

HÉLICES CON TECNOLOGÍA CLT EN LA POPA DEL BAM

José María RIOLA RODRÍGUEZ



PROVECHANDO el acto de botadura del último Buque de Acción Marítima (BAM) P 44 *Tornado* en el astillero de Puerto Real, quiero llamar la atención con uno de los avances tecnológicos que se ha incorporado en esta serie, y me refiero a la utilización de hélices CLT (*Contracted and Loaded Tip Propeller*) con objeto de reducir consumos, mejorar el nivel de ruido, aumentar la velocidad y su autonomía. El *Tornado* es el último de los cuatro barcos que componen la primera serie, a la que seguirá un segundo programa que incluye la construcción de cinco nuevos barcos; tres de ellos igua-

les al propio *Tornado* y sus gemelos *Meteoro*, *Rayo* y *Relámpago*, y dos más con perfiles específicos para salvamento y rescate y de investigación oceanográfica.

Este artículo nace de la imprecación de un operario que al ver las palas de estas hélices exclamó: «Quillo, aquí alguien la ha liao, esto está más torcido que la Shakira». No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar del *waka-waka*, de lo bien que juega al fútbol el *Barsa* y las horas bajas de mi *SúperDepor*, pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.

Las primeras aplicaciones de las «humildes» hélices (del griego *helix* espiral) están datadas hace miles de años en la ingeniería de los molinos de viento y agua, y aunque la rosca de Arquímedes tiene más de dos mil años y hay diversos intentos documentados a lo largo de los siglos XVII y XVIII, se suele citar al año 1804 en que John Stevens desarrolló un propulsor de hélice en una aplicación de la máquina de vapor. Otros autores citan al guardabosques imperial Josef Ressel, quien solicitó la patente austriaca del invento en 1826, y consiguió que en 1829, bajo la atenta mirada de la población de Trieste, el buque *Civetta* zarpara propulsado por una innovadora espiral. También se suelen citar las patentes del granjero Francis Pettit Smith, en 1836, de una



Figura 1. Acto de botadura del BAM *Tornado*.

hélice de dos espiras completas, y la del ingeniero sueco Ericsson, con un propulsor de dos tambores con siete paletas helicoidales sujetas por un aro exterior, que giraban en sentido contrario. Y parece que también hay acuerdo en citar a Marc Brunel, que en 1843 diseñó el buque de seis mástiles *Great Britain*, de más de 3.600 toneladas, el primero que usó el nuevo invento que prometía revolucionar la náutica y que hizo que este barco se llevase la gloria de ser el primero que cruzó el Atlántico a hélice. Pero, no puedo pasar por alto los previos diseños de Leonardo da Vinci (1) y su helicóptero. Siempre visionario y meticuloso, en su descripción de la hélice escribió: «Su borde exterior deberá ser un filo de hierro... si el ingenio helicoidal está bien construido y se hace girar rápidamente, subirá por los aires en forma de espira»¹. No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar de Leonardo y sus ensayos a escala, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión*.

Es fácil de intuir las discusiones de la época a favor y en contra de la nueva propulsión. La controversia llegó a ser tan importante que el almirantazgo británico en 1845 decidió salir de dudas enfrentando a dos buques simi-

(1) RIOLA, J. M. (2004): «El ensayo Da Vinci». *REVISTA GENERAL DE MARINA*. Diciembre.

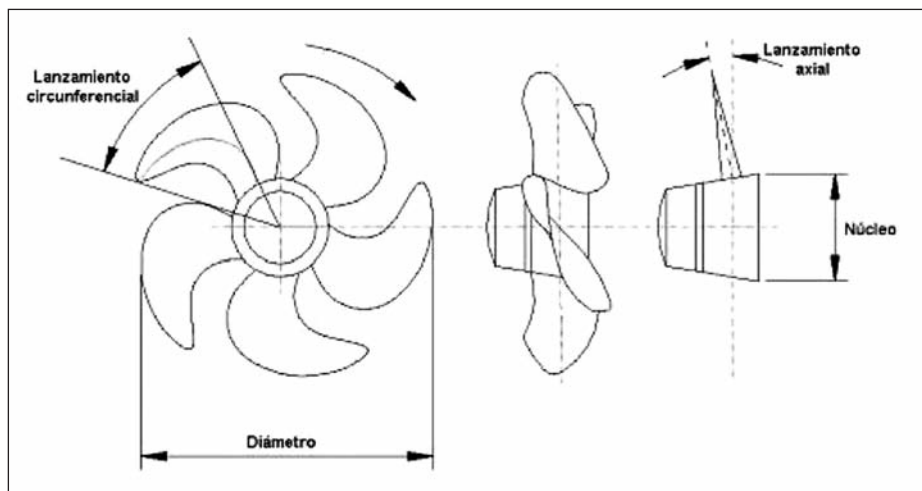


Figura 2. Geometría de una hélice.

lares de 800 toneladas y equipados con la misma caldera de vapor, el *Rattler*, con un eje con hélice, y el *Alecto* movido por ruedas, como las de los típicos barcos del Misisipí. El *Rattler* ganó sistemáticamente en todas las pruebas y, para asegurar los concluyentes resultados, se decidió unir los dos barcos con una larga estacha por sus popas para que tirasen con sus motores a tope: el *Rattler* avanzó a tres nudos de velocidad arrastrando al pobre *Alecto*, que a pesar de llevar las calderas a tope de presión y de tener viento favorable perdía la prueba de forma evidente. A raíz de ahí, la hélice determinó un cambio radical en la propulsión de los buques (adiós, paletas de ruedas, adiós).

¿Qué es una hélice?

Podemos definir una hélice como un dispositivo formado por un conjunto de elementos denominados palas o álabes, montados de forma concéntrica alrededor de un eje, cuya función es transmitir su propia energía cinética a un fluido. La hélice al rotar produce una fuerza que provoca un empuje del agua hacia atrás; esto origina una fuerza en la misma dirección pero en distinto sentido, que da como resultado el movimiento del barco. Esta teoría se basa principalmente en la tercera Ley de Newton o «Principio de acción y reacción»: «Si un cuerpo actúa sobre otro con una fuerza, este reacciona contra aquel con otra fuerza de igual valor y dirección, pero de sentido contrario».



Figura 3. Leonardo da Vinci.

No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar de mis hijos, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*

Para entender la acción hidrodinámica de la hélice es necesario conocer su geometría, por lo que se deben definir conceptos tales como: avance o paso, como la distancia que una de sus hojas desplaza hacia adelante por cada vuelta completa que realiza el eje; el tamaño del núcleo necesario para fijar las palas y sus mecanismos de control; el diámetro de la circunferencia que tangentea los extremos de las palas y la relación paso-diámetro (P/D). También el lanzamiento axial de la pala y el lanzamiento circunferencial, que afectan directamente a los efectos vibratorios inducidos por la presión del casco y que aportan ventajas hidrodinámicas al evitar fenómenos de cavitación.

En otro orden de cosas y según el sentido de giro, llamamos hélices dextrógiras cuando en marcha avante giran a la derecha si miramos desde popa hacia proa, y levógiras si giran al contrario. Otro factor clave es la selección del número de palas, que normalmente varía de tres a siete, y que en las aplicaciones militares predominan de cinco palas para minimizar las frecuencias de resonancia perjudiciales para estructura y maquinaria.

La cavitación o aspiración en vacío es un fenómeno que se advierte cuando las hélices trabajan a altas revoluciones y existen zonas de las palas (bordes donde es mayor la velocidad lineal) y de la cara de empuje donde se

produce un aumento de la presión mayor que la presión hidrostática. La física nos dice que la temperatura del agua varía en función de la presión, que el agua hierve a 100° C a nivel del mar y a menor temperatura al subir en altura. Así, al aplicar este principio a la depresión que forma la hélice al girar, el agua hierve a temperatura ambiente, hecho que implica que las burbujas que las palas expulsan hacia atrás sean de vapor de agua, desplazándose hasta que se encuentran con una zona de mayor presión donde «implotan», es decir, el vapor regresa al estado líquido de manera súbita contra las propias palas, lo que induce erosión en el material además de una pérdida adicional de rendimiento. No dude el lector que en este momento me siento tentado a hablar de los estudios de Leonardo da Vinci *¿dimmi che cosa ignoró mai quest'uomo?*, por el deterioro que se produce en los pilares de los puentes, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*



Figura 4. Hélice CLT.

Tecnología CLT

En los últimos años se han venido desarrollando nuevos diseños de hélices no convencionales encaminados a mejorar el rendimiento propulsor del buque; así podemos citar las de paso variable, hélice tobera, contra-rotativa, azimutales, supercavitantes, emergentes, Voith-Schneider, etc. Sin duda, una de las aportaciones más importantes ha sido un diseño español (SISTEMAR) de un tipo especial de hélice denominada CLT o hélice con «extremos de pala cargados». Este concepto, idea de mi profesor Gonzalo Pérez Gómez, surge en los 70 y ha venido evolucionado hasta nuestros días. No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar de este profesor y aquel examen con *Popi*, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*

Estas palas introducen un aspecto diferenciador de las convencionales al contar con «placas de cierre» en sus extremos, a modo de los *wind-tips* de las alas de los aviones, de manera que exista una carga no nula en su borde, e

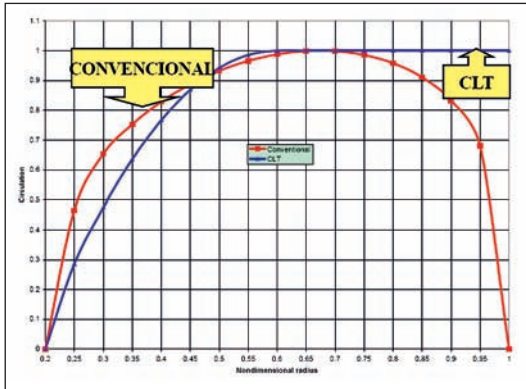


Figura 5. Distribución radial de cargas.

impiden que se generen torbellinos en su extremo, lo que provoca que las fuerzas fluctuantes de presión sean menores y en consecuencia también los niveles de ruidos y vibraciones. La teoría ha conseguido demostrar que cuanto mayor es la diferencia de presiones en ambas caras, mayor es el rendimiento, y además al poder ser más anchas en su borde de salida, cargan más agua. Estas hélices CLT han sido instaladas en casi 300 buques, entre civiles

(petroleros, quimiqueros, *bulkcarriers*, pesqueros, ro-ro, cruceros, etc.) y militares, oscilando la potencia propulsora desde los 36.000 bhp a 90 rpm hasta los 300 bhp a 2.400 rpm. La dificultad del éxito global de este diseño se encuentra en la preferencia del armador y astillero en seleccionar el propulsor dentro de un conjunto completo: motor, ejes, bocinas, hélices, etc. Además está la dificultad de la comprobación de su futuro resultado mediante ensayos a escala, ya que se precisa de una metodología de extrapolación diferente de las hélices convencionales.

En las CLT, gracias a sus placas de cierre, se independiza el flujo en el extremo de la pala, lo que permite que se cree una diferencia de presiones y las anchas secciones extremas de las palas contribuyen en gran medida al empuje total, tal como se observa en la figura 5. Respecto a la cavitación, tienen a su favor la menor depresión existente aguas arriba, pero en su contra está el desprendimiento de flujo producido en las secciones extremas debido al excesivo ángulo de ataque (2). La segunda generación de estas hélices ha aportado mejoras, como la reducción de la depresión en la cara de succión, minimizando la extensión de cavitación tipo lámina y las fluctuaciones de presión, y han aumentado la sobrepresión en la otra cara, con el consecuente aumento del rendimiento (3).

(2) PÉREZ-GÓMEZ, G.; PÉREZ-SOBRINO, M.; GONZÁLEZ-ADALID, J.; GARCÍA-GÓMEZ, A.; MASIP, J.; QUEREDA, R.; MINGUITO, E., y BELTRÁN, P. (2006): «Un hito español en la propulsión naval. Rentabilidad de un amplio programa de I + D + i». *Revista de Ingeniería Naval*. 838, pp. 79-114.

(3) GENNARO, G.; GONZÁLEZ-ADALID, J., y FOLSO, R. (2009): *Contracted and loaded tip (CLT) propellers. Latest installations and experiences*. 16th International Conference of Ship and Shipping Research. Messina, Italia.

Del diagrama de velocidades y fuerzas por unidad de longitud radial de una sección anular genérica de la pala, se deduce que cuanto menor sean las velocidades inducidas, más paralela será la sustentación *Lift* a la línea de ejes y por tanto mayor será el empuje T y en consecuencia el rendimiento de la hélice, por lo que para aumentar el rendimiento del propulsor es necesario reducir estas velocidades inducidas. No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar de la cara de los contemporáneos de Aristraco, siglo III, cuando escucharon que la Tierra giraba alrededor del Sol, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*

Fundamentos teóricos

A la hora de diseñar un buque, un factor a tener en cuenta es el denominado rendimiento propulsivo η_p . Este coeficiente se define como la relación entre la potencia efectiva necesaria para vencer la resistencia al avance y la potencia desarrollada por la planta propulsora. La base de partida para el proyecto de una hélice es la curva de su potencia efectiva, y el principal objetivo del diseño de las formas del buque y de la hélice será incrementar, tanto como sea posible, el valor del η_p de manera que la potencia requerida para propulsar el buque a una determinada velocidad sea lo menor posible. Este rendimiento puede calcularse en función de los rendimientos del casco, propulsor aislado, rotativo relativo, del mecánico, de succión y el efectivo de estela.

Para el diseño de hélices, en 1980 se generaliza la «Teoría de Líneas Sustentadoras». Y de ella, en función del coeficiente adimensional C_{TH} asociado a la carga específica de la hélice, y los rendimientos ideales, donde el empuje es igual a la densidad del fluido por el área del disco y la velocidad del buque; el empuje suministrado por la hélice se obtiene por medio de la acción combinada de una reducción de la presión ($\varepsilon \Delta p$) aguas arriba y de una sobre-presión aguas abajo de la hélice. Posteriormente surge la «Nueva Teoría de la Impulsión» que demuestra que la velocidad inducida al fluido por la hélice depende del coeficiente ε que define la relación entre la reducción de

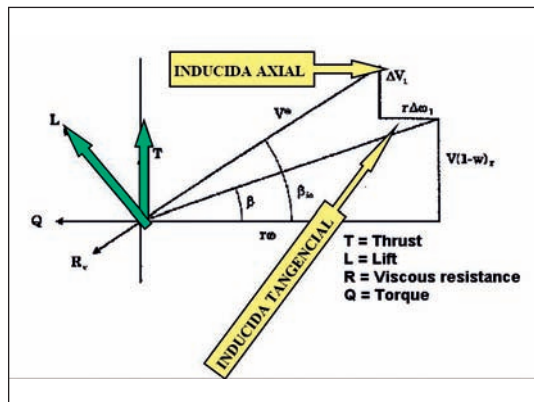


Figura 6. Diagrama de velocidades.



Figura 7. Ensayo de cavitación.

presión a proa de la hélice y el diferencial total entre ambas caras. Se concluye que conforme ε disminuye, el rendimiento aumenta. No dude el lector que en este momento me siento tentado de hablar de Anaxágoras (siglo V a. C.) y el primer intento de conseguir la cuadratura del círculo, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*

Además, cuando se produce el giro de la hélice, se modifica el campo de presiones del agua que la rodea, generándose una velocidad inducida que da lugar a un incremento de la velocidad del agua, reduciéndose progresivamente la sección transversal de la vena líquida, y las placas de cierre deben adaptarse a esta contracción para reducir su resistencia viscosa. No dude el lector de mi felicitación por superar la parte teórica,

sin duda inevitable, que me trae recuerdos de la ENM, *pero esas son otras historias y deben ser contadas en otra ocasión.*

Programas de I + D

A lo largo del desarrollo de estas hélices, se han llevado a cabo diversos programas de I + D + i por parte de SISTEMAR, la mayor parte de ellos en colaboración con el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) y el astillero AESA-IZAR-NAVANTIA, dependiendo del momento. Destaca el realizado en 2005 con el objetivo de desarrollar un procedimiento de extrapolación de los resultados de los ensayos de remolque, autopropulsión y propulsor aislado, y una metodología para efectuar ensayos de cavitación. El programa finalizó con la validación de esta tecnología en el buque *Fortuny*, construido por AESA para Trasmediterránea. Gracias a estos



Figura 8. CLT Instalada en el BAM.

desarrollos, Navantia exploró la posibilidad de instalar estas hélices tanto en el buque de aprovisionamiento (BAC) *Cantabria* como en los BAM. Estos últimos (4) cuentan con dos unidades propulsoras dotadas cada una de una hélice CLT de paso controlable.

En 2009 se inició el programa SILENV (*Ships oriented Innovative Solutions to Reduce Noise & Vibrations*), con objeto de estudiar las fuentes que provocan ruido y vibraciones en los buques y su entorno, y proponer una categoría *green label* que define unos requisitos asociados a los distintos tipos de barcos y aporta soluciones para alcanzar estos requisitos. Otro proyecto de I + D que se está desarrollando actualmente es el TRIPOD (*Triple Energy Saving by Use of CRP, CLT and PODded Propulsion*), que pretende imple-

(4) MANRIQUE, J.; GONZÁLEZ-VILLEGAS, F.; CHACÓN, J., y DEL CASTILLO, F. (2006): «El Buque de Acción Marítima (BAM). Una solución innovadora y con proyección de futuro adaptada a las necesidades de la Armada». *Revista de Ingeniería Naval*, 841, pp. 81-91.

mentar un nuevo concepto de propulsión para mejorar la eficiencia energética mediante la combinación de tres tecnologías existentes de propulsión: propulsor azimutal POD, hélices CLT y hélices contra rotativas.

Aplicaciones en Defensa y conclusiones

En octubre de 2009 se llevaron a cabo las pruebas de mar del *Cantabria*, equipado con una hélice de cinco palas de un diámetro de 5,7 m y una relación área-disco de 0,58. En el caso de los BAM, la hélice seleccionada cuenta con cuatro palas, un diámetro de 3,45 m y una relación área-disco de 0,52. La figura 7 muestra el ensayo de cavitación de la hélice en modelo a escala realizado en el CEHIPAR, mientras que la figura 8 nos presenta el propulsor instalado en un BAM.

Tras más de 30 años de desarrollo, la tecnología CLT es una realidad que presenta ventajas significativas sobre las hélices convencionales en buques de gran tamaño, lo que se traduce en ahorro de combustible, menores niveles de ruido y vibraciones, mayor velocidad y autonomía (5).

Espero haber creado alguna inquietud en los pacientes lectores y que a partir de ahora, además de apreciar la esbelta figura de estos buques, también disfruten de lo que hay debajo del agua. Al final, esto es lo que se pretende desde el I + D del Ministerio (6): productos innovadores y los mejores buques para la Armada.



(5) PÉREZ-GÓMEZ, G. (1976): «Una innovación en el proyecto de hélices». *Revista de Ingeniería Naval*. Octubre.

(6) RIOLA, J. M., y DÍAZ, J. J. (2011): «Hélices CLT: Tecnología BAM». *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*, núm. 31.