia máxima al 100 % de las RPM.

Por el contrario la curva negra, con marcadores romboidales corresponde al funcionamiento del motor cuando se navega en olas y a plena carga, a los dos años de salir de dique: El motor trabaja en zona de sobrecarga, la hélice es pesada y absorbe el par máximo del motor a un régimen de RPM inferior al nominal, y no se puede llegar al 100% de la potencia.

En la figura de la derecha se muestra la curva de funcionamiento del motor durante la operación de arrastre. En este ejemplo, - curva negra sin marcadores-, el motor estaría trabajando en sobrecarga.

La adopción de un reductor de dos velocidades, con la segunda velocidad dando un 10 % más de RPM que con la primera velocidad, haría que el motor trabajase, en las mismas condiciones de arrastre, siguiendo la curva inferior, negra con marcadores romboidales, que ya queda en la zona de funcionamiento continuo sin restricciones del motor.

Con este ejemplo quedan bastante claras las ventajas de la adopción de los reductores de dos marchas. Sus costes de adquisición se compensarán rápidamente evitando sobrecargas y averías del motor, permitiendo funcionar a las hélices con buenos rendimientos propulsivos. Esta solución se ha considerado adecuada para ser recomendada en varios de los buques auditados.

### **5.3. GESTIÓN DE LA ENERGÍA A BORDO**

El objetivo principal de este análisis es la identificación y desarrollo de posibles acciones cuya aplicación puede originar un ahorro en el consumo de combustible de la flota considerada.

Los barcos pesqueros de la flota aquí contemplada se caracterizan por tener unos espacios disponibles muy ajustados lo que impone grandes limitaciones a la instalación de equipos adicionales, de tal forma que toda modificación que se proponga en ellos tendrá que tener en consideración el volumen, (empacho) y dimensiones del sistema propuesto, así como su peso y posición a bordo que, en ocasiones, podrían no ser aceptables por afectar en exceso a la estabilidad del pesquero.

Si en los apartados anteriores se han hecho consideraciones relativas a la generación y consumo de la energía vinculada a la propulsión y a la condición de arrastre. Asimismo en la auditoría energética de cada uno de los buques, en esta sección del proyecto se ha analizado de forma específica para cada buque, lo relativo a la generación y consumo de energía auxiliar y su posible optimización.

Nos limitaremos aquí a indicar las posibilidades de uso de determinados sistemas que son de uso común en otras flotas o en otras ramas industriales y que podrían ser útiles para mejorar la gestión de la energía a bordo de los arrastreros del Mediterráneo.

#### **5.3.1. Utilización de PTOs y Alternadores de Cola**

Los motores principales de los barcos pesqueros son por necesidad de pequeño peso y volumen, por lo que, en la gran mayoría de los casos se recurre al uso de motores rápidos o semi-rápidos. Como consecuencia de ello, para que la hélice gire a las revoluciones óptimas se hace necesario el uso de una caja reductora de engranajes, en la que con frecuencia suelen incorporarse tomas de fuerza para generar energía auxiliar.

En aquellas embarcaciones, como es el caso de los arrastreros, en que se producen dos regímenes diferenciados de funcionamiento del sistema propulsor debido a que la velocidad adecuada durante la faena de pesca es inferior a la velocidad durante la navegación hasta el caladero o hasta el puerto base, es frecuente la utilización de alternadores de cola, para conseguir un mejor régimen de utilización del motor propulsor en la región de máximo rendimiento.

Se puede afirmar que la instalación de alternadores de cola y máquinas accionadas a través de PTO es una actuación que propicia el aprovechamiento de la energía, de ahí que se haya extendido rápidamente y pueda decirse que ya es común en la flota pesquera española, sin embargo los alternadores de cola se han usado hasta ahora solamente en buques con hélice de paso variable por la necesidad de mantener un régimen de revoluciones constante para mantener la frecuencia.

Las tecnologías más recientes de motores con frecuencia variable, amplían el campo de utilización de los generadores de cola, posibilitando su uso en buques con hélice de paso fijo.

### **5.3.2. Aprovechamiento de Energías Residuales**

Los barcos mercantes, de mayor porte que los pesqueros, montan sistemas y equipos que permiten el aprovechamiento de la energía térmica residual que genera la planta propulsora y que debe ser evacuada al medioambiente, localizada principalmente en los gases de exhaustación y en el agua de refrigeración

Los barcos pesqueros carecen, en su mayoría, de sistemas adecuados para el aprovechamiento de las citadas energías térmicas residuales, debido, entre otras causas, a que por una parte se ha tratado de minimizar los costes de construcción de dichos barcos y, por otra parte, se ha considerado conveniente evitar la complicación de sus circuitos con objeto de que su operación y mantenimiento esté al alcance de las tripulaciones de los pesqueros, de menor cualificación que las tripulaciones de los mercantes. Por ello, salvo en pesqueros de grandes dimensiones no se han instalado hasta ahora dichos sistemas.

En el caso de los arrastreros del Mediterráneo, las limitaciones de espacio y la intermitencia del uso acentúan los problemas de utilización de estas tecnologías como puede verse en los apartados siguientes.

#### ***5.3.2.1. Viabilidad Técnica de la recuperación de energías residuales***

La mayoría de las tecnologías que se utilizan para recuperar energías residuales no son de aplicación a los buques contemplados en este proyecto por falta de espacio o porque podrían crear problemas de estabilidad al requerir la incorporación de equipos pesados y voluminosos en zonas altas.

Por estos motivos se ha desestimado la incorporación de tecnologías tales como la recuperación mediante plantas de vapor auxiliar, ya sea por medio de turbogeneradores o calderetas de exhaustación, o los equipos industriales de absorción.

La única opción que podría ser viable en este tipo de barcos pesqueros es la recuperación mediante equipos industriales de absorción que utilizan como fuente de energía el agua caliente, que podrían usarse para satisfacer las necesidades de climatización de las acomodaciones

Dadas las limitaciones de su utilización tampoco se ha llegado a hacer recomendaciones concretas en este sentido en los buques auditados, especialmente por la corta duración de las jornadas de pesca que impediría la correcta amortización de estos equipos con las tecnologías actuales.

### **5.3.3. Utilización de Motores Electrónicos.**

La electrónica, ampliamente utilizada en numerosos equipos y sistemas a bordo, se emplea ahora en los denominados motores electrónicos o inteligentes.

Estos motores aplican un sistema de control electrónico para su sistema de inyección de combustible de accionamiento hidráulico y su válvula de escape, así mismo de accionamiento hidráulico. La fuerza motriz procede de un circuito hidráulico, conocido como “common rail”, accionado por el propio motor, y que trabaja a una presión de unos 200 bar.

Estos motores suelen poseer sistemas de control que reciben la información de diferentes sensores localizados en zonas sensibles del motor que transmiten datos para que éste los evalúe y actúe. Se puede utilizar por control remoto desde cualquier parte del barco.

Los motores electrónicos se controlan mediante la regulación del flujo de combustible, no solo por la cantidad inyectada en la cámara de combustión, sino también por la presión, la sincronización y la duración de cada ciclo de inyección.

Aunque el precio de estos motores es hasta un 20% más elevado que el de los convencionales, sus ventajas son muchas, y entre ellas hay que destacar: la economía de consumo, Menores emisiones de NOx ,y un control eficaz del mantenimiento preventivo del motor, registro de datos y estrategias de protección. Es esta en resumen una tecnología muy recomendable para aquellos buques que precisen un cambio de motor ya que, hasta el momento no es viable la conversión de motores convencionales en electrónicos.

### **5.3.4. Gestión de la lubricación**

El objetivo final de la lubricación es mejorar la fiabilidad de las máquinas, que trabajen el máximo tiempo posible en condiciones óptimas. Se trata de un tema que se tiene poco en cuenta por regla general, ya que disponer de un lubricante bueno, no implica que los resultados lo vayan a ser, hay que ir más allá y ahí encaja la gestión de la lubricación.

## **6. RECONOCIMIENTO Y PRUEBAS DE MAR DE LOS BUQUES.**

El Trabajo de Campo realizado a bordo de las embarcaciones seleccionadas por el Equipo Técnico de la UPM, puede dividirse en tres Apartados:

- Reconocimiento del Buque
- Realización de Pruebas de Velocidad en Navegación Libre y
- Realización de Pruebas de Tiro a Punto Fijo

Se exponen a continuación los aspectos más importantes a considerar en cada uno de los paquetes de trabajo antes mencionados.

## 6.1. RECONOCIMIENTO DEL BUQUE

Cada buque visitado ha sido reconocido exhaustivamente por el Equipo Técnico, tomadas fotografías de los equipos y maquinaria de aquél y ampliada la información existente mediante entrevistas técnicas con el Patrón y el Maquinista de la embarcación.

Desde el punto de vista logístico y para la buena realización de los trabajos ha sido necesario:

- ✓ Avisar a los Armadores para que tengan el buque dispuesto en una condición de carga lo más cercana posible a la más habitual.
- ✓ Poder hablar en algún momento con el armador de cada barco, el patrón – si no es la misma persona-, y el maquinista.
- ✓ Presencia a bordo de tripulación suficiente durante las pruebas.
- ✓ Datos relativos a las redes, puertas y aparejos.
- ✓ Obtener los datos de consumos y días trabajados en intervalos largos de tiempo.
- ✓ Cantidades de pesca descargadas y valor también en períodos largos.

## 6.2. PRUEBA DE VELOCIDAD EN NAVEGACIÓN LIBRE

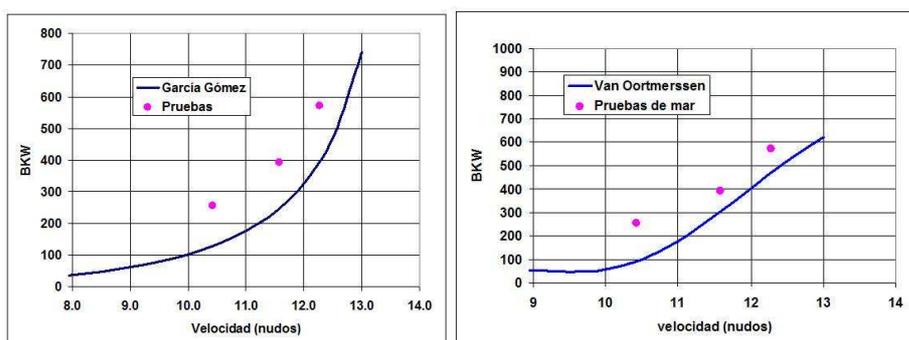
Al realizar la Prueba de Velocidad, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Establecer el desplazamiento en pruebas del buque midiendo con precisión los calados en proa y en popa. Se ha procurado que coincida con uno intermedio entre el de ida y el de vuelta al caladero.
- Constatar el grado de rugosidad del casco, y el tiempo transcurrido desde la última limpieza de fondos.
- Las pruebas se han realizado de forma progresiva en el siguiente orden:
  - A una velocidad inferior a la habitual de ida y vuelta del caladero.
  - A la velocidad habitual de ida y vuelta del caladero.
  - A la correspondiente a la máxima potencia del motor.
- Las velocidades se han medido mediante GPS, promediando las lecturas tomadas, al menos durante tres minutos, una vez que el buque se ha estabilizado.
- Las carreras se han repetido a rumbo encontrado, con la misma duración, empezando a medir una vez estabilizadas velocidad y rumbo, tras virar 180°.
- En cada carrera se ha navegado a rumbo constante y suficientemente alejado de la costa, en aguas profundas, con viento suave, en ausencia de corrientes, y minimizando las metidas de caña.
- La potencia propulsora, se ha estimado con los mejores datos disponibles: Por lectura directa si se trata de motor electrónico, con los datos de las pruebas de banco para obtener el valor de los pares motores relacionándolos con el grado de inyección de combustible o bien por la temperatura de los gases de escape.

- Las curvas potencia – velocidad obtenidas en estas pruebas se han calibrado con uno de los métodos numéricos indicados en 5.3.1 (García Gómez, etc.) para poder detectar aquellos motores que estén demasiado fuera de punto.
- Se ha medido el trimado dinámico y se ha visualizado el aspecto del espejo y de los trenes de olas, transversal y divergente, pues estos datos ayudan a valorar el comportamiento del buque y a “anclar” las simulaciones realizadas con CFD.

La figura 14 siguiente muestra la validación de los resultados obtenidos en pruebas para uno de los buques auditados, por comparación con los valores calculados, aplicando dos de los métodos mencionados anteriormente.

En ambas figuras se puede apreciar que la potencia requerida por el buque es superior a la predicha por ambos métodos. Aunque los métodos indicados son de aplicación a buques nuevos navegando en aguas tranquilas, se puede concluir que las prestaciones del buque son algo inferiores a las esperadas desde un punto de vista estadístico.



*Figura 14.- Comparación de los resultados de pruebas de mar con la predicción basada en los métodos de García Gómez y Van Oostmerssen*

### 6.3. PRUEBA DE TIRO A PUNTO FIJO.

Se ha podido comprobar se trata de una prueba muy compleja de implementar y que implica cierta peligrosidad, lo que obliga a tomar todas las precauciones posibles para evitar daños y averías. Los detalles más importantes de la prueba, ha sido necesario definirlos “in situ” y las conclusiones principales de esa experiencia han sido:

1. Antes de hacer la prueba hay que hacer una estimación previa de la tracción (TPF), aprox. 11 kg/BKW para pesqueros sin tobera y en base a ello decidir si la prueba se ha de hacer contra uno o dos noray:
2. Se deben usar estachas o cables nuevos de unos 100 m., y que aguanten al menos el doble de la TPF estimada.

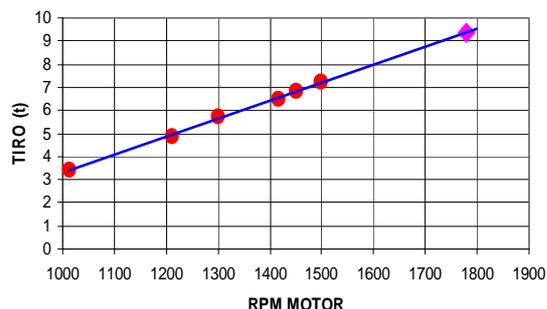
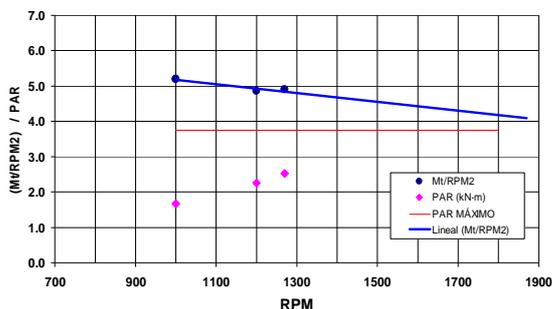
3. La forma más segura y sencilla de intercalar el dinamómetro en las líneas de pesca debe hacerse de acuerdo con los patrones. Lo normal ha sido embozar la estacha a uno de los grilletes del dinamómetro, tal como se puede ver en la fotografía de la Figura 15



*-Figura 15- Colocación del dinamómetro*

4. La zona de pruebas debe ser lo más amplia y despejada posible. La profundidad ideal es más de 12 m o 3 veces el calado, en un radio de dos esloras entorno al buque.
5. La distancia a los norays debe ser como mínimo de dos esloras ya que la TPF es muy sensible a las perturbaciones del chorro de la hélice cuando rebota en el cantil del muelle.
6. En sentido transversal la zona libre en ambas bandas debe ser una eslora en el sentido de la manga por una eslora en el sentido de la eslora (una eslora cuadrada a cada banda).
7. Se han de minimizar los efectos de vientos y corrientes y las metidas de caña para mantener el buque a la vía.
8. El proceso de la prueba es como sigue: Se calienta el motor con una pequeña tensión en el cable para templarlo y empezar a medir. Luego se sube rápidamente a la potencia máxima. Una vez se estabiliza la circulación del flujo los registros bajan un poco.
9. Hay que registrar las RPM, para promediarlas, a las que se obtiene la máxima TPF.
10. Normalmente la máxima TPF se promedia en un minuto. El valor estacionario de TPF se promedia en cinco minutos.
11. Es de esperar que las medidas oscilen bastante ya que las estrepadas son inevitables. La toma de datos se ha hecho mediante grabación en video del display o manualmente, sincronizada al oído con el puente del buque.

La Figura 16 presenta los resultados de la Prueba de Tiro de dos de las embarcaciones auditadas en el Puerto de Calpe. Teniendo en cuenta el escenario donde se realizaron las pruebas, los valores obtenidos se consideran aceptables



-Figura 16-Pruebas de tiro

#### 6.4. EQUIPOS EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS

El equipo empleado en las pruebas ha sido el siguiente:

- Dinamómetro Electrónico Digital, PROYMAN, con transmisión de datos por radiofrecuencia y de 25 toneladas de capacidad máxima.
- Inclinómetro digital autónomo BOSCH DNM60 L, con capacidad para medir trimados dinámicos de 0,1 grados.



-Figura 16- Inclinómetro y GPS

- Equipo de posicionamiento DGPS que permite obtener coordenadas geográficas (elipsoide Word Geodetic System 84 (W.G.S. 84) y en la proyección U.T.M. obteniendo de este modo un sistema global y de conexión con las coordenadas oficiales.

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez realizados los Reconocimientos y las Pruebas de Tiro a Punto Fijo y Navegación Libre de los 32 buques objeto de la Investigación, y analizados los resultados se ha procedido a formular las recomendaciones individuales que se incluyen en la Auditoría entregada al armador de cada barco y de las generales para la flota que se exponen a continuación.

Se debe puntualizar que muchas de las modificaciones que se recomiendan son de pequeña entidad, y por lo tanto de bajo coste, y están avaladas por la experiencia acumulada, de muchos años de ejercicio profesional en el complejo mundo del barco pesquero.

**7.1.** En la mayoría de los buques auditados se aprecia un sobredimensionamiento de los motores, Esta situación, muy común en los arrastreros del Mediterráneo, y corresponde a otras épocas en las que primaba la velocidad de navegación. En la situación actual, con los altísimos costes del combustible, todos los barcos navegan a velocidades reducidas, 10 – 11 nudos, tanto en la aproximación a los caladeros como en el regreso a puerto.

**7.2.** Algunos de los buques auditados – no muchos – disponen de bulbo de proa, el resto tienen proas convencionales con amplio abanico de proa y roda lanzada. Los usuarios de los primeros están, por lo general, muy satisfechos de su comportamiento en la mar. A lo anterior hay que añadir la ganancia de velocidad, estimada en 3 ò 4 décimas de nudo aproximadamente, con respecto a los barcos sin bulbos. Manteniendo la velocidad, la incorporación del bulbo puede suponer, en términos de potencia, un ahorro de un 8-10% (Referencia). Lo anterior ha sido confirmado en los estudios de flujo (CFD), en los que se aprecia una clara disminución de Resistencia de Presión en las proas cuando se incorpora un bulbo. En consecuencia se ha recomendado la incorporación de un bulbo postizo en todas aquellas unidades que carecen del mismo. Es una operación perfectamente factible y sencilla, siempre que el proyecto se estudie cuidadosamente y, además, no excesivamente onerosa.

**7.3.** En las pruebas de Navegación Libre realizadas en todos los buques, se han medido los asientos dinámicos que toma la embarcación a diferentes velocidades. En todos los casos han resultado asientos positivos y variaban entre 1 y 2 grados. Los estudios de CFD confirman lo expuesto en el Apartado 5.1.5. y señalan una disminución de Resistencia si se elimina el asiento. Por ello en la mayoría de los casos se ha recomendado la incorporación de flaps o, mejor todavía, cuñas y/o pantallas deflectoras de flujo que eleven el espejo del buque cuando navega a la velocidad operativa actual.

**7.4.** Analizados los Planos de Formas y Disposición General de todos los buques, se ha detectado en numerosos casos que la hélice está demasiado pegada al codaste. Como consecuencia, el flujo que le llega al disco del propulsor no está suficientemente uniformizado, lo que hace que puedan producirse fluctuaciones de presión y pérdidas en el rendimiento propulsivo. En aquellos casos en los que parece posible, se ha recomendado separar la hélice, intercalando un suplemento –un carrete- en el eje de cola y proteger su extremo de popa con un guardacabos. A la vista de los finales de las líneas de agua, se puede tratar de añadir si es posible un carenado suplementario para uniformizar todavía más las líneas de corriente a la entrada del disco de la hélice.

**7.5.** Muchos de los propulsores estudiados están correctamente proyectados y se ajustan bastante bien a las dos condiciones de servicio del buque: Arrastre y Navegación Libre. No obstante, en algunos casos, la realización de las pruebas ha demostrado que, por diversas razones, las hélices resultan pesadas, es decir, no alcanzan las revoluciones nominales en la condición de Navegación Libre sin que se sobrecargue el motor (véase Apartado 5.2.4.). En estos casos, se ha recomendado practicar un recorte en el borde de

salida del propulsor, para disminuir el paso, tal como se define en el Apartado 5.2.3. Esta operación es sencilla y se puede realizar en seco sin desmontar la hélice del eje de cola.

**7.6.** La incorporación de hélices en tobera a los arrastreros del Mediterráneo ha tenido, desde antiguo, una fuerte resistencia por parte de los Armadores, que siempre han alegado que el buque perdía velocidad. Sin dejar de ser cierto, el incremento del precio del combustible ha cambiado radicalmente el escenario y el ahorro de potencia/consumo con este sistema propulsor puede ser considerable –no menos de un 15%- en la condición de arrastre que ocupa, como poco, el 70% del tiempo de servicio de la embarcación, lo que supone como mínimo un 10% del total. Esta actuación tiene un coste moderado pues, además de incorporar el apéndice hay que sustituir la hélice por otra especial para funcionar en tobera, pero su implementación podría contar con ayudas estructurales

**7.7.** Según declaraciones de los patronos, la pérdida de velocidad de la embarcación entre dos varadas o, lo que es lo mismo, con el casco sucio o limpio, puede estimarse en un cuarto de nudo. Tal como ha quedado reflejado en el Apartado 5.1.5., la utilización de nuevas pinturas a base de copolímeros de flúor y siliconas, garantizan una disminución de la resistencia viscosa que se puede cifrar hasta en un 6% de ahorro de la potencia, dependiendo de las condiciones. Estas nuevas pinturas son, sin duda, más caras que las convencionales (hasta un 50%) pero, además del ahorro tienen la ventaja adicional de que se pueden espaciar las varadas hasta dos años, como mínimo.

**7.8.** Algunas de las unidades auditadas disponen de hélice transversal de proa para atraques y maniobras de puerto y de arrastre. Según los propios Patronos este equipo es prácticamente imprescindible, aunque no se ha podido establecer el posible ahorro de esta medida.

**7.9.** El mantenimiento de los barcos reconocidos es, normalmente, satisfactorio. Se realizan los cambios de aceite y filtros periódicamente (cada 350-400 horas de funcionamiento del motor), el equipo de pesca y de cubierta está también cuidadosamente puesto a punto. No ocurre lo mismo con la ventilación de la cámara de máquinas que, en bastantes casos, es deficiente. De todos es sabido que un exceso de temperatura en cámara de máquinas (más de 50º) puede suponer pérdidas de potencia de un 10%. Por ello, se ha recomendado, en varios casos sustituir la ventilación y aspiración natural por ventilación forzada y procurar inyectar aire directamente encima de las turbosplantas para que estas entren y funcionen sin retraso.

**7.10.** Aquellos buques – más bien escasos - que tienen motor electrónico han valorado su utilidad y los Armadores están muy satisfechos, a pesar de su alto coste. Además de controlar de una manera efectiva las emanaciones de gases perjudiciales para el medioambiente (GHG) (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc.), el gran número de sensores que montan para medir los parámetros de funcionamiento (temperaturas de gases de escape, cargas de la bomba de inyección, consumo de combustibles, etc) facilita la operación óptima del motor. Es una opción a contemplar para aquellos barcos que, por la razón que sea, se decidan por un cambio de motor.

**7.11.** Se ha podido comprobar, a la vista de las declaraciones de los Armadores, que la incorporación de polarizadores para ahorrar combustible ha tenido poca o ninguna aceptación entre aquellos. Sí puede ser útil la inclusión de depuradoras de combustible y de aceite por lo que, en aquellos casos en los que no se dispone de estos equipos, se ha recomendado su incorporación.

**7.12.** En cuanto al equipo de pesca, bastante de las unidades auditadas, disponen de una monitorización más o menos completa de las artes de pesca. Abundan los medidores de apertura horizontal de la boca de la red, los ecosondas de profundidad y otros equipos, todos ellos sumamente útiles, sobre todo a grandes profundidades, para conocer, en todo momento, el despliegue y comportamiento del arte.



## **8. Apéndice: Otros aspectos del consumo vinculados a la actividad**

El presente Proyecto se ha centrado en la optimización de la eficiencia energética de un grupo de buques concretos, mediante una investigación a fondo de su situación actual y la preparación de propuestas de medidas concretas, encaminadas a eliminar la causa de las ineficiencias detectadas, incluyendo la incorporación de innovaciones y mejoras tecnológicas ya existentes en el mercado.

El trabajo se ha concentrado en los buques en sí mismos y su equipamiento a bordo, como herramienta fundamental, dejando más de lado los temas relativos a las redes y su aparejo o la interacción entre ambos elementos, no porque estos aspectos no se consideren importantes sino porque se trata de trabajos independientes y que requieren otro tipo de actuaciones.

En efecto la mayor parte de las soluciones que se desarrollan teóricamente para mejorar la eficiencia de los equipos de pesca, requieren ajustes individualizados que hay que afrontar desplazando a bordo equipos multi-disciplinarios que puedan hacer ajustes en situación real de pesca. Ello requiere invertir en tiempo de técnicos a bordo del buque y tiempo de pesca perdido, lo que o bien encarece el proyecto o limita el alcance del mismo y la posibilidad de llegar a un número mayor de buques.

Se ha tenido en cuenta también la existencia de otros proyectos muy interesantes y ya desarrollados, que se centran en esos aspectos, como es el caso del de “Mejora de la Eficiencia, la sostenibilidad y el beneficio de la flota pesquera de arrastre catalana, promovido desde la Direcció General de Pesca i Acció Marítima de Catalunya”, y otros.

Otra temática importante y que tampoco tiene que ver directamente con el buque y su equipo pero sobre la cual es posible influir para mejorar mucho la eficiencia energética es la propia Planificación pesquera de la flota afectada.

Por todo ello, y teniendo en cuenta las grandes posibilidades de ahorro energético que existen en estos dos aspectos, el presente trabajo no quedaría completo si no se incluye alguna consideración general sobre los mismos que es lo que se pretende hacer en este Apéndice.

## I) El consumo de combustible en arrastre

Para poder apreciar las posibilidades de mejora de la eficiencia energética en arrastre es importante ver primero cómo se reparte de forma aproximada el consumo de energía. En esta flota de arrastreros del Mediterráneo, la relación entre el tiempo de navegación y el tiempo en arrastre varía entre un 30/70%, para los barcos que se alejan mucho de la costa y un 20/80% para los que faenan más cerca de puerto.

La conversión de estas cifras a consumo, depende del buque, las formas, potencia del motor, hélice, etc., pero también del factor humano, el patrón, que decide la velocidad en navegación.

En arrastre, dada la baja velocidad (2-4 nudos), la resistencia a la marcha debida al buque se reduce mucho hasta el punto de que puede darse como aceptable que en esta condición, la parte de energía consumida que se dedica a propulsar el barco es solamente del orden de un 6/7%, mientras que la empleada en remolcar el aparejo de arrastre llega al 93/94%.

Por supuesto, en realidad, estos valores varían de barco a barco, y dependen de múltiples factores como el aparejo, la velocidad de arrastre, el viento, el estado de la mar, las corrientes, etc., pero valen para ver el orden de magnitud de cada factor.

Para ver mejor dónde están las oportunidades es necesario saber cómo se reparte esa resistencia entre los diferentes componentes. Hay varios estudios disponibles sobre el tema y todos dan valores parecidos. Los de Seafish (1993) son los siguientes:

• Red de arrastre	53%
• Puertas de arrastre	25%
• Burlón	8%
• Cables de arrastre	4%
• Flotadores	3%

Viendo la tabla es fácil identificar que los dos grandes filones para la reducción son la mejora del filtrado de la red y mejoras técnicas en las puertas, aun cuando hay otros factores que dependen del armado de la red y que son menos visibles.



En este campo hay grandes controversias entre los tecnólogos y los patrones de los barcos ya que los objetivos de unos y de otros difieren. Nos limitaremos aquí a enunciar el origen de las dificultades para materializar estos desarrollos y las oportunidades que suponen:

**Dificultades:**

- La definición actual de las redes y su aparejado es muy empírica
- Cómo corregir defectos comunes sin afectar a estabilidad y capturabilidad.
- Resistencia en patrones, pérdida de capturas, necesidad demostración directa.
- Alto coste actuaciones individuales, problemas para extender al resto de la flota.

**Oportunidades:**

- Aprovechar gran avance en sensores que permiten conocer cómo va la red.
- Reducir el área barrida acortando malletas.
- Control la velocidad de arrastre por sensor de velocidad de filtrado en vez de GPS.
- Optimización del filtrado: Hilos más resistentes con menor diámetro, y aumento malla en zonas concretas.
- Puertas más hidrodinámicas, voladoras, con menor peso e impacto en el fondo.

En este momento hay mucha investigación sobre estos temas y existe un consenso importante entre los técnicos, de que una importante reducción de la resistencia del arte es un objetivo viable y, se considera realista, la posibilidad de lograr reducciones del consumo del 30% o más, que sobre el 70-80% del tiempo de operación, se traduciría en un 20-25% sobre el total.

Hay también algunos factores adicionales a considerar en el consumo en arrastre que contribuyen a dificultar el análisis, y el avance en la implementación de estas tecnologías y su experimentación en condiciones reales, que se enumeran a continuación

- La utilización de la potencia del motor en aguas tranquilas es en general moderada.
- La resistencia total aumenta mucho con mal tiempo, mar de proa, olas y viento en contra, o con corrientes cruzada y buque atravesado, bastante comunes y difíciles de medir.
- El objetivo básico del patrón es mantener la apertura y velocidad efectiva del arrastre, sobre el agua de forma estable y siguiendo un camino preconcebido.
- Con ángulos fuertes de timón usados forma permanente para compensar las corrientes, la resistencia debida a este apéndice y la de la carena aumentan de forma notable.

## **II. Planificación y gestión de la pesquería**

Este es sin duda otro campo en el que existen muchas posibilidades de actuación que producirían una mejora generalizada de la eficiencia energética en toda la flota.

La normativa que regula los horarios de actividad y el sistema de comercialización actuales, son en parte responsables de la actual ineficiencia energética de la flota, al primar comportamientos competitivos que aumentan el consumo. La actual estructura de costes los hace obsoletos y resulta necesario no solamente flexibilizarlos sino cambiarlos revisando los acuerdos sociales que se hicieron en su día.

Deberían estudiarse soluciones más imaginativas como descansos rotativos, eliminar zonas o especies menor interés, asignar cuotas transferibles de esfuerzo por buque, o limitar las redes, que permitieran cambiar de criterios puros de captura a otros de maximizar el beneficio.

Hoy día los motores están sobredimensionados y a la vez infrautilizados, por lo que trabajan fuera de su punto óptimo. Habría que flexibilizar las normas y ayudar a una reducción de potencias, para evitar que, la dualidad de las medidas de ahorro imposible de evitar, haga que se utilicen para pescar más, en lugar de para consumir menos.

La resistencia a la introducción de ciertas mejoras, como instalar toberas o redes y puertas con menor resistencia, podría reducirse con medidas de formación en eficiencia energética.



La aplicación de las mejoras propuestas en el campo de las tecnologías del buque, que han sido el objetivo central de este proyecto, combinadas con las que podrían obtenerse en los aparejos de arrastre y en la planificación y gestión, conseguirían hacer una flota notablemente mas eficiente desde el punto de vista energético y de sostenibilidad medioambiental

## 9. **BIBLIOGRAFÍA**

1. **Alvariño Castro, R., Azpiroz Azpiroz, J. J. y Meizoso Fernández, M.:** "El Proyecto Básico del Buque Mercante". Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 1ª Edición, 1997.
2. **Calisal, S. M. and McGreer, D.:** "A Resistance Study on a Systematic Series of Low L/B Vessels" Marine Technology, October 1993.
3. **García Gómez, A.:** "Predicción de Potencia y Optimización del Bulbo de Proa en Buques Pesqueros". Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, Publicación nº 131, abril, 1991.
4. **Núñez Basañez, J. F.:** "Curso de capacitación F.A.O./Noruega sobre Proyecto de Embarcaciones de Pesca" Sección 7. Guayaquil, 1980.
5. **Núñez Basañez, J.F.; Liria Franch, J.M. y otros.** "Análisis, Investigación y Aplicación de Tecnologías Disponibles e Innovadoras para el Ahorro de Combustible". Estudio encargado por la Secretaría General de Pesca conjuntamente a la Universidad Politécnica de Madrid y a la Federación Española de Organizaciones Pesqueras (FEOPE). Madrid, Junio 2006.
6. **O'Dogherty, P. y García Gómez, A.:** "Modificación de Hélices, para una Utilización Satisfactoria a lo Largo de la Vida del Buque". Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, Publicación nº 56, enero 1977.
7. **Powering Performance Committee Report.** "19<sup>th</sup> International Towing Tank Conference" Proceedings, Volume 1. September 1990, Madrid, Spain.
8. **Santarelli, Mario F. C. y Núñez Basañez, José Fernando:** "Consideraciones acerca del Sistema Propulsor de Arrastreros en Función del Arte de Pesca". Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, Publicación nº 72, diciembre 1981.
9. **Santos Rodriguez, L. y Núñez Basañez, J.F.** "Fundamentos de Pesca". 210 p. Fondo Editorial de Ingeniería Naval. Madrid, Mayo 1994.
10. **Secretaria General de Pesca Marítima..** "La Pesca en España". Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mayo 2003.

11. **The Specialist Committee on Powering Performance Prediction:** “Final Report and Recommendations to the 24<sup>th</sup> ITTC”. Proceedings to the 24<sup>th</sup> ITTC, Volume II, Edinburgh (U.K.) 2005.
12. **Van Oortmerssen, G.** “A Power Prediction Method and its Application to Small Ships”. International Shipbuilding Project, 1971
13. <http://www.international-marine.com/intersleek900> (2008-02-26).

