

# Nueva Generación de Hélices CLT ® Optimizadas para su Aplicación en Buques Militares

Págs. 139-153

*Juan González Adalid<sup>a</sup> Mariano Pérez Sobrino<sup>b</sup> José María Riola Rodríguez<sup>c</sup> Juan Jesús Díaz Hernández<sup>d</sup>*

<sup>a</sup>SISTEMAR, S.A. PhD. adalid@sistemar.com

<sup>b</sup>SISTEMAR, S.A. PhD. mps@sistemar.com

<sup>c</sup>Capitán de Fragata, Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid, España. jrriorod@fn.mde.es

<sup>d</sup>Isdefe. jjdiaz@isdefe.es

## Resumen

Se introducen las hélices CLT (Contracted and Loaded Tip) destacando sus ventajas sobre hélices convencionales alternativas y se describen los hitos más relevantes en el desarrollo de la tecnología vinculada con dichas hélices. Se presentan algunas de las referencias más relevantes de hélices CLT tanto en buques mercantes como militares y se describen los últimos proyectos de I+D+i realizados.

Dentro del marco del programa COINCIDENTE del Ministerio de Defensa de España se va a llevar a cabo una optimización de la hélice CLT que dará lugar a modificaciones importantes en la geometría de la placa de cierre, con una mayor adaptación al flujo, con la finalidad de mejorar el comportamiento en cavitación y reducir tanto ruidos y vibraciones a bordo como ruido radiado al mar, lo que resulta especialmente indicado para su aplicación en buques militares.

**Palabras claves:** Hélice CLT, actividades de I+D, placa de cierre.

## Abstract

The paper introduces CLT (Contracted and Loaded Tip) propellers and describes them emphasizing their advantages about conventional propellers. Additionally explains the most important milestones related with this technology. Some of the most relevant CLTs references will be reported both in merchant ships and military vessels and the last and more recent R&D made will be illustrated.

Within the framework of the Spain Ministry of Defense program call COINCIDENTE it will be carried out an optimization of the CLT propeller that will lead major changes in the geometry of the sealing plate, with greater adaptation to flow, in order to improve cavitation behavior and reduce both noise and vibration on board as sea radiated noise, aim which is particularly suitable for use in military vessels.

**Keywords:** CLT propeller, R&D activities, end plates.

*Fecha de recepción: Abril de 2015*

*Fecha de aceptación: Julio de 2015*

## 1. INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía es un objetivo prioritario en el diseño de hélices de buques. Además, las normativas cada vez más estrictas en términos de polución y emisiones de  $NOx$  y  $SOx$

Al mismo tiempo, las normativas relacionadas con el ruido radiado al agua y la emisión de vibraciones que puedan tener efectos negativos sobre la vida marina así como la importancia de la firma acústica en buques militares y buques de investigación deben tenerse en cuenta al abordar una nueva construcción y requieren por tanto un estudio específico del diseño de la hélice.

Gracias a su mayor rendimiento las hélices CLT reducen el consumo de combustible, las emisiones a la atmósfera y los índices Energy Efficiency Design Index (EEDI) y Energy Efficiency Operational Index (EEOI).

El desarrollo de la tecnología relacionada con el diseño de este tipo de hélices se inició en 1976, año en el que se publicaron las primeras ideas sobre la posibilidad de mejorar el rendimiento de las hélices propulsoras de los buques mediante la utilización de placas de cierre en los extremos de las palas. La primera generación de hélices con placas de cierre se denominó TVF (Tip Vortex Free) y fue desarrollada entre los años 1976 y 1986 en el seno de AESA (Astilleros Españoles, S.A.) y posteriormente SATENA (Sociedad Anónima de Tecnología Naval).

En 1986 se desarrolló una segunda generación de hélices con placas de cierre más avanzada denominada CLT. Desde entonces su desarrollo se ha realizado en el seno de la empresa SISTEMAR, creada en 1987 con el

objetivo de desarrollar y comercializar dichas hélices en todo el mundo.

En el presente trabajo se presentan los desarrollos vinculados a una tercera generación de hélices con placas de cierre especialmente diseñada para su aplicación en buques militares ya que la geometría de la placa de cierre se ha modificado optimizando su adaptación al flujo con la finalidad de mejorar el comportamiento en cavitación y reducir la excitación de pulsos de presión con la consiguiente reducción tanto de ruidos y vibraciones a bordo como del ruido radiado al mar. Estos desarrollos se están realizando dentro del ámbito del programa COINCIDENTE del Ministerio de Defensa de España.

## 2. HÉLICES CLT: FUNDAMENTOS, VENTAJAS, APLICACIONES POTENCIALES

Las hélices CLT se caracterizan por tener una placa de cierre en el extremo de cada pala localizada en la cara de presión (ver Fig.1). Las placas de cierre son elementos pasivos cuya única misión es permitir que se desarrolle una circulación finita en el extremo de las palas como consecuencia de la barrera que impide la comunicación del agua entre las caras de presión y de succión de las palas. Adicionalmente, dicha barrera tiene el objetivo de reducir la intensidad del torbellino de extremo de pala, mejorando así el comportamiento de la hélice en cavitación.



**Figura 1.** Hélice CLT instalada en el bulkcarrier “Paiute”

Fuente: Elaboración propia

El dimensionamiento adecuado de las placas de cierre es muy importante ya que debe minimizarse su resistencia viscosa tanto como sea posible. Por otra parte, resulta importante su adaptación al flujo que atraviesa la hélice.

Como es sabido, las palas de una hélice en funcionamiento producen un aumento en la velocidad del fluido (velocidades inducidas) a lo largo de la vena líquida que atraviesa el disco de la hélice. La componente axial de la velocidad inducida aumenta a lo largo de la vena líquida desde el infinito aguas arriba hasta el infinito aguas abajo, lo que origina una reducción progresiva del área transversal de la vena líquida de acuerdo con la ecuación de continuidad.

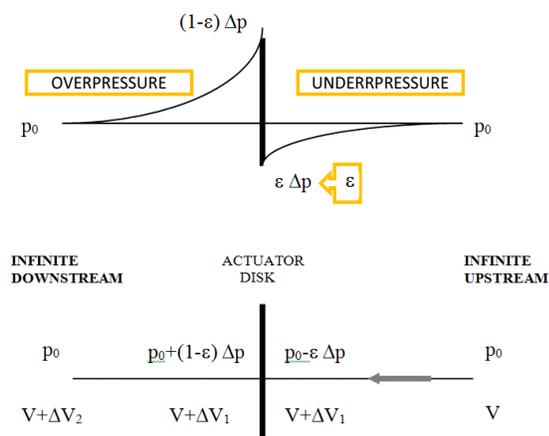
Las placas de cierre situadas en los extremos de las palas deben adaptarse a la contracción de la vena líquida con la finalidad de reducir al máximo su resistencia viscosa y evitar que se produzcan desprendimientos de flujo que podrían dar lugar al desarrollo de cavitación sobre la propia placa.

De esta manera surge hacia la mitad de los años 1980's una segunda generación de hélices con placas de cierre adaptadas a la contracción de la vena líquida que reciben el nombre de hélices CLT, caracterizadas porque las placas de cierre, dispuestas únicamente en cara de presión, no son tangentes a un cilindro coaxial con la línea de ejes sino que están adaptadas a la contracción de la vena líquida, de manera que el radio del borde de entrada de la sección extrema de la pala es mayor que el radio del borde de salida.

Una de las principales ventajas de las hélices CLT frente a las hélices TVF, a parte de su mejor interacción con el flujo de extremo de pala, es la posibilidad de extender la aplicación de hélices con placas de cierre a sistemas de paso variable (Pérez y González-Adalid, 1995).

Gracias a la existencia de las placas de cierre es posible diseñar las hélices CLT con una distribución radial de carga caracterizada por tener un valor finito no nulo en el extremo de la pala, lo que constituye una diferencia fundamental con las hélices convencionales en las que no es posible tener carga en el extremo de la pala debido a que la comunicación del agua en ambas caras de la pala impide que se establezca un salto de presiones y como consecuencia dichas secciones extremas no contribuyen a la generación del empuje total suministrado por la hélice.

Por medio de la Nueva Teoría de la Impulsión desarrollada por SISTEMAR (Pérez, Baquerizo y González-Adalid, 1983) y (Pérez, 1983), se demuestra que el empuje suministrado por la hélice se produce por medio de la acción combinada de una depresión aguas arriba y de una sobrepresión aguas abajo de la hélice (ver Fig.2) y que cuanto menor sea la depresión en la cara de succión y mayor la sobrepresión en la cara de presión, menores son las velocidades inducidas en el disco de la hélice y en consecuencia mayor es su rendimiento de propulsor aislado.



**Figura 2.** Disco actuador que explica el funcionamiento de la hélice de acuerdo con la Nueva Teoría de la Impulsión

Fuente: Elaboración propia

La existencia de las placas de cierre elimina la comunicación de agua entre ambas caras del extremo de la pala y en consecuencia facilita que se consiga un aumento de la sobrepresión en la cara de presión y una reducción de la depresión en la cara de succión. En una hélice convencional, el salto de presiones se distribuye aproximadamente en 60% sobrepresión y 40% depresión, mientras que en una hélice CLT el reparto aproximado es 90% sobrepresión y 10% depresión.

Debido al mayor rendimiento de propulsor aislado de la hélice CLT en comparación con una hélice convencional alternativa, es posible aumentar la velocidad del buque a igualdad de consumo de combustible o alternativamente reducir el consumo de combustible a igualdad de velocidad. Adicionalmente, se mejora el índice de eficiencia energética EEDI

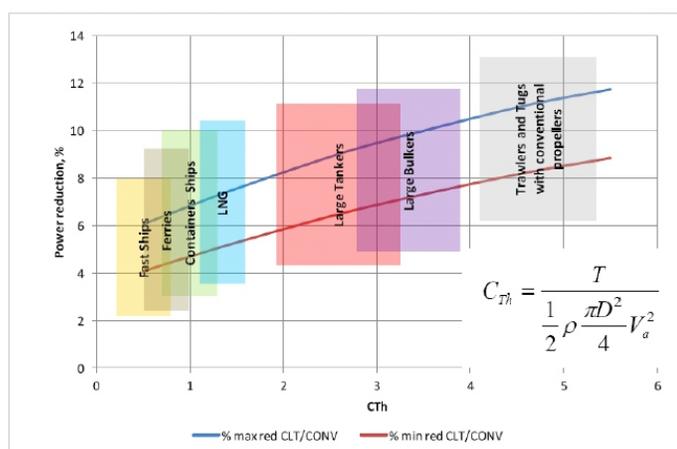
En buques militares, la mejora de rendimiento conseguida con hélices CLT se traduce en un incremento de la autonomía, mejora que puede ser estratégica en función del perfil operativo del buque.

Por otra parte, al ser mayor la sobrepresión aguas abajo de una hélice CLT, el campo de presiones que se genera alrededor del timón tiene valores más elevados que el desarrollado por una hélice convencional alternativa y además el flujo llega más concentrado, por lo que la acción del timón es más efectiva y en consecuencia se mejoran las características de maniobrabilidad del buque tales como el diámetro del círculo de evolución, la estabilidad de ruta, el tiempo y la distancia necesaria para detener un buque en marcha.

La intensidad del torbellino de extremo de pala es una hélice CLT es menor que en una hélice convencional alternativa. Además, al ser la depresión aguas arriba menor, la cavitación lámina desarrollada sobre la cara de succión es más estable lo que se traduce en unos armónicos de orden superior de los pulsos de presión más bajos que los correspondientes a la hélice convencional alternativa y en consecuencia los niveles de ruidos y vibraciones a bordo son menores.

La mejora del rendimiento conseguido con una hélice CLT depende del tipo de buque, siendo mayor para buques lentos y de alto coeficiente de bloque como

petroleros, bulkcarriers, etc. A continuación se presenta una indicación de la reducción de potencia que es posible conseguir mediante la instalación de hélices CLT para distintos tipos de buque en función del coeficiente específico de empuje (ver Fig.3).



En el caso de hélices de paso variable, las hélices CLT introducen mejoras muy significativas cuando se opera en posiciones de paso distintas de las de proyecto a revoluciones constantes gracias a su especial distribución radial de carga.

En la actualidad existen cerca de 300 aplicaciones a plena escala de hélices CLT instaladas en muy distintos tipos de barcos. Más de 60 aplicaciones se refieren a equipos de paso variable.

### 3. HITOS Y REFERENCIAS RELEVANTES EN EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA VINCULADA CON LAS HÉLICES CLT

La idea de situar placas de cierre en los extremos de las palas de una hélice con la finalidad de mejorar su rendimiento, tiene en sus inicios un carácter totalmente intuitivo, ya que conceptualmente se entiende que de esa manera las secciones superiores de las palas tendrán una mayor contribución en la generación del empuje total suministrado por la hélice, pero en el momento de su planteamiento (Pérez, 1976) no existe ninguna teoría de diseño de hélices que permita avalar objetivamente dichas ideas.

En 1976 dio comienzo una ardua tarea de desarrollos teóricos con la finalidad de adaptar las teorías de diseño de hélices existentes para hacer posible el diseño de hélices con placas de cierre y carga no nula en el extremo de las palas. Como consecuencia de estos desarrollos se generalizaron la Teoría de las Líneas Sustentadoras y la Teoría de la Impulsión.

A finales de los años 1970's se realizaron varios diseños de hélices TVF en AESA para distintos tipos de buques y se desarrollaron extensos programas experimentales de ensayos con modelos. Se desarrolló un procedimiento de extrapolación específico para hélices TVF, teniendo en cuenta los efectos de escala de la resistencia viscosa sobre las palas y las placas de cierre.

La primera hélice TVF se instaló a plena escala en Abril de 1982 en el bulkcarrier de 35.000 tpm "Sokorri", de Naviera Sota. Con dicho buque se realizó un amplio programa de pruebas de mar que permitió por

una parte contrastar los resultados obtenidos en los ensayos de canal, pero por otra parte, permitió introducir modificaciones en el sistema propulsor; las experiencias realizadas a plena escala con el buque “Sokorri” han sido determinantes en el desarrollo posterior de las hélices con placas de cierre.

Hacia la mitad de los años 1980's se crea la empresa SISTEMAR y surge una segunda generación de hélices con placas de cierre adaptadas a la contracción de la vena líquida que reciben el nombre de hélices CLT. SISTEMAR se vio obligada a explorar en sus inicios un mercado totalmente nuevo como fue el sector pesquero, en el que no es frecuente realizar ensayos de canal, lo que supuso que los avances con las hélices CLT llevaran más tiempo del inicialmente esperado.

A comienzos de los 1990's se instalaron las primeras hélices CLT en buques mercantes de flotas españolas como Naviera Petrogas, Ership, Marítima del Norte, Flota Suardiaz, Trasmediterránea, etc. y también se llevaron a cabo algunas operaciones internacionales en Corea, Japón, Indonesia, Suiza, etc.

Desde el punto de vista teórico se avanzó en los desarrollos de la Nueva Teoría de la Impulsión Generalizada (Pérez, 1984) y se extendió la tecnología a la posibilidad del diseño de hélices en serie, tanto contra-rotativas como en tándem.

Con el objetivo de desarrollar y validar un procedimiento de extrapolación de resultados de ensayos de canal realizados con hélices CLT se inició en 1997 una estrecha colaboración entre AESA, el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR)

y SISTEMAR dentro del marco de un proyecto de I+D+i gestionado por la Gerencia del Sector Naval y el Ministerio de Industria. Se construyeron modelos tanto de carena como de hélices de distintos barcos instalados con hélices CLT de los que se tenían resultados de pruebas de mar y se realizó un gran número de ensayos de canal; la comparación de los resultados de ensayos y los resultados de pruebas de mar permitió definir una base de datos de los coeficientes de correlación empíricos necesarios para corregir las curvas de propulsor aislado de las hélices CLT para distintos tipos de buques.

La colaboración continuó con Izar y CEHIPAR para investigar el comportamiento en cavitación de hélices CLT, ya que debido a los efectos de escala que aparecen en los ensayos con modelos de este tipo de hélices, resulta importante tenerlos en cuenta a la hora de realizar los ensayos de cavitación y la medición de fluctuaciones de presión. Con esta finalidad se desarrolló entre 2001 y 2003 un nuevo programa de I+D+i, también gestionado por la Gerencia del Sector Naval y el Ministerio de Industria.

Para la realización de este proyecto se tomó como buque base el Ro-Ro “Super-Fast Levante” de Trasmediterránea, de nueva construcción en Unión Naval de Levante, instalado con palas CLT. Se realizaron unas mediciones de vibraciones detalladas en la popa del buque, que se compararon con los resultados obtenidos mediante integración de las fluctuaciones de presión medidas por CEHIPAR en los ensayos y los cálculos de vibraciones con elementos finitos realizados por Izar modelizando numéricamente la popa del buque. De esta forma se validó el procedimiento desarrollado por

CEHIPAR para la realización de ensayos de cavitación y medición de pulsos de presión con modelos de hélices CLT (Pérez et al, 2006).

Los procedimientos de extrapolación y de realización de ensayos de cavitación desarrollados en los proyectos mencionados se presentaron en una importante conferencia internacional y se siguen utilizando en todos los proyectos CLT desde entonces.

La colaboración entre Izar, CEHIPAR y SISTEMAR se extendió a un nuevo programa de I+D+i desarrollado entre 2003 y 2005 con la finalidad de aplicar los desarrollos anteriores a un caso concreto. En este proyecto también participaron dentro del consorcio Acciona Trasmediterránea y Técnicas y Servicios de Ingeniería (TSI).

Para el desarrollo de este proyecto se eligió como buque base el ferry de 1000 pasajeros y 24 nudos de velocidad "Fortuny" de Acciona Trasmediterránea, entregado por Izar-Puerto Real en 2002. El buque tiene dos líneas de ejes y cada una va acoplada a dos motores de 7.240kW; cada línea mueve una hélice de paso variable que opera a revoluciones constantes para sacar partido de la PTO. Operando a velocidades altas con las hélices convencionales en el paso de diseño, el comportamiento del buque desde el punto de vista de ruidos y vibraciones a bordo era muy satisfactorio; sin embargo, operando a revoluciones constantes con el paso por debajo del diseño los niveles de ruidos y vibraciones eran muy elevados. Tanto en ensayos de canal como en las mediciones de pulsos de presión realizadas a plena escala se comprobó que este problema se debía a la cavitación cara de presión que se desarrollaba en condiciones fuera de diseño y al espectro de

banda ancha de los pulsos de presión.

Mediante la instalación de palas CLT se resolvió el problema gracias a su distribución radial de pasos geométricos, que no se descarga tanto como la convencional en condiciones de paso distintas de la de diseño, evitando que aparezca cavitación en cara de presión y espectro de banda ancha de los pulsos de presión y además de eliminarse los problemas de ruidos y vibraciones en condiciones de paso distintas a las de proyecto, se comprobó por medio de pruebas comparativas de velocidad que las palas CLT redujeron el consumo de combustible del orden de un 8% en la zona alta de velocidades y más de un 15% en velocidades inferiores. El armador instaló palas CLT en el buque gemelo "Sorolla" en la siguiente varada.

A finales de los años 1990's y principios de los 2000's se consiguieron importantes pedidos de hélices CLT, como por ejemplo los de Cargill International correspondientes por una parte a los bulkcarriers de 164.000 tpm "Comanche" y "Cherokee", y por otra parte en los bulkcarriers de 70.000 tpm "Paiute" y "Powhatan", en los que el armador reconoció ahorros de combustible superiores al 8%.

También se instalaron hélices CLT entre 1999 y 2000 en tres bulkcarriers de 16.900 tpm ("Nogat", "Orla", "Pilica") y un buque de transporte de sulfuro líquido de 15.500 tpm ("Mitrope") de nueva construcción en el astillero polaco Szczecin Shipyard para Polish Steamships (PZM).

En 2001 se entregaron en Corea los quimiqueros de 37.000 tpm "Flores" y "Sicilia", construidos por

Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd. para los armadores Soponata (Portugal) y Armitter (Mónaco), instalados con hélices CLT de 5,45 m de diámetro.

Las siguientes hélices CLT relevantes se instalaron en los bulkcarriers de 67.000 tpm “Bernardo Quintana”, 63.700 tpm “W.H. Blount” y 78.570 tpm “Sklenar” de Barber Ship Management. Estas hélices comprendidas entre 5,5 m y 6,1 m de diámetro fueron construidas por Wärtsilä Propulsion en Drunen (Holanda).

A finales de los 2000's se recibió el importantísimo apoyo de la Armada Española, que decidió instalar palas CLT en el buque de aprovisionamiento de combate (BAC) “Cantabria”, entregado en 2009 por Navantia Puerto Real y en la serie de buques de acción marítima (BAM) “Meteoro”, “Rayo”, “Relámpago” y “Tornado” (Riola y Díaz, 2011) y (Riola, 2011).

En 2006 A.P. Moller-Maersk (APMM) realizó un estudio interno de soluciones capaces de reducir el consumo de combustible y las emisiones de la flota del Grupo. Se realizaron cálculos y ensayos de canal con hélice CLT en diferentes tipos de buques, desde portacontenedores de 2.500 TEU a 8.500 TEU a petroleros de 35.000 tpm a 320.000 tpm. El M/V “Roy Maersk”, petrolero de 35.000 tpm, fue seleccionado como buque de referencia para la realización de un proyecto de demostración.

Se realizaron ensayos de canal en CEHIPAR (Madrid) y HSVA (Hamburgo) y a la vista de los resultados satisfactorios obtenidos de los ensayos APMM decidió construir la hélice CLT a plena escala y confirmó el pedido a Wärtsilä Propulsion (Drunen,

Holanda) en Diciembre 2008. Después de la instalación de la hélice CLT APMM realizó una monitorización del comportamiento en servicio para comparar con la hélice convencional original. Por otra parte, HSVA realizó una observación de la cavitación a plena escala y mediciones de las fluctuaciones de presión y comparó con los resultados de los ensayos. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios.

SISTEMAR ha participado subcontratado por CEHIPAR en el proyecto de I+D+i europeo “SILENV” (Ships oriented innovative solutions to reduce noise and vibrations), desarrollado entre 2009 y 2012 para estudiar la reducción de ruidos y vibraciones en buques y crear una etiqueta verde de buques silenciosos.

Dentro del ámbito de la convocatoria FP7 de la Unión Europea se ha realizado el proyecto “TRiple Energy Saving by Use of CRP, CLT and PODded Propulsion” (TRIPOD) (Pérez et al, 2013), con el objetivo de desarrollar y validar un nuevo concepto de propulsión para el ahorro energético de buques por medio de la combinación avanzada de tres tecnologías de propulsión existentes: propulsión azimutal tipo pod (POD), hélices CLT y hélices contra-rotativas (CRP). El proyecto comenzó en Noviembre 2010 y ha finalizado en Junio 2013. Los miembros del consorcio que han desarrollado el proyecto TRIPOD son ABB y VTT de Finlandia, AP Möller Maersk de Dinamarca y CEHIPAR, Cintraval-Defcar y SISTEMAR de España.

A lo largo del proyecto se han analizado diversas configuraciones del sistema propulsor. Se ha tomado como buque base para el proyecto el portacontenedores de

8.500 TEU “Gudrun Maersk”, de 351 m de eslora entre perpendiculares y con una MCR de 68.640 kW a 102 rpm, equipado con una hélice convencional de 8,95 m de diámetro y 6 palas.

Se ha diseñado en una primera fase una hélice CLT de 8,65 m de diámetro y 6 palas para comparar con el sistema de referencia y en una segunda fase, se ha modificado el sistema de referencia quitando el timón y poniendo en su lugar un sistema POD en configuración CRP, con diferentes combinaciones de hélices (convencional y CLT) y se han analizado y comparado con el sistema de referencia original. En una etapa final, representativa del caso de nueva construcción, se han optimizado las formas del buque directamente para ser equipado con un sistema CRP-CLT-POD.

Todas las configuraciones analizadas durante el proyecto mejoran el comportamiento de la hélice original, pero algunas de las soluciones tienen un retorno de la inversión demasiado elevado, por lo que no son viables para buques existentes.

El primer pedido de hélices CLT para buques de nueva construcción en China se confirmó a finales de 2012 y corresponde a una serie de cuatro LEG carriers de 12.000 m<sup>3</sup> construidos por Sinopacific Offshore & Engineering CO. LTD. para Greenship Gas de Singapur a través de la compañía subsidiaria Evergas de Copenhague.

El segundo pedido de hélices CLT en China se ha confirmado en Mayo 2014 y corresponde a dos bulkcarriers de 120.000 tpm de nueva construcción en el Astillero Shanhaiguan New Shipbuilding Industry

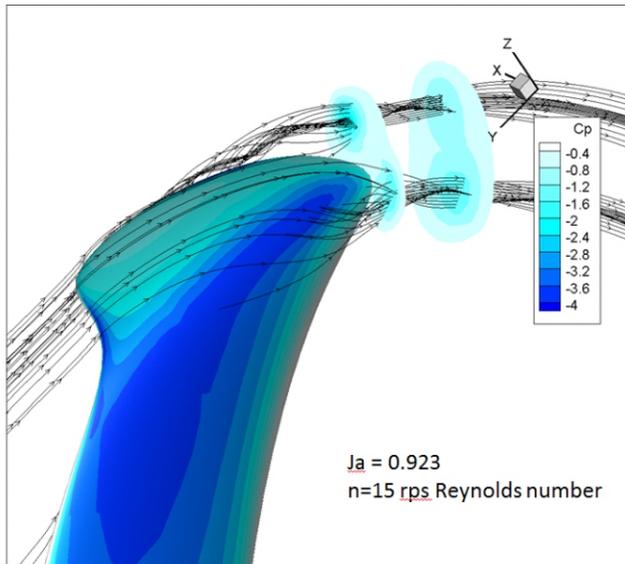
CO. LTD. para el Armador español Empresa Naviera Elcano. Las pruebas de mar con el primer barco están previstas para Junio 2015.

En Octubre 2014 se confirmó la decisión de instalar hélices CLT en dos quimiqueros de 19.800 tpm de nueva construcción en el Astillero Ningbo Xinle Shipyard para el Armador holandés De Poli Tankers. Las hélices de 5,45 m. de diámetro, 4 palas y 13,6 t. de peso están siendo construidas por YHC. El diseño ha sido aprobado por RINA y las pruebas con la primera unidad están previstas para Diciembre 2015.

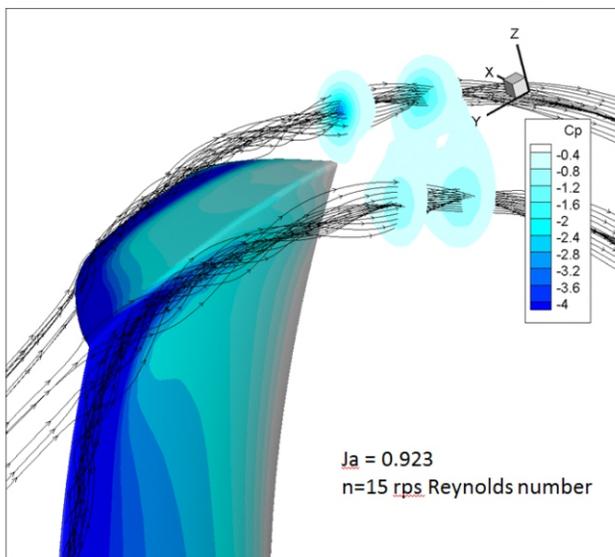
#### **4. PROGRAMA COINCIDENTE: NUEVA GENERACIÓN DE HÉLICES CLT OPTIMIZADAS PARA SU APLICACIÓN EN BUQUES MILITARES**

SISTEMAR ha realizado en 2012-2014 un proyecto de I+D+I con la Office of Naval Research (ONR) de la U.S. Navy y NSWCCD (Naval Surface Warfare Center Carderock Division) dentro del marco de los proyectos NICOP (González-Adalid, 2012), con el objetivo de demostrar que las hélices CLT pueden mejorar el rendimiento de las hélices de buques militares en un rango comparable al obtenido en buques mercantes sin sacrificar el comportamiento en cavitación. SISTEMAR ha desarrollado un diseño CLT y NSWCCD ha desarrollado un diseño TLP usando sus propias teorías de diseño. A continuación se representa la modelización CFD del flujo alrededor del extremo de la pala de una hélice CLT (ver Fig.4).

## Tip-vortex Visualization (TLP)



## Tip-vortex Visualization (CLT)



**Figura 4.** Modelización CFD del flujo alrededor del extremo.

Fuente: Elaboración propia

Se han construido sendos modelos en CEHIPAR y se han realizado ensayos de propulsor aislado y de cavitación, incluyendo medición de pulsos de presión, con especial interés en la inyección de cavitación. Por otra parte, se han realizado cálculos numéricos para ambos

diseños por NSWCCD y SISTEMAR/VTT usando códigos RANS para números de Reynolds del campo modelo y campo buque para comprobar los efectos de escala de este tipo de hélices (Pérez y González-Adalid, 2000) y (Pérez et al, 2005).

También en el marco del 7º Programa Marco de I+D de la Unión Europea y como continuación del proyecto SILENV se ha desarrollado el proyecto AQUO, que tiene como objetivos primordiales suministrar a la UE una potente herramienta para la gestión de la contaminación acústica submarina encaminada a la toma de decisiones sobre la ordenación del tráfico marítimo y crear unas guías de diseño para la reducción de la huella acústica de los buques de la flota.

SISTEMAR, diseñador exclusivo a nivel mundial de hélices CLT, ha realizado un esfuerzo continuado de innovación, desde su creación en 1987, mediante proyectos de I+D+i, estudios teóricos, aplicaciones experimentales y validación de resultados. La gran mayoría de sus aplicaciones han sido realizadas en buques mercantes, aunque existen algunas aplicaciones recientes en buques militares que han demostrado la conveniencia de optimizar los diseños para este tipo de buques. Para ello recientemente la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del Ministerio de Defensa Español (MDE) ha aprobado un proyecto específico denominado “Optimización de las hélices CLT para operación en buques militares y demostración mediante ensayos del comportamiento en cavitación, presiones inducidas y ruido radiado”.

El objeto de este proyecto es adaptar el diseño de las hélices CLT para perfeccionar sus posibilidades de aplicación a las condiciones propulsivas de los buques

militares, de acuerdo con estos tres objetivos:

- Desarrollo de una nueva geometría de las palas de las hélices CLT, con especial atención a la forma de las placas de cierre.
- Adaptación de las herramientas de diseño incorporando de forma más sistemática procedimientos numéricos (Computer Fluid Dynamics – CFD) al proyecto y geometría de las hélices CLT.
- Optimización de las hélices CLT para la mejora de su comportamiento propulsivo con los requerimientos de los buques militares, en los que, además del rendimiento, son de gran importancia la cavitación, las presiones inducidas al casco y el ruido radiado.

El proyecto propuesto tiene una primera fase de extensión o adaptación de las herramientas de diseño de las hélices CLT para incorporar los requerimientos específicos de los buques militares; después hay que validar estos desarrollos con la selección de un demostrador que será sometido a un proceso de optimización; del óptimo seleccionado se construirá un modelo a escala y se realizarán ensayos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas. En él se prevé desarrollar nuevas herramientas de cálculo, diseño y análisis. Para ello se han establecido una serie de condicionantes y requisitos que cubra todo el rango de los objetivos propuestos partiendo de la recopilación y análisis de la información más reciente correspondiente a hélices CLT incluidas las aplicaciones en buques de la Armada, la revisión de los coeficientes de correlación y propuesta y validación de los procedimientos definitivos, el estudio de las relaciones de los parámetros básicos de diseño con el rendimiento y con la geometría de la línea media de las secciones de pala. Para posteriormente

llevar a cabo la definición de una nueva geometría CAD de la hélice, sus cálculos CFD y posterior validación mediante un exhaustivo test de ensayos que incluirá predicción de resultados de propulsor aislado y de cavitación. Una vez se obtengan éstos, se llevará a cabo el análisis y comparación de los cálculos con los de VTT y NSWCCD, para ser capaces de definir una nueva geometría de hélice, además de adaptar el proceso de cálculo CFD mediante variaciones sistemáticas de parámetros geométricos de pala-placa. A través de todo el proceso descrito se pretende seleccionar definitivamente un demostrador de hélice CLT óptima, su construcción en el CEHIPAR, realización de ensayos y validación de los resultados experimentales, para ser capaces de predecir los resultados de propulsor aislado en flujo libre y comparar con los calculados mediante CFD para Rn-modelo y Rn-buque para deducir efectos de escala.

El coordinador del proyecto será SISTEMAR, que estará encargado de la gestión global del proyecto, de la preparación de los desarrollos y adaptaciones de las hélices CLT para optimizar su comportamiento en las aplicaciones a buques militares y del análisis final de los resultados. Participarán en el desarrollo del proyecto el grupo de investigación del Canal de ensayos de la ETSIN-UPM, que como agente colaborador será el encargado de los desarrollos y adaptaciones de los procedimientos de cálculo numérico con la utilización de herramientas CFD. Y finalmente el CEHIPAR realizará los ensayos con modelos de las hélices CLT para validar los resultados de los cálculos realizados.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

Los desarrollos realizados en los últimos 40 años en la tecnología implicada en el diseño, ensayos, análisis, construcción, etc. de hélices con placas de cierre, confirman que la tecnología está madura y su aplicación conduce a importantes ventajas en el comportamiento de los buques tanto desde el punto de vista de rendimiento como de comportamiento en cavitación y niveles de ruidos y vibraciones.

La utilización de procedimientos de cálculo numérico está permitiendo dar un salto cualitativo en el diseño de las hélices con placas de cierre de manera que además de las ventajas anteriormente señaladas se optimice la interacción de la placa de cierre (Sánchez, González-Adalid y Pérez, 2012) y (Sánchez et al, 2014) con el flujo y se reduzcan sensiblemente los ruidos radiados al mar, lo que hace que esta tecnología sea especialmente adecuada para su aplicación en buques militares.

## REFERENCIAS

- Álvarez, P., Gallego, J., Serrano R., González-Adalid, J., García, J., Pérez, L., Cercós, J., Souto, A., (2009). La Hidrodinámica y la eficiencia energética en pesqueros: resultados del proyecto Superprop. Ingeniería Naval.
- ANAVE, (1991). Reunión sobre ahorro energético en la propulsión de buques. Hélices CLT. Ingeniería Naval.
- Boeta, R., (1994). Ship performance improved by fitting CP-CLT blades. The Motor Ship supplement.
- Boeta, R., (1996). Trasmediterranea fits first hydrofoil. The Motor Ship supplement.
- Cerrada, P., Soriano, J., Beltrán, P., Pérez, A., Pérez, G., González-Adalid, J., (2002). Conclusiones del programa especial de mediciones de vibraciones realizado en el Super-Fast Levante. Ingeniería Naval.
- Ferrer, J., (1987). Service data back tip loaded propeller claims. The Motor Ship.
- Gaggero, S., Brizzolara, S., (2011). End plate effect propellers: a numerical overview. Trabajo presentado en el IMAM 2011 XIV Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean.
- Gaggero, S., Viviani, M., Villa, D., Berletta, D., Vaccaro, C., Brizzolara, S., (2012). Numerical and experimental analysis of a CLT propeller cavitation behaviour. Trabajo presentado en el CAV 2012 8th International Symposium on Cavitation.
- Gennaro, G. y González-Adalid, J., (2012). Improving the propulsion efficiency by means of Contracted Loaded Tip (CLT) propellers. Trabajo presentado en el Society of Naval Architects and Marine Engineers SNAME SOME Symposium, Atenas, Grecia
- Gennaro, G., González-Adalid, J. y Folso, R., (2009). Contracted and Loaded Tip (CLT) Propellers: latest installations and experiences. Trabajo presentado en el 16th International Conference of Ship and Shipping Research NAV 2009, Mesina, Italia.
- González-Adalid, J., (2012). NICOP CLT Project:

- Energy efficient Contracted Loaded Tip (CLT) propellers for Naval ships. *Infomarine Marine*. 4-4.
- González-Adalid, J., Tuduri, J., (2012). CLT propellers: an efficient measure to reduce fuel consumption and ship emissions. *InfoMarine*.
- González-Adalid, J. y Gennaro, G., (2011). Contracted and Loaded Tip (CLT) Propellers experience. Trabajo presentado en el Ship Power Forum. *ImarEST 2011*, Londres, Reino Unido
- González-Adalid, J. y Gennaro, G., (2011). Latest experiences with Contracted and Loaded Tip (CLT) Propellers. Trabajo presentado en el XIV Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean *IMAM 2011*, Génova, Italia.
- Haimov, H., Vicario, J., Corral, J., (2011). RANSE code application for ducted and end plate propellers in open water. Trabajo presentado en el *SMP'11. International Symposium on Marine Propulsors*.
- Hollstein, H., (1995). Performance improvement of the orange juice carrier *Bebedouro* by means of a CLT propeller. *The Motor Ship supplement*.
- Hollstein, H., Pérez, G., González-Adalid, J., (1997). Bulkcarrier speed trials with a *Sistemar* CLT propeller. *The Naval Architect*.
- Hollstein, H., Pérez, G., González-Adalid, J., (1998). Before and after comparisons of a CLT propeller installation. *The Naval Architect*.
- Palao, L., Pérez, M., González-Adalid, J., (2012). Colaboración *Cehipar-Sistemar* para el desarrollo de las hélices de alto rendimiento y tecnología española CLT. *Rotación*.
- Pérez, G., (1976). Una innovación en el proyecto de hélices. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., (1984). Application of a New Momentum Theory to the design of highly efficiency propellers having finite load at the blade tips. Trabajo presentado en el *West European Conference of Marine Technology*, París, Francia.
- Pérez, G., (1983). Correcciones de la teoría clásica de la impulsión y habilitación de la misma para el diseño de propulsores. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., Baquerizo, I., González-Adalid, J., (1983). Aplicación de la Nueva Teoría de la Impulsión al diseño de propulsores. Comparación con la Teoría de las Líneas Sustentadoras. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., González, F., Baquerizo, B., (1980). Some improvements of traditional Lifting Line Theory for ship propellers. *International Shipbuilding Progress*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1993). First CLT propeller fitted in South Korea. *The Motor Ship supplement*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1994). Contrarotating and tandem CLT propellers. Trabajo presentado en el *Symposium Propellers'84*, *SNAME*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1994). Optimización del sistema propulsor de un buque utilizando la

- Nueva Teoría de la Impulsión Generalizada. Ingeniería Naval.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1995). Tip Loaded Propellers (CLT). Justification of their advantages over conventional propellers using the New Momentum Theory. *International Shipbuilding Progress*, Vol.42, nº429.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1996). Consideraciones sobre la modelización matemática de la acción que la hélice ejerce sobre el agua. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1997). Optimization of the propulsion system of a Ship using the Generalized New Momentum Theory. Trabajo presentado en el West European Conference of Marine Technology Golden Medal Awards.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1998). Comparación entre lo comportamientos del panamax Powhatan con hélice convencional y con hélice CLT. *Rotación*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1998). Detailed design of ship propellers. Fondo Editorial de Ingeniería Naval.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1999). Nuevo procedimiento para definir la geometría de las líneas medias de las secciones anulares de las palas de una hélice. Generalización de los desarrollos precedentes. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (1999). Nuevo procedimiento para definir la geometría de las líneas medias de las secciones anulares de las palas de una hélice. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., (2000). Scale effects in the performance of a CLT propeller. *The Naval Architect*.
- Pérez, G., González-Adalid, J., García, A., Masip, J., Quereda, R., Pangusión, L., Minguito, E., Pérez M., Beltrán, P. y Galindo, C., (2006). Full scale comparison of a superferry performance fitted with both high skewed and CLT blades. Trabajo presentado en el World Maritime Technology Conference 2006, Londres, Reino Unido
- Pérez, G., Pérez, M., González-Adalid, J., García, A., Masip, J., Quereda R., Minguito, E., Beltrán, P., (2006). Un hito español en la propulsión naval: rentabilidad de un amplio programa de I+D+i. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, L., Souto, A., González-Adalid, J., Alvarez, P., Merino, D., Cercós, J., (2007). Sobre la optimización de la propulsión en pesqueros y remolcadores en servicio. Trabajo presentado en la XX COPINA-VAL.
- Pérez, M., Aláez, J., García, A., Pérez, G., González-Adalid, J., (2000). Optimización de la propulsión de buques. Un proyecto español de I+D+i. *Ingeniería Naval*.
- Pérez, M., Minguito, E., García, A., Masip, J., Pangusión, L., Pérez, G. y González-Adalid, J., (2005). Scale effects in model tests with CLT propellers. Trabajo presentado en el 27th Motor Ship Propulsion Conference, Bilbao, España

- Pérez, M., Sánchez, A., Quereda, R., Masip, J., Nijland, M., Veikonheimo, T., Kokkila, K., González-Adalid, J. y Uriarte, A., (2013). TRIPOD: the development of a novel propulsion concept. Trabajo presentado en el 52º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, Madrid, España.
- Quereda, R., Bobo, J., Pérez, M., Masip, J., González-Adalid, J., Veikonheimo, T., Sánchez, A., Uriarte, A., Nijland, M., Kokkila, K., (2013). Model test extrapolation for performance prediction of a CRP-POD propulsion unit. Trabajo presentado en el SMP'13. 3rd International Symposium on Marine Propulsors.
- Riola, J.M., (2011). Hélices con tecnología CLT en la popa del BAM. *Revista General de Marina*. 261, 701-710.
- Riola, J.M., Díaz, J.J., (2011). Hélices CLT: tecnología BAM. *Boletín de Observación Tecnológica de Defensa*. 2(31), 22-27.
- Ruiz, R., Pérez, G., (1981). Evolución de los propulsores TVF: proceso de diseño y primeros resultados experimentales. *Ingeniería Naval*.
- Ruiz, R., Pérez, G., (1981). Fuel saving from a new type of propellers. *Marine Propulsion*.
- Ruiz, R., Pérez, G., (1983). Full scale results of first TVF propellers. Trabajo presentado en el ISSHES' 83.
- Ruiz, R., Pérez, G., (1984). Service results with the TVF propeller duct system. Trabajo presentado en el 6th International Marine Propulsion Conference.
- Sánchez, A., (2012). Unsteady analysis of a CLT propeller using a lifting surface vortex-lattice method. Trabajo presentado en el MARNA 2012. International Conference on advances and challenges in Marine Noise and Vibration.
- Sánchez, A., González-Adalid, J. y Pérez, M., (2012). Study of end-plate shape variations for tip loaded propellers using a RANSE solver. Trabajo presentado en el 29th Symposium on Naval Hydrodynamics SNH 2012, Gotemburgo, Suecia
- Sánchez, A., González-Adalid, J., Pérez, M. y Saisto, I., (2014). Evaluation of end plate impact on tip loaded propeller performance using a RANSE solver. *International Shipbuilding Progress*. 61(1-2), 103-128.
- Sánchez, A., Sipila, T., Pylkkanen, J., (2011). Simulation of the incompressible viscous flow around an endplate propeller using a RANSE solver. Trabajo presentado en el 26th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Sendagorta, I., Uriarte, R., Pérez, G., González-Adalid, J., (1992). Mejoras en el Sierra Guadarrama con una hélice CLT. *Rotación*.
- Zatarain, G., (1991). Comportamiento del buque Guardo equipado con una hélice CLT. *Rotación*.
- Zatarain, G., (1992). Experience with retrofitting CLT propellers. Trabajo presentado en el 14th International Marine Propulsion Conference.