MECANICA DE LOS FLUIDOS Y MAQUINAS FLUIDODINAMICAS
Dr. Ing. Santiago A. Urquiza
Profesor Titular
Dpto Mecánica- Fac. de Ingeniería- UNMDP
Versión Preliminar - No Revisada-03/06/1005:59

Análisis dimensional de hélices propulsoras

En principio, el análisis dimensional de hélices propulsoras pareciera ser similar al de las bombas rotodinámicas. Sin embargo, las bombas rotodinámicas funcionan acopladas a un circuito hidráulico independiente. Esta cuestión determina que para el análisis dimensional el caudal sea una variable independiente, ya que puede variar de acuerdo a las condiciones del circuito. Como una primera aproximación, puede asumirse que los propulsores marinos funcionan en una corriente libre, es decir, despreciando la interacción con el buque. Esta situación equivale a la de una bomba conectada a un circuito muy corto que no opone resistencia y que, por lo tanto, funciona a caudal máximo y altura despreciable. En ese caso el caudal deja de ser una variable independiente y pasa a ser una variable dependiente más. Por lo tanto, en las relaciones funcionales para el torque, la potencia, etc. de este tipo de propulsores navales el caudal no deberá postularse como una de las variables independientes de las que dichas cantidades dependan.

Por otra parte, sería legítimo incluir como variables (al igual que para el caso de las bombas) los efectos de la viscosidad y la rugosidad. De esta manera, el análisis dimensional conducirá a relaciones con dependencia del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Pero dado que para elementos nuevos los resultados experimentales se muestran relativamente insensibles a éstas dos variables, las mismas suelen ser omitidas de las relaciones funcionales usadas corrientemente. Es importante tener en cuenta que la pérdida de rendimiento a lo largo de la vida útil de la hélice podrá estar asociada a una variable similar a la rugosidad que tendrá que ver con el deterioro de la superficie por erosión, por incrustaciones y otros efectos como la corrosión. Pero eso es algo que no se tiene en cuenta, al menos en primera instancia en el proceso de selección y diseño de los propulsores.

Otra variable a tener en cuenta y que produce deterioro en el rendimiento es la diferencia entre la presión existente en el entorno de la hélice y la correspondiente presión de vapor del agua a la temperatura de trabajo, p-pv. Observar que en el caso naval la presión p será p= po + γ . h , donde h es la profundidad del eje de la hélice.

Si denominamos con *T* el empuje (Thrust) generado por la hélice, tendremos entonces una función que determinará la relación de la cual el empuje dependerá,

$T = \mathrm{f}\,(N, V_a, D, \rho, \mu, \varepsilon , p\text{-}p_v, h, g)$

siendo *N*: RPS (velocidad de giro del impulsor), V_a: velocidad de corriente libre (velocidad del buque o avance), *D*: diámetro del impulsor , ρ: densidad, μ: viscosidad, ε: rugosidad, $p\text{-}p_v$: presión disponible a cavitación, *h*: profundidad y *g*: aceleración de la gravedad.

Aplicando el teorema Pi con *N*, ρ y *D* como variables repetitivas, tendremos

$$\frac{T}{\rho N^2 D^4} = \tilde{f}\left(\frac{V_a}{ND}, \frac{\mu}{\rho N D^2}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho N^2 D^2}, \frac{h}{D}, \frac{gD}{N^2 D^2}\right)$$

Definimos

$K_T = \dfrac{T}{\rho N^2 D^4}$ Coeficiente de Empuje, observar que es la Fuerza de Empuje medida en unidades de presión de estancamiento asociada a la velocidad tangencial del rotor *N.D*, actuando en un área D^2 que es proporcional a la sección barrida por la hélice.

$J = \dfrac{V_a}{ND}$ Grado o Número de Avance, y que no es mas que la velocidad del buque medida en unidades de velocidad tangencial de la hélice.

$\mathrm{Re} = \dfrac{\rho N D^2}{\mu}$ Nro de Reynolds asociado a las tensiones de corte por rotación de la hélice

$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{D}$ Rugosidad relativa, medida en proporción al diámetro del impulsor

$h_r = \dfrac{h}{D}$ Profundidad relativa

$C_v \, \dfrac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho N^2 D^2}$ Coeficiente o Índice de Cavitación

$F' = \frac{ND}{\sqrt{gD}} = \frac{ND^{1/2}}{\sqrt{g}}$ Nro de Froude. Ahora bien, *F'* puede ser reemplazado por:

$$F = F'\sqrt{\frac{D}{h}} = \frac{ND}{\sqrt{gh}}$$

Que es el Nro de Froude verdaderamente significativo, que va a medir (el cuadrado de su inversa) el peso de la columna líquida por encima del eje del impulsor en proporción a la presión dinámica (energía cinética asociada a las velocidades de impulsión *ND*).

Por lo tanto, se tendrá en general que

$$K_T = \hat{f}(J, \text{Re}, \varepsilon_r, h_r, F, C_v)$$

Ahora bien, se sabe que el Re no influye significativamente. Además, las hélices nuevas tiene muy poca rugosidad superficial y su influencia es despreciable. Por otra parte, la profundidad relativa es parte de la semejanza geométrica y por lo tanto podría omitirse. Asimismo, las curvas de hélices se dan para casos suficientemente sumergidos, de tal manera que la formación de olas por efecto de la impulsión de la hélice se asume despreciable, de tal manera que F puede omitirse del análisis. Esto debido a que a suficiente profundidad su variación no producirá ningún cambio en el comportamiento de la hélice. Por último, suele suceder que las hélices se comparan asumiendo cavitación despreciable, para luego verificar su incidencia posteriormente. De tal manera que muchas veces encontramos gráficos del tipo $K_T = \hat{f}(J)$

Un análisis similar puede hacerse para el torque aplicado, el cual conducirá a una relación del tipo: $K_Q = \breve{f}(J)$

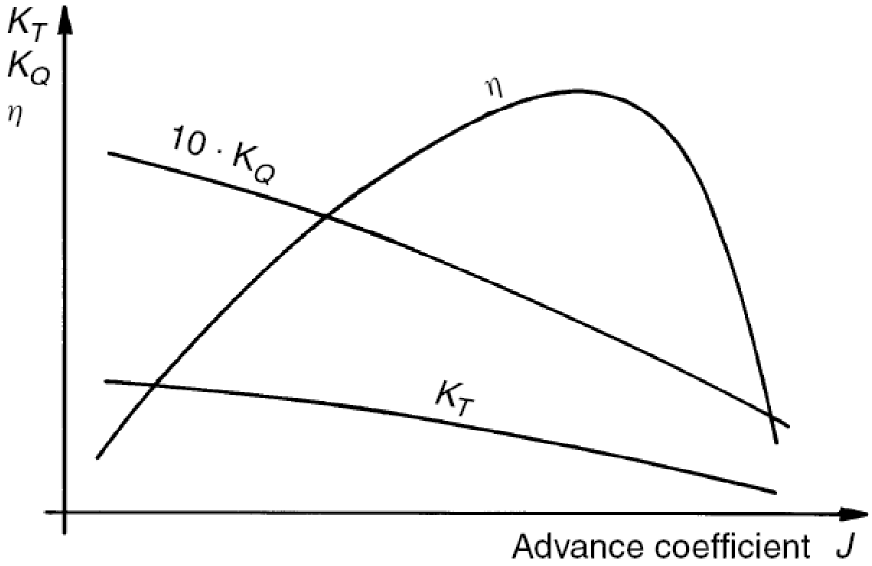
$K_Q = \frac{Q}{\rho N^2 D^5}$ siendo K_Q el coeficiente de torque.

A su vez podrá definirse un rendimiento (adimensional de por sí) como:

$\eta = \frac{T.V_a}{2\pi NQ}$ que representa la fracción de potencia que aplicada al eje va a parar a impulsión efectiva del buque. Observar que es posible escribir:

$$\eta = \frac{K_T \, \rho N^2 D^4}{K_Q \, \rho N^2 D^5} \frac{V_a}{2\pi N} = \frac{K_T}{K_Q} \frac{V_a}{2\pi ND} = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$$

Usualmente se dan gráficos como el siguiente, donde los demás parámetros se expresan como función de *J*.

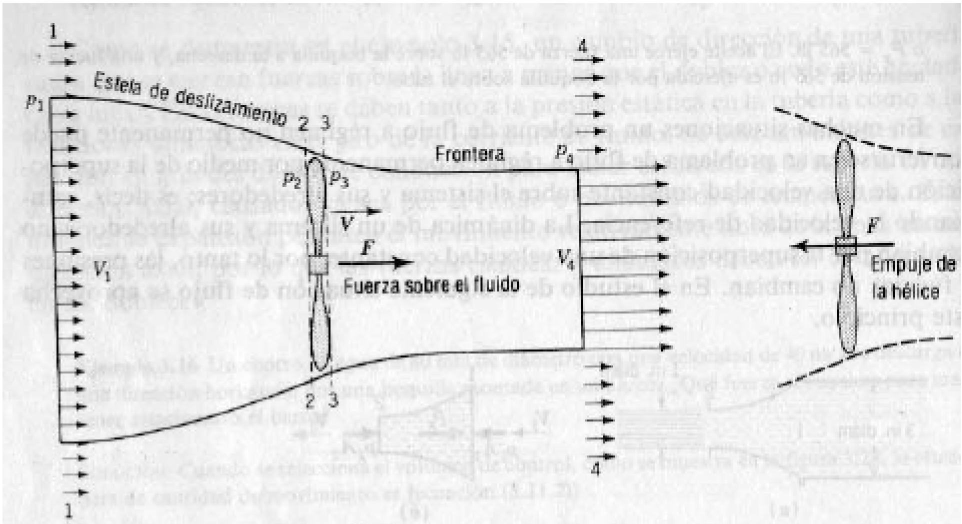


Este tipo de diagrama se suele implementar computacionalmente, lo que facilita el trabajo de selección de los impulsores.

Es posible encontrar otros coeficientes en los cuales el empuje y el torque se han adimensionalizado usando como referencia la velocidad de corriente libre V_a , en lugar de *ND*. Baste con dividir K_T o K_Q por J^2 , para lograr coeficientes de este tipo.

MECANICA DE LOS FLUIDOS Y MAQUINAS FLUIDODINAMICAS
Dr. Ing. Santiago A. Urquiza
Profesor Titular
Dpto Mecánica- Fac. de Ingeniería- UNMDP

Teoría de cantidad de movimiento para hélices



Hélice en funcionando en corriente libre

Como se observa en la figura precedente, la hélice se encuentra estacionaria en una corriente libre con velocidad V_1. También podría pensarse en una hélice moviéndose con velocidad V_1 en un fluido en reposo. La función de la hélice es proporcionar una fuerza de propulsión F a través del cambio en la cantidad de movimiento que produce en la corriente fluida. La sección 1 se define por aquella en la cual el fluido que se aproxima a la hélice todavía no ha sido perturbado por la presencia de las misma. La sección 4 esta caracterizada por la recuperación de la presión a los valores no perturbados, es decir, $p_4 = p_1$. Las secciones 2 y 3, son las secciones de entrada y salida de la hélice y pueden asumirse con igual área A. La zona definida como estela de deslizamiento puede asumirse a presión p_1.

Considerando un volumen de control definido por las secciones 1, 4 y la estela de deslizamiento, se llega rápidamente a que

$$F = M' \Delta V \text{ o } F = \rho\, Q\, (V_4 - V_1)$$

Por otro lado si nos concentramos en el volumen de control delimitado por las secciones 2 y 3 tendremos

$$F = (p_3 - p_2).A$$

Dado que $Q = V.A$, con V la velocidad del fluido en la hélice y A el área barrida por las aspas, resulta

$$(p_3 - p_2) = \rho\, V\, (V_4 - V_1) \quad (*)$$

Planteando las ecuaciones de Bernoulli entre 1 y 2 y, entre 3 y 4 y teniendo en cuenta que $p_4 = p_1$, resulta

$$p_1 + \tfrac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \tfrac{1}{2} \rho V_2^2$$
$$p_3 + \tfrac{1}{2} \rho V_3^2 = p_4 + \tfrac{1}{2} \rho V_4^2$$

$$p_3 - p_2 = \tfrac{1}{2} \rho (V_4^2 - V_1^2) \quad (**)$$

De las ecuaciones (*) y (**) se llega a

$$V = (V_4 + V_1)/2$$

Esta ecuación muestra que la velocidad en la hélice es el promedio de las velocidades corriente arriba y debajo de la misma.

En referencia a la potencia desarrollada por la misma habrá que pensar que la potencia útil para desplazamiento de carga por la acción propulsora de la hélice será

$$\mathrm{Wu} = F.V_1 = \rho \mathrm{Q} (V_4 - V_1) V_1$$

Suponiendo un rendimiento hidráulico perfecto, es decir, que toda la potencia puesta en el eje de la hélice va a parar al fluido, tendremos que la potencia consumida Ws por el propulsor será el producto del caudal por la variación de la energía cinética entre 1 y 4, ya que no hay variaciones de altura ni de presión. De tal manera se tiene que

$$\mathrm{Ws} = \rho Q(\tfrac{1}{2}V_4^2 - \tfrac{1}{2}V_1^2)$$

Así es posible definir un rendimiento respecto de la capacidad propulsora de la hélice que medirá la eficiencia mecánica teórica de la misma:

$$\eta = \mathrm{Wu} / \mathrm{Ws} = 2 V_1 /(V_4 + V_1) = V_1 / \mathrm{V}$$

Definiendo

$$\eta = 1 / (1+\Delta \mathrm{V}/2 V_1)$$

Esta última ecuación pone de manifiesto que la eficiencia máxima es para aquellas hélices que aumentan lo menos posible la velocidad de la estela. La hélice más eficiente sería aquella que se enrosca en el agua prácticamente sin moverla. La cuestión es que en ese caso la fuerza propulsora se anula. Es así que la eficiencia de las hélices marinas ronda el 60%.