

Ingeniería Avanzada para Economía de Combustible en Pesqueros

¹M. Salas, ²V. Bertram, ²V. Höppner, ²K. Fach

¹Universidad Austral de Chile.

²FutureShip GmbH, Alemania

¹msalas@uach.cl

Resumen

Este trabajo explora opciones de ingeniería para reducir el consumo de combustible en pesqueros. Las principales áreas investigadas son la propulsión y la energía auxiliar, donde se identifican las principales opciones disponibles para lograr una alta eficiencia en el uso de la energía en pesqueros. Se incluye una descripción de las herramientas más recientes de simulación disponibles para optimizar el consumo de combustible de maquinaria a bordo. Finalmente se abordan aspectos tales como monitoreo de energía a bordo y celdas de combustible para energía auxiliar.

Palabras Claves: Eficiencia energética, combustible, pesquero, resistencia

Abstract

This paper surveys engineering options to save fuel in fishing vessels. The main areas to consider are propulsion power and auxiliary power. Propulsion power depends on resistance and propulsive efficiency. Here, the main options for fishing vessels are given. For machinery and onboard consumers, a general discussion is followed by a description of latest simulation tools for design and operational guidance towards more fuel efficient ships. On-board energy monitoring and fuel cells for auxiliary power are also covered.

Keywords: Energy efficiency, fuel, fishing vessel, resistance.

1. Introducción

Los precios de combustible llegaron a un máximo histórico en 2008 y se espera que retomen su tendencia al alza tras la crisis económica de 2009. Cambios legislativos impondrán mayores exigencias a la calidad de los combustibles incluyendo la penalización de emisiones sobre la norma. El aumento en los costos de combustible es particularmente crítico para pesqueros ya que crecientemente deben navegar largas distancias para llegar a los caladeros más productivos.

La operación sustentable de flotas depende cada vez más de un uso eficiente de la energía a bordo. La Universidad Austral de Chile tiene una larga experiencia en optimización de formas de buques pesqueros, sustentada fundamentalmente en investigaciones realizadas en su canal de pruebas hidrodinámicas, Fig. 4, Salas *et al.* [1]. Por otra parte, el *Germanischer Lloyd* a través de su división *FutureShip*, ha agrupado el conocimiento adquirido en economía de combustible y mecanismos para mejorar la eficiencia energética. Las primeras investigaciones se centraron en buques de carga, Bertram [2], Bertram *et al.* [3]. La presente publicación, enfocada a la eficiencia y reducción del consumo de combustible en pesqueros, es un área donde ambas Instituciones colaboran sinérgicamente.

2. Aspectos hidrodinámicos clave en el ahorro de combustible

Se puede usar la hidrodinámica tradicional para descomponer los requerimientos de potencia de un buque en aspectos de resistencia y propulsión. El casco y el propulsor deben ser considerados sistemas, esta configuración puede ayudar a entender dónde el ahorro energético puede ser acumulativo y dónde los diferentes mecanismos funcionan en base a una misma fuente de energía y por lo tanto son alternativas mutuamente excluyentes en un esquema de ahorro energético.

2.1. Reducción de resistencia

Hay muchas formas de reducir la resistencia al avance de un buque. En el aspecto global hay dos opciones bastante obvias:

- Reducir el tamaño del buque o su desplazamiento, por ejemplo mediante el uso de materiales de bajo peso.
- Reducir la velocidad

Ninguna de estas opciones triviales se discutirá en este trabajo. Reducir la velocidad máxima en las especificaciones de diseño es una forma muy efectiva de reducir el consumo de combustible. Debido a que esto es bien sabido se abordarán aspectos menos conocidos del problema energético.

Los aspectos más relevantes en el diseño de un buque son una selección apropiada de las dimensiones principales y formas de carena. Es aconsejable que un experto sea consultado para evaluar el impacto de las dimensiones principales en función de su experiencia y bases de datos de canales de pruebas disponibles. El proceso de optimización debe considerar restricciones originadas por la estabilidad y el comportamiento del buque en el mar (*seakeeping*). En un análisis detallado, dada una velocidad y desplazamiento de diseño, todas las componentes de la resistencia al avance pueden ofrecer algún grado de ahorro en el consumo de combustible.

Resistencia de fricción del casco desnudo: La Resistencia de fricción (para una velocidad dada) depende principalmente de la superficie mojada, la que a su vez depende de las dimensiones principales y el trimado, y la rugosidad del casco. La rugosidad media del casco depende en tanto de la pintura y rugosidad adicional debido a incrustaciones (*fouling*). Un casco con problemas severos de incrustaciones puede requerir hasta el doble de la potencia que un casco de superficie lisa. Pinturas basadas en siliconas crean una superficie no adherente de un modo similar a las conocidas ollas de Teflón. Una superficie lisa, además de prevenir efectivamente el *fouling*, puede resultar en un ahorro significativo de combustible, hasta un 6% de ahorro según lo informado por algunas compañías navieras. Una rugosidad media del casco de 65 μm es muy bueno, 150 μm normal, y mayor de 200 μm deficiente, *Hollenbach and Friesch* [4]. La experiencia muestra que a cada 25 μm de rugosidad del casco corresponde el 0.7 a 1% de la propulsión, [5].

Resistencia de olas del casco desnudo: Dadas las dimensiones principales de un buque, la resistencia de generación de olas ofrece amplias posibilidades de mejoras. Cambios moderados en las formas de la carena pueden resultar en cambios considerables en la resistencia de olas. El bulbo de proa puede ser diseñado en base a un estudio de CFD, en la mayoría de los casos es suficiente utilizar un programa rápido basado en la teoría potencial. Una optimización formal puede ofrecer una reducción de resistencia de 1-2%, aún en cascos que ya han sido optimizados mediante variaciones de formas de CFD y ensayos en canal de pruebas, Fig.1, *Abt and Harries* [6]. En el caso de un buque tipo OSV (*Offshore Supply Vessel*) se obtuvo una reducción de hasta 16% en la resistencia. Esta opción es particularmente atractiva para buques

nuevos, donde el armador puede ordenar que tales estudios de optimización de resistencia se realicen.

Resistencia residual del casco desnudo: Esta parte de la resistencia debe principalmente a la separación del flujo. Simulaciones de CFD pueden ayudar a reducir la resistencia residual, principalmente mediante un adecuado compromiso entre la hidrodinámica y otros aspectos de diseño. Sin embargo el potencial de beneficio es mucho mayor en la resistencia por generación de olas.

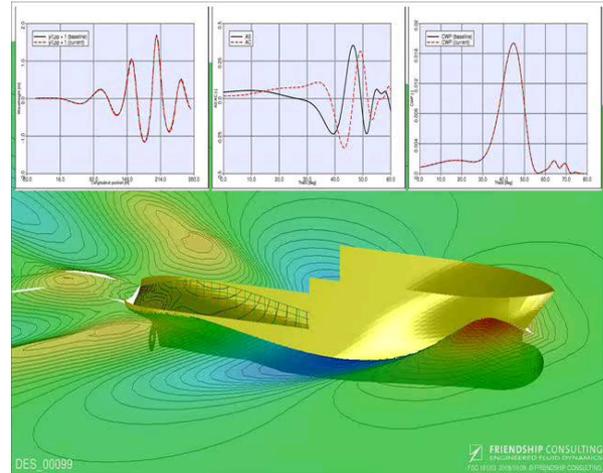


Fig.1: Optimización de formas del casco

Fuente: www.futureship.net

Resistencia de Apéndices: Los apéndices contribuyen desproporcionadamente a la resistencia de un buque. Una apropiada alineación de apéndices, Fig.2, puede contribuir a minimizar su efecto en la resistencia total. En el caso de pesqueros es frecuente la instalación de quillas de balance, la ubicación óptima de éstas debería considerar un adecuado estudio de líneas de corriente, Fig. 3.

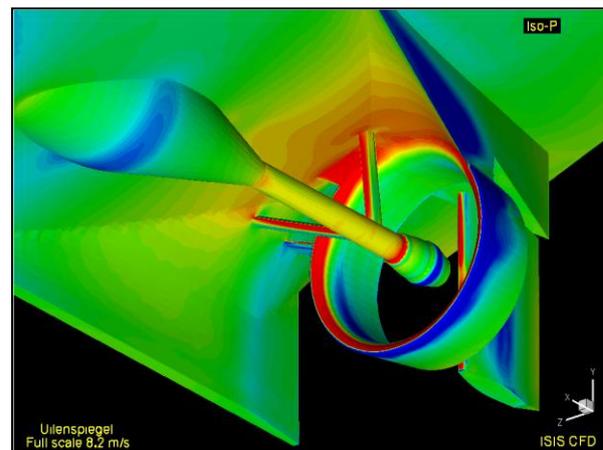


Fig.2: Análisis CFD de hélice y tobera. Fuente: ECN

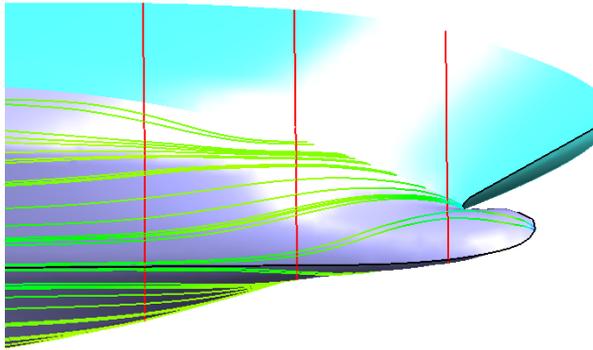


Fig.3: Estudio CFD de Líneas de Corriente
Fuente: Universidad Austral de Chile

Resistencia del timón: Los timones a menudo ofrecen un potencial subestimado de ahorro de combustible. Timones más eficientes permiten reducir el tamaño del timón y consecuentemente su peso y resistencia al avance. Debido a la componente rotacional del flujo producido por la hélice, los timones convencionales rectos, cuando están en posición neutral de 0 grados, reciben un flujo oblicuo desde un lado en la parte superior hasta el otro lado en la parte inferior. Esto crea fuerzas de sustentación en direcciones opuestas que se cancelan mutuamente, pero el arrastre inducido en ambos lados se suma, incrementando la resistencia al avance. Torciendo el timón en ángulos adecuados se puede disminuir este arrastre. Los timones altamente eficientes combinan varios factores para ahorrar combustible: los timones torcidos son combinados con un bulbo en la zona a continuación del cono de la hélice, produciendo de este modo un flujo continuo y por lo tanto disminuyendo el arrastre. De acuerdo a los fabricantes, estos timones pueden reducir la resistencia entre un 2 y 8%.

Resistencia adicional debido al estado del mar: El comportamiento de un pesquero en olas puede ser evaluado mediante ensayos a escala en un canal de pruebas, Fig. 4, es importante verificar que las formas de la carena no induzcan movimientos excesivos de pitch que aumentan la resistencia al avance. En el aspecto operativo de las naves, la programación inteligente de la ruta, esto es la optimización de curso y velocidad del buque, puede reducir la resistencia adicional debido al estado del mar (olas). Por ejemplo el Sistema de Asistencia de Ruta de Buques (*Ship Routing Assistance System*), Rathje y Beiersdorf [7], fue originalmente diseñado para evitar o disminuir el *slamming* y el movimiento de balance paramétrico, pero también puede ser usado para programar una ruta con el objetivo de optimizar el uso de combustible, sin embargo, expertos del GL estiman que el potencial de ahorro es menos del 1% para escenarios realistas de navegación.

Resistencia adicional debido a aguas someras: El sistema de programación de ruta puede también considerar el caso de aguas someras y el incremento asociado de resistencia.



Fig. 4. Ensayo de un pesquero en olas.
Fuente: Canal de Pruebas U. Austral de Chile

Resistencia adicional debido al viento: El posible ahorro de combustible debido al viento es despreciable para embarcaciones pesqueras.

Para cada calado y velocidad existe un trimado óptimo para el ahorro de combustible. La potencia requerida en buques con popa recta y bulbo en proa puede variar hasta 10% cuando se compara la peor y mejor condición de trimado, *Mewis y Hollenbach* [8]. Se recomienda realizar mediciones sistemáticas con modelos o simulaciones de CFD para evaluar el mejor trimado y el efecto en la resistencia de diferentes condiciones de trimado. Este estudio es particularmente atractivo para series de buques, como es frecuentemente el caso tratándose de pesqueros.

2.2. Optimización de la Propulsión

La hélice transforma en empuje la potencia entregada por el motor a través del eje propulsor. Típicamente solo 2/3 de la potencia entregada es transformada en empuje. La mayoría de los pesqueros tiene una única hélice de paso controlable con una tobera para potencia de tiro elevada, *Pinkster* [9]. Los ensayos con modelos de apéndices tales como toberas y otros apéndices usados para mejorar la propulsión son afectados por errores de escala, lo que hace dudosa la estimación de los beneficios esperados a escala real. Por tal razón, con creciente frecuencia, se están realizando estudios de CFD para evaluar la interacción del casco con la hélice, timón y otros apéndices, Fig.5. Las opciones de economía de combustible en el aspecto de la propulsión incluyen:

Operar la hélice en el punto óptimo de eficiencia:

La eficiencia de la hélice depende entre otras cosas del paso y las rpm. Una hélice de paso controlable puede modificar el paso y ofrece grandes ventajas para buques que navegan en condiciones operacionales variables. Se ha informado que se puede obtener hasta un 8% de ahorro de combustible en buques que han implementado palas nuevas en hélices de paso controlable, *N.N.* [10].

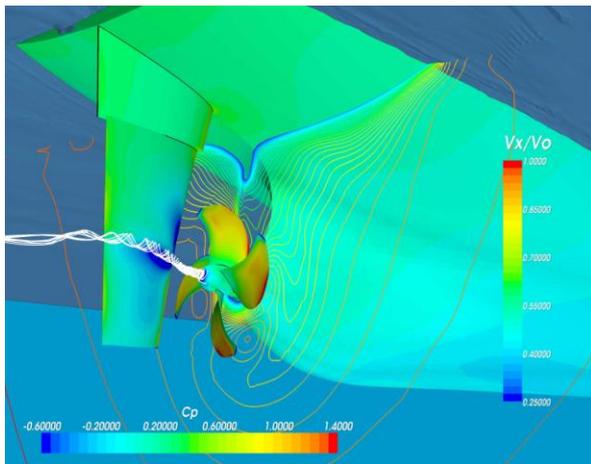


Fig.5: Simulación CFD de casco y apéndices

Reducción de pérdidas en energía rotacional: En la mayoría de los buques existen pérdidas importantes de energía en el flujo rotacional de la hélice. Muchos dispositivos han sido propuestos para recuperar parte de esta energía. Estos mecanismos operan ya sea a proa o a popa de la hélice. Los que funcionan a proa de la hélice incluyen perfiles, hélices secundarias, y formas de popa asimétrica. Los mecanismos que funcionan a popa de la hélice incluyen también hélices secundarias (hélice tipo *Grim*), perfiles en el flujo posterior a la hélice y perfiles dispuestos en el timón. Una alternativa a estos mecanismos son las hélices contra-rotatorias que pueden recuperar las pérdidas de energía en el flujo rotatorio. Los mecanismos mencionados son relativamente complejos y no son particularmente apropiados para pesqueros pues requieren una inversión alta o moderada, no son estructuralmente robustos y la economía de combustible esperada es bastante incierta y puesta en duda por expertos.

Reducción de pérdidas de fricción: Una hélice con palas pequeñas y altamente cargadas puede reducir las pérdidas de fricción, sin embargo es posible que surjan problemas de cavitación. Puede definirse un compromiso de operación recurriendo al análisis CFD llevado a cabo por diseñadores experimentados de hélices.

Reducción de vórtices en el extremo de las palas: La diferencia de presión entre ambas caras de una pala de hélice induce un vórtice en el extremo de cada pala. El vórtice y las pérdidas asociadas de energía pueden reducirse implementando perfiles en los extremos de las palas, de un modo similar a lo observado en las alas de un avión. En el caso de una hélice operando en tobera, es muy importante conseguir una correcta interacción de la hélice y la tobera. Una herramienta apropiada para esto es el análisis de CFD, Fig.2.

Reducción de vórtices del cono de la hélice: Algunos apéndices diseñados para reducir la energía perdida en el cono de la hélice han sido planteados en Japón y por *HVA* y *Schottel* en Alemania. Los fabricantes de estos

mecanismos creen que son capaces de producir un incremento de la eficiencia de la hélice de un 3 a 4%. Tales rendimientos no han sido probados en general y habría que tomarlos con cierto escepticismo.

Mejora de la estela en que opera la hélice: La hélice puede tener un desempeño más eficiente si opera en una estela homogénea. Los mecanismos de modificación de la estela, tales como toberas tipo *Schneekluth* o generadores de vórtices, no parecen ser muy atractivas para aplicación en pesqueros.

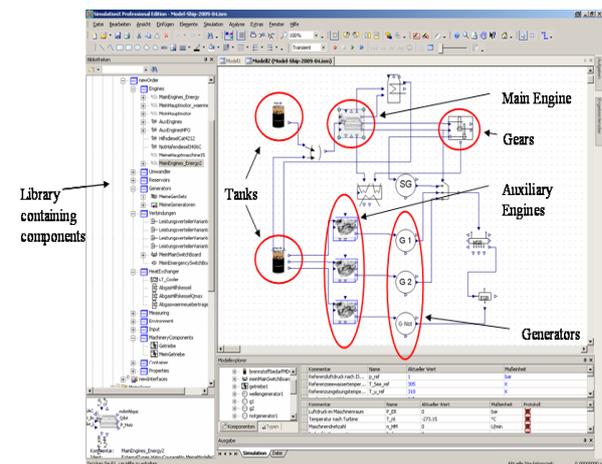


Fig.6: Simulador de maquinaria

3. Economía de combustible en Máquinas

Hay varias opciones que permiten ahorrar combustible en la operación de máquinas a bordo, el potencial de ahorro depende del tipo de buque. En buques pesqueros un área potencial de ahorro es el uso de bombas más eficientes controladas electrónicamente. Los motores de uso naval convierten aproximadamente solo hasta el 45% de la energía del combustible en potencia propulsora, el resto de la energía se pierde en los gases de escape y el agua de enfriamiento. Hay varias opciones para recuperar parte de estas pérdidas, *Hochhaus* [11]. Por ejemplo los gases de escape pueden utilizarse para producir vapor. La energía contenida en los líquidos de enfriamiento, usualmente agua calentada a su paso por el motor, pueden emplearse para desalinizar agua de mar.

Evitar sobredimensionar el motor principal: Los márgenes de propulsión de un buque deben considerar el tamaño del buque y el tipo de operación planificado. El margen por olas puede elegirse de acuerdo a la experiencia o un análisis de comportamiento en olas (*seakeeping*). El margen adicional del motor puede omitirse completamente, los márgenes para situaciones ocasionales de alta demanda de potencia son muy caros y raramente imprescindibles. En caso de necesidad esporádica de mayor potencia, ésta puede obtenerse mediante un motor auxiliar acoplado a un eje PTI (*Power Take In*). Un análisis detallado de ingeniería puede usarse para evaluar la factibilidad y el

costo de diversas configuraciones propulsoras, *Freund et al.* [12], Fig.6. Para buques lentos con hélice de paso controlable es mejor reducir la presión en vez de las rpm. Se puede contar con un sistema de monitoreo inteligente y un software de simulación que combine datos provistos por el fabricante del motor y mediciones estándar abordo del buque para, dado un perfil operacional, determinar las combinaciones óptimas de paso y revoluciones de la hélice.

Evitar sobredimensionar los motores auxiliares: Un manejo apropiado de las necesidades energéticas a bordo puede ayudar a balancear de mejor forma la demanda *peak* de energía, lo que puede redundar en un equipo generador reducido y esto a su vez resulta en un peso total menor de maquinaria. Las simulaciones globales de un sistema de maquinarias pueden predecir el nivel de consumo de combustible para un perfil de operación previsto, Fig.6, estas simulaciones permiten evaluar diversas alternativas y permiten un mejor balance energético.

El software *ITI SimulationX* desarrollado por el *Germanisher Lloyd* es fácilmente adaptable a diferentes tipos de buques para lo cual usa una biblioteca de componentes predefinidos de maquinaria. Las simulaciones fueron validadas para dos buques, *Freund et al.* [12].

El consumo de combustible fue calculado con una desviación de 2% respecto de los datos informados al mediodía de un periodo de medición de 4 a 8 semanas. Cuando el simulador está instalado abordo, el consumo real de energía mecánica y eléctrica puede mostrarse al mismo tiempo que el consumo de combustible de la maquinaria y su generación de potencia, *Hansen and Freund* [13]. Observando el consumo en el tiempo, la tripulación puede evaluar sus acciones en relación al consumo de energía, por ejemplo para evitar cargas durante periodos *peak*, que de otro modo significaría

poner en funcionamiento un generador adicional. Un ejemplo se muestra en la Fig.7. Los valores de consumo instantáneo del motor principal se muestran en la parte izquierda, en tanto que en la parte derecha se presentan los consumos en función del tiempo.

Hay muchas posibilidades futuras de ahorro de combustible en el campo de los nuevos convertidores de energía y los sistemas de celdas de combustible. Por ejemplo, el gobierno de Islandia planea desarrollar una economía basada en el hidrógeno. Además de la industria automotriz y del transporte público, la industria pesquera también podría ser operada con celdas de combustible. Un proyecto experimental de empleo de celdas de combustible es la embarcación de avistamiento de ballenas desarrollada en Reykjavik en 2008, Fig. 8.

Un sistema híbrido que combine una celda de combustible y una batería para los *peaks* de consumo de energía puede tener ventajas para aplicaciones con alta fluctuación en la demanda de potencia. Un sistema de este tipo fue experimentado abordo de un ferry en el puerto de Hamburgo. Las simulaciones revelaron que existe un gran margen para el aumento de la eficiencia energética, *Gysels* [14]. En general los sistemas híbridos son atractivos, especialmente para cargas transitorias. En relación al perfil de operación de la nave, un sistema híbrido reduce también el tamaño del motor principal y lo mantiene funcionando en el punto de máxima eficiencia. En el caso de los buques pesqueros, las cargas transitorias asociadas a la operación típica de éstos, ofrece ventajas para la aplicación de sistemas híbridos que mejoren la eficiencia energética. La Fig. 8 y Fig. 9 muestran prototipos que han demostrado la factibilidad de utilizar celdas de combustible en los sistemas auxiliares de propulsión y generación de energía.

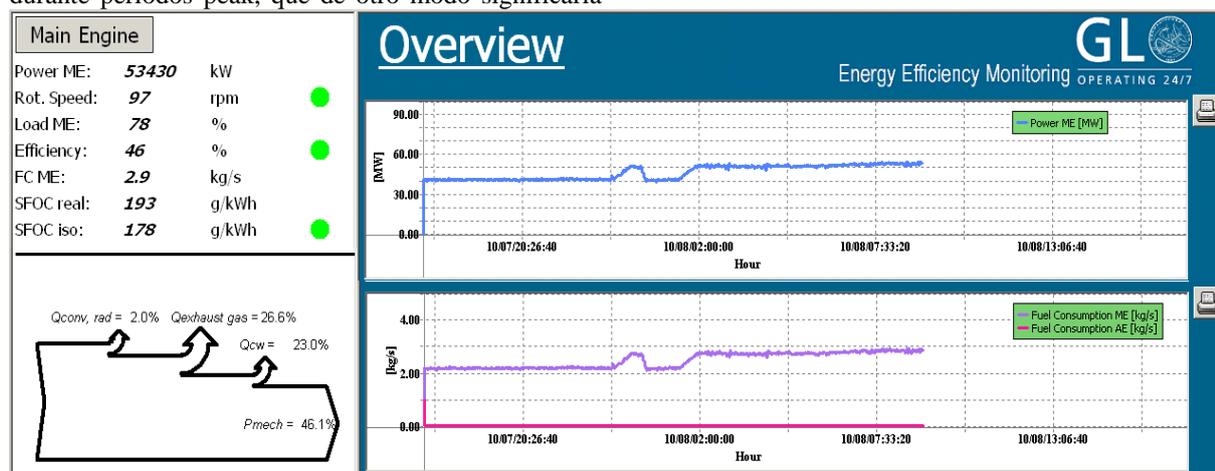


Fig.7: Ejemplo de Monitoreo del Motor Principal para Eficiencia Energética



Fig. 8: Nave de avistamiento de ballenas ELDING I



Fig. 9: Buque de pasajeros ALSTERWASSER

4. Conclusiones

Hay muchas opciones técnicas para ahorrar combustible a bordo de embarcaciones pesqueras. Desafortunadamente las opciones son muy dispersas y existe una incredulidad generalizada y muchas veces justificada sobre el potencial real de ahorro de cada alternativa. Si bien el potencial de ahorro de cada opción debe ser tomado con precaución, existe un amplio consenso de que existe un gran potencial para la economía de combustible en buques pesqueros y para hacer realidad este potencial se debe aprovechar la información disponible de fabricantes, diseñadores competentes, armadores y operadores.

Si bien las opciones se concentran en el aspecto técnico, también el factor humano es muy importante. Por ejemplo una velocidad de operación uniforme economiza combustible, este es un aspecto que depende del estado de alerta y la motivación de la tripulación. Los sistemas de monitoreo abordo pueden ayudar en este sentido y se ha probado que se puede obtener una operación mejor balanceada de la potencia resultando un ahorro de combustible de hasta un 2%.

5. Agradecimientos

Se reconoce el aporte de Malte Freund, Karsten Hochkirch, Finn Vogler y Gerd-Michael Würsig. de FutureShip del Germanischer Lloyd. Además se expresa el agradecimiento a los colegas del Canal de Pruebas Hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile.

6. Referencias

- [1] Salas, M.; Jiménez, P.; Ahumada, J. y Sepúlveda, P. "Evaluación del Desempeño Hidrodinámico de Apéndices de Popa en Cascos de Desplazamiento". XX COPINAVAL. Montevideo, Uruguay, Oct. 2009.
- [2] Bertram, V. (2009). "Fuel Saving Options for Ships". Annual Marine Propulsion Conf., London.
- [3] Bertram, V.; Fach, K.; Sames, P.; Höppner, V. (2009). "Engineering Options to Reduce Emissions". 10th Int. Marine Design Conf., Trondheim.
- [4] Hollenbach, U.; Friesch, J. (2007). "Efficient hull forms – What can be gained". 1st Int. Conf. on Ship Efficiency, Hamburg, www.ship-efficiency.org/2007
- [5] N.N. (2008). "Foul-release smooths hull efficiency". Marine Propulsion, Aug/Sept p.287.
- [6] Abt, C.; Harries, S. (2007). "A new approach to integration of CAD and CFD for naval architects". 6th COMPIT, Cortona, pp.467-479. www.ssi.tu-harburg.de/doc/webseiten_dokumente/compit/dokumente/compit2007_cortona.pdf
- [7] Rathje, H.; Beiersdorf, C. (2005). "Decision support for container ship operation in heavy seas – Shipboard routing assistance". 4th COMPIT, Hamburg, pp.455-467. www.ssi.tu-harburg.de/doc/webseiten_dokumente/compit/dokumente/compit2005_hamburg.pdf
- [8] Mewis, F.; Hollenbach, U. (2007). "Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb". Hansa 144/5, pp.49-58.
- [9] Pinkster, J. (2004). "Fishing vessels". Ship Design and Construction, Ch.41, SNAME
- [10] N.N. (2008). "Reblading to enhance economy and comfort". Marine Propulsion Feb/Mar, pp.54-55.
- [11] Hochhaus, K.H. (2007). "Umweltbetrachtungen zur Schifffahrt". Hansa 144/6, pp.70-76.
- [12] Freund, M.; Würsig, G.M.; Kabelac, S. (2009). "Simulation Tool to Evaluate Fuel and Energy Consumption". 8th COMPIT, Budapest, pp.364-373. www.ssi.tu-harburg.de/doc/webseiten_dokumente/compit/dokumente/compit2009.pdf
- [13] Hansen, H.; Freund, M. (2010). "Assistance tools for operational fuel efficiency", 9th COMPIT, Gubbio
- [14] Gysels, C. (2008). "Hybrid ferry efficiency estimations", Master Thesis, TU Delft.