



HIDRODINÁMICA, RESISTENCIA Y PROPULSIÓN MARINA

Equipo docente:

Dr. David Boullosa Falces

Dr. Alberto López Arraiza

“Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión Marina”

Tema 1: Resistencia al avance

Tema 2: Materiales, rugosidad y recubrimientos

Tema 3: Propulsores y timones

Tema 4: Diseño y rendimiento de hélices

Tema 5: Potencia instalada

Tema 4: Diseño y rendimiento de hélices

Objetivos del tema 4

- Estudiar las consideraciones técnicas del diseño de hélices.
- Calcular las características técnicas de hélices serie B
- Conocer los factores hidrodinámicos de interacción casco-hélice
- Conocer los tipos y las consecuencias de la cavitación en las hélices.

Tema 4: Diseño y rendimiento de hélices

4.1. Introducción.....	5
4.2. Elementos geométricos de una hélice.....	6
4.3. Características del rendimiento de propulsores.....	10
4.3.1. Definiciones y unidades.....	10
4.3.2. Series estándar de hélices: serie B.....	11
4.3.3. Interacción casco-hélice.....	13
4.3.3.1. Coeficiente de estela.....	14
4.3.3.2. Variación del empuje.....	16
4.3.3.3. Eficiencia relativa rotativa.....	17
4.3.3.4. Eficiencias de la propulsión de un buque.....	18
4.3.4. Cavitación.....	21
4.4. Referencias bibliográficas.....	24

4.1. Introducción

Las consideraciones geométricas en el diseño y la fabricación posterior de la hélice influyen en:

- ✓ Nivel de vibraciones.
- ✓ Características hidrodinámicas: absorción de potencia y rendimiento.
- ✓ Resistencia mecánica.
- ✓ Reparabilidad.
- ✓ Resistencia a la corrosión, erosión y cavitación.



Figura 1. Hélice del buque escuela "Saltillo" [1].

4.2. Elementos geométricos de una hélice

Diámetro: Es el círculo máximo que describen los extremos de las palas en su rotación.

Paso o *pitch*: Se llama paso a lo que avanza una hélice en una vuelta completa.

Línea de referencia de la hélice ó *Propeller reference line*: Línea normal al eje de la hélice (Figura 2(a)).

Línea de referencia de la pala ó *Blade reference line*. Línea que forma el eje de la pala (Figura 2(b)).

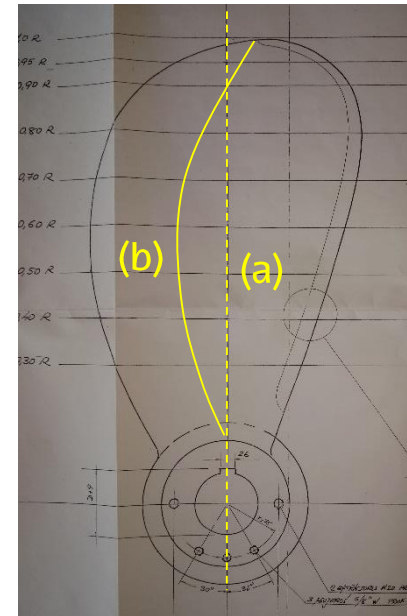


Figura 2. Elementos básicos de la geometría de una hélice [1]

4.2. Elementos geométricos de una hélice

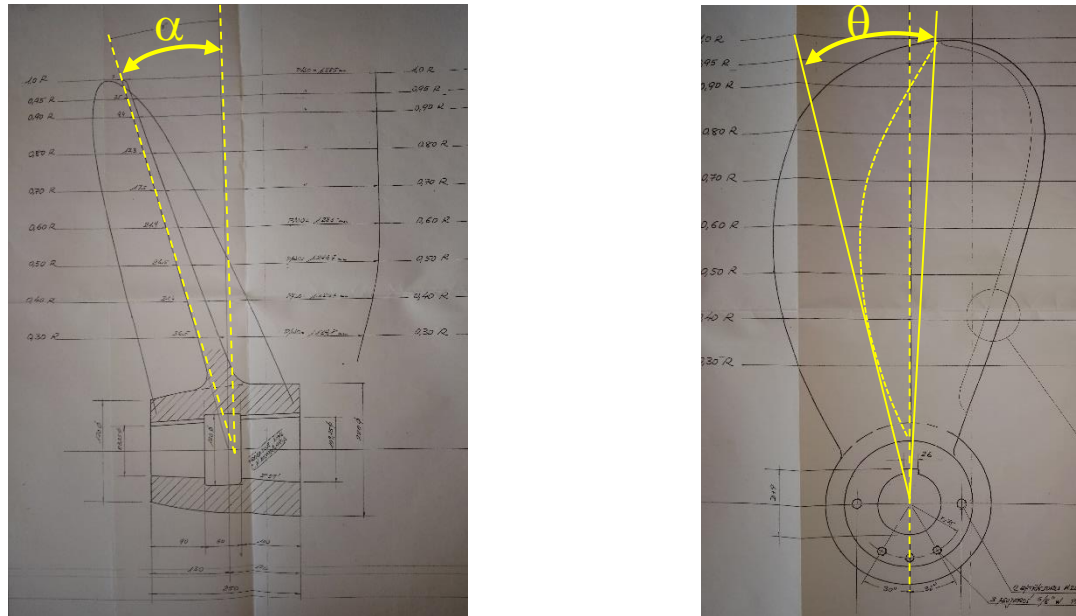


Figura 3. Lanzamiento axial (α) y circunferencial (θ) de una hélice [1]

Lanzamiento axial ó *Rake angle* (α). Es el grado de inclinación de la pala hacia atrás en relación al eje. Dicho ángulo varía entre 5 y 20° (Figura 3).

Lanzamiento circunferencial o *Skew angle* (θ). Es el ángulo entre la tangente desde el centro a la línea de referencia de la pala y el extremo de la misma (Figura 3).

4.2. Elementos geométricos de una hélice

Secciones hidrodinámicas: secciones cilíndricas que componen la pala de la hélice (Figura 4).

Borde de ataque ó *leading edge* (LE): entrada de la pala en el agua (Figura 4).

Borde de salida ó *trailing edge* (TE): salida del agua por el perfil de la pala (Figura 4).

Localización del máximo espesor (*thickness*) (Figura 4).

Localización de la línea generatriz (*Mean line*) (Figura 4).

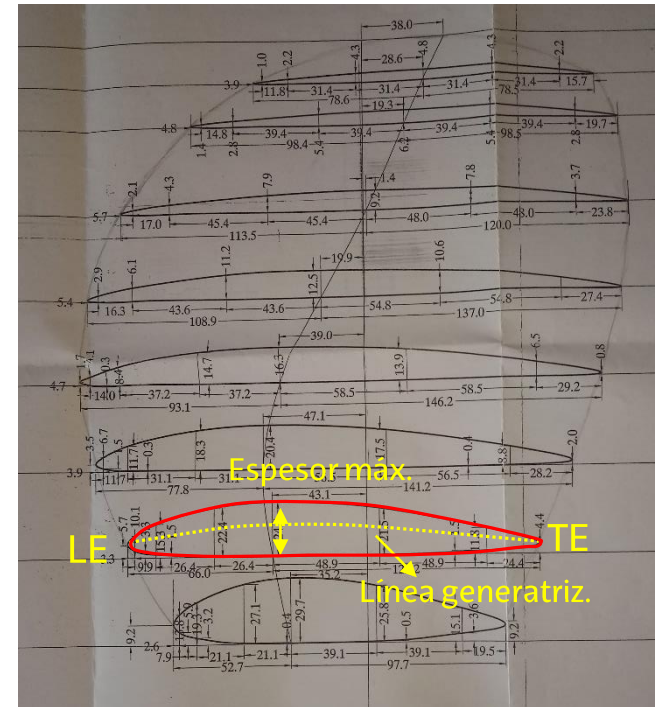


Figura 4. Secciones cilíndricas de la pala de una hélice [1]

4.2. Elementos geométricos de una hélice

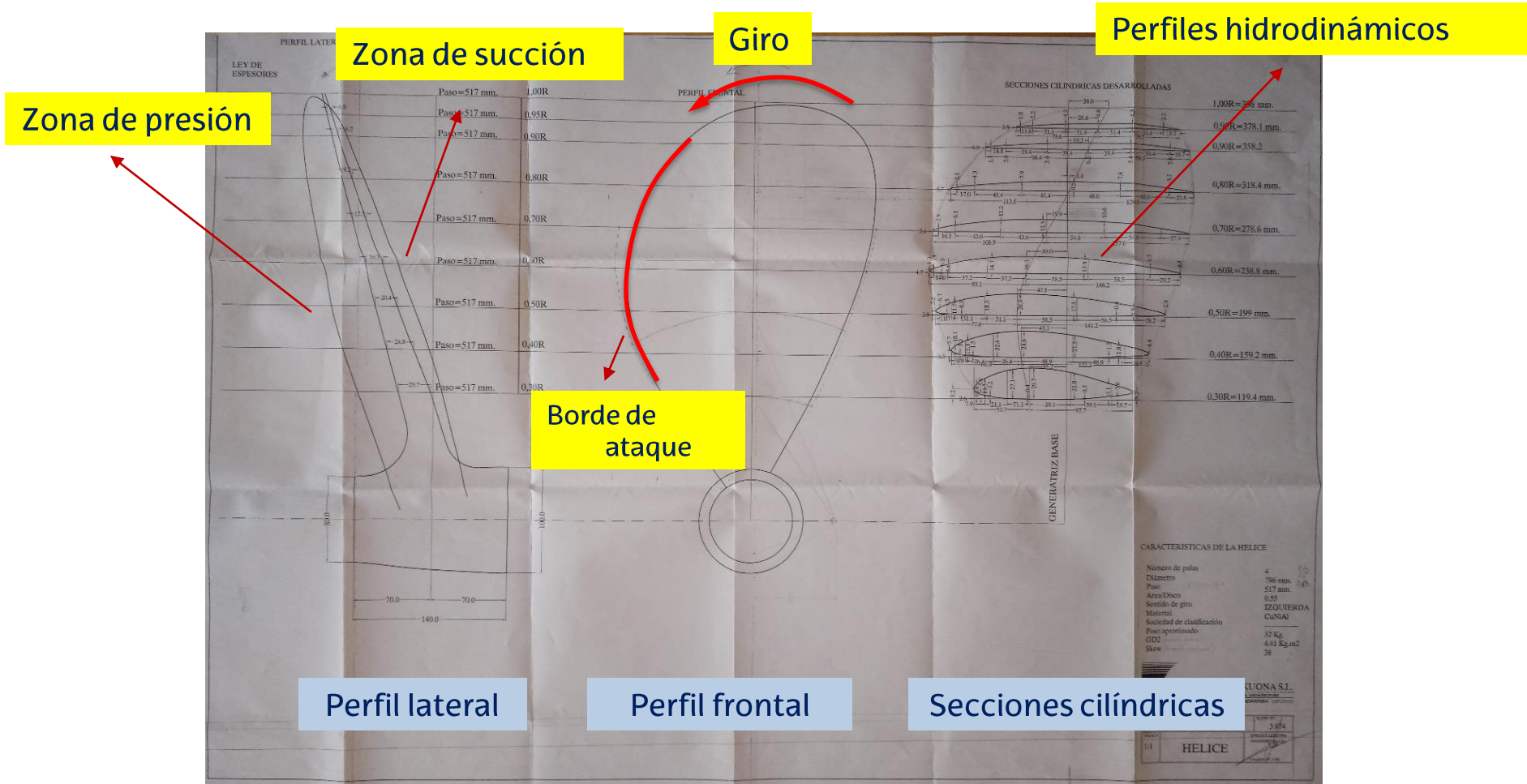


Figura 5. Plano constructivo de la hélice del Saltillo [1]

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.1. Definiciones y unidades

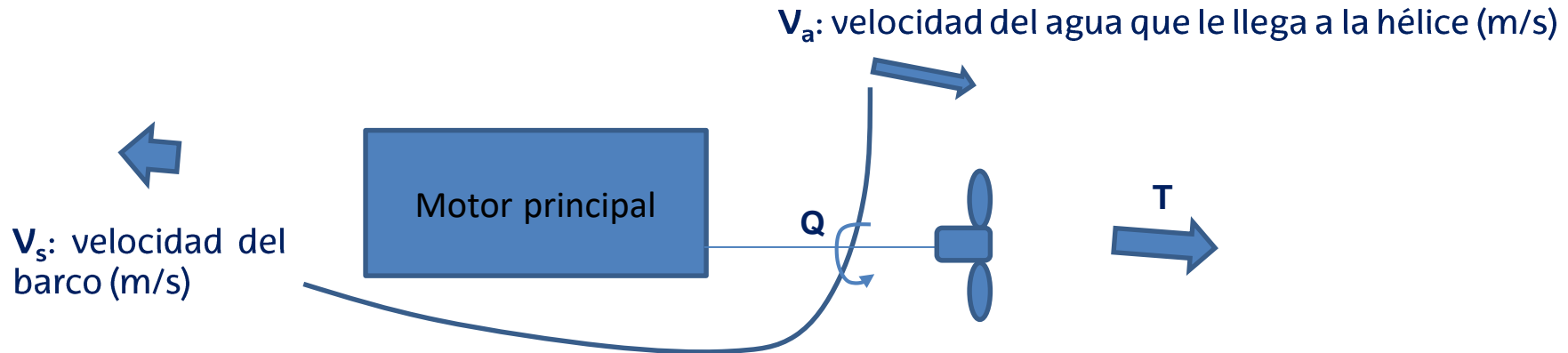


Figura 6. Fuerzas, momentos y velocidades en la hélice [1]

$$P_r = P_D = 2\pi nQ$$

$P_r = P_D$: Potencia entregada a la hélice (W)

Q : torque o par de torsión necesario para asegurar la rotación (N m)

n : velocidad de rotación de la hélice (rev/s)

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D}$$

η_B : rendimiento de la hélice

$$P_T = TV_a$$

P_T : Potencia de empuje (W)

T : thrust o fuerza de empuje axial de la hélice (N)

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.2. Series estándar de hélices: serie B

Las series estándar de Wageningen o Troost B, son las más utilizadas en hélices de paso fijo para barcos de carga general, petroleros,... La familia de hélices serie B (210 modelos) se obtuvo variando los parámetros:

- P/D : 0,5 a 1,4
- Z : 2 a 7
- $BAR = A_E/A_0$: 0,3 a 1,05

Denominación: BZ.y

B: representa la serie tipo B

Z: representa el número de palas

y: representa la relación A_E/A_0

Ejemplo: B4.85 (hélice serie B, 4 palas y $A_E/A_0 = 0,85$)



Figura 7. Hélice serie B [2]

Diagramas K_T - K_Q -J: obtenidos experimentalmente y utilizados para calcular los coeficientes característicos del comportamiento de las distintas hélices.

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.2. Series estándar de hélices: serie B

Conociendo las condiciones de funcionamiento de la hélice (empuje, par, diámetro...) se puede calcular su eficiencia a través de los diagramas K_T , K_Q , J . (Disponibles en el siguiente link: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Open_water_propeller_characteristic.svg)

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$J = \frac{V_a}{n D}$$

K_T : coeficiente de empuje J : coeficiente de avance

K_Q : coeficiente de par Q : par de giro (Nm)

T : empuje (N) D : diámetro de la hélice (m)

n : velocidad de rotación (rev/s) ρ : densidad del agua de mar ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$)

V_a : velocidad del agua en la hélice (m/s) \approx velocidad del barco V_s

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

Al operar detrás del casco del barco, las propiedades hidrodinámicas de la hélice (empuje, par y eficiencia) varían respecto a trabajar en aguas abiertas "open water" debido a que el casco, a lo largo de su geometría y en particular en la popa, puede frenar y alterar las condiciones de velocidad y turbulencia del agua que le llega a la hélice.

Los parámetros que tienen en cuenta el efecto del casco del barco sobre la operatividad de la hélice son los denominados **coeficientes de carena**:

1. Coeficiente de estela (*wake gain*): "w"
2. Variación del empuje (*thrust deduction*): "t"
3. Eficiencia relativa rotativa (relative rotative efficiency): " η_R "

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.1. Coeficiente de estela

El coeficiente de estela o *wake gain* (w) se debe a que el casco del barco genera un flujo viscoso (capa límite o boundary layer) y no viscoso (flujo potencial o potential flow) (Figura 8) → velocidad del agua que le llega a la hélice (V_A) disminuye frente a la velocidad del barco (V ó V_S) (Figura 9).

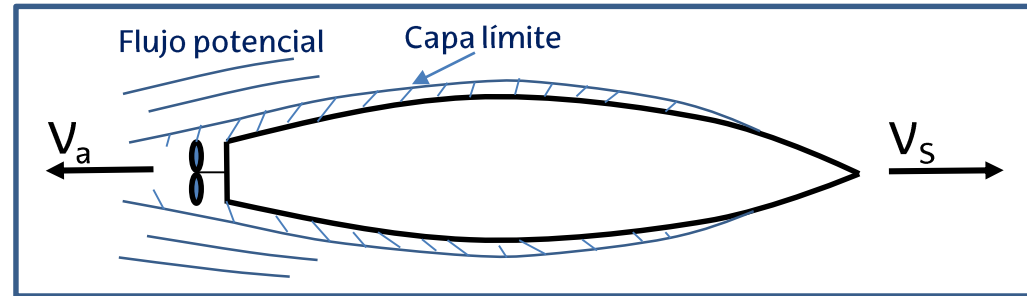


Figura 8. Capa límite y flujo potencial alrededor del casco del buque [1]

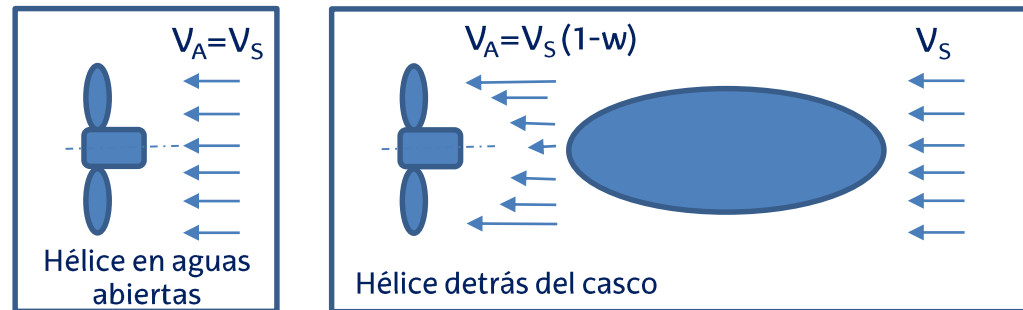


Figura 9. Flujo del agua que le llega a la hélice en aguas abiertas y con casco [1]

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.1. Coeficiente de estela

- Buques con una sola hélice, $w = 0,25-0,45 \rightarrow V_A = (0,8-0,55) V_S$.
- (w) aumenta cuanto mayor sea el coeficiente de bloque C_B .
- Buques con doble hélice $w \downarrow$ ya que las hélices están fuera del cinturón de estela.
- (w) aumenta cuando el casco está sucio
- (w) elevado puede dar cavitación
- Las toberas reducen (w) al homogeneizar la estela del agua que se dirige hacia la hélice
- Fundamental: buen diseño de la popa del barco que encamine el agua hacia la hélice para obtener una buena estela y un (w) bajo.

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.2. Variación del empuje

La variación o pérdida del empuje *thrust deduction (t)* se debe a que el empuje (T) desarrollado por la hélice debe superar a la resistencia total del casco (R) y a la fuerza F adicional generada por la succión de la hélice (T=R+F) (Figura 10):

$$t = \frac{\Delta R}{T} = \frac{F}{T} = \frac{T - R}{T} = 1 - \frac{R}{T}$$

En general, "t" aumenta cuando "w" aumenta. El diseño del casco es una vez más fundamental. Valores habituales de "t" son: t= 0,6w para buques de un solo eje y t=w para buques de doble eje.



Figura 10. Distribución de fuerzas generadas en un buque [1]

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.3. Eficiencia relativa rotativa

La eficiencia relativa rotativa *relative-rotative efficiency* (η_R) tiene en cuenta la diferencia de eficiencia de un propulsor trabajando en aguas abiertas o detrás del casco del buque.

$$\eta_R = \frac{\eta_B}{\eta_0}$$

η_B : eficiencia de la hélice detrás del casco
 η_0 : eficiencia de la hélice en aguas abiertas

En buques de una sola hélice η_R varía entre 1,0-1,07; es decir, la rotación del agua tiene efectos positivos. Buques con doble hélice y casco simple baja el rendimiento hasta 0,98.

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.4. Eficiencias de la propulsión de un buque

Al igual que se mostró en el tema 1, la figura 11 muestra todas las fuerzas, potencias y eficiencias involucradas en la propulsión de un buque.

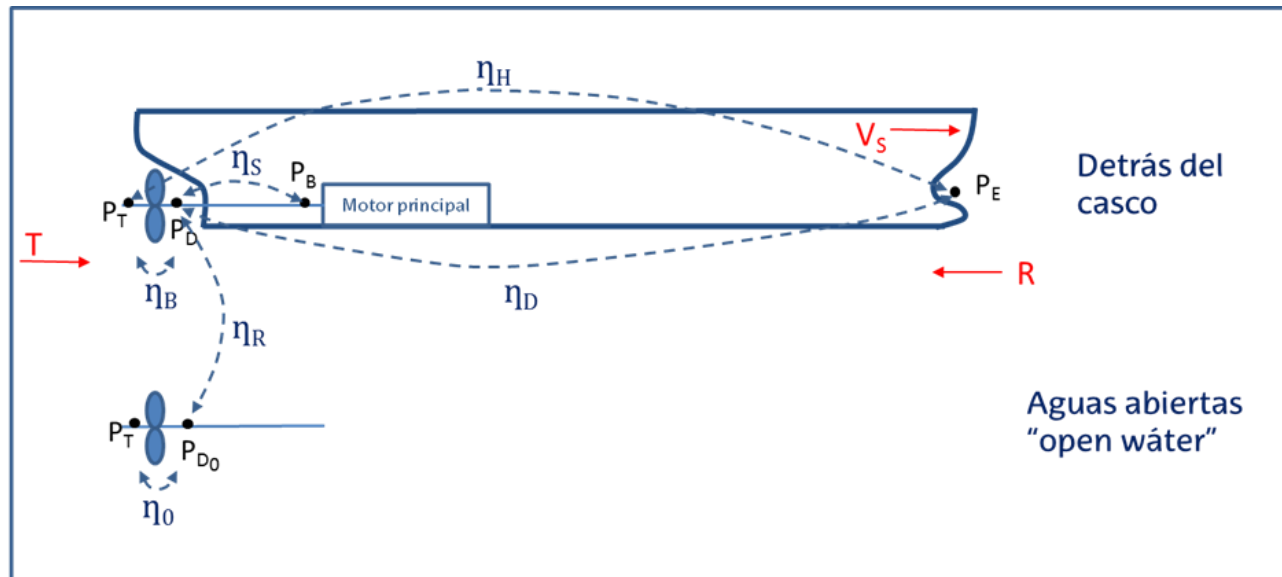


Figura 11. Distribución de potencias y eficiencias en un buque [1]

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.4. Eficiencias de la propulsión de un buque

Las eficiencias más utilizadas para caracterizar la propulsión de un buque son las siguientes:

- **Eficiencia quasi-propulsiva (η_D):** es la relación entre la potencia efectiva (P_E) y la potencia entregada a la hélice (P_D).

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R$$

η_H : eficiencia del casco $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$

η_0 : eficiencia de la hélice en aguas abiertas

η_R : eficiencia relativa rotativa

- **Eficiencia propulsiva o eficiencia total (η_T):** es la relación entre la potencia efectiva (P_E) y la potencia desarrollada por la máquina (P_B).

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_B} = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S$$

η_S : eficiencia en el eje

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.3. Interacción casco-hélice

4.3.3.4. Eficiencias de la propulsión de un buque

Ejemplos de últimos diseños de cascos



Figura 12. (a) Atunero “Ljubica” construido por Zamakona (2014) dispone de apéndices a lo largo del casco para dirigir el agua a la zona de la hélice y (b) barco de apoyo “Esvag Albert Betz” en construcción con proa diseñada para gran oleaje (2019) [1]

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.4. Cavitación

Las diferencias de presión generadas por la hélice dan lugar al fenómeno de la “cavitación” con la consiguiente generación y explosión de burbujas.

Tipos:

- 1-Cavitación del núcleo ó *Hub cavitation*: cavitación que sale del núcleo de la hélice. No afecta a su rendimiento, sí al timón.
- 2-Cavitación de borde ó *Tip cavitation*: nace de los extremos de las palas. No afecta al rendimiento de la hélice, sí al timón.
- 3-Cavitación de lámina ó *Sheet cavitation*. Crece del extremo de la pala a la superficie interior. Puedo provocar erosión y desgaste de material.

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.4. Cavitación

Tipos:

- 4- Cavitación de burbujas ó *Bubble cavitation*. Explosión violenta de burbujas en la cara de succión. Provoca vibración, ruido y erosión del material.
- 5- Nube de cavitación ó *Cloud cavitation*. Nube de pequeñas burbujas que se desplazan.
- 6- Cavitación con el casco ó *Propeller-hull cavitation*. Vórtice entre la punta de la pala y el casco. Genera ruido y vibraciones.
- 7- Cavitación en la raíz ó *Root cavitation*. Cavitación en la raíz de las palas por la presencia de soportes...(hélices de paso variable).

4.3. Características del rendimiento de propulsores

4.3.4. Cavitación

Efectos:

- Caída del rendimiento. Si la cavitación afecta al 20-25% superficie de la pala, $\eta_0 \downarrow\downarrow\downarrow$.
- Ruido
- Vibraciones
- Erosión

Prevención:

- Mantener la hélice limpia, libre de bio-fouling
- Navegar a velocidad de giro de la hélice por debajo de su inicio de la cavitación.
- Evitar cambios bruscos de las solicitaciones de la hélice (empuje/paso)
- En la fase de diseño, aumentar la relación A_E/A_0 reduce la posibilidad de cavitación
- Sistema PBCF[®] : elimina la "hub cavitation".



4.3. Referencias

- [1] Elaboración propia. LOPEZ-ARRAIZA, A. UPV/EHU (2019)
- [2] US GOV. [Consulta: 17/02/2019]. Dominio público, disponible en:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ship-propeller.jpg>



HIDRODINÁMICA, RESISTENCIA Y PROPULSIÓN MARINA

Equipo docente:

Dr. David Boullosa Falces
Dr. Alberto López Arraiza