

## Investigación sobre la eficiencia energética en timones. Líneas de investigación en Vicus Desarrollos Tecnológicos S.L.

*Adrián Sarasquete Fernández*  
*Alejandro Caldas Collazo*

Vicus Desarrollos Tecnológicos S.L.- Vigo

### RESUMEN:

El timón tiene como función primordial en la mayor parte de los buques el actuar como elemento de gobierno, pero al mismo tiempo realiza otra función muy notable, aunque no tan conocida, como elemento recuperador de energía, al interactuar con el flujo de agua que abandona la hélice.

Vicus Desarrollos Tecnológicos S.L., en colaboración con Baliño S.A. y Progener Steering Systems, llevan a cabo un proyecto de investigación sobre la mejora de la interacción hélice-timón. Se presentan en este artículo los estudios en curso sobre la eficiencia energética en timones, analizando en qué condiciones se puede mejorar la recuperación de energía y cuáles son las soluciones idóneas para maximizar la energía recuperada. Para esta investigación se han utilizado de forma combinada herramientas CFD de tipo potencial y viscoso mediante las cuales se han evaluado las características de arrastre y respuesta en maniobra de diversas geometrías.

Se analizan finalmente algunos resultados de ensayos de canal y se presentan futuras líneas de investigación relacionadas.

### ABSTRACT:

The main role of the rudder in most of the ships is to act as a steering device, but at the same time it also performs a very significant, but not so well known, task as an energy recovery device, interacting with the water flow leaving the propeller.

Vicus Desarrollos Tecnológicos S.L., in cooperation with Baliño S.A. and Progener Steering Systems, are carrying out a joint research project focused on the improvement of the propeller-rudder interaction. In this article the ongoing studies about energy efficiency in rudders are presented, analysing in which conditions can energy recovery process be improved and what are the optimum solutions for maximising the amount of energy recovered. For this investigation potential and viscous CFD tools have been used in combination; by means of these tools, drag and manoeuvring characteristics from several geometries have been assessed.

Finally, some results from the towing tank testing are analysed and future research lines are presented.

## ÍNDICE:

1	Introducción.....	3
2	Algunas consideraciones sobre hidrodinámica de timones. Interacción entre carena, hélice y timón. Estado del arte .....	3
2.1	Timones. ....	3
2.2	Interacción hélice-carena-timón .....	6
2.3	Sistemas especiales.....	9
3	Modelado matemático y resolución numérica.....	9
3.1	Zona 1: Carena.....	11
3.2	Zona 2: Propulsor .....	14
3.3	Zona 3: Timón .....	15
4	Balance energético y velocidades.....	17
4.1	Eficiencia energética de hélices.....	17
4.2	Distribución de Circulación.....	18
4.3	Velocidades.....	19
5	Optimización de la geometría de la pala.....	21
5.1	Velocidades.....	21
5.2	Perfiles .....	22
5.3	Bulbo.....	23
5.4	Placas de cierre .....	24
5.5	Otras soluciones.....	24
6	Ejemplo de cálculo .....	25
7	Maniobrabilidad. Indicadores de respuesta en maniobra .....	27
8	Conclusiones y futuras líneas de investigación .....	27
9	Referencias .....	28

## 1 Introducción

En los últimos años se ha producido un incremento espectacular en el precio del crudo alcanzando un récord histórico, que si bien se ha moderado recientemente con una notable disminución de la demanda, obliga a plantearse un futuro cercano con petróleo a más de 100 \$ por barril.

Este escenario tiene un enorme impacto sobre toda la industria pero afecta de forma especial al transporte marítimo y la pesca, sectores en los cuales el coste de combustible representa el gasto más importante repercutiendo directamente sobre la cuenta de resultados. El interés de los armadores de todo tipo por la mejora de la eficiencia energética de sus buques abarca desde pequeños empresarios armadores de un único pesquero de litoral hasta las más importantes navieras, ya que pequeñas mejoras en el rendimiento que hace unos años eran despreciadas se convierten ahora en soluciones parciales a la rentabilidad de muchos buques aliviando la cuenta de resultados de las empresas.

Desde la construcción de los primeros buques, éstos han estado siempre dotados de dispositivos móviles para el gobierno, habiendo evolucionado estos dispositivos desde primitivos remos dispuestos en los costados de los buques hasta la forma más convencional habitual desde el siglo XII hasta hoy, consistente en una pala que gira sobre un eje vertical fijo en la popa del buque.

La generalización de las hélices como propulsor principal del buque y su ubicación en el codaste provoca que ese flujo de agua que abandona el propulsor incida sobre la pala del timón, mejorando enormemente la respuesta en maniobra, ya que ese flujo de agua a alta velocidad aumenta considerablemente la sustentación de la pala del timón.

Dado que el rendimiento de una hélice típica puede rondar el 60%, nos preguntamos si es posible aumentar el rendimiento propulsivo del buque intentando recuperar parte de esa energía que se pierde en el propulsor mejorando su interacción con el timón.

La utilización de herramientas CFD junto con la realización de ensayos con modelos en los canales de experiencias abren nuevas posibilidades en el estudio de los complejos fenómenos hidrodinámicos que tienen lugar en la zona de popa del buque y en concreto entre la hélice y el timón, posibilitando análisis que facilitan la realización de diseños de timones a medida, ya no sólo orientados a la maniobrabilidad (lo cual es totalmente lógico) sino para una máxima recuperación energética en la condición de servicio.

## 2 Algunas consideraciones sobre hidrodinámica de timones. Interacción entre carena, hélice y timón. Estado del arte

### 2.1 Timones.

El timón es una superficie sustentadora con una sección de perfil hidrodinámico que pivota sobre un eje vertical. Está normalmente situado en la zona de popa del buque, donde dirige el flujo de agua que abandona la hélice en la dirección del plano de la pala, a fin de producir una fuerza transversal y un momento de giro sobre el centro de gravedad del buque. Existen múltiples geometrías de palas de timón y tipos perfiles así como varias soluciones de fijación y situación de la pala en relación a la hélice y al buque. El timón se diseña a medida para cada proyecto de buque y la elección de sus características geométricas tiene una gran trascendencia pues condiciona enormemente la respuesta en maniobra del buque y, como veremos en apartados sucesivos, también afecta a la eficiencia energética de la propulsión.

Haremos en primer lugar una breve reflexión sobre las fuerzas que actúan sobre la pala del timón.

Es práctica habitual, al analizar perfiles en aerodinámica o hidrodinámica, el descomponer las fuerzas que actúan sobre el mismo en una fuerza sustentadora (L, lift) en dirección perpendicular al flujo incidente y una fuerza de arrastre (D, drag) en la dirección del flujo incidente.

Asimismo, normalmente se adimensionalizan dichas fuerzas mediante los coeficientes de sustentación (Cl) y arrastre (Cd), donde  $\rho$  es la densidad del fluido, A el área proyectada de la superficie sustentadora y  $U_0$  la velocidad del flujo incidente. Estos coeficientes dependen de la geometría del perfil, su ángulo de ataque y del número de Reynolds.

$$Cl = \frac{L}{0,5 \times \rho \times A \times U_0^2}$$

$$Cd = \frac{D}{0,5 \times \rho \times A \times U_0^2}$$

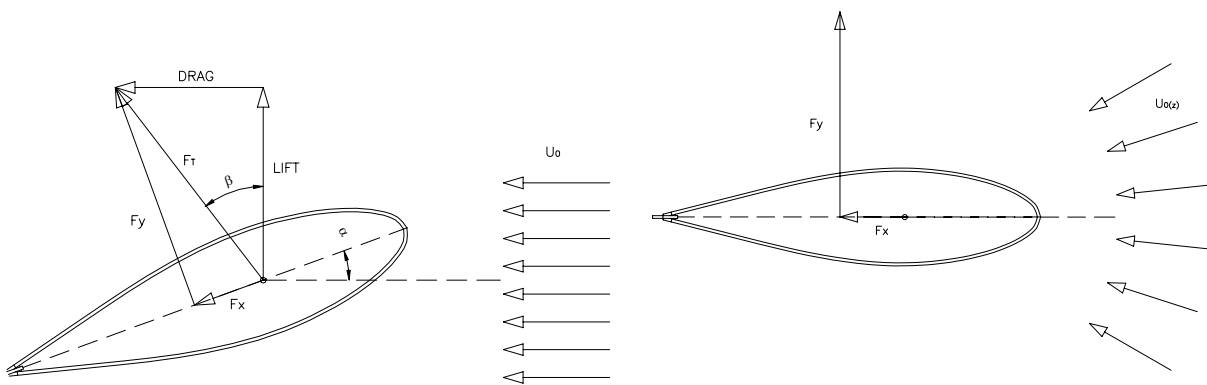


Fig. 1. Descomposición de fuerzas sobre un perfil. Vectores velocidad actuando sobre un perfil.

En este artículo, donde se analiza el timón desde el punto de vista de su eficiencia energética, la principal magnitud a considerar es la fuerza en la dirección de avance del buque. En navegación libre la pala del timón se encontrará “a la vía”, esto es prácticamente alineada con el plano de crujía del buque. Tomando el perfil mostrado en la imagen anterior como una sección de un timón cualquiera, nos interesa descomponer las fuerzas sobre un sistema de coordenadas alineado con el buque.

La pala del timón está sometida a flujos de magnitud y dirección variable en función de su posición vertical a lo largo de la pala; este flujo varía también con el tiempo, dado que el campo de velocidades a la salida de la hélice tiene una periodicidad marcada por el número de palas y velocidad de giro de la misma, aunque es habitual realizar los cálculos empleando un campo de velocidades promediadas en el tiempo.

La proyección de las fuerzas de sustentación y arrastre sobre el sistema de ejes del buque se realiza en función del ángulo de ataque local.

$$Fx = -L \times \text{sen}(\alpha) + D \times \text{cos}(\alpha)$$

$$Fy = L \times \text{cos}(\alpha) + D \times \text{sen}(\alpha)$$

Este tipo de descomposición se utiliza también al trabajar con códigos de tipo potencial, empleados para el análisis de perfiles en 2D. Este tipo de estudios se realizan a fin de obtener comparativas rápidas de la resistencia de diferentes perfiles, o para valorar el efecto que sobre la resistencia tiene un cambio en la distribución de presiones / geometría de un determinado perfil.

A continuación se muestra un ejemplo de la distribución de presiones en un perfil NACA0020 trabajando a un número de Reynolds de  $Rn=18.000.000$  y un ángulo de ataque de  $20^\circ$ .

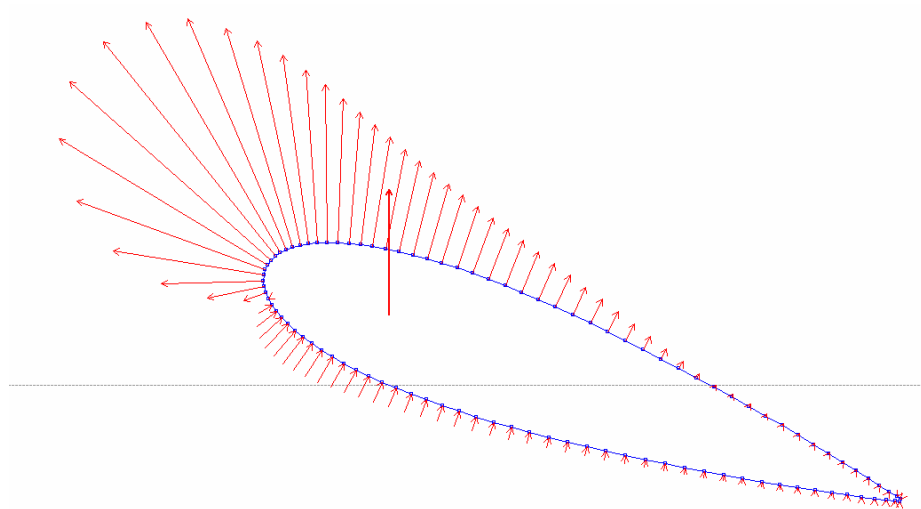


Fig. 2. *Distribución de presiones sobre un perfil 2D.*

Calculando este perfil mediante un código de paneles de tipo potencial para perfiles 2D nos da los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} C_l &= 1.859 \\ C_d &= 0.0288 \\ C_l/C_d &= 64,46 \end{aligned}$$

Proyectando las fuerzas sobre los ejes del buque obtenemos unos coeficientes de fuerza del mismo orden de magnitud:

$$\begin{aligned} F_x &= 0.6088 \\ F_y &= 1.7567 \end{aligned}$$

A la vista de lo anterior, el aspecto más interesante de la investigación pasa por optimizar la geometría de las secciones de la pala del timón, maximizando el aprovechamiento de las fuerzas sustentadoras, las cuales son habitualmente más grandes que las de arrastre.

El cálculo anterior se ha realizado a un número de Reynolds de  $18.000.000$ , que es el correspondiente al buque real. En el modelo encontramos unos valores de Reynolds mucho más pequeños, con lo cual las fuerzas viscosas afectan mucho más a la resistencia.

Analizando el mismo perfil con un número de Reynolds de  $Rn= 315000$ , obtenemos la siguiente distribución de presiones y espesor de capa límite, la cual es completamente diferente a la obtenida con el perfil original:

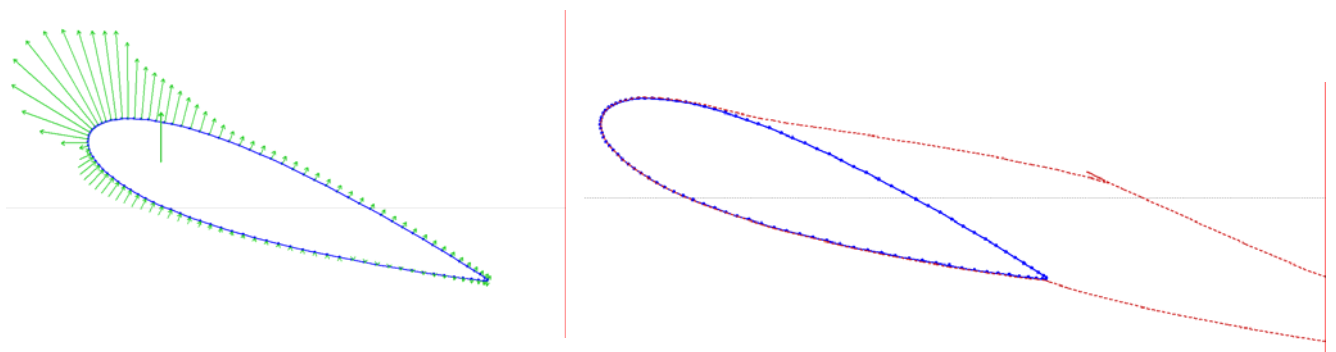


Fig. 3. Distribución de presiones sobre un perfil 2D a  $Re=315000$  y distribución de capa límite.

Los coeficientes de sustentación y arrastre calculados son:

$$\begin{aligned}C_l &= 1.169 \\C_d &= 0.1026 \\C_l/C_d &= 11,39\end{aligned}$$

Puede verse que son inferiores la caso anterior; observamos una disminución del ratio  $L/D$ , el cual es 6 veces menor que en el perfil real. Esto deriva en unos coeficientes de fuerzas proyectados cuyos valores oscilan entre un 50% y un 60% más pequeños que en el perfil de partida.

$$\begin{aligned}F_x &= 0.3034 \\F_y &= 1.1336\end{aligned}$$

En un ensayo con un modelo a escala, por ejemplo, en un canal de experiencias hidrodinámicas, los efectos viscosos se corrigen al extrapolar a escala real, pero la respuesta de la capa límite es diferente de la teoría pues el flujo que llega a la pala es extremadamente turbulento tras desprenderse en la popa y ser impulsado por la hélice. Algo similar sucede en las simulaciones con códigos CFD de tipo viscoso, donde el efecto de la turbulencia en el flujo incidente tiene un gran efecto sobre el cálculo de fuerzas sobre la pala.

Debemos señalar que la comparativa anterior se ha hecho mediante un cálculo potencial con un perfil de relación de aspecto infinita, con las limitaciones que ello conlleva. En una superficie sustentadora tridimensional, las velocidades inducidas por los vórtices desprendidos de los extremos provocan una modificación del ángulo de ataque, de ahí que debemos ser muy cuidadosos a la hora de llevar a cabo análisis demasiado simplistas mediante perfiles en 2D para aplicaciones 3D como una pala de timón.

Cuando las superficies sustentadoras trabajan con ángulos de ataque pequeños, el punto de separación de flujo se encuentra cerca del borde de salida del perfil. A medida que aumenta el ángulo de ataque, el punto de separación se desplaza hacia el borde de ataque. Este proceso produce una estela turbulenta que disminuye la sustentación. Es por lo tanto un fenómeno a minimizar tanto en maniobra como durante el proceso de optimización de la recuperación energética de la pala.

## 2.2 Interacción hélice-carena-timón

Una vez realizada esta pequeña introducción, nos adentramos un poco más en los fenómenos que tienen lugar en las superficies sustentadoras tridimensionales.

En lo que respecta a la interacción que tiene lugar entre el casco del buque, la hélice y el timón, podemos resumirla como sigue:

- La carena del buque modifica el flujo de agua que llega a la hélice, dando lugar a un campo de velocidades no uniforme (estela) en el cual se ve obligada a trabajar (no sin dificultades en muchos casos) la hélice. Este campo de velocidades se suma a las velocidades inducidas por nuestra hélice por lo cual la pala del timón también se verá afectada por él.
- Tanto el diseño de la hélice como su punto de operación tienen una importancia capital sobre el comportamiento del timón, dado que el flujo de agua que abandona el propulsor está muy condicionado por parámetros como la distribución carga ( $\Gamma$ ) de la pala, su geometría, etc... Las características de dicho flujo condicionan enormemente el potencial recuperable en el timón así como su respuesta hidrodinámica en maniobra.
- Finalmente, en contra de lo que pueda parecer a primera vista, el timón también afecta a la hélice, dado que induce velocidades aguas arriba, afectando a los coeficientes de estela efectiva. Este

efecto ha sido objeto de diversos estudios dada la importancia que tiene su cuantificación para un adecuado análisis de la propulsión del buque y una correcta extrapolación de los datos procedentes de ensayos de canal.

La fuerza axial resultante en el timón depende principalmente de las velocidades del flujo de agua incidente. En la siguiente imagen se muestran a modo de ejemplo dos condiciones de carga con diferentes magnitudes y direcciones de las velocidades incidentes en la parte superior e inferior del timón. Al aumentar el ángulo de ataque, la resultante de fuerzas sobre la pala pueden hacer que ésta actúe como “vela” con una fuerza axial neta en la dirección de avance del buque. El papel de las velocidades tangenciales es fundamental en este fenómeno.

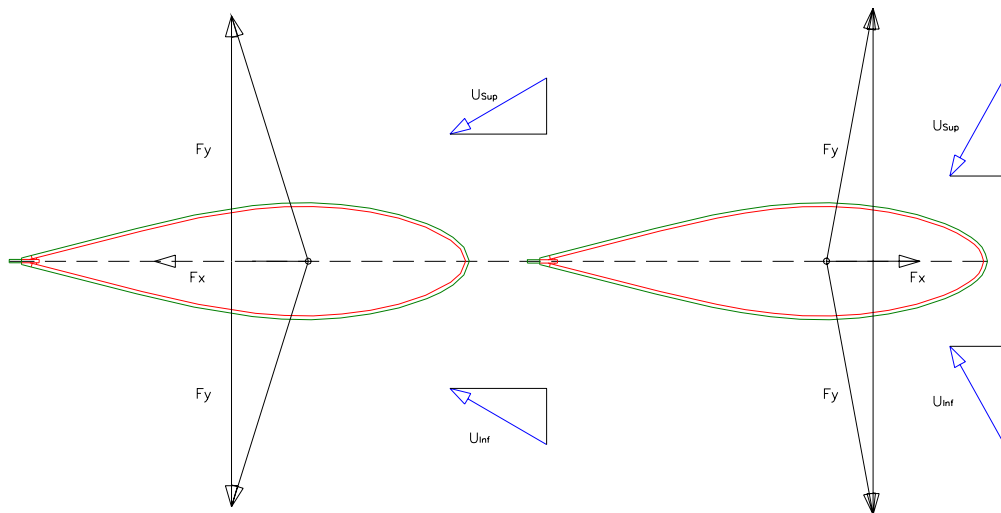


Fig. 4. Composición de la fuerza de empuje o arrastre sobre la pala para diferentes ángulos de ataque del flujo incidente.

Molland y Turnock [5] han llevado a cabo el que hasta la fecha podría calificarse como el más exhaustivo estudio sobre hidrodinámica de timones, realizando todo tipo de análisis con diferentes timones, paso de hélice, grados de avance y posiciones relativas. Resumimos a continuación algunas conclusiones que consideramos interesantes para esta investigación, comentando únicamente el efecto de la posición relativa axial ( $X/D$ ) y transversal ( $Y/D$ ) entre timón y hélice.

En la siguiente gráfica se observa cómo para diferentes condiciones de carga de la hélice ( $Kt/J^2$ ), la posición axial relativa entre hélice y timón afecta a la fuerza de arrastre de la pala, llegando incluso a cambiar de signo en la condición de máxima carga y una posición  $X/D$  próxima a 0.4. Esta tendencia no es común a todos los casos analizados; en los experimentos de Stierman [7], la tendencia medida para un grado de avance determinado es una disminución de la fuerza de arrastre en el timón a medida que aumenta la distancia  $X/D$ .

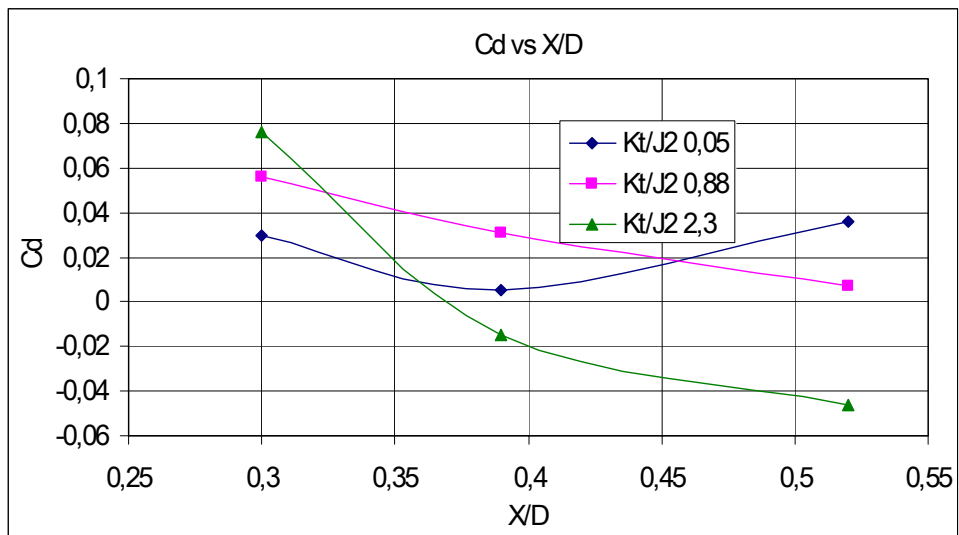


Fig. 5. Efecto de la posición relativa longitudinal entre timón y hélice sobre el coeficiente de arrastre. (Referencia [5]).

La desalineación transversal de los timones para facilitar el desmontaje de los ejes de cola es una disposición bastante habitual en buques con dos líneas de ejes como pueden ser los patrulleros, buques de guerra y ferries. Esta desalineación tiene también un efecto importante sobre las fuerzas sobre la pala. La gráfica mostrada a continuación ha sido elaborada a partir de los datos de los ensayos en [5] y en ella se observa que para hélices cargadas, y desde un punto de vista de eficiencia energética, no es recomendable desalinear transversalmente los timones pues empeora la recuperación energética en los mismos.

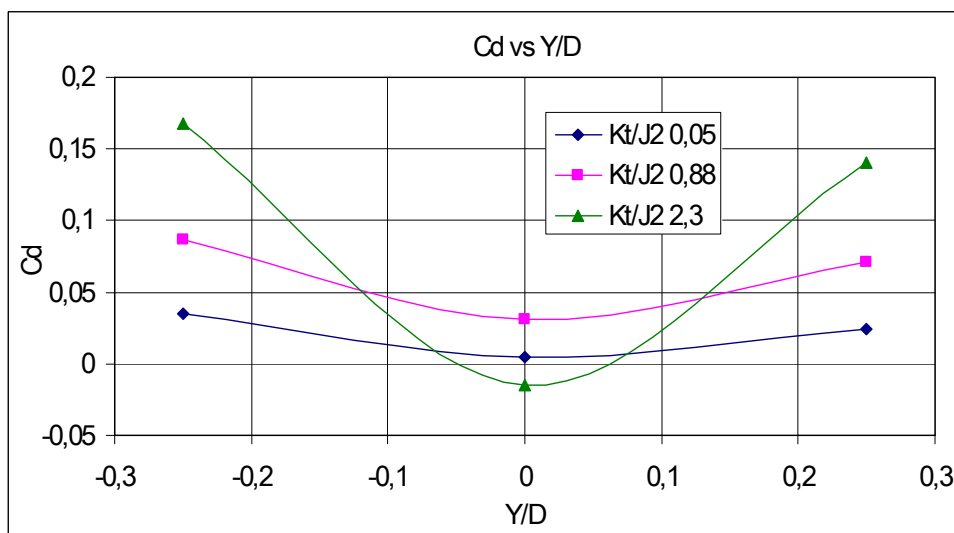


Fig. 6. Efecto de la posición relativa transversal entre timón y hélice sobre el coeficiente de arrastre. (Referencia [5]).

Los principales parámetros que afectan a la interacción hélice-timón son el paso de la hélice, la posición relativa entre hélice y timón y el espesor de la pala del mismo. No obstante, de acuerdo con las investigaciones llevadas a cabo por VICUSdt, la magnitud del espesor (o la relación espesor / cuerda) y su distribución en la pala debe ser valorada cuidadosamente dado que encierra una serie de efectos colaterales que obligan a ir más allá de una simple decisión sobre el parámetro espesor / cuerda mayor o menor.

Las indicaciones anteriores no son una regla general aplicable a todos los buques sino que cada proyecto debe ser analizado detalladamente, a fin de hallar la geometría y ubicación óptima de la pala como un compromiso entre eficiencia energética y requerimientos de maniobrabilidad.

## 2.3 Sistemas especiales

En lo que respecta a dispositivos especiales para la recuperación energética en la hélice o timón del buque, existen multitud de soluciones, disponiendo cada una de ellas de una serie de ventajas e inconvenientes cuyo análisis excede con creces el alcance de este trabajo, aunque haremos no obstante una breve reseña de las mismas.

Carlton clasifica estos dispositivos en tres grandes grupos en función de su ubicación:

- La primera zona se sitúa aguas arriba de la hélice. Los sistemas aquí ubicados funcionan de varias maneras, siendo una de ellas la imposición de una rotación en el flujo de agua de sentido opuesto al giro de la propia hélice, con el objetivo de cancelar la rotación del flujo que abandona la hélice mejorando el rendimiento de la misma. Otras soluciones tratan de mejorar el flujo axial de agua que llega a determinadas zonas de la hélice, especialmente la parte alta del disco (como la tobera ecualizadora de flujo de Schneekluth) mientras que otros dispositivos, como la tobera integrada de Mitsui, mejoran además el coeficiente de succión generando un cierto empuje.
- La segunda zona incluye aquellos dispositivos situados en la zona de la hélice. En esta zona el principal objetivo radica en la recuperación de la energía rotacional del flujo de agua que abandona la hélice como el “Grim Vane Wheel”, el cual consiste en una hélice situada inmediatamente a continuación de la hélice del buque y que gira libremente impulsada por el flujo de agua de la hélice en su zona exterior recuperando energía de rotación en los radios interiores.
- En la tercera zona se localizan normalmente todos aquellos apéndices añadidos a la pala del timón. Entre otros mencionamos las aletas en el bulbo tipo “Costa” y las “Additional thrust fins” de Ishikawajima Heavy Industries. Ya en esta tercera zona nos encontramos el timón, el cual es un importante dispositivo recuperador de energía aunque su función principal sea la de gobierno.

Para profundizar más sobre estos dispositivos recomendamos consultar la referencia [2].

Finalmente destacamos el desarrollo por parte de los grandes fabricantes de sistemas propulsores marinos y de sistemas integrados de timón y hélice, donde se combinan perfiles adaptados y bulbos integrados con el capuchón de la hélice.

## 3 Modelado matemático y resolución numérica.

Existen multitud de aproximaciones al problema de la interacción entre hélice, carena y timón para su resolución numérica. Exponemos a continuación algunas de las posibles metodologías:

- Acoplamiento fuerte: Un solo cálculo con Carena + Hélice + Timón.  
Modelo matemático: RANSE  
Método numérico: Volúmenes Finitos
  - No despreciamos efectos de viscosidad
  - Capturamos las interacciones
  - Tiempos de cálculo muy elevados
  - Coste computacional muy elevado
- Acoplamiento bi-zona: Carena por un lado y Hélice + Timón por el otro.
  - Carena

- a) Calculada:
  - Modelo Matemático: RANSE
  - Método Numérico: Volúmenes Finitos
- b.) Medida
  - Tubos de Pitot, Laser Doppler....
- Hélice+Timón
  - Modelo Matemático: RANSE
  - Método Numérico: Volúmenes Finitos
  - Despreciamos la interacción Estela vs Hélice + Timón
  - Menores tiempos de cálculo
  - Menor coste computacional
- Acoplamiento tri-zona: Carena, Hélice y Timón en tres cálculos diferentes.
  - Carena : Igual que en el bi-zona
  - Hélice
    - Modelos Matemáticos: RANSE ó Potencial
    - Métodos Numéricos: Volúmenes Finitos ó Elementos de Contorno
  - Timón
    - Modelos Matemáticos: RANSE ó Potencial
    - Métodos Numéricos: Volúmenes Finitos ó Elementos de Contorno
    - Limitaciones en la valoración de las interacciones
    - Tiempos de cálculo mucho menores
    - Evaluación cualitativa y cuantitativa de mejoras

En primer lugar debemos aclarar que los modelos matemáticos escogidos, así como los métodos numéricos asociados a la resolución de los mismos, vendrán determinados por el tipo de análisis a efectuar; presentaremos aquí una metodología orientada al proceso de diseño, por lo que debe capacitarnos para evaluar el mayor número de casos en el menor tiempo posible con una fiabilidad suficiente.

La primera decisión tomada es desacoplar nuestro problema zonalmente según las características físicas asociadas a cada zona, teniendo así tres zonas de análisis: Casco, Hélice y Timón.

Ganamos con esta decisión una reducción notable en los tiempos de cálculo conservando una metodología que nos permite obtener buenos resultados numéricos.

Para modelar estas tres zonas partimos inicialmente de las ecuaciones de Navier –Stokes (*N-S*) para fluidos incompresibles:

$$\nabla \cdot \vec{V}^p = 0$$

$$\rho \cdot \frac{D \vec{V}^p}{Dt} = \rho \cdot \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{V}$$

En definitiva partimos de cuatro ecuaciones en derivadas parciales (continuidad y tres ecuaciones escalares para la cantidad de movimiento) con cuatro incógnitas (tres componentes de la velocidad y presión).

### 3.1 Zona 1: Carena

Debemos tomar en consideración algunas características de la configuración del campo fluido que origina el movimiento de un buque. Como primera característica, debemos salientar que nos encontramos a números de Reynolds elevados; es bien sabido que en estos flujos son los términos convectivos los que determinan la configuración del flujo excepto en la denominada capa límite y en la estela, donde los términos difusivos (viscosidad) toman mayor importancia.

$$\nabla \cdot \vec{V}^* = 0$$

$$\rho^* \cdot \frac{D \vec{V}^*}{Dt} = \frac{\rho^*}{Fn} - \nabla \cdot p^* + \frac{1}{Rn} \cdot \nabla^2 \vec{V}^*$$

En nuestro análisis estamos interesados en obtener valores de velocidad en la zona de estela, por lo que no vamos a desprestigiar los términos difusivos en las ecuaciones de N-S. En este punto tenemos dos opciones: resolver las ecuaciones tal como están o promediarlas y modelar los fenómenos turbulentos. La primera opción no parece acertada, teniendo en cuenta el tipo de análisis que proponemos por ser muy costosa en términos computacionales; adoptamos la segunda puesto que devuelve buenos resultados con un coste computacional mucho menor (aún así el coste sigue siendo alto).

No resolveremos por tanto N-S, sino que resolveremos las denominadas Ecuaciones de Navier Stokes con Promedios de Reynolds (RANSE). Básicamente descomponemos velocidad y presión en dos componentes, una media y otra alternante:

$$V_j = U_j + u'_j$$

$$p = P + p'$$

Una vez sustituidas en N-S y promediando llegamos a una expresión del tipo:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{u}' = 0$$

$$\rho \cdot \frac{D \vec{U}}{Dt} + \rho \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i \cdot u'_j}) = \rho \cdot g - \nabla P + \mu \cdot \nabla^2 \vec{U}$$

La introducción de seis nuevas incógnitas en la ecuación de momentos (componentes del llamado tensor de esfuerzos de Reynolds) nos obliga a realizar algún tipo de modelado para volver a tener igual número de ecuaciones que de incógnitas.

En nuestro caso vamos a intentar resolver un estacionario por lo que en el primer término de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento desprestigiaremos la derivada parcial de la velocidad respecto del tiempo y conservaremos solo los términos convectivos.

En este momento ya estarían definidas las ecuaciones diferenciales a resolver, quedarían por definir características particulares del problema como son dominio computacional, condiciones de contorno, leyes de comportamiento, esquema numérico empleado y parámetros del mismo. Hemos utilizado dos modelos de turbulencia diferentes: uno de dos ecuaciones k-w SST y un modelo RSM que modela directamente los elementos del tensor de esfuerzos de Reynolds. En principio los resultados debieran ser de mejor calidad en el segundo modelo por ser en un caso de turbulencia no isotrópica, pero a costa de mayor tiempo de cálculo; en el k-w SST además de resolver los valores promedio de velocidades y presión, resolvemos k y w pero en RSM modelamos las seis nuevas incógnitas al problema (una para cada componente del tensor de esfuerzos de Reynolds). Además de tener que resolver mayor número de ecuaciones, la convergencia del esquema numérico también será más complicada (para una misma malla, mayor número de iteraciones).

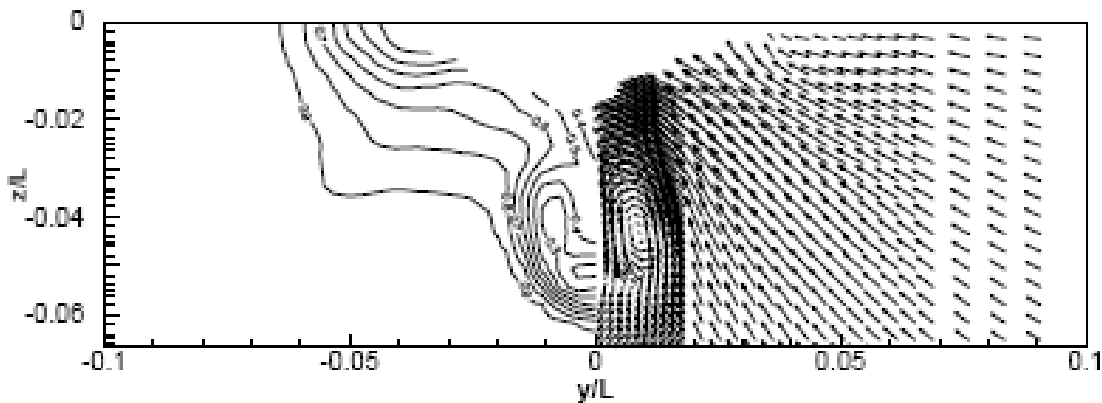
Para la pared de la carena vamos a tomar dos alternativas: por un lado buscando valores de  $y^+$  en torno a la unidad y resolviendo el campo fluido cercano a la pared (sólo nos es posible en el  $k-w$ ) y por otro empleando una ley logarítmica de pared, por lo que deberemos situarnos en valores de  $y^+$  por encima de 30.

Una vez hemos escogido el modelo a resolver debemos elegir un esquema numérico adecuado para su resolución. Dada su gran difusión en el sector y debido a los buenos resultados obtenidos en el proceso de validación y verificación, el esquema adoptado es el Método de Volúmenes Finitos (FVM); en concreto emplearemos un esquema segregado (acoplamos explícitamente las diferentes ecuaciones), mediante un algoritmo de tipo SIMPLE.

- Validación

- KVLCC2

- Se ha empleado este buque para llevar a cabo el proceso de validación en el cálculo de la estela nominal, por ser un caso muy estudiado y bien documentado. Para ello hemos empleado el modelo y el método numérico detallado más arriba. Debemos aclarar que para la discretización espacial hemos empleado mallas no estructuradas, exceptuando la capa límite en las que hemos empleado semiestructurada.



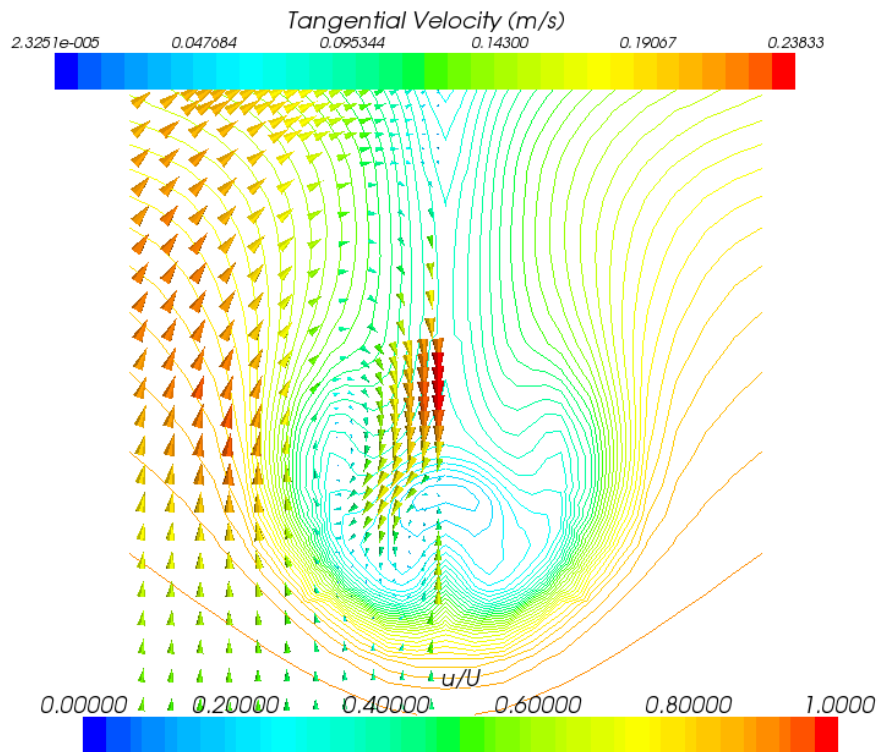
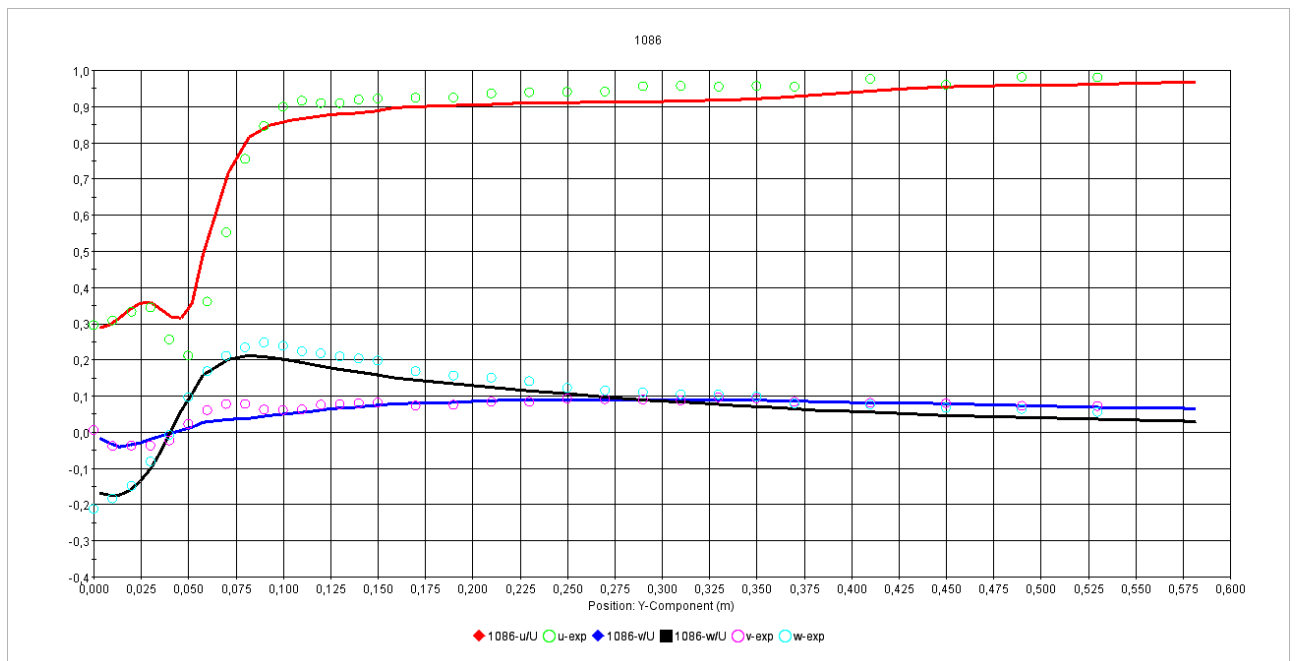


Fig. 7. Comparación de las isolíneas de estela y vectores contenidos en el plano de la hélice, medidas en el ensayo de canal y calculadas empleando un método de Volúmenes Finitos.



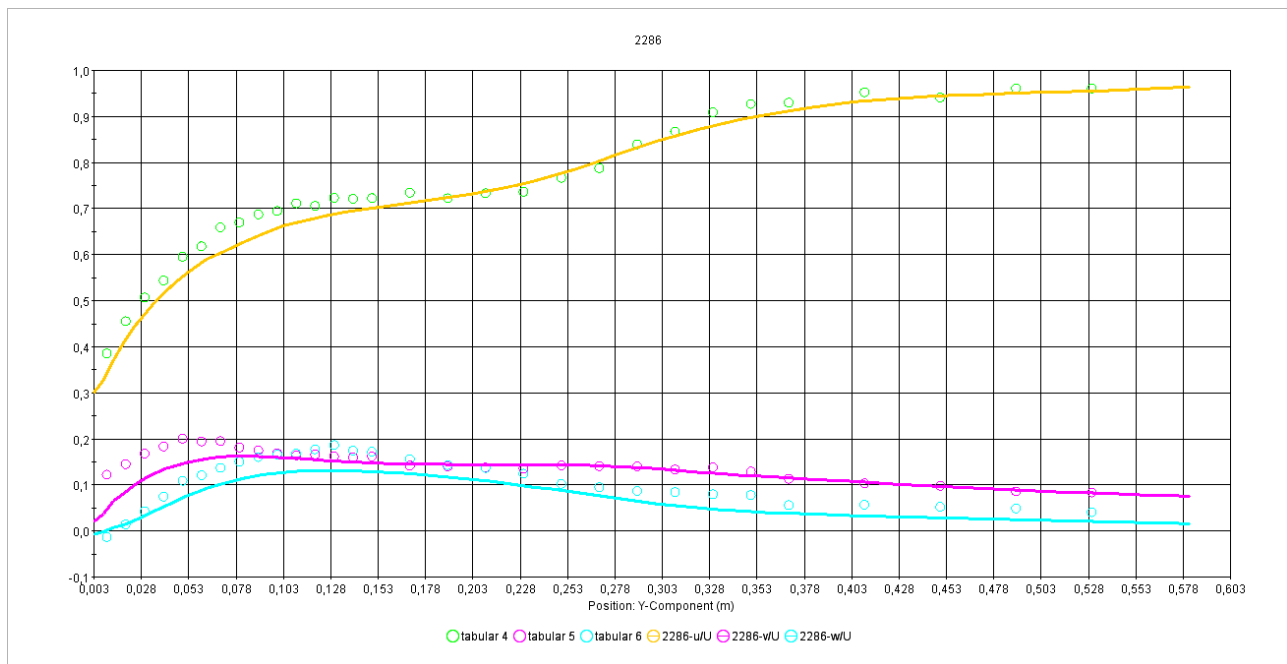


Fig. 8. Comparación de valores puntuales de coeficientes de estela en dos líneas horizontales contenidas en el plano de la hélice.

Vemos que el cálculo se ajusta significativamente a los resultados experimentales incluso en las zonas con gradientes de velocidades altos.

### 3.2 Zona 2: Propulsor

Nos proponemos analizar este elemento individualmente pero teniendo en cuenta en el cálculo el efecto de la carena, empleando para este fin los valores de velocidad inducidos por el movimiento de la carena.

Al modelar la hélice vamos a partir igualmente de N-S pero aquí vamos a despreciar los términos difusivos de las ecuaciones debido al elevado número de Reynolds. Con esta aproximación seguimos teniendo resultados aceptablemente buenos y reduciremos notablemente el tiempo de cálculo, lo que nos permite realizar cálculos rápidos para diferentes condiciones de carga de la hélice.

Si despreciamos los términos difusivos de N-S llegamos a la expresión de las llamadas Ecuaciones de Euler, en las que seguimos teniendo 4 ecuaciones con cuatro incógnitas.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\rho \cdot \frac{D \vec{V}}{Dt} = \rho \cdot \vec{g} - \nabla p$$

Si además imponemos vorticidad nula (flujo irrotacional) llegamos a una expresión potencial de las ecuaciones en la que tendremos sólo una incógnita y obtendremos valores derivados de ésta para nuestras variables de partida (velocidad y presión).

$$\vec{V} = \nabla \varphi$$

$$\Delta \varphi = 0$$

La resolución de la ecuación de Laplace supone una reducción notable de coste, ya que, además de su carácter lineal y la reducción de incógnitas del sistema, su resolución mediante un Método de Elementos de Contorno (BEM) conduce a un número bajo de elementos dado que al formular el problema utilizando la ecuación de Green pasamos de resolver las ecuaciones en todo el volumen a resolver sólo sobre los contornos (en nuestro caso sobre la superficie del propulsor).

El código de paneles PPB se utilizará para el cálculo de las velocidades aguas abajo de la hélice. Se ha realizado previamente un extensivo trabajo de validación de esta herramienta, empleando para ello varios casos, reconocidos internacionalmente para validación de CFD en hélices.

Se realiza un análisis del funcionamiento de la hélice a un grado de avance  $J$  determinado, comparando los coeficientes de par  $KQ$  y empuje  $KT$ , así como la distribución de velocidades axiales y tangenciales promediadas en el tiempo, en una posición determinada aguas abajo de la hélice.

Se muestra a modo de ejemplo algunos resultados obtenidos con una de las hélices; se trata del propulsor DTMB P4119, que es una hélice de tres palas y 304,8 mm de diámetro desarrollado en los años 60 para la validación de códigos de superficie sustentadora.

Comparando los coeficientes de par y empuje en tres grados de avance obtenemos:

J	KT			10KQ		
	TEST	CFD	DELTA	TEST	CFD	DELTA
0,7	0,2	0,2015	0,75%	0,36	0,3429	-4,75%
0,833	0,146	0,1459	-0,07%	0,28	0,277	-1,07%
0,9	0,12	0,1173	-2,25%	0,239	0,2396	0,25%

En la siguiente gráfica, se representan a modo de resumen las velocidades axiales y tangenciales en la posición  $X/R = 0,3281$  aguas abajo de la hélice.

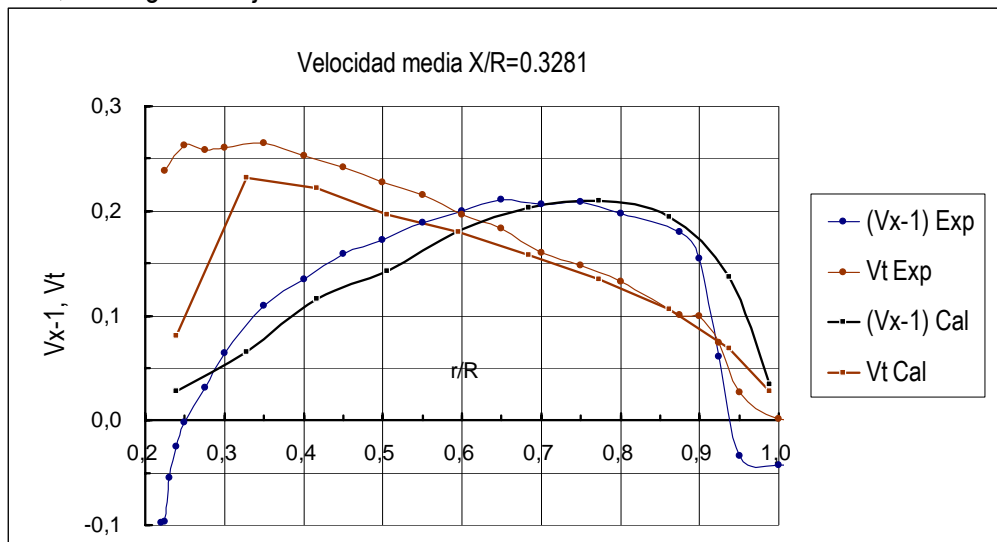


Fig. 9. Comparación de velocidades axiales y tangenciales medidas y calculadas.

Los errores obtenidos se consideran aceptables dadas las limitaciones y simplificaciones implícitas al código empleado, si bien los resultados en coeficientes de par y empuje son significativamente mejores que los obtenidos en velocidades.

### 3.3 Zona 3: Timón

En lo que respecta al cálculo de presiones sobre el timón, es posible realizar un cálculo empleando un código de tipo potencial de paneles similar al PPB. Éste emplea las velocidades impuestas en el borde de ataque de la pala como condición de contorno de entrada, permitiendo realizar evaluaciones muy rápidas de distintas geometrías. Ésta es, no obstante, una aproximación bastante limitada, dado que no tiene en cuenta el flujo cruzado que incide sobre el resto de la pala así como otro tipo de fenómenos viscosos como los desprendimientos que tiene lugar especialmente a ángulos de ataque elevados y pueden afectar significativamente a las fuerzas sobre la pala. Todo esto limita la validez de los resultados. Para solventar estos problemas empleamos un modelo RANSE similar al utilizado para la carena, resuelto empleando el mismo método numérico. Debemos salientar que empleamos como condición de contorno de este problema los valores de velocidad calculados aguas abajo de la hélice en el paso anterior.

Hemos realizado la validación para un timón funcionando detrás de la hélice, para dos condiciones de carga distintas, con buenos resultados en ambos casos. A la hora de hacer nuestro cálculo hemos hecho una serie de simplificaciones; entre ellas destacan las siguientes:

- 1 Acoplamiento sin realimentación entre carena, hélice y timón
- 2 Modelo potencial para hélice
- 3 Modelización de turbulencia para el timón

Además habría que agregar los errores propios de la discretización espacial llevada a cabo por cualquier método numérico. Para medir la cuantía de estos errores hemos llevado a cabo un proceso de validación con datos experimentales llevados a cabo por Molland, A.F. y Turnock S.R. en el túnel de viento de la Universidad de Southampton. La metodología que hemos adoptado es la misma que con nuestros timones, calculamos con BEM las velocidades a la salida de la hélice y tomamos estas velocidades como condiciones de contorno para los cálculos sobre nuestro timón. En la tabla siguiente presentamos datos de este proceso con dos condiciones de carga diferentes para nuestra hélice.

Altura		1	Altura		1	
Cuerda Inferior (m)		0,667	Cuerda Inferior (m)		0,667	
Cuerda Superior (m)		0,667	Cuerda Superior (m)		0,667	
Z/D		0,75	Z/D		0,75	
Y/D		0	Y/D		0	
X/D		0,52	X/D		0,52	
V (m/s)		10	V (m/s)		10	
N (rpm)		1433	N (rpm)		2079	
J		0,52	J		0,36	
Celdas	Ct		Error Iterativo	Celdas	Ct	Error Iterativo
	1605224	0,0072	3E-07	1605224	-0,044	4,00E-07
	644559	0,0081	2E-08	644559	-0,041	3,40E-08
	253645	0,0090	1E-07	253645	-0,040	4,80E-07
Experimental		0,007		Experimental		-0,046

## 4 Balance energético y velocidades

Un paso imprescindible a la hora de afrontar un problema de recuperación energética como el que nos ocupa, es intentar conocer al máximo el origen de nuestras pérdidas de energía, lo cual debería ayudarnos a encarar su recuperación con mayores probabilidades de éxito.

En primer lugar debemos considerar la hélice trabajando en aguas libres para después analizarla operando en la condición “a popa del buque”. En esta última condición, a las velocidades inducidas por la hélice se le añaden las velocidades de la estela del buque, las cuales normalmente distan mucho de ser uniforme.

### 4.1 Eficiencia energética de hélices

Las pérdidas energéticas en las hélices se dividen normalmente en tres grupos: pérdidas axiales, rotacionales y de fricción. A continuación, cuantificamos, de forma muy aproximada, los porcentajes que suponen cada una de estas pérdidas partiendo de una hélice trabajando en aguas libres.

Las pérdidas axiales son inherentes al propio principio de funcionamiento de la hélice y vienen dadas por el rendimiento ideal de la misma, el cual se deriva de la teoría del disco actuador según la cual:

$$\eta_{AX} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

Por otro lado, se inducen unas velocidades tangenciales que constituyen las pérdidas rotacionales. Parte de esa energía de rotación es recuperada en el timón. De acuerdo con la referencia [7] el rendimiento rotacional se podría estimar como:

$$\eta_{ROT} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{(1 - \lambda_e^2 C_T)} \right)$$

$$\lambda_e = \frac{J}{0,7 \cdot \pi} \left( 1 + \frac{2}{Z} \right)$$

Finalmente, se producen unas pérdidas de origen viscoso debidas a la interacción del agua con la superficie de la pala. Éstas pueden ser calculadas de forma directa si conocemos el rendimiento de propulsor aislado de nuestra hélice.

$$\eta_{VIS} = \frac{\eta_0}{\left( \eta_{AX} \cdot \eta_{ROT} \right)}$$

Si hacemos el cálculo para la hélice analizada en el proyecto obtenemos:

Rendimiento propulsor aislado: 0,646  
 Rendimiento axial: 0,769  
 Rendimiento rotacional: 0,937  
 Rendimiento viscoso: 0,897

Éstos son valores aproximados que se ven afectados por las características geométricas particulares de cada hélice. Asimismo recordamos que la situación varía mucho de la condición de propulsor aislado a la condición “behind” o a popa del buque, por la interacción con la estela.

#### 4.2 Distribución de Circulación.

En el apartado anterior hemos visto la descomposición de las pérdidas de energía en una hélice de forma que podamos hacernos una idea del margen que tenemos para recuperar energía en el timón. No obstante, la aproximación empleada no permite conocer los detalles de la distribución de velocidades inducidas ni los ángulos de ataque de los vectores de salida.

La distribución de carga o circulación sobre las palas de una hélice influye sobre la distribución de velocidades aguas abajo de la misma; por ello es interesante comentar cómo afectan las variaciones de carga en las hélices.

Si analizamos una hélice de paso fijo en un rango de velocidades normal de un buque, observamos que el grado de avance de la misma y por lo tanto sus coeficientes y distribución de carga no varían demasiado dado que al aumentar la velocidad del buque, lo hace también la velocidad de giro de la propia hélice, manteniendo el grado de avance  $J$  dentro de unos límites. En lo que respecta a la hélice de paso variable trabajando a revoluciones constantes, ésta se caracteriza por su funcionamiento con grandes variaciones en el grado de avance, debido a que, al aumentar la velocidad del buque, la velocidad de giro se mantiene constante provocando grandes variaciones de los coeficientes de par y empuje. Asimismo, el cambio en la distribución de paso con el giro de la pala provoca la deformación de la curva de distribución de circulación, desplazando el máximo hacia los radios exteriores al aumentar el paso.

A continuación realizamos un ejemplo de cálculo, mediante el código PPB, de una hélice de paso variable en aguas libres en cuatro condiciones de paso y carga diferentes. La hélice tiene un diseño con la punta de pala descargada.

Las condiciones de carga a estudio son:

	A	B	C	D
<b>Vs [kn]</b>	12,5	14	17,6	18,5
<b>Jva</b>	0,404	0,453	0,57	0,6
<b>KT</b>	0,085	0,113	0,2	0,22
<b>N [rpm]</b>	134	134	134	134
<b><math>\Delta\alpha</math> [°]</b>	-9,7	-7	0	1,5

Mientras que la distribución de circulación adimensionalizada sería:

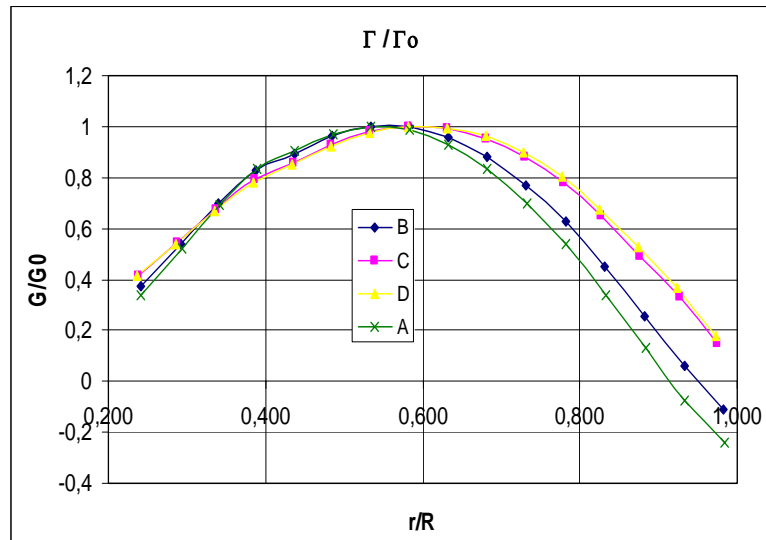


Fig. 10. Distribución de circulación en varias condiciones de carga y paso.

Observamos que la reducción de paso produce la descarga de la punta de pala hasta el límite de alcanzar valores de circulación negativa. En los radios interiores apenas se produce variación.

### 4.3 Velocidades

Realizando el cálculo de las velocidades tangenciales y axiales aguas abajo de la hélice para las cuatro condiciones, obtenemos los resultados mostrados en las siguientes gráficas, en las cuales las velocidades están adimensionalizadas con la velocidad de avance.

En ellas observamos que las velocidades axiales aumentan hacia los radios interiores y disminuyen en los exteriores al disminuir el paso (y carga) de la hélice.

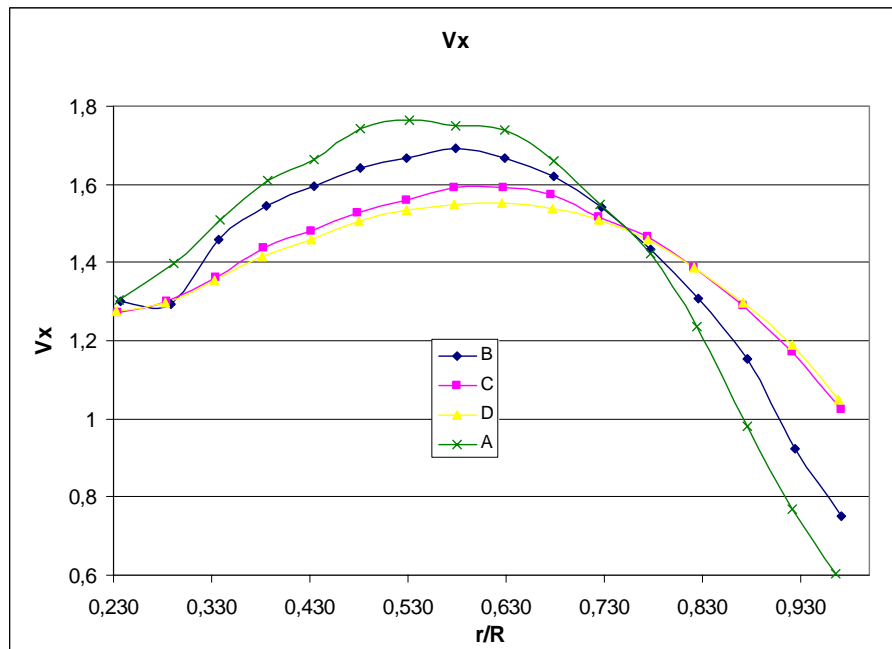


Fig. 11. Distribución de velocidades axiales

El perfil de velocidades tangenciales se mantiene prácticamente inalterado, pero sufre no obstante una disminución de magnitud aproximadamente proporcional a la disminución de carga.

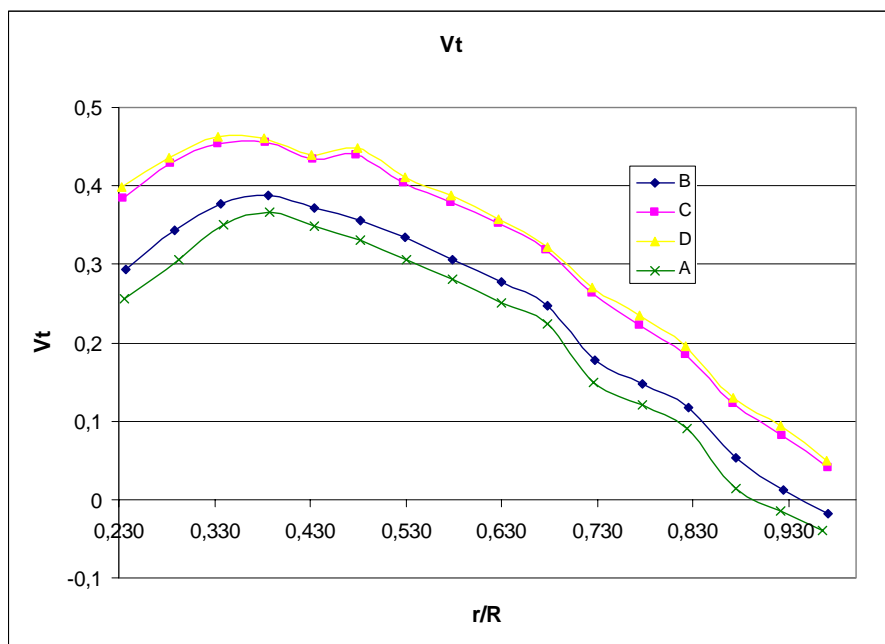


Fig. 12. *Distribución de velocidades tangenciales*

La composición de velocidades resulta en unos ángulos de ataque pequeños con un reparto semejante a la de las velocidades tangenciales, de ahí la importancia que en este tipo de hélices de punta descargada tiene una adecuada optimización de la geometría de la pala del timón en las posiciones cercanas al núcleo de la hélice a fin de alcanzar una adecuada recuperación de energía.

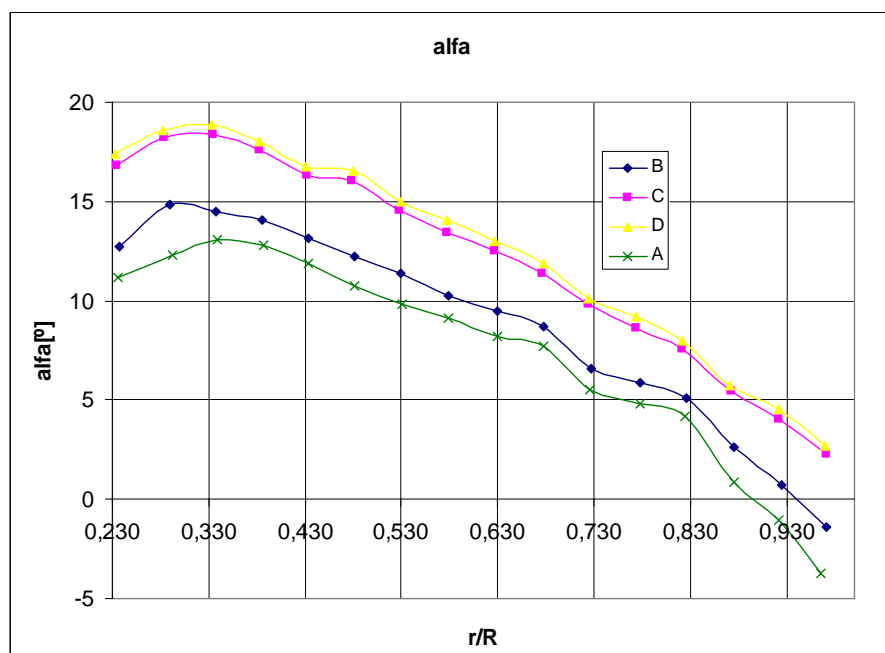


Fig. 13. *Distribución de ángulos de ataque*

Nótese que este cálculo se ha realizado con una hélice trabajando en aguas libres. En un análisis real, el campo de velocidades sería no axisimétrico y presentaría al mismo tiempo variaciones importantes en la dirección axial.

## 5 Optimización de la geometría de la pala

### 5.1 Velocidades

A la salida de la hélice tenemos siempre un perfil de velocidades en el que, debido al efecto de la hélice, aparecerán velocidades tangenciales de mayor magnitud que las que tendríamos si la hélice no actuara sobre el campo fluido. Nuestro objetivo es adaptar la geometría de la pala para intentar aprovechar en la mayor medida posible estas pérdidas. Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento a un volumen de control y a un fluido no viscoso llegamos a una expresión que nos ayuda a entender cualitativamente qué pasa en la hélice:

$$\dot{F} = \rho \cdot V_1 \cdot S_1 \cdot \dot{V}_1 - \rho \cdot V_2 \cdot S_2 \cdot \dot{V}_2 - S_1 \cdot P_1 \cdot \dot{h}_1 - S_2 \cdot P_2 \cdot \dot{h}_2$$

Lo que nos interesa es maximizar nuestro empuje; por esto, nos interesa que las velocidades a la salida de la hélice tengan la dirección de avance del casco, considerando las demás como pérdidas. En este grupo se encuadran las velocidades de rotación inducidas por la hélice, y nuestro objetivo es recuperar esta cantidad de movimiento minimizando así la energía perdida en la rotación de la masa fluida. Como ya hemos dicho, en VICUSdt proponemos optimizar el timón, no sólo como elemento de gobierno, sino como elemento activo en la recuperación energética de las pérdidas rotacionales de la hélice.

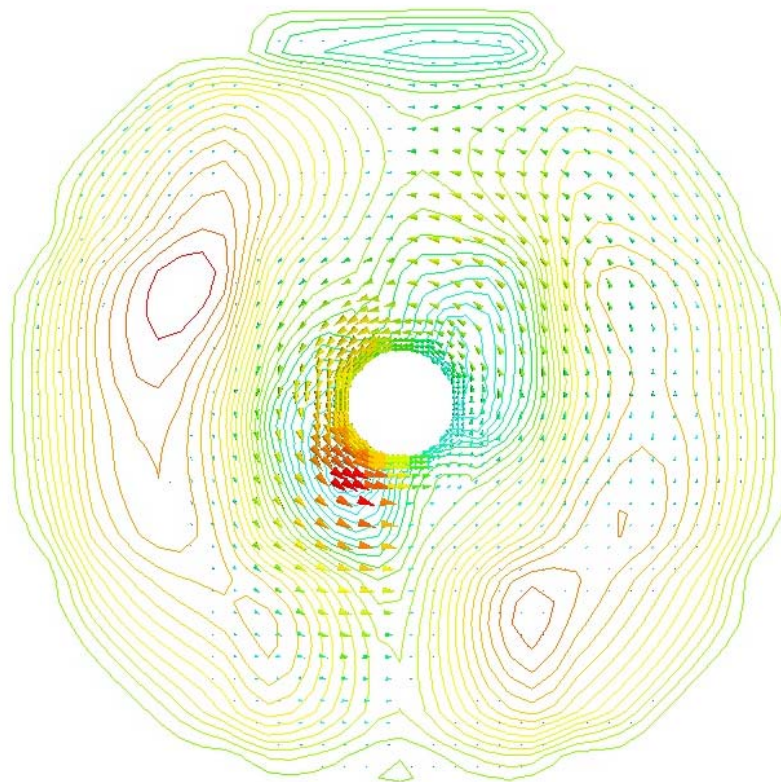


Fig. 14. *Campo de velocidades a la salida de la hélice*

En la figura podemos ver una distribución típica de velocidades a la salida de una de nuestras hélices. Los vectores representan las velocidades contenidas en el plano de la hélice, siendo la energía que transportan las partículas en rotación la que queremos aprovechar en el timón. Nótese que no existe simetría dado que las velocidades inducidas por la hélice se suman a la estela del buque.

En última instancia, nuestro objetivo es modificar la geometría del timón de forma que maximicemos (dentro de lo posible) la componente axial de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre el timón en el sentido de avance de nuestra carena. Para esto interponemos nuestro timón en el movimiento de rotación del agua, transformando parte de la energía cinética en un aumento de la presión (en la zona donde paramos el flujo), dando al flujo que abandona el timón un carácter más uniforme (unidireccionalidad). Este proceso ocurre siempre que se coloca una pala detrás de una hélice; nosotros buscamos hacer que la configuración del campo de presiones sobre la pala nos sea lo más favorable posible. En la figura siguiente podemos ver una distribución típica de presiones sobre un timón convencional y la dirección de las velocidades en el borde de ataque del mismo para una hélice a derechas.

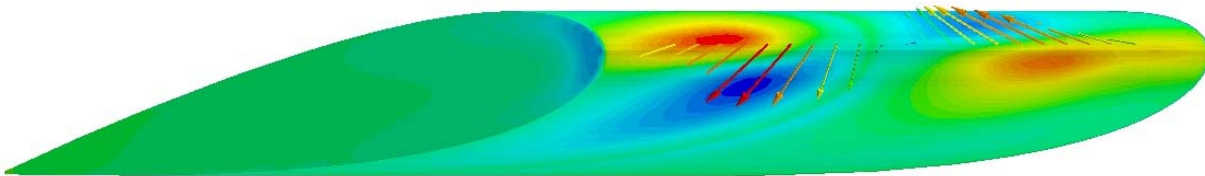


Fig. 15. *Distribución de presiones en el borde de ataque de la pala*

Vemos que aparece una distribución de presiones asimétrica tanto en un plano horizontal ( $xy$ ) como en uno vertical ( $xz$ ) que contengan al eje de la hélice. Esta asimetría es debida a las velocidades asociadas a la rotación del fluido, inducida por la interacción de hélice y carena, que llegan al borde de ataque de los perfiles del timón con ángulos que según los estudios realizados rondan valores de entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ . En el borde de ataque aparecen cuatro zonas bien diferenciadas: dos de presión (colores más vivos) y dos de succión (colores más apagados); esto coincide con lo esperado a la vista de las velocidades en la zona. La proyección de la fuerza inducida por estas presiones sobre la dirección de avance será de arrastre en las zonas de presión y de empuje en las de succión; lo que buscamos, mediante modificaciones en la geometría de la pala, es minimizar la proyección de la fuerza en las caras de presión y maximizar ésta en las de succión. Para conseguir esto trabajamos con varios parámetros: tipo de timón, ubicación relativa del mismo respecto a la hélice, forma de los perfiles, distribución de cuerda y espesores en los diferentes perfiles de la pala, localización y dimensionamiento de elementos específicos que ayuden a llevar a cabo la recuperación energética (bulbos, perfiles adicionales) etc.

## 5.2 Perfiles

La elección de la geometría de las secciones del timón a diferentes alturas será de crucial importancia ya que va a ser lo que determine, para un campo de velocidades dado, la eficiencia de la pala como recuperadora de

energía. Para definir un perfil hay una serie de parámetros que nos dan una indicación de la forma de éste como son el camber, la cuerda o el espesor.

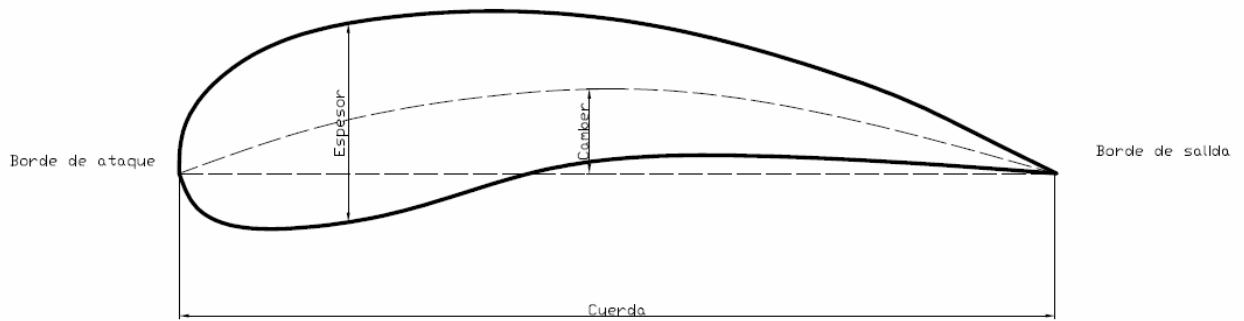


Fig. 16. Definiciones básicas de la geometría de un perfil

Además hay que fijar cómo distribuimos los espesores del perfil a lo largo de la cuerda, por lo que debemos elegir también el tipo de perfil a utilizar. Entre algunos de los perfiles empleados en la práctica habitual podemos destacar los siguientes:

	HSVA-MP73-20	NACA 64-018	NACA 00-20	IFS58-TR 15	IFS62-TR 25
Posición espesor máximo	45%	40%	30%	25%	20%

La posición del máximo espesor nos da una cierta medida de los ángulos de las líneas de agua en el borde de ataque del perfil; en principio al tener el máximo más adelantado, los ángulos de la normal a la superficie con la dirección de avance del barco serán menores y viceversa. Estos perfiles deben tomarse como punto de partida, ya que para cada estela la forma de distribuir los espesores será distinta.

Debemos hacer hincapié en que no existen leyes universales de cara al diseño; el espesor óptimo en una sección de la pala no tiene por qué serlo en otra sección de la misma pala (a veces perfiles con mayor espesor devuelven mejores resultados), y lo mismo pasa con parámetros como la posición del máximo, la distribución de camber, etc. El flujo del timón es complicado (geométricamente), ya que el efecto de la rotación da lugar a distribuciones de presión y velocidad no uniformes; es lógico que también lo sea la geometría y que su diseño esté sujeto a un trabajo cuidadoso de ingeniería.

### 5.3 Bulbo

El bulbo del timón se perfila como un elemento de recuperación, reduciendo la separación y uniformizando el flujo en la zona que sigue al núcleo y capuchón de la hélice. Al igual que en el caso anterior, su diseño debe estar orientado al campo de velocidades generado por el propulsor y su interacción con los restantes elementos implicados (carena, timón, etc.). Su buen funcionamiento está ligado siempre al grado de carga de la hélice, ya que a bajas cargas puede llegar a ser perjudicial.

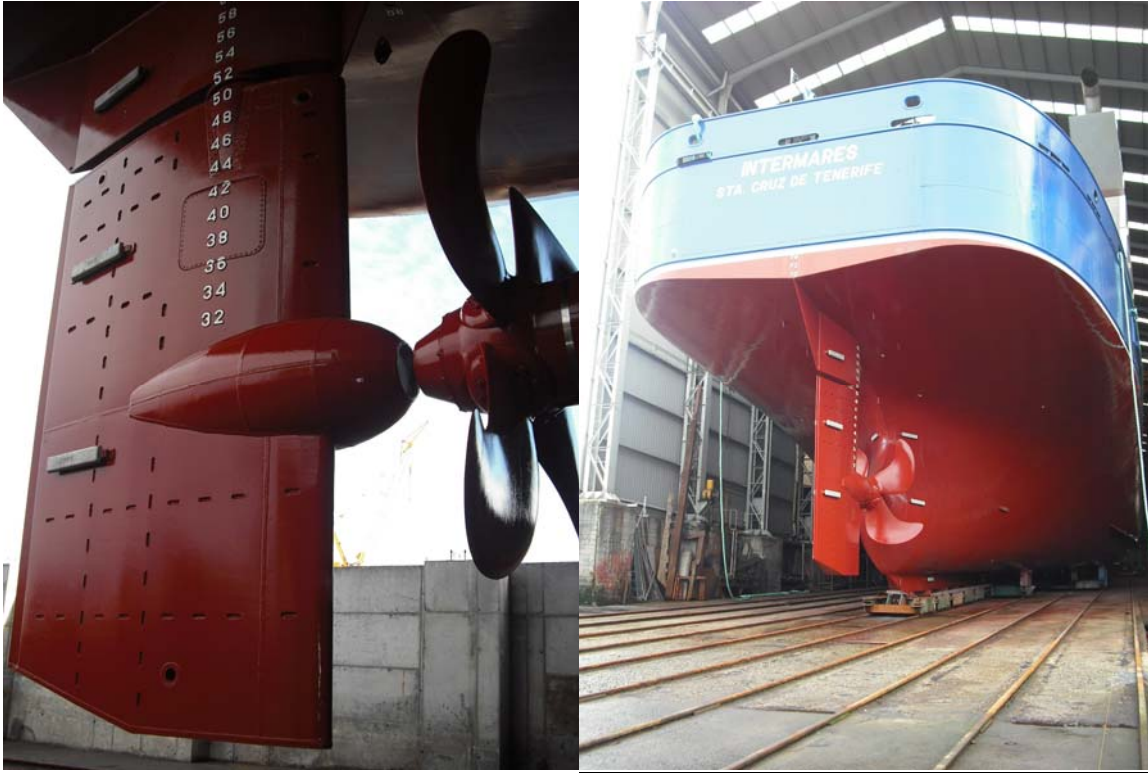


Fig. 17. *Timón adaptado a la estela y con bulbo diseñado por VICUSdt*

#### 5.4 Placas de cierre

El objetivo de las placas de cierre es de diferente índole que las anteriores soluciones. Su objetivo primordial es mejorar la respuesta del timón en maniobra, permitiendo mayores valores de circulación hacia los extremos de las palas, a fin de aumentar la sustentación. Su diseño debe tener en cuenta el aumento de resistencia de la pala en navegación libre, el cual puede llegar a ser bastante significativo.

#### 5.5 Otras soluciones

Al igual que en los elementos anteriores el objetivo de estas aletas es transformar el momento de rotación de la hélice en sustentación en estos perfiles. Su correcta orientación y diseño puede mejorar las características de resistencia al avance del timón.

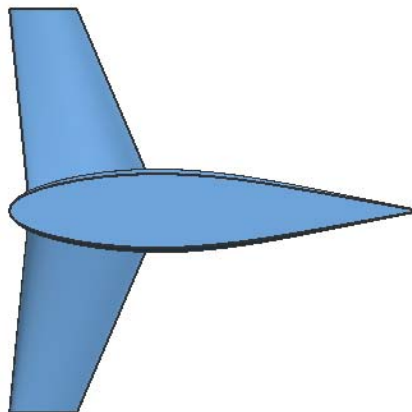


Fig. 18. *Aletas laterales*

## 6 Ejemplo de cálculo

Para este ejemplo describimos el procedimiento operativo para la optimización del timón de un buque existente. El fin es disminuir la resistencia al avance del conjunto mediante la sustitución del timón original por uno orientado a la estela.

- a) El primer paso es conseguir la configuración de la estela nominal del buque; para ello tenemos dos caminos: emplear medidas realizadas en el canal de experiencias hidrodinámicas o realizar un cálculo RANSE de la carena. La resolución del campo fluido de la estela mediante métodos numéricos supone entre 1 y 3 días de cálculo en función de lo ajustado de los resultados. La imagen siguiente corresponde a la estela nominal de un buque atunero; el cálculo corresponde a velocidad de diseño en aguas tranquilas empleando el modelo matemático y el esquema numérico descrito más arriba.

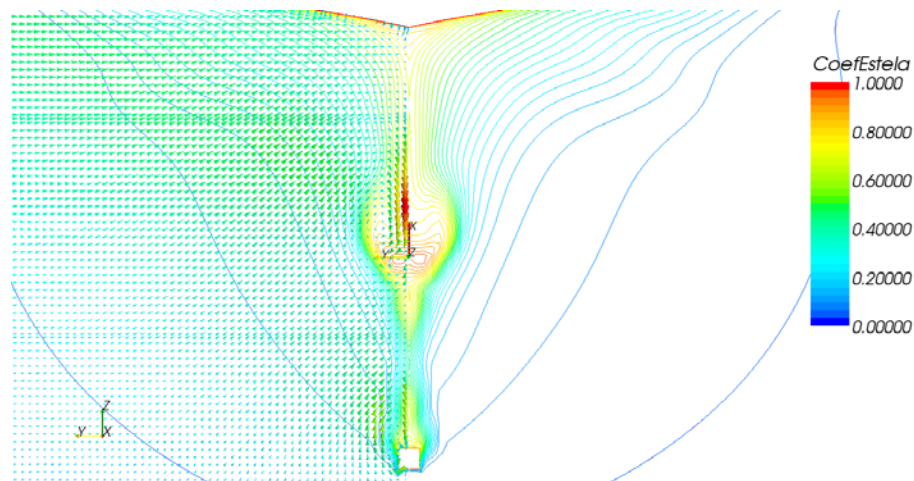


Fig. 19. *Estela nominal y vectores contenidos en el plano de la hélice*

- b) El siguiente paso es realizar con estos datos una estimación de la estela efectiva del buque (bien sea a partir de los datos de canal o del CFD) para introducir estos valores como condiciones de contorno en nuestro programa de paneles para el cálculo de las velocidades inducidas aguas abajo de la hélice. El tiempo de cálculo de una de estas simulaciones puede rondar los dos minutos en una máquina convencional. A pesar de estar resolviendo ecuaciones simplificadas el error del cálculo, como puede verse en el proceso de validación realizado, es relativamente pequeño (por nuestra experiencia es siempre inferior al 7%). Además, como podemos ver en las siguientes imágenes, lo realizamos para varias condiciones de carga de la hélice.

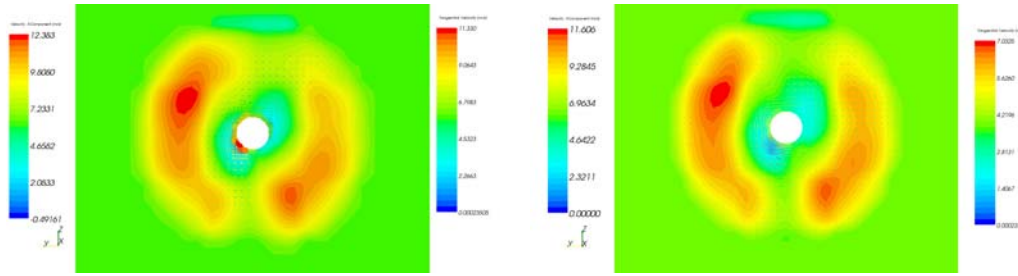


Fig. 20. *Campo de velocidades a la salida de la hélice para dos condiciones de carga*

- c) Una vez hecho esto, empleamos nuestro programa de paneles orientado a timones para empezar a acercarnos a la geometría de nuestra pala optimizada que mejor se adapte al campo de velocidades que tenemos detrás de la hélice. Debemos tener en cuenta que este cálculo es bastante limitado, por lo que sólo lo tendremos en cuenta para orientarnos sobre las tendencias que deben seguir las formas del perfil. La ventaja de este método es el bajo coste computacional (1 minuto!) y la desventaja es el orden de magnitud del error; cuando el flujo no es uniforme y aparecen fenómenos de origen viscoso (desprendimientos de capa límite) la aproximación de flujo potencial empieza a perder corrección. Para solventar este problema en la siguiente etapa resolvemos el campo fluido en torno al timón empleando un modelo RANSE. Al igual que con los paneles, introducimos las velocidades de salida del programa de hélices como condición de contorno de entrada, pero además debemos ser cuidadosos con los parámetros de contorno de la turbulencia, ya que una mala elección conllevará a malos resultados. Para cada condición de carga de la hélice tenemos definidas las condiciones de contorno para el problema desacoplado del timón, pudiendo llevar a cabo un proceso de mejora de las formas del mismo. Para esto, vamos variando los parámetros que definen nuestro timón apoyándonos en la distribución del campo de velocidades en las zonas cercanas al perfil y distribución de presiones sobre la pala, así como magnitudes derivadas como vorticidad o gradientes de velocidades que pueden ayudar a obtener un buen diseño.

Algunos de los resultados obtenidos en el proceso de optimización son:

	Mejora respecto al caso 0 referido al timón	Mejora respecto al caso 0 referido al buque
Pequeños cambios en perfil	427%	0,8%
Bulbo	100%	0,2%
Cambios en perfil distribución de espesores	1137%	2,1%
Aletas	1790%	3,7%

Vemos que los márgenes de mejora son mucho mayores que los errores propios del proceso de cálculo, por lo que podemos tomarlos como significativos. Los valores de mejora entran dentro de lo previsto teniendo en cuenta que la hélice está poco cargada y perderá menos energía rotacional.

Asimismo, en anteriores proyectos de diseño o rediseño de timones, se han obtenido buenos resultados en ensayos de canal. En concreto:

Buque carguero  $L_{pp}=94,9$  m

- Ensayos realizados en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR).

- Mejora del rendimiento propulsivo a la velocidad de 12,5 nudos:

Timón A: 12,9 %

Timón B: 7,9 %

Estos valores extraordinariamente grandes no son habituales en las optimizaciones de este tipo por lo que no debemos generalizar ni sacar conclusiones precipitadas.

Buque de cooperación pesquera  $L_{pp}=70$  m

- Ensayos realizados en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la ETSIN (CEHINAV).
- Mejora del rendimiento propulsivo a la velocidad de 15 nudos:

Timón modificado: 3%

## 7 Maniobrabilidad. Indicadores de respuesta en maniobra

Si resolvemos el mismo tipo de modelo pero girando el timón a una banda, observamos que de cara al cálculo de fuerzas transversales el método se presenta útil a la hora de estimar el orden de magnitud ( la desviación del  $C_l$  se encuentra entre el 15% y el 25%). En cualquier caso las desviaciones son muy elevadas comparadas con el cálculo del  $C_d$  descrito en apartados anteriores debido a que en este caso la influencia del timón sobre la carga de la hélice no se puede despreciar. El coeficiente  $C_l$  depende principalmente del área de pala y la distribución de las presiones inducidas sobre la misma. Ésta a su vez interactuará con la carga de la hélice en mayor medida al estar el timón girado a la banda. A pesar de esto sí nos da una indicación cualitativa del efecto las diferentes configuraciones por lo que se presenta como una metodología válida para optimizar la configuración de elementos que tienen incidencia sobre las características del timón de cara a maniobra como son las placas de cierre.

## 8 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Entendemos que la metodología presentada es de probada validez para la optimización de la geometría de la pala de cara a la reducción de la fuerza total requerida por la planta de potencia. Además de devolver cálculos fiables, los tiempos de cálculo son relativamente bajos por lo que nos permite la evaluación de multitud de casos, que es el camino a seguir en este tipo de diseño para llegar a una buena solución.

Como futuras líneas de trabajo nos proponemos calibrar metodologías que reduzcan en número de simplificaciones en los modelos matemáticos empleados a saber:

### Modelos

#### 1. Acoplamiento Hélice + Timón con retroalimentación

*BEM – RANSE*

En este modelo nos planteamos tener en cuenta la influencia no sólo de la hélice sobre el timón sino también el efecto del timón sobre la carga de la hélice.

#### 2. Acoplamiento Hélice + Timón

*RANSE – RANSE*

Nos planteamos un modelo similar al anterior pero sin despreciar efectos de la viscosidad en la hélice.

3. Acoplamiento Carena + Hélice + Timón con retroalimentación *RANSE - BEM – RANSE*

En este caso nos planteamos modelar el efecto del propulsor sobre el campo de velocidades de la carena despreciando los efectos de la viscosidad en el modelado de la hélice

4. Acoplamiento Carena + Hélice + Timón *RANSE - RANSE – RANSE*

Este caso sería el más completo al que pretendemos llegar; el modelo matemático recogería acoplamiento total entre las tres zonas y no despreciaríamos la viscosidad. La única asunción sería la que conlleva el empleo de modelos de turbulencia.

Los modelos anteriores están ordenados por el coste computacional requerido; para llevar a cabo un proceso de optimización con las herramientas computacionales actuales emplearíamos el modelo planteado en este artículo y (3) ó (4) para las fases finales de diseño. Para las fases iniciales pretendemos implementar acoplado a nuestro software de cálculo un algoritmo de tipo genético para realizar la optimización de nuestras geometrías de forma automatizada.

Agradecemos el apoyo prestado por el Ministerio de Ciencia e Innovación para la realización de esta investigación, la cual se enmarca dentro del proyecto de Investigación Aplicada Industrial IAP-2008-560420-2008-008.

## 9 Referencias

- [1] Bertram, V. *Practical ship hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann. 2002
- [2] Carlton, J. *Marine propellers and Propulsion*. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann 2007.
- [3] Li, Da-Quing. *Investigation on Propeller-rudder interaction by numerical methods*. PhD thesis. Chalmers University of Technology.
- [4] Ferziger, J.H., Perić, M. *Computational Methods for fluid dynamics*. Springer. 2000
- [5] Molland, A. F. and Turnock, S.R. *Marine Rudders and Control Surfaces*. Butterworth-Heinemann 2007.
- [6] Söding, H. *Limits of potential theory in rudder flow predictions*. Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington, D.C. 1998
- [7] Stierman E.J. *The influence of the rudder on the propulsive performance of ships Part I & II*. International Shipbuilding Progress, 36, N° 407 (1989) pp 303-334 y N° 408 (1989) pp 405-435
- [8] Streckwall H. *Rudder Cavitation. Numerical Analysis and Shape Optimization*. STG CFD in ship Design. Hamburg. 2007
- [9] Tetsuhi Hoshino et Al. *Development of high performance stator fin by using advanced panel method*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. Vol 41 N°6. 2004

[10] Vorhoelter, H., Krueger, S.. Optimization of appendages using RANS-CFD Methods, Numerical Towing Tank Symposium, Hamburg 2007