

# Auditoría energética en un buque ro-ro: impacto de la conversión de un generador de cola a velocidad variable y otras actuaciones en la propulsión

Adrián Sarasquete, Aitor Juandó

Vicus Desarrollos Tecnológicos S.L. - Jacinto Benavente, 37-3, 36202 Vigo

Este artículo muestra el efecto que tendría la conversión de un generador de cola a velocidad variable sobre un buque equipado con hélice paso controlable y que se combina con mejoras hidrodinámicas, tanto en la hélice como en el timón, derivadas de un estudio de auditoría energética.

## 1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética es probablemente uno de los asuntos tecnológicos más importantes de esta década en el sector marítimo y de construcción naval. Prácticamente la totalidad de las navieras están realizando esfuerzos para reducir sus costes de combustible y cumplir la normativa sobre contaminación ambiental. Ejemplo de esto son la regulación de los índices de eficiencia energética (EEDI, EEOI) y la documentación específica de implantación de estas medidas a bordo (SEEMP). Pero hay que tener en cuenta que la aplicación de cualquier solución tecnológica precisa de un análisis previo detallado para asegurar un adecuado retorno de la inversión.

## 2. AUDITORÍA GENÉTICA

### 2.1 Objetivo

Como paso previo a cualquier actuación para la reducción de consumos, es fundamental disponer de una imagen global del uso de energía en el buque. El objetivo de

la auditoría energética es identificar y analizar cómo la energía se genera, se transforma y se utilizada a bordo del buque, para poder juzgar el potencial de mejoras existente que repercute tanto en una reducción de la energía consumida a bordo como de las correspondientes emisiones. Por tanto, una auditoría energética completa y bien planificada garantiza que se obtiene el mejor retorno de la inversión por cada euro invertido.

La auditoría energética debería ser el primer paso de un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP en sus siglas en inglés).

### 2.2 Metodología

Debido a la complejidad de este tipo de análisis, implica el uso de

diferentes herramientas y la aplicación de conocimientos de diferentes disciplinas como hidrodinámica, instrumentación, mediciones, ingeniería eléctrica, maquinaria, motores, etc.

A continuación se resumen las cinco fases de un procedimiento normal de auditoría energética en un buque:

- **Recopilación de información técnica:** Tras una fase previa de planificación y establecimiento de objetivos concertados con el armador y la tripulación, se recopila toda la información técnica relevante. En muchas ocasiones, la información técnica disponible es escasa y se debe recurrir a diferentes fuentes como astilleros y suministradores.
- **Mediciones a bordo:** Esta fase es clave en una auditoría energética y se debe llevar a cabo midiendo magnitudes reales durante la operación del buque, bien sea de forma puntual o limitada en el tiempo (una campaña de mediciones con personal a bordo se puede prolongar durante dos o tres días) o de forma semi-permanente



Fig. 1: Mediciones de consumo en motor principal.

Tribuna Profesional cuenta con el patrocinio de:

<p>DET NORSKE VERITAS ESPAÑA, S.L. C/Almansa, 105 - 1ª Planta Oficina 2 28040 Madrid</p>	
<p>MANAGING RISK</p>	

con un sistema de registro instalado al efecto durante un periodo dado. Debe incluir el registro de potencias mecánicas, velocidades, consumos, potencias eléctricas, energía térmica, emisiones, etc.

- **Análisis hidrodinámico:** Dado que la propulsión es, como norma general, el principal consumidor de potencia en un buque, se debe analizar con detalle el rendimiento hidrodinámico del casco y su sistema de propulsión. Esto incluye un análisis detallado, mediante herramientas CFD (*Computational Fluid Dynamics*), de la configuración actual y del efecto de posibles actuaciones, como nuevos diseños de hélices, timones o mejoras en el propio casco mediante modificaciones localizadas del mismo o de los apéndices.
- **Análisis de instalaciones y maquinaria:** Se debe llevar a cabo un análisis detallado de motores, sistemas auxiliares y consumidores, basándose en las mediciones realizadas previamente y utilizando modelos numéricos que permitan reproducir el efecto de cada medida.
- **Resultados, informes y recomendaciones:** Los resultados y recomendaciones se incluirán en un informe, que incluirá las medidas propuestas y su efecto, así como un análisis económico de las mismas, incluyendo el retorno previsto de la inversión. Este informe debe sentar las bases para un plan de gestión

de eficiencia energética, incluyendo objetivos, hitos, seguimiento y revisión del proceso.

### 2.3 Resultados y beneficios

La auditoría energética facilita al armador la información necesaria para la toma de decisiones correctas sobre la eficiencia energética. Podríamos decir que con ella "se separa el grano de la paja" y se facilita la puesta en práctica de un PGEEB adecuado. Entre sus resultados cabe destacar:

- Ahorros de combustible inmediatos, derivados del conocimiento del perfil de consumo, detectando condiciones de trabajo ineficientes y evitando malas prácticas.
- Identificación de potenciales problemas en motores diesel (elevado consumo específico, desequilibrios, mala combustión, etc.)
- Caracterización hidrodinámica completa de la carena del buque (principal consumidor de energía).
- Estudio de las potenciales mejoras y su efecto técnico y económico, incluyendo un asesoramiento para su puesta en práctica.
- La auditoría energética prepara al armador y su plan de gestión frente a futuras normativas relacionadas con limitación de emisiones o sistemas de bonificación de tasas portuarias en función de las emisiones.
- La puesta en práctica de las mejoras propuestas tiene, típicamente, un período de retorno de inversión reducido y mejora la cuenta de resultados desde el primer día.

### 3. EL RETROFITTING DE UN BUQUE MERCANTE REAL. CASO DE UN RO-RO.

Debido a la coyuntura económica actual y al exceso de capacidad

existente en la flota mundial, la construcción de un nuevo buque dotado con la última tecnología no es una opción muy viable hoy en día. Por ello, es de sumo interés para todos los armadores analizar la aplicación de soluciones de mejora de eficiencia energética en sus buques aprovechando al máximo los sistemas ya disponibles en ellos, lo que se conoce como *retrofitting*.

A continuación se analizan los efectos de tres medidas, adecuadas para un *retrofitting*, y que producirían un interesante ahorro de combustible en un buque ro-ro, con una inversión moderada y con un tiempo muy breve de retorno de dicha inversión.

#### 3.1 Características del buque

Se presentan los resultados de la auditoría energética realizada en el citado buque con las siguientes características principales:

- Eslora: 150 m
- Manga: 20 m
- Calado: 10 m
- Potencia instalada: 15000 kW
- Generador de cola: 500 kW

Este buque está equipado con una línea de ejes, acoplada a una hélice de paso controlable, accionada por un motor de velocidad media. El tren propulsor arrastra un generador síncrono a velocidad constante. Los datos del perfil operacional real registrado durante las mediciones muestran un perfil típico en este tipo de buques, donde podemos observar un variado abanico de velocidades de servicio (ver tabla 1).

#### 3.2 Generación en cola a velocidad variable. Sistema SHYMGEN

##### 3.2.1 Generación eléctrica. Operación de generadores a velocidad fija y variable.

La generación de energía a bordo de los buques se lleva a cabo normalmente mediante generadores síncronos accionados por motores diesel funcionando a velocidad constante, bien sea como grupos auxiliares o mediante una toma de fuerza del motor principal.

Dentro de una auditoría energética, uno de los problemas encontrados más habitualmente es la optimización de la planta generadora y el sistema propulsor. Ambos sistemas suelen estar interconectados por medio del generador de cola.

Si nos centramos en un caso típico, un buque equipado con hélice de paso controlable y generador de cola, el



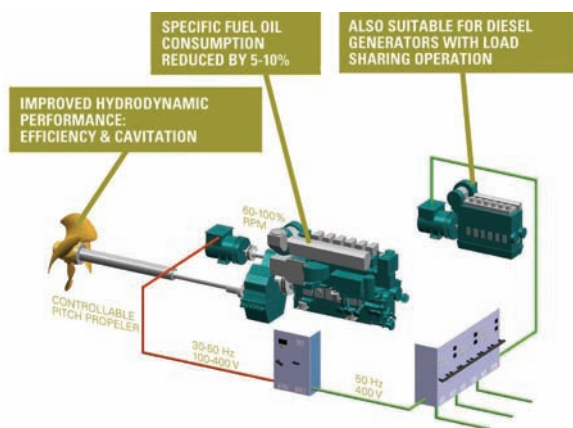
Condición	A	B	C	D	E
Velocidad media (kn)	20	18	16	8	4
% de tiempo	45%	29%	19%	5%	3%
Horas / año	2.768	1.784	1.169	308	185

Tabla 1: Perfil operacional.

uso de este último obliga al tren propulsor a girar a velocidad constante para mantener la frecuencia y tensión de la red, pero esta velocidad constante presenta una serie de inconvenientes desde el punto de vista de la eficiencia energética del sistema. Si se obliga al motor diesel a trabajar a velocidad constante, se reduce su rendimiento a cargas inferiores a la nominal, donde sería recomendable una reducción de velocidad de giro; por otro lado, el rendimiento hidrodinámico de la hélice se ve perjudicado cuando se reduce el paso sin bajar las vueltas del motor.

Si bien existen en el mercado modelos de generadores de velocidad variable, éstos se emplean normalmente en nuevas construcciones de buques de gran porte, equipados con motores de dos tiempos. La gran mayoría de los buques equipados con hélices de paso controlable accionan generadores de velocidad fija con las limitaciones anteriormente indicadas.

Fig. 2: Shymgen.



Debido a estos condicionantes, han hecho aparición recientemente en el mercado sistemas de conversión de tensión y frecuencia que se pueden instalar entre un generador existente y el cuadro principal, permitiendo la operación a velocidad variable, con el consiguiente ahorro.

### 3.2.2 Principio de funcionamiento y tecnología

Uno de estos sistemas es el Shymgen (fig. 2), solución que se compone principalmente de un convertidor de tensión y frecuencia junto con otros sistemas auxiliares. Al instalarse entre el generador y el cuadro principal, adapta, mediante electrónica de potencia, una corriente de tensión y frecuencia variable a un valor fijo e igual al de la red.

Los detalles del sistema escapan al alcance de este artículo, si bien los autores pueden facilitar referencias y más información técnica sobre el sistema Shymgen.

### 3.2.3 Aplicación abordo y cálculos de funcionamiento

Durante la auditoría energética, y una vez efectuadas las mediciones que permiten conocer el perfil de operación completo, se deben llevar a cabo dos tipos de cálculos: por un lado se reproduce en el simulador el

funcionamiento del buque como lo hace habitualmente, a velocidad constante, mientras que por otro lado se reproduce una situación alternativa, en la que se opera con una velocidad del tren propulsor optimizada para cada velocidad y carga del motor. En cada situación se conocen las curvas reales de consumo específico del motor diesel, así como el rendimiento de la hélice previamente calculado mediante CFD para cada velocidad y paso.

En la tabla 2 se muestra la energía consumida en cada situación, calculando un balance anual como potencia media multiplicada por el número de horas en servicio en dicha condición.

El número total de horas de navegación es de 6150 h/año. De ellas, un 45% se navegan a la velocidad nominal de proyecto del buque, mientras que el resto a velocidades menores, debido a restricciones operativas y de rutas.

N1 representa la velocidad del motor principal en la situación original. La demanda de potencia se basa en una combinación de mediciones reales en el buque y cálculos CFD. Se puede observar que, cuanto más se aleje la condición de trabajo de la de diseño, mayor es el ahorro derivado de la aplicación del

Condición	A	B	C	D	E
V media (kn)	20	18	16	8	4
% tiempo	45%	28%	19%	5%	3%
Horas / año	2.768	1.722	1.169	308	185
N1 (rpm)	500	500	500	500	500
Potencia media (kW)	15.000	10.935	7.680	1.800	1.300
Energía (MWh)	41.512	18.830	8.978	554	240
N2 (rpm)	500	450	425	400	400
Potencia media (kW)	15.000	10.450	7.000	1.000	650
Energía (MWh)	41.512	17.995	8.180	308	120
Reduc. rev. cola (%)	0	-10	-15	-20	-20
Ahorro potencia (%)	0	-4,40	-8,9	-44,4	-50
Ahorro energía (MWh)	0	835	798	246	120
Ahorro k€	0	91,8	88	27	1,3
Ahorro total k€	208,1				

Tabla 2: Análisis de ahorros del sistema.



sistema de generación a velocidad variable, por ejemplo en la fase de aproximación a puerto a baja velocidad. Esto es debido al pobre rendimiento de la hélice trabajando a velocidad de giro nominal, muy poco paso y una distribución del mismo muy ineficiente. Además, una pequeña parte del ahorro proviene de la mejora en el consumo específico del motor.

Una vez que una auditoría energética determine la idoneidad de una actuación de *retrofitting* del generador de cola mediante un sistema de conversión de potencia, su aplicación con éxito requiere un proyecto detallado. Se deben analizar aspectos como el espacio disponible, características del generador y posibles modificaciones en el mismo, cableado, control de la propulsión y consumidores eléctricos.

### 3.3 Optimización de la propulsión

Además de la actuación de *retrofitting* mostrada en el punto anterior, es interesante hacer hincapié en determinadas mejoras hidrodinámicas del sistema propulsor del buque.

El tren propulsor del buque a estudio es responsable de más del 90% del consumo de energía. Por ello, una mejora en el diseño de las palas de la hélice y un nuevo diseño de timón se presentan a priori como unas mejoras interesantes.

#### 3.3.1 Diseño de la hélice

Las principales características de la única hélice propulsora del buque son las siguientes:

- Diámetro: 4,8 m
- Relación de áreas: 0,702
- Paso de diseño: 5,33 m
- Velocidad giro: 150,7 rpm

Es habitual que los buques se encuentren a lo largo de su vida con condiciones de trabajo diferentes de aquellas para las que fueron proyectados. En este caso, se detectó y cuantificó durante la auditoría un potencial de mejora significativo, por medio del rediseño de las palas, adaptándolas al nuevo perfil de operación y reduciendo los espesores correspondientes a la cota de hielo del buque, que no es necesaria al operar el buque en las autopistas del mar del Atlántico.

Este nuevo conjunto de palas se puede instalar durante una varada, conservando el juego original para operaciones en otras rutas en áreas más frías.

En la tabla 3 se muestran los valores de rendimiento para el diseño original y el diseño modificado.

El nuevo diseño supone aproximadamente un incremento de rendimiento del 3%. Cabe esperar una mejora adicional si se rediseñan las palas para una nueva condición en la que se opera a velocidad variable, optimizando la distribución de paso y el área de pala.

#### 3.3.2 Diseño del timón

El timón es el principal elemento de maniobra del buque, pero al mismo tiempo juega un papel importante desde el punto de vista de la eficiencia energética, pues se trata de

un elemento recuperador de parte de la energía contenida en el flujo de agua que abandona la hélice.

La mejora en la geometría de la pala del timón da lugar al conocido como "timón adaptado a la estela". En este proyecto, se diseñó un timón con una geometría tipo "twist" y nuevos perfiles, alcanzando una mejora de rendimiento propulsivo del orden del 4,5%, un valor significativo si se tiene en cuenta que únicamente es necesario sustituir la pala del timón. (Ver fig. 3 y tabla 4.)

#### 3.3.3 Ahorros y retorno de la inversión

Como se puede observar en la tabla 2, del *retrofitting* con un sistema de generador de cola de velocidad variable se deducen unos ahorros de unos 210.000 €/año. En el caso del timón, los ahorros rondan los 44.000 €/año mientras que las nuevas palas ofrecen unos ahorros de 52.000 €/año. Estos ahorros se calcularon considerando un precio de combustible de 680 \$/t y un consumo específico de 200 g/kWh.

El coste de estas operaciones de *retrofitting* puede rondar los 150.000 € para un sistema tipo Shymgen, unos 100.000 € para el timón y un coste similar para la hélice, se puede estimar un período de retorno de la inversión inferior a 2 años, dependiendo del perfil de operación.

Obviamente estos valores se podrían ajustar con presupuestos más detallados, fluctuaciones en el precio de combustible y tipo de cambio, pero en cualquier caso la inversión se justifica.

	Original	Modificado
$\eta$	0,565	0,583

Tabla 3: Comparación de rendimiento del propulsor.

Caso	$K_T$	$K_T$ (%)	$K_Q$	$K_Q$ (%)
Orig.	0,2213	0,0%	0,0466	0,0%
Mod.	0,2212	4,5%	0,0466	0,0%

Tabla 4: Comparación de rendimiento del conjunto hélice-timón.

## 4. CONCLUSIONES

El *retrofitting* de un buque ro-ro con un sistema de generador a velocidad variable junto con otras medidas de mejora en el sistema propulsor puede producir unos ahorros significativos en el consumo de combustible, que podrían sobrepasar los 300.000 €/año en el buque en estudio. Los costes que implica una operación de este tipo la hacen muy interesante, derivando en un período de retorno de inversión muy breve y un riesgo técnico mínimo. ■



Fig. 3: Distribución de presiones en el timón adaptado.

