



Ing. Nelson Noziglia

Ingeniero Naval

Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Marina Mercante.

Hélices propulsoras CLT para empujadores de la Hidrovía Paraná-Paraguay

Resúmen

Las limitaciones en las profundidades de la Hidrovía Paraná-Paraguay, transitada por barcas, propulsadas por empujadores de altas potencias, determinan restricciones en los diámetros requeridos para las hélices, que afectan sus rendimientos, y en consecuencia el rendimiento propulsivo total.

Las hélices en toberas son una solución para estos casos, pero en la navegación en la zona presentan algunos inconvenientes, en algunos casos importantes.

Los propulsores Contracted Loading Tip (CLT), con aletas periféricas alabeadas, determinan un mejor comportamiento que las comunes, e intermedio entre éstas y las toberas.

No existen antecedentes de aplicación de ellas en empujadores de la zona bajo análisis, pero las bases teóricas en las que se sustentan, permiten admitir que resultan adecuadas a esos fines.

En el presente trabajo se propone un procedimiento más simplificado que el habitual para la determinación del alabeo de las placas periféricas, así como un intento de normalización, para facilitar sus diseños.

No se presentan en esta instancia resultados de pruebas de tanques de experiencias hidrodinámicas, lo que podrá surgir en futuros trabajos, donde además se informará sobre resultados en casos de aplicación real en empujadores, y para, la zona contemplada, y con los que se podrá ratificar o, ajustar valores surgidos de este análisis teórico-práctico preliminar.

A. Objeto

El presente trabajo tiene por objeto demostrar que las hélices de tipo Contracted Loading Tip (CLT), ya de aplicación en buques mercantes marítimos, incluyendo pesqueros, y surgidas a causa de la aplicación de la Nueva Teoría de la Impulsión nacida en España, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales; tema que se incluyó en el "Simposio

Propeller Shafting 94", patrocinado por SNAME, presentan características que se suponen adecuadas para la propulsión de empujadores que operan en la Hidrovía Paraná-Paraguay, donde las hélices con toberas, tal como las que poseen los empujadores provenientes de EE.UU., presentan dificultades, no obstante su reconocido beneficio de rendimiento para las condiciones ideales de operación requeridas, que se sintetizan en un incremento de empuje o una disminución de diámetros.

Considerando además que dadas las incertidumbres que presenta el cálculo para el caso particular de esta navegación y costumbres operativas, se propone una metodología menos rigurosa, cuyos posibles errores se encuentren acotados por esas variables no determinables.

Se propone además una aproximación sobre la base del procedimiento de cálculo de las hélices standard, sin evitar los imprescindibles cálculos particulares que se requieren para los aspectos específicos del alabeo de las

placas limitadores propias de estas hélices, y que de no ser adecuados pueden determinar inconvenientes que anulan las ventajas que se proponen obtener.

Es objeto también del presente trabajo, el permitir las bases para continuar con las investigaciones, dado que los valores presentados se consideran iniciales, y sujetos a ajustes que resulten de las experiencias reales.

B. Generalidades

La Hidrovía Paraná-Paraguay, vía navegable que permite el intercambio de productos en particular entre la R. Argentina, y la R. del Paraguay, con extensiones hasta el sur de Bolivia, posibilitando conexiones con Brasil, presenta características naturales que hacen que en circunstancias sean muy críticas las operaciones, tanto para las barcazas de empuje, prácticamente el único medio actual de transporte en ella, como para los empujadores que propulsan los convoyes o formaciones.

Tanto las barcazas, como los empujadores, siguen aún siendo los típicos del Mississippi-Ohio (EE.UU.), ya sea porque tales elementos provienen directamente de esa zona, o bien porque se los construyen en ésta, pero a su similitud.

La tendencia a adoptar tales embarcaciones, lo que incluye los empujadores a la Hidrovía, por simple transferencia, no es lo adecuado, dado que existen diferencias operativas y del régimen fluvial, que determinan que las barcazas y los empujadores óptimos resulten diferentes.

Este tema merece una consideración particular, y en este trabajo sólo se

trata un aspecto, que es el concerniente a las hélices propulsoras de los empujadores afectados al servicio, quedando pendiente el aspecto de las características de las barcazas, las formaciones, las velocidades, las potencias, el gobierno, y la distribución de la potencia en las líneas propulsoras, entre otras cuestiones, que requieren un tratamiento particular.

C. Síntesis sobre hélices propulsoras para los empujadores

El diseño de las hélices propulsoras para los empujadores de la Hidrovía Paraná-Paraguay, requiere hacer consideraciones particulares, tales como:

- 1) Limitaciones del calado de los empujadores, dadas las profundidades restringidas en las que deben operar, e incluso variables en las zonas y épocas del año.
- 2) Aguas con elementos en suspensión, de características, tales que afectan las estructuras de las hélices y a las toberas propulsoras, incluyendo los árboles correspondientes.
- 3) Valores significativos de velocidades de corriente, y variables en el trayecto y circunstancias.
- 4) Particulares características operativas de los convoyes, según sus requerimientos de carga y descarga, así como de disposición de las barcazas en el convoy, lo que determina variables condiciones de resistencia al avance y gobierno.

Las limitaciones que presenta el calado reducido y que impide determinar hélices con diámetro óptimo, es el aspecto más importante que interviene en la cuestión que se presenta.

Desde el punto de vista hidrodinámico, la disminución del diámetro de una hélice, y aún compensado hasta ciertos límites con un incremento de paso, determina una disminución del rendimiento del propulsor, (η_p), lo que evidentemente afecta el rendimiento propulsivo total, dado que es parte de él.

Una solución es dividir la potencia, aplicándola a varias líneas propulsoras.

En este aspecto puede apreciarse que cuando la potencia propulsora requerida está próxima a los 2.206 kW (3000HP), se debe disponer, como mínimo, de dos líneas propulsoras, a un régimen adecuado de revoluciones del propulsor, pero está limitado, y lo normal en estos casos es no superar 350 1/s.

Es también real que el incremento de líneas propulsoras, además de determinar un aumento de costo inicial, produce una disminución del rendimiento propulsivo total, a causa del menor rendimiento mecánico, y mayores interferencias hidrodinámicas, dadas las formas de las popas.

También es obvio que una duplicidad de líneas propulsoras, permite una mejor y más segura gobernabilidad, y un recaudo importante en caso de averías en una de las líneas.

Otra solución es la aceptación de la disminución del rendimiento de la hélice (η_p), cuestión que es bastante común en este servicio, lo que determina una pérdida inadecuada de potencia afectada a la propulsión, es en pocas palabras, una mala solución de ingeniería, que en la mayoría de los

casos los armadores admiten como un costo más de explotación.

Las soluciones más aceptables son las que determinan la utilización de accesorios específicos, tales como las toberas propulsoras, entre las que se destacan las Kort y las Marine.

Las tipo Kort, muy utilizadas en los empujadores norteamericanos, y que aparecen luego en la Hidrovía, por la transferencia de ellos a la zona, son sin lugar a duda, el aditamento propulsivo que hasta el momento produce mayores beneficios en relación al incremento de empuje logrados, diámetros menores y mayores rendimientos.

El principio de actuación de tales toberas que incluso pueden poseer secciones diferentes a las Kort, tales como las Marine, no será tratado en este trabajo, que es específico para el tipo de hélices CLT.

Las hélices que operan dentro de toberas, son hélices de características particulares, tipo Kaplan, de la que existen actualmente series standard, que permiten un cómodo dimensionamiento.

Tales toberas se admite que en circunstancias óptimas de diseño y estado, pueden lograr un incremento de empuje, entre el 15 y el 30%, para iguales diámetros, en relación a las comunes.

Las normalmente utilizadas son las Kort A 19 o las Marine 37.

Son elementos de importante volumen, que como apéndices del casco influyen en la resistencia al avance, que debe cuidarse en el diseño de

ellos, y de su instalación en las popas.

Por otra parte, el huelgo entre los extremos de palas y la cara interna de las toberas, es una cuestión que afecta notablemente el rendimiento esperado, debiendo ser el menor posible, incompatible con las posibilidades reales (alineación, deformaciones, desgastes de bujes, etc.)

En tal sentido, el Profesor Gonzalo Pérez Gómez, de España, propone valores admisibles de tales huelgos, los que se llevan a la siguiente función.

$$h = 0,01416 \cdot D^{0,75258}$$

D = diámetro de la hélice en mm.

En la Hidrovía donde la contaminación del agua con productos muy erosivos (arena), en general provenientes del Río Pilcomayo, el desgaste de los bujes de los árboles propulsores, lleva con facilidad a superar estos valores, en general en menos de un año de operación normal.

Las estructuras de las toberas son además complejas, como un ala curvada. En la zona de la sección del disco actuador de la hélice, se produce corrosión debida al régimen hidrodinámico en el lugar, que requiere que una franja del orden de 300 mm se realice en acero inoxidable, para una mayor duración de esa parte de la superficie interna de la tobera.

A causa de todo ello, junto con las posibilidades de enganche de las toberas y tobera-hélice, con elementos flotantes o a media agua, común en esa vía, que llegan a producir importantes averías, que incluso afectan los árboles propulsores, determinan ra-

zones para evitar su uso, no obstante las ventajas enunciadas.

En algunos casos, los armadores han preferido quitarlas en empujadores provenientes de EE.UU., y cuando las características constructivas de las popas y soportes de timones lo permitían.

Una solución analizada primitivamente para el aumento de rendimiento de las hélices, es el de las hélices con aro periférico total.

Estas hélices se utilizaron particularmente en submarinos, pero por otras razones, parte la teoría en que se basa, su mayor rendimiento hidrodinámico es adecuado, y se profundizará al tratar las CLT, pero considerando que el aro periférico gira con la hélice al número de revoluciones de ella, se determina una elevada resistencia viscosa, y el rendimiento final resultaba afectado negativamente, o sin el beneficio esperado y que justificara su empleo.

En las toberas el aro periférico es fijo, no pertenece a la hélice y no se ve afectado por este efecto.

Actualmente y como consecuencia de la combinación del análisis de las hélices con aros periféricos totales y las toberas propulsoras, surgieron las hélices con aletas periféricas, es decir aletas fijas en los extremos de las palas solamente en la longitud de la sección en ese lugar, disminuyendo de esa forma la superficie de rozamiento del primitivo aro total.

En estas hélices el rendimiento se incrementa en relación a las comunes y pueden resultar atractivas, en reemplazo de las hélices en toberas, cuando en éstas se presentan los in-

convenientes indicados, como propulsoras en los empujadores de la Hidrovía, donde los problemas de las toberas coinciden con las realidades operativas.

Estas hélices son las que serán tratadas en este trabajo, en forma específica.

Otro de los problemas que presenta el diseño de las hélices propulsoras en los empujadores considerados, es el derivado de la determinación de la velocidad requerida en condiciones de operar con los convoyes.

Obviamente esta velocidad es determinante para calcular la potencia propulsiva y las características de las hélices correspondientes.

En relación a ello es necesario considerar las siguientes cuestiones:

- 1) Resistencia al avance del convoy propuesto.
- 2) Velocidad máxima posible en virtud de las características de las barcas componentes.

En lo referente a 1), el armador requiere la posibilidad de empuje de un determinado número de barcas de características estipuladas, lo que impone un DWt total, para las condiciones más críticas.

En cuanto a la velocidad máxima posible con relación a la costa, ella depende en parte de la velocidad de la corriente a esperar en la zona, lo que no es constante en todo el trayecto a navegar, ni en el sentido, ni en las diferentes épocas del año.

Lo común es realizar los cálculos para los casos más críticos normales, y con corriente en contra, es decir en

el sentido decreciente del kilometraje de la Hidrovía; barcas a plena carga, subiendo (R. Argentina - R. Paraguay).

Si bien no es posible dar un valor absoluto de la velocidad de la corriente (V_c), es posible admitir a estos fines que ella debe considerarse en el orden de $V_c = 1,287 \text{ m.s}^{-1}$ (2,5 nudos).

Además en estos casos la velocidad de cálculo no debe superar los $3,6 \text{ m s}^{-1}$ (7 nudos), caso contrario, y debido a las formas de las carenas de las barcas, en extremo llenas, con coeficientes de bloque del orden de 0,90 y proas sin afinamientos, se produce una inadecuada formación de ondas en proa del convoy, que incluso puede sumergir la zona, no obstante el arrufo.

Efecto similar se genera cuando el empujador, actuando solo, emplea su potencia propulsora en valores elevados para esa condición, observándose el embarque de agua por la proa y descenso de ella.

Es también digno de considerar los efectos en las velocidades finales reales de los viajes, en este caso para el análisis del rendimiento económico del transporte en las condiciones operativas.

Ello es muy variable e intervienen cuestiones que tienen origen en las propias costumbres y técnicas de las compañías armadoras, las tripulaciones, las operaciones intermedias, en los viajes, el instrumental de navegación y su buen uso, la adecuada coordinación general de los viajes, las características de seguridad de los trincados, de forma tal de evitar de-

moras por ajustes durante los trayectos (roturas, estiramientos, etc.).

D. Hélices con placas limitadoras extremas

La necesidad de investigar sobre este tipo de hélices propulsoras es la de obtener una disminución de diámetro y simultáneamente un incremento del rendimiento, como es el caso que se requiere para los empujadores fluviales, tal como se mencionó anteriormente.

Siempre se ha tratado de mejorar el rendimiento de las hélices, dada su importancia en el rendimiento propulsivo total y en el empuje, para ello se han efectuado y se realizan profundos estudios que abarcan cuestiones interdisciplinarias que cubren aspectos tales como: la Hidrodinámica, la Mecánica de los Fluidos, la Física, la Matemática, la Informática e incluso la Resistencia de Materiales.

En la actualidad no se concibe la optimización de hélices propulsoras navales sin la aplicación de softwares informáticos, tal como es por ejemplo el Computational Fluid Dynamics (CFD).

Los investigadores de este tema han actuado según diferentes bases, así por ejemplo: "Teoría de la Sustentación" (Lifting Surface Theory - LST), que ha proporcionado buenos resultados, y que obtuvo el reconocimiento de la International Towing Tank Conference - (TIC), en los años 1990 y 1993.

En esta teoría, cuya hipótesis no es totalmente cierta, pero que resulta aceptable para el cálculo de los propulsores, se considera a la hélice actuando en un flujo paralelo al eje

que la propulsa, y circularmente uniforme, aunque puede admitirse una variación radial de dicho flujo, pero no en una forma real total.

Para dar solución a los problemas que presenta el método LST, se han utilizado tres modalidades:

Vortex – Lattice (VLM)

Mode – Functions (MFM)

Método de Paneles (PM)

El método MFM es teóricamente más perfecto que el VLM, que es más rápido y sencillo, aunque presenta inconvenientes en la determinación de la distribución de las presiones en las proximidades de los extremos de las palas (Tip).

En este método se encuadra el de Tsakonas, presentado en Unsteady Propeller Lifting Surface Theory of Chordwise Modes.

En cambio, el método PM, que es el más reciente, se aproxima al Lifting Bodies (cuerpos sustentados).

Las hélices con aletas periféricas limitadoras, que tal como se anticipó, poseen placas fijas en los extremos de las palas. Basan fundamentalmente el incremento de rendimiento en la disminución de vórtices en esa zona, lo que determina una distribución de la carga en la pala, que no es nula en esos extremos, como ocurre con las palas comunes.

En principio la carga es mayor, y la distribución determina que el centro de presión se eleve, lo que con las limitaciones requeridas, determina un aumento de eficiencia de la hélice.

Si la altura de aplicación supera cierto valor, el rendimiento disminuye.

En las figuras 1a y 1b se observa un croquis de una pala típica con aletas perimetrales, y la variación de presiones mencionada, así como de la posición de la fuerza sobre la pala, en relación a una pala común.

Las placas limitadoras perimetrales, se asimilan a tramos de toberas, sin huelgos con las palas, pero que giran con la hélice.

Los cálculos teóricamente requeridos para estas hélices, se basan en la generalización de la Nueva Teoría de la Impulsión; en este trabajo se pro-

pone una simplificación para el caso particular.

Existen fundamentalmente dos tipos de estas hélices.

TIP VORTEX FREE (TVF)

CONTRACTED AND LOADED TIP (CLT)

Las hélices TVT fueron las primeras, ellas poseen las placas tangentes a la superficie de la vena líquida de salida del disco actuador.

En las hélices en que los extremos de palas están cargados, no puede aplicarse la Teoría Clásica de la Línea de

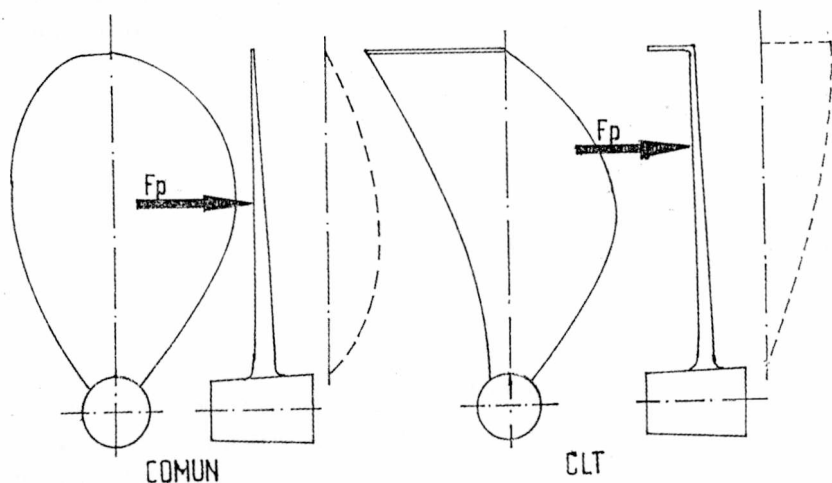


FIG 1a

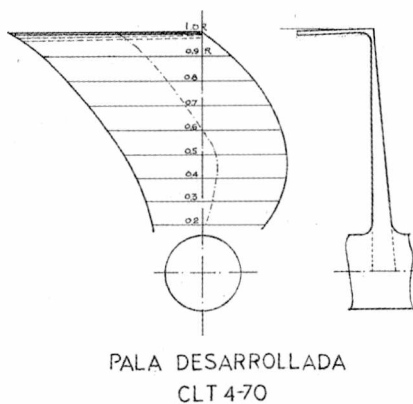


FIG 1b

Sustentación.

En las CLT, el alabeo de las placas limitadoras se ajusta a la generatriz del chorro contraído a la salida del círculo actuador, tales placas determinan superficies cuasicilíndricas, a diferencia de las correspondientes a las TVF, que determinan superficies cilíndricas.

Las hélices con placas limitadoras podrían, teóricamente, también ser aplicadas dentro de toberas, aunque no existen antecedentes de ello.

La contracción del chorro a la salida del círculo actuador, es causado por el aumento de velocidad impartido a la vena líquida por el círculo actuador en su giro.

Que las placas limitadoras se ajusten a la vena líquida de salida, permite disminuir la resistencia que ellas ofrecen al giro de la hélice, y es la ventaja principal frente a las TVF, que poseen las CLT.

En investigaciones realizadas en España, por los Dres. Gonzalo Perez Gomez – Juan Gonzalez – Adalid, y publicado sus resultados en la Revista Ingeniería Naval N° 687, se concluye en que con las hélices CLT se logra un diámetro óptimo entre un 10 y un 15% inferior al de las hélices convencionales, así como un aumento de rendimiento η_p del orden del 10%; y ello particularmente para hélices muy cargadas, como son las de los empujadores; para los que no se dan referencias, y que es el tema del presente trabajo.

Sin lugar a dudas los pesqueros serían también aptos para estas hélices, cuestión que sí cuenta con antecedentes positivos. Los rompehielos serían también aptos.

Para las hélices CLT, se reconocen las siguientes características:

a) La distribución radial de la circulación sobre las palas, presenta un tramo constante desde aproximadamente $0,6 R$ hasta los extremos.

b) A consecuencia de lo anterior, las velocidades inducidas resultan inferiores a las de las hélices comunes.

c) Las placas limitadoras disminuyen los vórtices radiales, y en la modelización matemática se cumplen los teoremas de Helmholtz, existiendo un valor finito de la circulación en los extremos de palas.

d) Con el adecuado alabeo de las placas extremas, que se acomoda a la corteza de la vena líquida contrada, la resistencia hidrodinámica de estos elementos influye menos que en el caso de las TVF, con placas que determinan superficies cilíndricas coaxiales con el eje de propulsión. La velocidad del agua no produce choque con las placas hidrodinámicamente acomodadas.

e) Resultan hélices de menor diámetro, para las mismas velocidades y empujes que las comunes, e incluso que las TVF.

f) Producen una estela más estrecha y recta.

g) Se generan menos vibraciones.

h) Se reduce el peso.

i) El círculo evolutivo del buque es de menor diámetro.

j) Se reduce el consumo de combustible

k) Desaparece la cavitación en los extremos de palas.

l) Se incrementa el rendimiento η_p .

m) Se incrementa la velocidad.

n) Según las experiencias cuyos resultados fueron publicados, para un considerable número de bu-

ques de mar de importante porte, se obtuvieron los siguientes resultados, que se considera pueden admitirse para los empujadores tratados, admitiendo que pueden ser más beneficiosos. Los valores indicados se refieren a comparaciones con hélices comunes de la serie Troost.

Reducción del diámetro:
10 al 15%

Incremento del rendimiento:
10%

Incremento de la velocidad:
del orden del 5%

Reducción del consumo de combustible:
10 al 15%

Las características de aspecto de estas hélices, tanto por el agregado de las placas periféricas, como de las formas de las palas para adecuar la distribución de la presión, no resulta a primera vista agradable para personas acostumbradas a observar hélices comunes, la ilustración agregada permite un anticipo de las características de una hélice de este tipo.

En buques con velocidades elevadas, que superen los 30 nudos, o el número de Reynolds sea demasiado bajo el empleo de hélices con aletas perimetrales no es recomendable.

Estas hélices deben proyectarse admitiendo que con el casco limpio absorban una potencia entre el 80 y el 90% de la máxima continua del motor propulsor.

E. Diametros y pasos de las hélices propuestas

Para la determinación óptima de los diámetros (D) y los pasos (H) de estas hélices, es necesario la aplicación de la Nueva Teoría de la Circulación, considerando que las palas en este caso particular, también resultan cargadas en los extremos, debido a las placas periféricas que impiden el traslado de presión a la cara de succión en el borde, y evitar los vórtices.

Sin embargo, como el objeto de este trabajo fue enunciado para determinar una metodología simplificada, que se justifica en el caso de los empujadores de la Hidrovía Paraná-Paraguay, se ha resuelto adoptar como base de partida para el cálculo, las hélices de la serie standard de Wageningen para la determinación de D, H y η_p se estima que posteriormente podrán determinarse series de hélices CLT, tal como ocurre con otras actuales de series.

No obstante, lo que no podrá evitarse es el análisis particular y cuidadoso de las placas extremas.

Basándose en las series Troost referidas, y afectando a los valores de los coeficientes correctores, para llegar a los correspondientes a las CLT, según las experiencias obtenidas, se ha confeccionado un gráfico, en función del coeficiente de carga B_p , de donde se obtienen los parámetros requeridos para el diseño.

Las curvas presentadas en la Fig. 2 corresponden a hélices de cuatro (4) palas con una relación $Fa/F = 0,70$, dado que son las más empleadas en los empujadores, en virtud de las

elevadas cargas en las palas que se requieren.

El valor del coeficiente de carga empleado es B_p , el mismo que se utiliza en la serie de referencia:

$$B_p = \frac{P^{0.5} \cdot N}{V_a^{2.5}}$$

En el gráfico de la Fig. 2b. que contiene además las curvas de cálculo, se agregó para observar la variación que presentan los valores, las correspondientes al coeficiente de diámetro δ y de η_p para las hélices de la serie Troost B4-70. Con todos los elementos aportados, es posible proyectar una hélice CLT, para los empujadores de la Hidrovía Paraná-Paraguay, admitiéndose que en esta etapa sus resultados deben ser analizados, con los reales para permitir los ajustes que pueden surgir hasta la optimización.

También se han graficado los valores para las hélices Ka en toberas.

(ver fig. 2; 2a y 2b)

F. Funciones aproximadas para el dimensionamiento

Con suficiente aproximación es posible utilizar para la determinación de las características de las hélices aquí tratadas (CLT), las siguientes funciones, surgidas del cálculo estadístico, empleando regresión de potencia ($y = A \cdot X \cdot B$)

$$B_p > 30 \text{ y HASTA } 100; \delta_1 = 34,847 \cdot B_p^{0,4873}; H/D1 = 1,8228 B_p^{-0,1416}$$

$$B_p > 100 \text{ y HASTA } 140; \delta_2 = 33,757 \cdot B_p^{0,4942}; H/D2 = 1,8438 B_p^{-0,14364}$$

$$B_p > 140 \text{ y HASTA } 200; \delta_3 = 34,914 \cdot B_p^{0,4869}; H/D3 = 1,8438 B_p^{-0,14364}$$

$$\eta_p = 101,9 B_p^{-0,17479}$$

Como complemento se indican las funciones que pueden permitir obtener las características de hélices de tipo Troost B 4-70 y Ka 4-70 con toberas 19 A.

Tales funciones se han obtenido, en general, por regresión de potencia, y

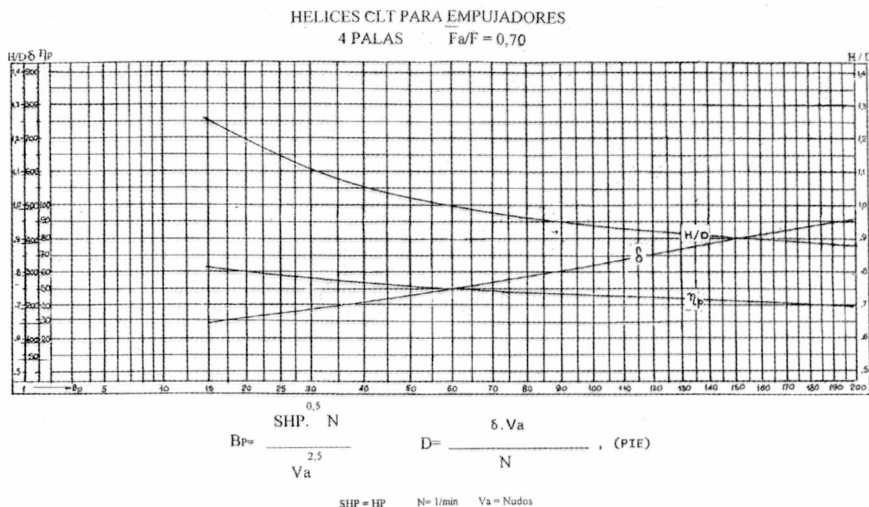


FIG 2

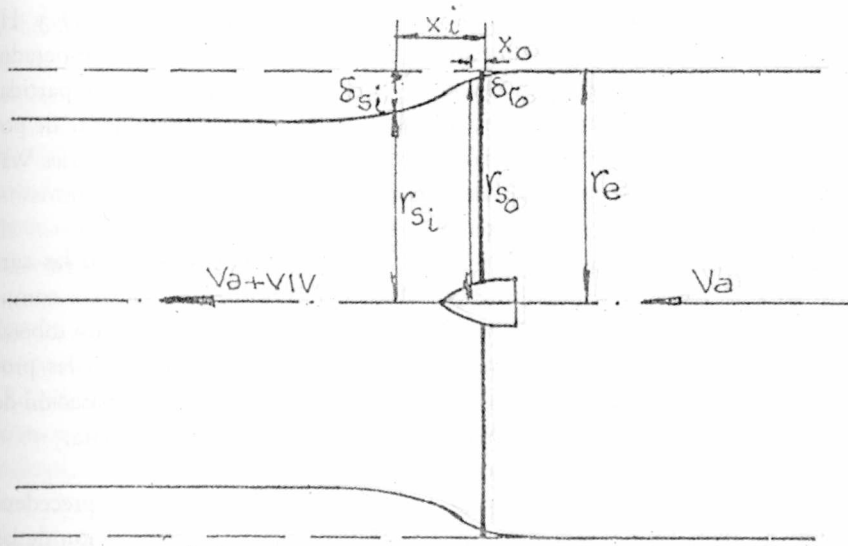


FIG 2a

KAPLAN Ka 4.70 (Toberas 19 A)

$B_p < 100$

$$\delta_1 = 38,9487 \cdot B_p^{0,4503}$$

$$H/D_1 = 1,956 \cdot B_p^{-0,1607}$$

$B_p > 100 < 140$

$$\delta_2 = 39,06 \cdot B_p^{0,4486}$$

$$H/D_2 = 1,445 \cdot B_p^{-0,0950}$$

$B_p > 140$ hasta 200

$$\delta_3 = 42,715 \cdot B_p^{0,4308}$$

$$H/D_3 = 4,616 \cdot B_p^{-0,3232}$$

Para todos los B_p

$$\eta_p = 1,218 \cdot B_p^{-0,2162}$$

empleando los gráficos de cálculo correspondientes a las series.

TROOST B 4.70

$B_p < 100$

$$\delta_1 = 44,8248 \cdot B_p^{0,4496}$$

$$H/D_1 = 1,7563 \cdot B_p^{-0,2314}$$

$$\eta_p = 146,15 \cdot B_p^{-0,2775}$$

$B_p > 100 < 140$

$$\delta_2 = 19,3147 \cdot B_p^{0,633}$$

$$H/D_2 = 25,6137 \cdot B_p^{-0,810}$$

$$\eta_p = 146,15 \cdot B_p^{-0,2775}$$

$B_p > 140 < 310$

$$\delta_3 = 304,596 + 0,993 \cdot B_p$$

$$H/D_3 = 0,465$$

$$\eta_p = 146,15 \cdot B_p^{-0,2775}$$

G. Presión en las palas - velocidad periférica - cavitación

Los criterios utilizados en relación a las presiones máximas admisibles sobre las palas de las hélices, son también de aplicación en estos casos, uno de ellos consiste en evitar sobrepasar la presión de 0,0582 Nmm² (8 PSI); otro es el determinar la superficie de palas, sobre la base de la siguiente expresión que proporciona la relación recomendada de F_a/F :

$$F_a/F \geq \frac{46,31 \cdot SHP \cdot \eta_p}{[(0,7 \cdot N \cdot D + 900) \times D^2 \cdot V_a]}$$

$$\eta_p = \%/100$$

V_a = nudos

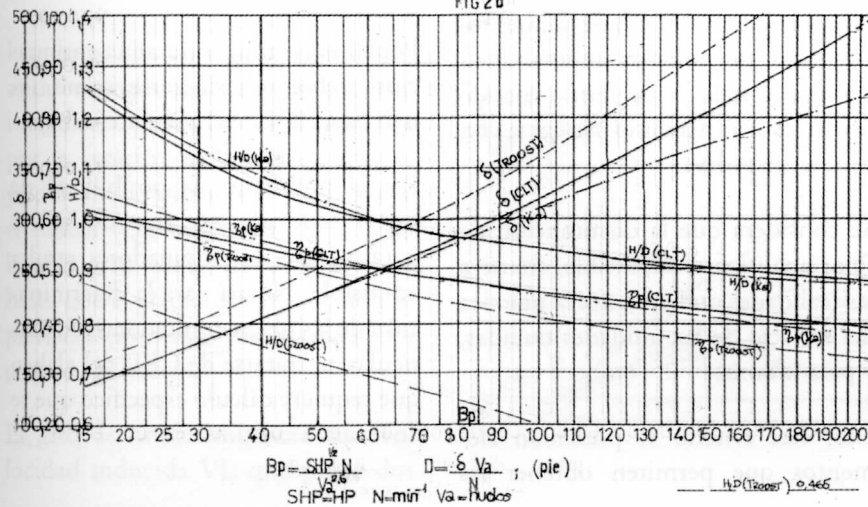
D = m

N = RPM

En lo referente a la velocidad periférica (Tip Speed), ella debe ser parti-

4 PALAS - $F_a/F=0.70$

FIG 2b



cularmente controlada en este tipo de hélices, y disminuirse dentro de lo posible, para que el R_n no conduzca a una elevada resistencia viscosa de las placas limitadoras, que es una cuestión importante en las hélices con estos aditamentos, tal como se analizó.

En las hélices comunes se recomienda no sobrepasar de 67 ms^{-1} (130 MPH), en las propuestas sería aconsejable disminuir este valor.

La velocidad periférica puede determinarse según la expresión.

$$V_p = D \times \text{SHP} \times 0,002973 \quad (\text{MPH})$$

$$D = \text{pié}$$

En hélices comunes no es de esperar cavitación cuando se cumple con el criterio de la velocidad periférica.

No obstante el análisis de esta cuestión requiere mayor profundidad, empleando métodos de cálculo de verificación más adecuados, y que son los de estilo en hélices comunes.

Conclusiones primera síntesis del avance de la tarea

En esta primera síntesis del avance de la tarea, que comprende aspectos relativos a una introducción a la cuestión, bajo análisis, y a las razones que llevan a su análisis, así como un panorama sobre las hélices con placas limitadoras extremas, tanto las de tipo Tip Vortex Free (TVF), como las Contracted and Loaded Tip (CLT), donde además se hace referencia a las hélices en toberas, en particular las utilizadas en empujadores de la Hidrovía Paraná-Paraguay, por exten-

sión de las empleadas en los ríos de EE.UU; se concluye en la solución intermedia que presentan las CLT, de las que surgen las ventajas prácticas, y como una solución de compromiso para la zona de los ríos considerados en los empujadores donde se detecta el problema.

La solución presentada determina ventajas hidrodinámicas con relación a los propulsores ortodoxos, pero algo menores a los valores que presentan las hélices en toberas, que en cambio determinan algunos inconvenientes en los ríos de la Hidrovía, tales como los mencionados en el análisis de las partes ya tratadas.

A esta altura de la tarea, y sobre la base de los resultados obtenidos haciendo uso de las teorías modernas de cálculo de propulsores navales, y de las herramientas informáticas existentes, así como de las experiencias reales logradas, aunque no particularmente para empujadores, se propone una metodología de cálculo de las características fundamentales de estas hélices, que si bien se funda en la Nueva Teoría de la Circulación, se admite que en este caso particular de hélices para empujadores, con algunas constantes operativas, es posible simplificarla con el uso de valores estadísticos, que además intentan arribar a la obtención de series, cuando se cuenta con mayor experiencia con hélices ensayadas.

Se considera que la disminución de rigor analítico es admisible, frente a las realidades que presenta la práctica del servicio de las unidades tratadas, y para la zona.

Con este criterio se presentan elementos que permiten obtener las

características geométricas D y H , así como el rendimiento esperado, sobre la base de los datos de partida, con aplicación del coeficiente de potencia ortodoxo B_p de las series Wageningen.

También se han presentado las curvas correspondientes a hélices comunes tipo Troost, y Kaplan con toberas Kort 19 A, que junto con las propuestas, permiten la comparación de resultados en una forma clara.

El contenido de las partes precedentes posibilita la determinación de las características básicas de las hélices propuestas, pero no aún las específicas correspondientes a las placas periféricas, así como a las formas generales de las palas, que son los elementos distintivos y fundamentales de estas hélices, y que se expondrán en las siguientes partes componentes de este trabajo, así como el criterio de diseño de ellas.

Debe admitirse que si no se ajustan adecuadamente los aspectos que se tratarán a continuación, el beneficio esperado para las hélices propuestas, no sólo no se logrará, sino que podrán resultar hélices con menor rendimiento que las comunes.

Por ello los temas a tratar a continuación deben considerarse como los más específicos del presente trabajo.

Por el momento, la posibilidad de lograr series de este tipo de hélices para el caso de empujadores resulta admisible. No así para la determinación de las placas limitadoras, en particular, al tratarse de CLT, del alabeo que requiere cálculo específico que se analizará a continuación.

Las funciones presentadas permiten operar sin necesidad de utilizar las curvas representativas.

H. Criterio propuesto para la determinación del alabeo y características de las placas limitadoras de extremos de palas tipo CLT

Para la determinación del alabeo de las placas limitadoras de las hélices CLT, donde ello es la base de la diferenciación con las TVF, como se ha indicado; se utiliza en forma rigurosa para determinar las velocidades inducidas en los extremos del disco actuador, el cálculo del incremento del momento cinético del líquido de la vena, producido por la velocidad de giro de la hélice.

En este trabajo, y admitiendo que tiende a una forma simplificada y no tan estricta, pero admisible para el caso que presenta muchos interrogantes, se propone emplear para obtener la contracción de la vena líquida, y en consecuencia las características de su corteza, a la que deben acomodarse las placas limitadoras, el principio de conservación del caudal; entre la zona de ingreso al círculo actuador y la de salida inmediata a popa de la hélice.

Este principio admite que el aumento de velocidad del fluido a causa del incremento de la velocidad impuesta por la rotación de la hélice, (ΔV_a), y debiendo mantenerse constante el caudal (Q), la sección de la vena líquida a la salida, debe contraerse, hasta que el efecto de la velocidad se pierda, a una distancia considerable a popa de la hélice.

El giro de la hélice genera una velocidad inducida VI, que posee dos

componentes, una en el sentido axial del chorro VIV, y la otra en el sentido tangencial al giro del propulsor VI ω .

En el presente caso sólo interesa VIV, dado que el incremento de velocidad del chorro es el que genera la contracción cuyas características se tratan de determinar para acomodar a las placas limitadoras en su corteza.

Haciendo uso de la Nueva Teoría de la Impulsión, resulta:

$$VIV = 0,5 \left[\left[\frac{V_a^2 + \frac{2 T_{0,7}}{\rho \pi 0,7 D}}{\rho \pi 0,7 D} \right]^{1/2} - V_a \right]$$

donde:

V_a = velocidad de avance de la hélice (ns)

$T_{0,7}$ = empuje por unidad de longitud radial del elemento anular de radio 0,7 D/2.

ρ = densidad del agua dulce = 102 kg s⁻² m⁻⁴

$T_{0,7}$: según la Nueva Teoría de la Impulsión tiene un valor de:

$$T_{0,7} = 0,0036332674 \frac{T}{D}; \text{ kg m}^{-1}$$

T = empuje total del propulsor (kg)

En la Figura 3 se recuerda el concepto hidrodinámico de la velocidad inducida VI, y el de sus componentes VIV y VI ω .

α : ángulo de ataque del perfil de la pala.

V_e : es la velocidad efectiva del fluido con respecto al elemento de pala, que se emplea para el cálculo en la Teoría de la Circulación.

El vector VRT corresponde a la velocidad relativa teórica del agua, con relación al elemento de la pala.

La velocidad inducida VI es perpendicular a la velocidad efectiva del agua respecto al perfil.

Sobre la base del conocimiento de todos los elementos de la fórmula de VIV, antes indicada, y reemplazándolos en ella, se puede calcular tal velocidad inducida, en forma directa:

$$VIV = 0,5 \left[\left[\frac{V_a^2 + \frac{SHP \cdot \eta_p \cdot 0,00476}{V_a \cdot D^2}}{V_a \cdot D^2} \right]^{0,5} - V_a \right], \text{ ms}^{-1}$$

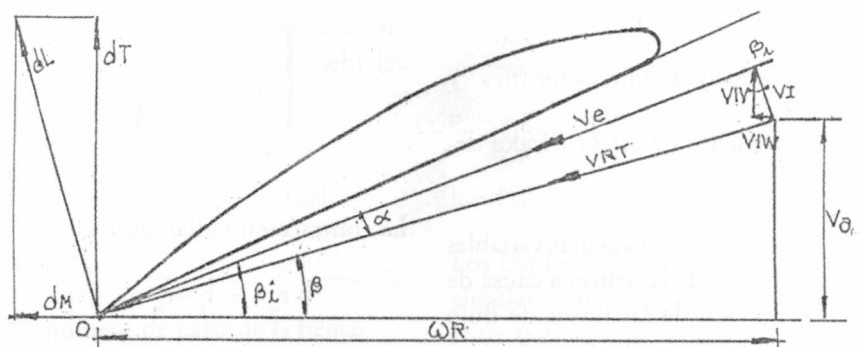


FIG 3

$$\eta_p = \% / 100$$

$$SHP = HP$$

$$D = m$$

$$V_a = ms^{-1}$$

I. Criterio propuesto para la determinación del alabeo

La contracción de la vena líquida, operando con el principio de conservación del caudal, según lo propuesto en este trabajo, resulta:

$$Si, \quad Q_e = Q_s ; \text{ es decir } Q = \text{cte.}$$

Donde:

Q_e = caudal de ingreso al círculo actuador de la hélice

Q_s = caudal de descarga

Luego:

$$\pi r_s^2 (V_a + VIV) = \pi r_e^2 V_a ; (1)$$

En esta expresión:

VIV = velocidad inducida axial, que incrementa a V_a , y que es la componente vertical de la velocidad VI. ($m s^{-1}$).

V_a = velocidad de avance de la hélice

$$V_a = VB (1 - \omega) ; (m s^{-1})$$

VB = velocidad del empujador ($m s^{-1}$)

ω = coeficiente de estela (Wake deduction)

Los valores de ω son además variables con los radios de la hélice, a causa de la distribución de las líneas de flujo que llegan a ella, y ello depende de si se trata de una o dos hélices, del sen-

tido de giro, y de la inclinación del árbol propulsor.

La experiencia permite aconsejar para este caso de empujadores del tipo Mississippi, con dos hélices en túneles, valores de ω próximos a 0,15, en ese caso:

$$(1 - \omega) = 0,85 ,$$

Una solución para disminuir $(1 - \omega)$, es la de aproximar lo más posible los propulsores a crujía, inclusive solapando ambos discos de las hélices.

Luego:

$$V_a = VB \times 0,85$$

El coeficiente de succión se considera igual a ω , aunque este valor se reduce por la existencia de los túneles en los empujadores del tipo tratados.

El coeficiente relativo rotativo se lo considera igual a 1,0; siendo su variación escasa en los empujadores, dado que representa la relación entre el rendimiento de la hélice instalada a popa, y el rendimiento en aguas abiertas.

De la forma indicada en (1), resulta posible calcular el radio r_s del chorro contraído inmediatamente a popa del círculo actuador:

$$r_{so} = \left[\frac{r_e^2 \cdot V_a}{(V_a + VIV)} \right]^{1/2} , (3)$$

La contracción radial resulta:

$$\delta r_{so} = r_e - r_{so}$$

Que es la base para determinar la ecuación de la vena que se requerirá

para diseñar el alabeo de las placas limitadoras extremas.

J. Ecuación de la generatriz de la vena contraída

De las investigaciones realizadas para este trabajo, surge que con suficiente aproximación a los fines pretendidos, y para la longitud de la vena contraída, en la distancia que cubre el ancho normal de una placa periférica, que la ecuación de la generatriz de dicha vena, responde a la expresión exponencial siguiente:

$$\delta r_{si} = A \cdot e^{1,9375 \cdot x_i} , (4)$$

El coeficiente A de la función (4), se determina realizando el cálculo de δr_s según los valores r_e y r_s , obtenido según la fórmula (3) y despejando A de la fórmula (4) para δr_{so} correspondiente a $x_o = 0,002$ m (adoptado como adecuado), es decir inmediatamente próximo al círculo actuador:

$$A = \frac{\delta r_{so}}{e^{1,9375 \cdot x_o}}$$

En tal caso:

$$A = \frac{\delta r_{so}}{e^{1,9375}} = \frac{\delta r_{so}}{1,00388}$$

Las contracciones para cada x_i dentro del ancho de la placa periférica, permiten determinar los radios de la corteza para diseñar en consecuencia el alabeo de dichas placas con referencia al eje de giro de la hélice.

La ecuación del alabeo en función de los radios al eje de giro de la superficie de la vena contraída resulta luego:

$$r_{si} = r_e - 0,99613 r_{so} \cdot e^{1,9375 \cdot x_i} (5)$$

La función representativa de la superficie de la corteza contraída es también obtenible, y con mejor precisión, determinando el incremento del momento cinético del chorro a la salida del círculo actuador, que es:

$$I \cdot \Delta VT,$$

donde:

$$I = \frac{\pi}{2} (r_e^4 - r_{(e-1)}^4) \delta \cdot V_a$$

$r_{(e-1)}$ = radio del chorro, inmediatamente a proa del disco actuador.

La ecuación de la continuidad del momento cinético es:

$$\pi (r_s^2 - r_{(s-1)}^2) V_s = \pi (r_e^2 - r_{(e-1)}^2) V_e$$

V_s = radio del chorro, inmediatamente a la salida del disco actuador.

V_s = velocidad del chorro a la salida

V_e = velocidad del chorro a la entrada

La función representativa de la contracción de la corteza contraída del chorro, resulta, con este criterio:

$$r_{si} = \frac{r_s^2 + r_{(s-1)}^2}{(r_s + r_{(s-1)})^2 (r_s - r_{(s-1)})}$$

r_{si} = radio de cada punto de la placa, desde el eje de giro de la hélice.

En nuestro caso se requiere conocer la contracción en la cara popel del círculo actuador, en los extremos de las palas (Tip), y ello se realiza para este trabajo con el criterio antes sustentado de la continuidad del caudal,

como un aporte a la simplificación, y para resultados admisibles para estos casos; sin quitar los méritos teóricos que determina la aplicación de la consideración de la continuidad del momento cinético del chorro, que es la que los investigadores europeos han utilizado para el diseño de estos propulsores en buques mayores y para condiciones de operación más constantes.

K. Características de las placas limitadoras

El diseño de las placas limitadoras extremas de palas de las hélices CLT tratadas en el presente, requiere un cuidadoso análisis, dado que los errores que se cometan pueden anular la efectividad para ellas prevista, con relación a las comunes.

Las características del alabeo, se han analizado precedentemente y se determinó la función de la vena contraída a la salida del chorro de la hélice, a la que debe ajustarse la superficie de las placas, la fórmula expresada en (5) es de aceptable aproximación, y posibilita determinar el alabeo en toda la superficie de la placa.

El plano agregado permite observar los valores del alabeo calculado para el caso de una hélice tratada.

En cuanto al ancho de la placa se considera, según valores experimentales, que el máximo debe encontrarse en el orden de:

$$b = 0.68 \cdot D/Z \cdot Fa/F$$

Donde:

Z = número de palas de la hélice

Fa/F = relación entre el área de la pala expandida y el área del disco de la hélice.

También puede admitirse que :

$$b = \frac{1}{3} l_s$$

l_s = largo del perfil de la pala a 1,0 R.

Al considerar el valor de "b", según lo indicado, y para un largo de sección l_s a 1,0 R, que surgirá luego al tratar la forma de las palas, resulta que Fp/F es del orden del 24%, valor que justifica un cuidadoso diseño para disminuir la resistencia viscosa de las placas; Fp = área total de las palas.

El ancho "b" corresponde al máximo en el borde de salida según el sentido de giro de la hélice, y puede disminuirse a $b_1 = 0,9 b$, en el otro extremo (entrada).

La sección longitudinal de las placas será de forma currentiforme.

En lo referente al espesor de las placas y considerando las necesidades de resistencia a los esfuerzos a que serán sometidas, se admite que debe ser del orden de:

$$e_p = e_a \cdot k$$

e_p = espesor en los bordes de las placas.

e_a = espesor máximo de la sección de la pala a 1.00 R.

$k = 1,1$ a $1,15$

Los bordes tendrán una terminación circular, con un diámetro mínimo entre 6 y 10 mm.

El acuerdo en el ángulo de unión entre pala y placa en la cara de presión de la pala, debe tener un radio adecuado, cuidando la concentración de tensiones, y la resistencia estructural.

El radio de este acuerdo es un compromiso entre resistencia y menor influencia en la circulación en esa sección anular de la pala, se considera aceptable que tal radio sea:

$$R_c = 0,22 \cdot b$$

b = ancho máximo de la placa limitadora.

Debe admitirse el hecho de que las placas al girar con la hélice, pueden enganchar elementos que se encuentran a media agua, sin embargo ese riesgo es similar al que se produce por el mismo efecto en las toberas, y en ese caso con mayores riesgos.

El incremento del espesor de las placas puede ser posible, con la finalidad de mejorar la resistencia, pero se requiere mayor experiencia para determinarlo, sin incurrir en errores que perjudiquen el rendimiento por aumento excesivo de las superficies de las placas, que redundan en una mayor resistencia viscosa, cuestión importante en este caso, como se adelantó, y cuya insistencia es necesaria.

L. Forma de las palas

La determinación de las formas óptimas de las palas se logra con la aplicación de la Nueva Teoría de la Circulación, en este caso considerando sus condiciones de carga.

En un primer intento de estandarización, para los casos que se tratan en el presente, se proponen las características que se observan en la figura

específica, y que surgen a partir de las hélices tipo Kaplan, con el criterio de aprovechar en estos casos la circulación en los extremos de las palas.

En la Tabla I, se indican los valores para lograr el perfil desarrollado de las palas, partiendo de su ancho a 0,6 R, al que se le asigna un valor de:

$$l_{0,6} = 2,057 D/Z \cdot F_a/F$$

siendo ya conocidos los valores intervinientes en esta fórmula.

Las palas resultantes determinan una elevación del centro de presión con relación a las comunes de la serie Troost, y ello permite un mayor rendimiento hidrodinámico cuando se opera en límites adecuados.

Futuras investigaciones podrán permitir obtener formas óptimas partiendo de determinaciones directas.

En la Tabla II se indican las características de las secciones de las palas, sobre la base de las Kaplan, lo que en su momento podrá ser ajustado.

Conclusiones de la segunda parte

Luego de haber obtenido según lo actuado precedente, las características geométricas e hidrodinámicas básicas de las hélices propuestas, resulta necesario diseñar sus placas periféricas que la diferencian de las hélices comunes, y en este caso sobre la base de las CLT.

Tal como se adelantó esta cuestión no puede por el momento ser resuelta con soluciones generales (series), y debe surgir de análisis particulares; los errores en esta etapa pueden determinar fallas que varían fuertemen-

te lo esperado en estas hélices, más aún, aportando elementos negativos.

El método de determinación del alabeo de las placas, para acomodarlos a la corteza de la vena líquida de descarga se propone, como simplificación, sobre la base de la constancia de caudal entre el ingreso y la descarga, pero también se hacen consideraciones con relación a la constancia del momento cinético, que es el método hasta ahora aplicado en buques comunes.

Las velocidades inducidas en el círculo actuador surgen de la Nueva Teoría de la Impulsión.

Se hacen consideraciones particulares para la determinación de la velocidad de avance del propulsor, sobre la base de valores admitidos como adecuados de la Wake Deduction, para empujadores como los tratados de las que existen suficiente experiencia en la zona analizada.

Finalmente, se presenta la expresión exponencial que permite determinar la generatriz, de la vena líquida contraída, cuestión que resultó de ensayos con bases teóricas, y que sin lugar a dudas es una cuestión que da pie a investigaciones futuras, sobre la base de casos reales con el criterio sustentado.

Se incluyen entre las características de diseño de las placas, además del alabeo, las correspondientes a sus dimensiones, considerando valores de compromiso, para disminuir la resistencia viscosa que debe ser particularmente considerada y obtener la resistencia mecánica requerida.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DE LAS PALAS DESARROLLADAS

a) valores porcentuales en funcion del largo de la seccion a 0,6 r; de valor:

$$2,057 \frac{D}{Z} \cdot \frac{F_a}{F} \quad Z = N^{\circ} \text{ PALAS}$$

r/R	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
LARGO TOTAL DE LA SECCIÓN	65,59	76,95	86,81	94,74	100,00	103,89	107,50	109,73	111,12
DISTANCIA AL BORDE DE ENTRADA DESDE LA VERTICAL DE REFERENCIA	36,80	44,44	48,89	49,44	45,80	39,17	29,16	16,66	0,00
DISTANCIA AL BORDE DE SALIDA DESDE LA VERTICAL DE REFERENCIA	28,91	32,51	37,92	45,30	54,19	64,71	78,33	93,06	111,12
DISTANCIA DEL BORDE DE ENTRADA A LA LINEA DE MAXIMOS ESPESORES	34,98	37,90	39,98	40,52	46,58	50,00	50,00	50,00	50,00
b) valores porcentuales en funcion del diametro (d)									
MÁXIMO ESPESOR DE LA SECCIÓN	4,00	3,52	3,00	2,45	1,90	1,38	0,98	0,61	0,50
MÁXIMO ESPESOR EN EL EJE	0,05 . D								
ANCHOS DE LAS PLACAS LIMITADORAS:	$b = 0,68 \frac{D}{Z} \cdot \frac{F_a}{F}$								

TABLA IIESPESORES DE LAS SECCIONES DE PALAS
HÉLICES CLT

Los valores representan % del máximo espesor de la pala a esa r/R

Las distancias de ordenadas en %, están referidas a la ordenada correspondiente al máximo espesor (Tabla I)

BACK

r/R	SALIDA						ENTRADA					
	100%	80%	60%	40%	20%	20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%
0,2	--	37,59	64,13	82,38	95,00	95,81	90,62	77,17	55,00	45,66	44,55	--
0,4	--	45,49	67,37	85,67	95,71	97,19	88,87	73,59	50,16	34,70	25,82	--
0,6	--	39,47	55,26	78,94	84,21	97,36	81,57	65,78	39,47	36,84	32,89	--
0,8	--	48,37	71,06	87,41	97,15	97,15	87,41	71,06	48,37	40,60	35,53	--
1,0	--	83,33	87,5	89,16	91,66	91,66	89,16	87,5	83,33	83,00	82,60	--
FACE												
0,2	20,4	2,89	2,38	--	--	2,09	3,09	4,36	10,50	15,96	19,8	32,21
0,4	6,80	2,35	--	--	--	--	--	--	--	--	--	13,46

Las características particulares de las palas son las surgidas ante la posibilidad de elevar el centro de presión con su consiguiente beneficio hidrodinámico en la medida de lo admisible, si ello se supera, el rendimiento disminuye sobre la base de la circulación que permiten las placas, en el borde elevado de las palas.

Estas particulares características, que determinan formas específicas surgen a partir de las hélices Kaplan que operan en toberas, aunque adaptadas para obtener el mayor rendimiento con las placas periféricas.

Las formas aparecen como no comunes para la vista de los acostumbrados a las hélices normales tanto de las series Troost como para las Kaplan.

Se concluye con el aporte de dos planillas para el diseño de las formas de las palas y de sus secciones hidrodinámicas, en forma similar a lo que se está acostumbrado para las series de Wageningen y las Kaplan.

Con los elementos hasta aquí proporcionados resulta posible el diseño de las hélices propuestas, restando aspectos constructivos y de características de los materiales, sus reparaciones y tolerancias de construcción, que serán considerados a continuación; así como un análisis comparativo de resultados con otros diseños de propulsores.

M. Cubos

Los cubos de estas hélices son de características similares a las correspondientes a las hélices comunes, en la medida que el material empleado sea el recomendado y con sus valores en los límites superiores.

Esta consideración se basa en el hecho de que las hélices tratadas resultan más cargadas que las comunes para características geométricas similares.

Como el centro de aplicación de la fuerza de empuje que genera la hélice, se encuentra a un radio mayor que en las normales, es necesario que el valor ideal del espesor de pala en correspondencia al centro del eje de giro, se incremente respecto a lo que es común en hélices de serie, se considera adecuado que tal valor sea 0,49 D, similar a las tipo Kaplan.

El valor del diámetro máximo del cubo se mantiene en 0,167 D.

Se agrega el croquis de la Fig. 4, donde se indican las características recomendables, experimentadas en hélices reales.

N. Materiales

Para el caso de aleaciones de base Cu, se empleará Cu1 (IACS), y para aceros inoxidable utilizan aceros austeníticos de grado CF3 (ABS).

Los controles de fabricación, así como de variaciones de pasos, o reparaciones, deben seguir las normas que prescriben los Registros de Clasificación, así por ejemplo el American Bureau of Shipping, en su Guidance Manual for Bronze and Stainless Steel Propeller Casting; esto tanto para hélices de aleaciones de Cu, como de acero inoxidable, donde se incluyen tratamientos térmicos y terminación superficial.

O. Reparaciones admitidas

Las reparaciones admitidas en estas hélices, averiadas comúnmente dada

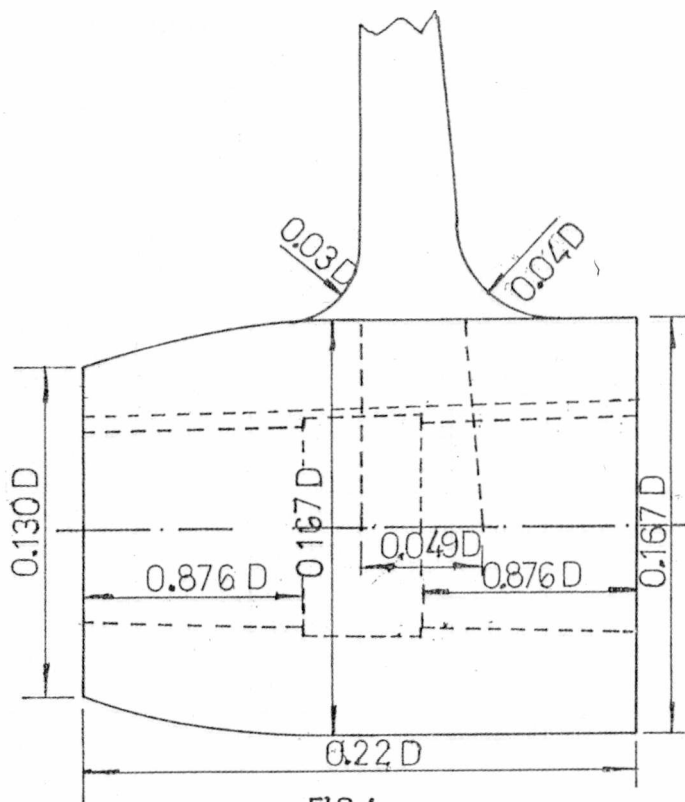


FIG 4

la zona de operación, son las indicadas en las normas de los Registros (ABS).

Las reparaciones en las placas limitadoras seguirán el mismo criterio que las de las palas en los extremos (tip), y según el material de construcción.

P. Distancia hélice casco

Si bien en las hélices propuestas no es de presumir la existencia de vórtices en los extremos de palas, y en consecuencia las vibraciones transmitidas al casco en la zona, disminuyen, resulta conveniente mantener los criterios de distancias mínimas entre el casco y los extremos de palas, aunque para estos casos ellos pueden ser algo menores y permitir un incremento de diámetro, si ello fuera necesario.

La frecuencia de excitación por el pasaje de las puntas de pala en el casco, se mantiene según lo conocido.

Q. Peso

El peso de estas hélices resulta algo mayor que el de las hélices de igual diámetro de tipo común o Kaplan, a causa del agregado de las placas periféricas.

En la hélice del ejemplo resultó que si hubiera sido del tipo común, pesaría del orden de 324 kg, al ser CLT pesaría aproximadamente 371,24 kg, es decir del orden de 12,8 % mayor.

R. Balanceo

Las averías o defectos de construcción de las placas periféricas, dada su distancia al eje de giro de la hélice, pueden producir desbalanceos importantes, que deben ser evitados.

Este es un inconveniente digno de considerar en estas hélices en particular operando en la Hidrovía, con aguas con elementos en suspensión, que las golpean, o bien profundidades que las pueden hacer tocar.

S. Costo

Si se considera sólo el efecto del aumento de peso, el costo de estas hélices sería un 13% mayor que el de las hélices comunes sin placas periféricas, la mano de obra se ve levemente afectada.

T. Tolerancias de fabricación

Para las tolerancias de fabricación de estas hélices, dadas las condiciones en que operan, es conveniente utilizar las normas ISO R 484 - 1966, y considerarlas en la Clase II, que es la empleada para "presión media", en la mayoría de los buques mercantes.

De pretenderse una mayor precisión, puede especificarse Clase I, pero en general no es necesario a estos fines.

Con ese criterio:

T.1. Radios

	CLASE	
	I	II
DESVIACION MÁXIMA Y MÍNIMA	+ -0,5	+ -0,5
CON UN MÁXIMO (mm)	3	3

T.2. Pasos

	CLASE	
	I	II
PASO LOCAL %	+ - 2	+ - 3
MÁXIMO (mm)	20	30
PASO MEDIO POR PALA A 0,6 R %	+ - 1,5	+ - 2,0
CON UN MÁXIMO (mm)	15	20

PASO	CLASE	
	I	II
MEDIO POR PALA %	+ - 1,0	+ - 1,5
MÁXIMO (mm)	10	15
TOTAL %	+ - 0,75	+ - 1

T.3. Longitudes de secciones de pala

	CLASE	
	I	II
DESVIACION MÁXIMA Y MÍNIMA (1) %	+ - 1	+ - 1,5
MÁXIMO (mm)	5	10

(1) En % de la longitud de pala correspondiente al radio respectivo.

Las tolerancias a 0,2; 0,3 y 0,4 R; pueden incrementarse 50%.

En cuanto a los ángulos +
- 0,5

U. Rugosidad en el cubo y palas

Valores máximos

ZONA	H máx (mm) (*)	SIMBOLO DE MECANIZADO
INTERIOR DEL CONO	0,0032	
SUPERIOR DEL CHAVETERO	0,0125	
LATERALES DEL CHAVETERO	0,0063	
FRENTE DE PROA	0,0125	
EXTERIOR DEL CUBO	0,0125	
PALAS	0,0063	
PLACAS LIMITADORAS	0,0032	

(*) h = altura máxima de la rugosidad

Conclusiones de la tercera parte

Las características hidrodinámicas de las hélices cubren aspectos propios para incrementar el aprovechamiento de la potencia entregada a ella por la planta propulsora, que resultan de sus dimensiones y formas, como en lo concerniente a los accesorios que actúan conjuntamente, como los cu-

bos donde se insertan las palas, y las dimensiones que se requieren para determinar las resistencia mecánica necesaria, lo que obviamente está íntimamente ligado a las características de los materiales empleados y sus tratamientos térmicos.

En relación a ello se han dado recomendaciones que surgen de investigaciones particulares, y de la experiencia obtenida en hélices en general

empleadas en la zona.

Dadas las posibilidades de las hélices propuestas y el tratamiento de ellas en los empujadores, esta cuestión debe ser particularmente tenida en cuenta, y para ello se aportan valores que se consideran adecuados, que se encuentran en los límites máximos utilizados en propulsores comunes.

Se admite que los materiales a emplear serán los bronces, latones y

aceros inoxidables, de aleaciones admitidas por los Registros de Clasificación, materiales estos que permiten reparaciones, siempre necesarios en estas hélices, según las normas mencionadas.

Se ha considerado oportuno indicar además las tolerancias de fabricación, ajustadas a las características de estas hélices, en las que se está pretendiendo lograr un mayor rendimiento, pero dentro de límites que no determinen cuestiones ideales no razonables en virtud de las indeterminaciones que presenta donde prestan servicio estas hélices propulsoras.

V. Ejemplo de aplicación

A los fines de ejemplo de aplicación, se incluye el cálculo de una hélice CLT, para un empujador de la Hidrovía Paraná-Paraguay.

Se ha tomado el caso de un empujador de dos líneas de ejes, en túneles, con una potencia en cada eje de SHP = 591,6 kW (801,37 HP), y 350 RPM en las hélices.

Se ha decidido que se trate de hélices de cuatro palas, con una relación F_a $F = 0,70$, y que la velocidad empujando el convoy, resulte 3,60 m/s (7 nudos).

V.1. Velocidad de avance de las hélices

Se adopta:

$$(1 - \omega) = 0,85$$

Luego:

$$V_a = 7 \times 0,85 = 5,95 \text{ nudos } (3,062 \text{ m/s})$$

V.2. Determinación de las características de cada hélice

Haciendo uso del gráfico correspondiente, para:

$$B_p = \frac{SHP^{0,5} \cdot N}{V_a^{2,5}} = \frac{804,37^{0,5} \times 350}{5,95^{2,5}} = 114,949$$

$$B_p = 114,949$$

Se determinan los siguientes valores:

Por el gráfico propuesto:	Por las funciones propuestas:
D = 1,80 m	D = 1,823 m
H/D = 0,92	H/D = 0,931
H = 1,656 m	H = 1,697 m
$\eta_p = 43\%$	$\eta_p = 44,4\%$

Se utilizarán las del gráfico en este ejemplo.

V.3. Características de las placas limitadoras.

V.3.1. Para determinar la velocidad inducida vertical VIV, se emplea la fórmula de la Nueva Teoría de la Impulsión:

$$VIV = 0,5 \left[\left[V_a^2 + \frac{2 T_{0,7}}{\rho \pi 0,7 D} \right]^{1/2} - V_a \right]$$

$$T_{0,7} = 0,003633 \cdot \frac{T}{D}, \text{ (kg m}^{-1}\text{)}$$

Para determinar el empuje total en la hélice, se utiliza la expresión:

$$T = \frac{147,21 \times SHP \eta_p}{V_a}$$

$$\eta_p = (\%/100)$$

$$V_a = (\text{m s}^{-1}); SHP = (\text{HP}).$$

$$T = 16628,62 \text{ kg}$$

$$T/D = 9238,12$$

$$T_{0,7} = 33,564$$

En consecuencia:

$$VIV = \left[3,062^2 + \left[\frac{2 \times 33,564}{224,31 \cdot D} \right]^{1/2} - V_a \right]$$

$$VIV = 0,01350 \text{ m.s}^{-1}$$

V.3.2. El momento Torsor resulta de la expresión:

$$M = \frac{716,2 \times SHP}{\text{RPM}}$$

Para el caso:

$$M = 1645,97 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

V.3.3. Determinación del alabeo de las placas

Los radios de los diferentes puntos de las placas, medidas desde el eje de giro de la hélice, resulta de:

$$r_{si} = r_e - 0,99613 \delta r_{so} \cdot e^{1,9375 \cdot xi}$$

El valor de la contracción para $xi = x_0$, que se adopta 0,002 m, resulta:

$$\delta r_{so} = r_e - r_{so} \quad ; \quad r_e = \frac{D}{2} = 0,90 \text{ m}$$

$$r_{so} = \left[\frac{r_e^2 \cdot V_a}{V_a + VIV} \right]^{1/2} = \left[\frac{0,90^2 \times 3,062}{3,062 + 0,01352} \right]^{1/2} = 0,8979 \text{ m}$$

Luego:

$$r_{so} = 0,90 \text{ m} - 0,8979 \text{ m} = 0,0021$$

y:

$$r_{si} = 0,90 - 0,99613 \times 0,0021 \times e^{1,9375 \cdot xi} ;$$

que permite determinar los radios del alabeo en cualquier punto de la placa limitadora.

Luego:

- En el extremo exterior del ancho máximo:

$$b = 0,214 \text{ m} = xi$$

$$r_{sb} = 0,90 - 0,0020918 \times 2,71828^{1,9371 \times 0,214} = 0,8968 \text{ m}$$

$$\delta_{rb} = 0,0032 \text{ m}$$

-En el extremo exterior del menor ancho:

$$b_1 = 0,9 \times b = 0,1926 \text{ m}$$

$$r_{sbl} = 0,90 - 0,0020918 \times 2,71828^{1,9371 \times 0,1926} = 0,8969 \text{ m}$$

$$\delta_{rbl} = 0,0031 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta el ancho de las placas, es suficiente la determinación del alabeo sólo en el borde externo.

La figura 6 aclara los resultados.

Resulta luego posible diseñar el alabeo de las placas, admitiendo que el ancho máximo (b) será:

$$b = 0,68 D/z \text{ Fa/F}$$

$$b = 0,68 \times 1,80 / 4 \times 0,70 = 0,214 \text{ m,}$$

y el espesor:

$$e_p = e_a \cdot k ; e_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$e_p = 9,0 \times 1,15 = 10,35 \text{ mm}$$

V.4. Características de las palas y de las secciones correspondientes

Ello se obtiene haciendo uso de las Tablas I y II que se presentaron anteriormente en el texto de este estudio;

V.5. Plano de la hélice

El plano agregado es el correspondiente a una hélice similar a la determinada en el ejemplo analizado, y que hubiera permitido confeccionar el modelo para la experiencia en aguas abiertas.

W. Comparación de valores obtenidos

A los fines comparativos, se indican los valores de las características de la hélice del ejemplo, obtenidas según la serie Troost B. 4-70, Kaplan, Ka 4-70 y la propuesta CLT 4-70, pudiendo observarse que tales resultados están de acuerdo con lo previsto en este trabajo, es decir, las CLT propuestas con mejor rendimiento que las Troost, y algo menor que las Kaplan en toberas Kort 19 A.

En todos los casos $B_p = 114,949$

Tipo	D mm	H/D	H mm	η_p (%)
Troost	2020	0,55	1114	39
Kaplan	1694	0,92	1558	44,2
CLT	1800	0,92	1656	43

X. Constantes hidrodinámicas

Las constantes hidrodinámicas para la hélice calculada, según lo propuesto para la misma V_a y revoluciones, resultan:

$$D = m; V_a = m \cdot s^{-1}; n = s^{-1}; N = \text{mín}^{-1}; \rho = 102 \text{ kg m}^{-4} \cdot s^{-2};$$

Y. Pruebas en aguas abiertas

Los valores de los coeficientes para las hélices propuestas deberán ser verificados en ensayos en aguas abiertas ya sea en modelos a escala natural, o con modelos de hélices en tanques de experiencia.

Tales modelos a escala reducida requieren tener dimensiones aceptables, dado las tolerancias requeridas en particular en el alabeo de las placas periféricas, es decir modelos de diámetros importantes, que requieren equipos acordes.

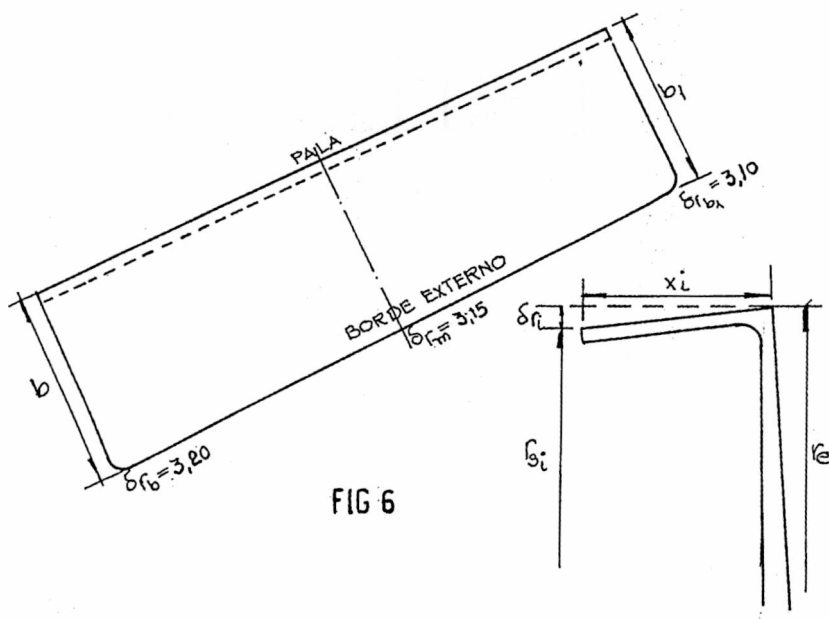


FIG 6

CONCEPTO	EXPRESION	TROOST	KAPLAN	CLT
COEFICIENTE DE AVANCE	$J = \frac{V_a}{N D}$	0,2598	0,3098	0,2916
CONSTANTE DE EMPUJE	$K_{sT} = \frac{S}{\rho D^4 N^2}$	0,00003730	0,00008548	0,00006523
CONSTANTE DE TORSION	$K_{mt} = \frac{M}{\rho D^5 N^2}$	0,0000039167	0,000009443	0,000006971
RENDIMIENTO EN AGUAS ABIERTAS (%)	$\eta_{pt} = \frac{K_{sT}}{K_{mt}} \cdot \frac{J}{2\pi}$	39,3	44,6	43,4
CONSTANTE DE POTENCIA	$B_p = \frac{SHP^{0.5} \cdot N}{V_a^{2.5}}$	114,94	114,94	114,94

Z. Conclusiones generales

Sobre la base de lo expuesto, desde el punto de vista teórico y de la información obtenida en aplicaciones prácticas reales, particularmente en España, aunque no en empujadores como los empleados en la Hidrovía Paraná-Paraguay, resultaría adecuado instalar en estos últimos hélices del tipo Contracted Loading Tip (CLT), dado que ellas determinarían un mayor rendimiento general, aún con una disminución de diámetro, que es una condición fundamental en la zona donde navegan, y en relación a las hélices de series comunes.

Se admite que estas ventajas son algo menores a las que producen las hélices tipo Kaplan en toberas Kort A 19, pero se evita con las hélices propuestas los problemas que producen las toberas en la vía navegable, muy contaminada con residuos sólidos, además del alto costo de sus instalaciones, y del mantenimiento del sistema, para que el rendimiento no disminuya, y el aditamento pase a ser

un elemento negativo, afectando la resistencia al avance.

En la figura 7, en forma contribuyente, se incluye un gráfico que permite estimar valores para las hélices propuestas aplicadas en empujadores de la zona analizada, y realizar compa-

raciones con otras hélices diseñadas, según los criterios comunes.

Resulta además posible, para los casos presentados, utilizar un método con alguna simplificación en el cálculo del alabeo de las placas periféricas limitadoras, y se intenta una norma-

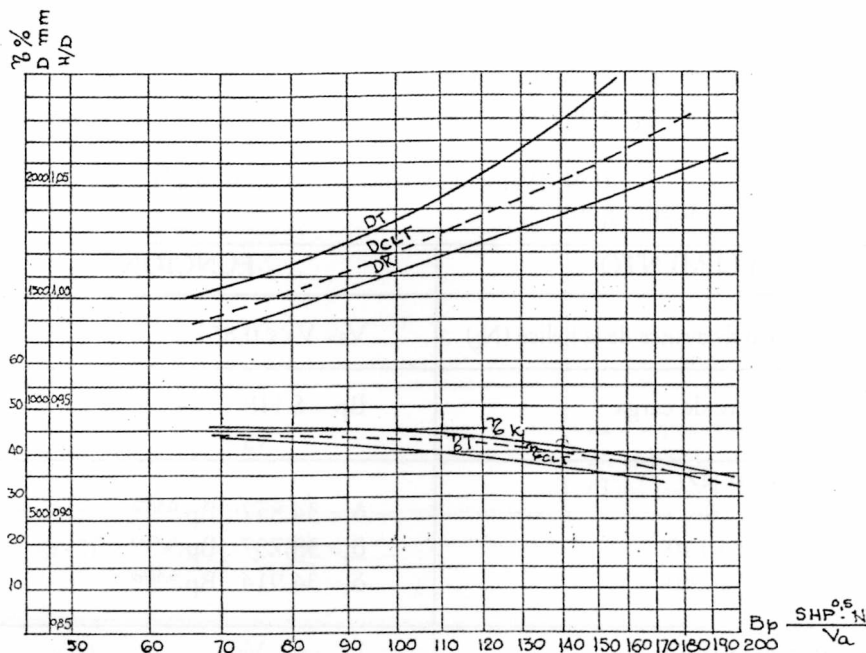


FIG 7

lización para el diseño, tanto en lo concerniente a las características de las hélices para este servicio, lo que incluye las formas de las palas y sus secciones.

Sin lugar a dudas las experiencias, ya sea en tanques con modelos adecuados de hélices, en aguas abiertas, como de tamaño natural en empujadores reales, serán los pasos futuros tendientes a comprobar los resultados, y a perfeccionarlos para su aplicación en ese tipo de buques y servicio, con una normalización que haga menos complicado el diseño, tendiendo a las series como son las de uso común.

El plano agregado es un ejemplo de la hélice CLT calculada según la metodología bajo análisis se determinan: dos (2) hélices de cuatro palas (4);

para una potencia por línea de 1200 SHP, a 350 RPM, con las siguientes características:

$$D = 2020 \text{ mm}$$

$$H = 1818 \text{ mm}$$

$$H/D = 0,9$$

$$Fa/F = 0,70$$

$$\eta_p = 42\%$$

Conclusiones de la cuarta parte

A los efectos de demostrar la aplicabilidad del método de cálculo de las hélices propuestas, se ha incluido un ejemplo, típico para un empujador de la Hidrovía Paraná-Paraguay, se propone una planilla para el ordenamiento de base para optar al proceso electrónico en las resoluciones.

Los resultados obtenidos permiten efectuar análisis comparativos de las

diferentes hélices calculadas, lo que posibilitó presentar una tabla con los resultados de los diferentes parámetros y observar sus variaciones.

Asimismo, se presentan las constantes hidrodinámicas correspondientes a cada hélice obtenidas por los procedimientos comunes, incluyéndose los valores previstos para las hélices propuestas.

Los valores de pruebas en aguas abiertas son un aporte que queda pendiente para cuando se cuente con los recursos para ello, siendo el más importante la posibilidad que brinde un tanque de pruebas de características adecuadas para operar con hélices de diámetro compatible con el requerimiento del ensayo.

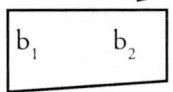
PLANILLA SÍNTESIS DE CÁLCULO HÉLICES CLT PARA EMPUJADORES

Empujador:

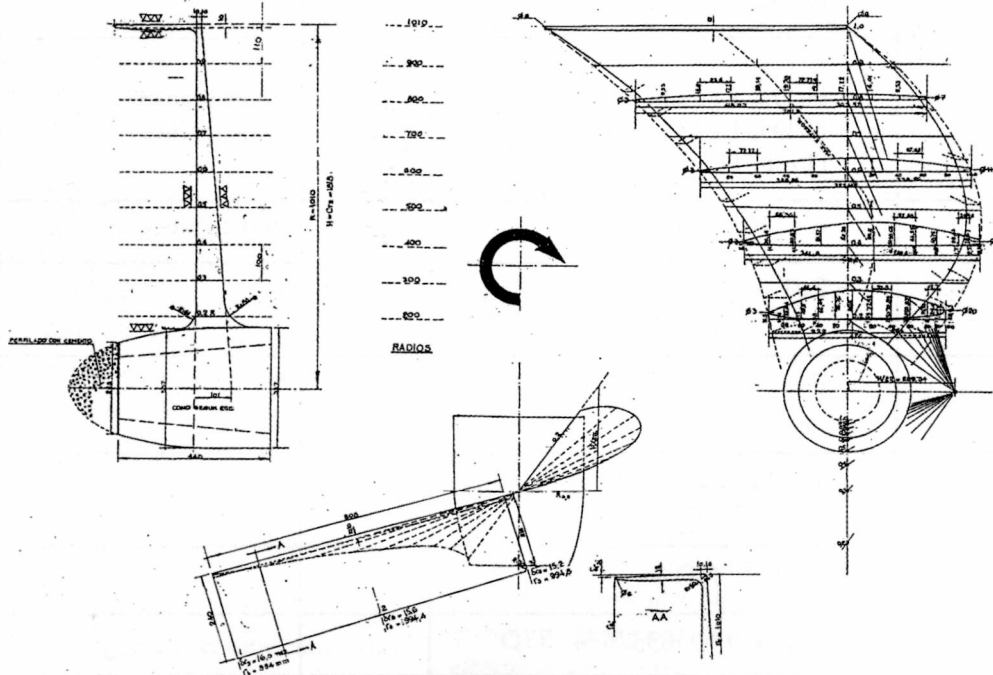
Potencia en el eje para cada línea (S HP) = HP
 Revoluciones por minuto en la hélice (N) = RPM
 Cantidad de hélices=
 Numero de palas (Z) =

$V_s = 7,0 N_s$ (Velocidad del convoy); (3,6 m.s⁻¹)
 $Fa/F = 0,70$

ELEMENTO	FUNCION	VALOR	OBSERVACIONES
Velocidad de avance de la hélice (N _s)	$V_a = V_s \times 0,85$		
Coefficiente de carga	$B_p = S \text{ HP}^{0,5} \cdot N$ $V_a^{2,5}$		
Diámetro (D) Bp= 30 a 100 Bp > 100 a 140 Bp > 140 a 200	$\delta_1 = 34,847 \cdot B_p^{0,4873}$ $\delta_2 = 33,757 \cdot B_p^{0,4942}$ $\delta_3 = 34,914 \cdot B_p^{0,4869}$		0 del gráfico 0 del gráfico 0 del gráfico
Diámetro (pie)	$D' = \frac{\delta_1 \cdot V_a}{N}$		

Diámetro (m)	$D = 0,3048 \cdot D'$		
Relación Paso/Diámetro Bp= 30 a 100 Bp = 100 a 200 Paso (H), (m)H =	$H/D = 1,8228 \cdot Bp^{-0,1416}$ $H/D = 1,8438 \cdot Bp^{-0,14364}$ $H = H/D \cdot D$		0 del gráfico 0 del gráfico
Rendimiento (η_p), (%)	$\eta_p = 101,9 \cdot Bp^{-0,1749}$		0 del gráfico
Verificación de la presión en las palas	$Fa/F \geq \frac{46,31 \cdot S \cdot HP \cdot \eta_p}{[(0,7 \cdot N \cdot D + 900) \cdot D^2 \cdot Va]}$		
Verificación velocidad periférica (Vp), MPH	$D' \cdot S \cdot HP \cdot 0,002973 \leq 130$		
Empuje Total (T) (kgf)	$T = \frac{147,21 \cdot S \cdot HP \cdot \eta_p}{Va}$		
Relación T/D (kgf.m-1)	T/D		
Relación empuje a 0,7 D (kgf.m ⁻¹)	$T_{0,7} = 0,0036332674 \cdot T/D$		
Velocidad inducida vertical (VIV) (m.s ⁻¹)	$VIV = 0,5 \left[\frac{[Va^2 + 2 \cdot T_{0,7}]^{0,5} - Va}{\rho \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot D} \right]$		
Radio de entrada (m)	$re = D/2$		
Radio de salida a 0,002 m del disco actuador (m)	$r_{SO} = \left[\frac{re^2 \cdot Va}{(Va + VIV)} \right]$		
Diferencia de radios (m)	$\delta r_{SO} = re - r_{SO}$		
Ancho de las placas (m)	$b_1 = 0,68 D/Z \cdot Fa/F$ $b_2 = 0,9 b_1$		GIRO HELICE 
Radios al centro del árbol propulsor en los extremos de popa de las placas (m)	$rs1 = \frac{D}{2} - 0,99613 \cdot \delta r_{SO} \cdot e^{1,9375 \cdot b_1}$ $rs2 = \frac{D}{2} - 0,99613 \cdot \delta r_{SO} \cdot e^{1,9375 \cdot b_2}$		
Espesor de las placas (mm)	$ep = ea \cdot 1,15$		ea = espesor de la pala en el borde superior (Tip) (mm)
Características de las palas y sus secciones	SEGÚN TABLAS I y II		

(*) El presente trabajo es el resultado de la tarea de investigación y desarrollo, realizado por el autor, para la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de la Marina Mercante (DICyT), en el año 2004.



POTENCIA ESE	SHIP	11200	KW
VELOCIDAD BARRIL	V _B	3,64	M/S
REVOLUCIONES	n	150	1/MIN
RELACION AREA	E ₀ /E	0,70	---
Nº PALAS	Z	4	---
PASO/DIAMETRO	H/D	0,9	---
PASO	H	1010	MM
DIAMETRO	D	1020	MM
ELEMENTO	RENOVA	TRAB	DESIGN

FACTOR DE POTENCIA	K _T	140,4	---
COEFICIENTE DE ARRASTE	K _R	0,027	---
COEFICIENTE DE PUNCIÓN	K _D	0,2	---
COEFICIENTE DE EFICIENCIA	K _E	0,7	---
RENOVACION EN AGUA	---	---	---
RENOVACION	---	---	---

TOLERANCIAS			
DIAMETRO	± 0,02 X / +0,03		
PASO	± 0,08 X / +0,06		
ESPESORES	+1,5 - 1,2		
ALICHO DE LA PLACA	0,05 TRIM		



HELICE CLT	
DISEÑO EXPERIMENTAL	
FECHA:	ESCALA: 1:1
PREPARADO: HELICE NATURALIA	PLANO:1P

Bibliografía

- PEREZ GOMEZ – BARREIRO BRIONES Nueva Teoría de la Impulsión Generalizada
- PEREZ GOMEZ, Gonzalo - Nuevo Procedimiento para Predimensionar las Características de un Propulsor Convencional de Rendimiento Optimo
- PEREZ GOMEZ, Gonzalo - Una innovación en el Proyecto de Hélices

- PEREZ GOMEZ, Gonzalo – Correcciones a la Teoría Clásica de la Impulsión y Habilitación de la misma para el diseño de propulsores.
- PEREZ GOMEZ; GONZALEZ ADALID – Optimización del sistema propulsor de un buque – Nueva teoría de la impulsión generalizada
- STERVELD, O. - Investigation on Different Propeller Types – M.N.E.
- TROOST, L. - Open Water Test Series with Modern Propeller Forms
- RUIZ FORNELLS; PEREZ GOMEZ – Resultados a plena escala de los primeros propulsores TVF
- ZATARAIN, G. – Experiencia con hélices CLT