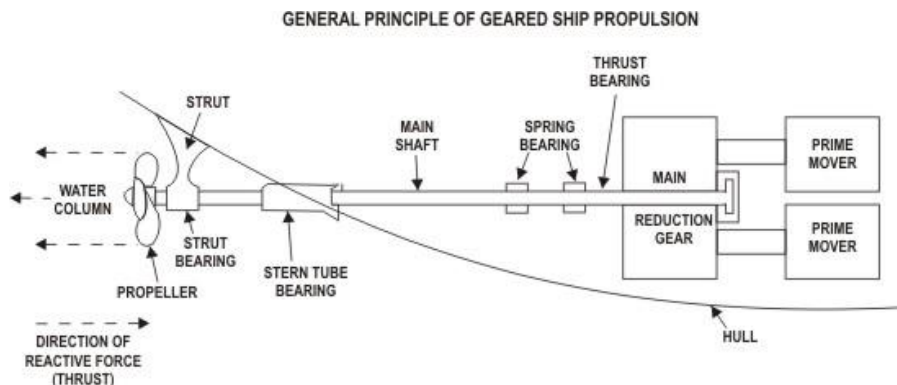
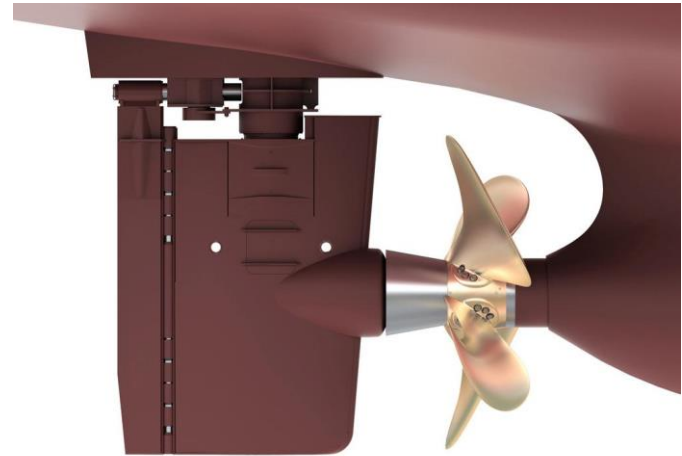


# VII. Propulsión

## Objetivos:

1. Definir que es propulsión y hacer algunos comentarios generales referentes a las máquinas empleadas para dar energía al propulsor de un buque.
2. Definir los diferentes tipos de potencia y eficiencias que se consideran en la propulsión naval.
3. Describir brevemente la nomenclatura usada en los perfiles aerodinámicos y en los perfiles hidrodinámicos.
4. Hacer algunos comentarios generales referente a la teoría bidimensional y tridimensional de perfiles hidrodinámicos; así como algunos comentarios generales referentes a las teorías hidrodinámicas para el análisis de propulsores.



# VII. Propulsión

## 1. Introducción

Como se comentó en la clase anterior, un buque en movimiento experimenta fuerzas que se oponen a ese movimiento. Dichas fuerzas deben ser vencidas por medio del empuje suplido por algún mecanismo. En un inicio, este mecanismo, consistía de remos, y luego de dispositivos como: jets, ruedas de paletas, y propelas de diferentes formas.

### ¿Qué es propulsión?

Propulsión es el movimiento generado a partir de la fuerza o empuje que es suplido.

### Tipo de máquinas empleadas para dar energía al propulsor de un buque

Al seleccionar la máquina que alimentará el sistema de propulsión de una embarcación dada, muchos factores deben ser tomados en consideración. Estos factores incluyen: peso, espacio disponible, costo inicial, confiabilidad de la máquina, vida útil estimada, flexibilidad, ruido, costos de mantenimiento, consumo de combustible, entre otros.

Los motores recíprocos a vapor que iban de 1 hasta 4 cilindros dominaron el campo de la propulsión de buques hasta 1910. Desde entonces, estos motores han caído en desuso siendo reemplazados primero por las turbinas de vapor, y más recientemente por motores diésel. Sin embargo, ha de decirse que en ciertas aplicaciones especiales también se utilizan turbinas a gas.

## 2. Definición de potencia

La eficiencia de los varios tipos de motores empleados en la propulsión marina no es evaluada bajo una misma base; producto de que es o muy inconveniente o prácticamente imposible medir con precisión la potencia de salida de la misma forma para todos estos tipos de motores.

# VII. Propulsión

## 2. Definición de potencia

Los motores diesel (que son los más comunes) son usualmente evaluados en términos de la potencia de freno (*breake power*,  $P_B$ ), mientras que las turbinas de vapor son evaluadas en términos de la potencia de eje (*shaft power*,  $P_S$ ).

Recuerde que la unidad del Sistema Internacional para la potencia es el Watt ( $1W = 1N \cdot m/s$ ), y que el término caballo de potencia (*horsepower*, *hp*) aún es usado pero tiene dos definiciones diferentes:

$$1 \text{ hp inglés} = 550 \text{ lbf} \cdot \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cong 745.7W \quad \text{y} \quad \text{un} \\ 1 \text{ hp métrico} = 75 \text{kgf} \cdot \text{m/s} \cong 735.5W.$$

La potencia de freno usualmente es medida directamente en el cigüeñal por medio de un medidor de torsión o un dinamómetro en pruebas hechas en taller. Esta potencia es calculada por medio de la siguiente expresión:

$$P_B = (2\pi n)Q_B$$

Donde  $n$  es la rata de rotación en revoluciones por minuto, y  $Q_B$  es el torque de freno en  $N \cdot m$ . Esta potencia también podría ser determinada a partir de la velocidad angular del cigüeñal  $\omega$ , recordando que  $\omega = 2\pi n$ .

La potencia de eje, en tanto, es la potencia transmitida a través del eje a la propela. Para buques que operan con motores diesel, la potencia de eje será prácticamente igual a la de freno para máquinas conectadas directamente con la propela (generalmente máquinas de baja velocidad). Para motores diesel de media o alta velocidad, la potencia del eje será inferior a la de freno producto de las perdidas en la transmisión.

# VII. Propulsión

## 2. Definición de potencia

La potencia de eje, usualmente es medida lo más cerca posible de la propela por medio de un medidor de torsión. Este instrumento mide el ángulo de giro o el desplazamiento angular entre dos secciones del eje, donde este ángulo es directamente proporcional al torque transmitido  $Q_S$ . Para un eje sólido de sección transversal circular, el torque del eje estará dado por:

$$Q_S = \left( \frac{\pi d_s^4}{32} \right) \frac{G_S \theta_S}{L_S}$$

Donde:  $d_s$  es el diámetro del eje en metros,  $G_S$  es el módulo de elasticidad al cortante del material que constituye el eje en  $N/m^2$  (generalmente con un valor de  $8.35 \times 10^{10} N/m^2$  para ejes de acero),  $L_S$  es la longitud del eje sobre la cual el torque es medido en metros, y  $\theta_S$  es el ángulo de giro en radianes.

Consecuentemente la potencia de eje estará dada por:

$$P_S = (2\pi n)Q_S$$

Ha de decirse que la potencia de eje se mide antes del *stern tube* y consecuentemente habrá pérdidas. Por lo tanto la potencia entregada  $P_D$  real será menor a la potencia de eje.

A medida que la propela impulsa al buque a través del agua a una determinada velocidad de avance  $V_A$ , se desarrolla el empuje  $T$  requerido para el avance. Por lo que también se puede definir la potencia de empuje como:

$$P_T = TV_A$$

Finalmente, la potencia efectiva es la resistencia total del casco  $R$  por la velocidad del buque,  $V$ :

$$P_E = RV$$

# VII. Propulsión

## 3. Eficiencia de propulsión

La eficiencia de una máquina operando es generalmente definida como la razón entre el trabajo útil o potencia obtenida a la potencia proporcionada para llevar a cabo esa operación. En el caso de un buque, la potencia útil obtenida es aquella que se usa para vencer la resistencia al movimiento a una determinada velocidad,  $P_E$ . La potencia proporcionada será definida dependiendo del tipo de motor empleado para dar energía al sistema de propulsión.

En el caso de turbinas de vapor, la eficiencia de propulsión global  $n_P$  está dada por:

$$n_P = \frac{P_E}{P_S}$$

Una forma quizá más conveniente de determinar esta eficiencia sería por medio del coeficiente o rendimiento cuasi propulsivo  $n_D$  y la eficiencia de transmisión del eje  $n_S$ :

$$n_D = \frac{P_E}{P_D}, \quad n_S = \frac{P_D}{P_S}$$

Por lo tanto:

$$n_P = n_D n_S$$

Casi siempre se suele suponer que  $n_S = 1$ .

En el caso de los motores diésel, la eficiencia de propulsión global está dada por la razón de  $P_E/P_B$ .

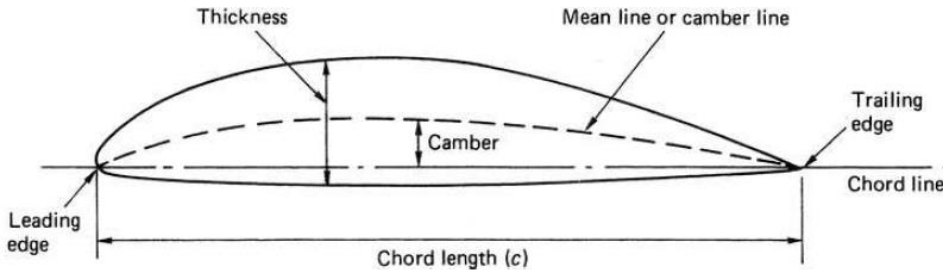
## 4. Geometría de perfiles

A inicios de 1930, NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*, hoy día NASA) desarrollo una serie de experimentos en perfiles aerodinámicos, los cuales se basaron en la geometría de perfiles generados de forma sistemática. Algunos de estos perfiles aerodinámicos han sido adoptados para el diseño de propelas marinas, y como tal han sido ampliamente usados por empresas manufactureras alrededor del mundo.

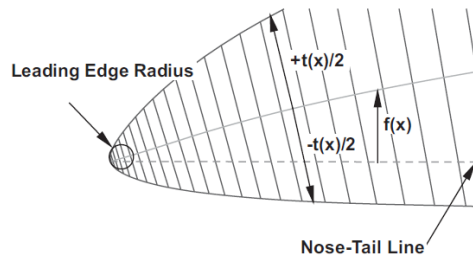
La figura siguiente muestra algunas definiciones importantes de un perfil aerodinámico.

# VII. Propulsión

## 4. Geometría de perfiles



- ✓ Línea media o de combadura (*mean or camber line*). Es el lugar geométrico de los puntos medios entre la superficie superior y la superficie inferior, en donde los puntos en dicha superficies se encuentran en líneas de acción perpendiculares a la línea de combadura.



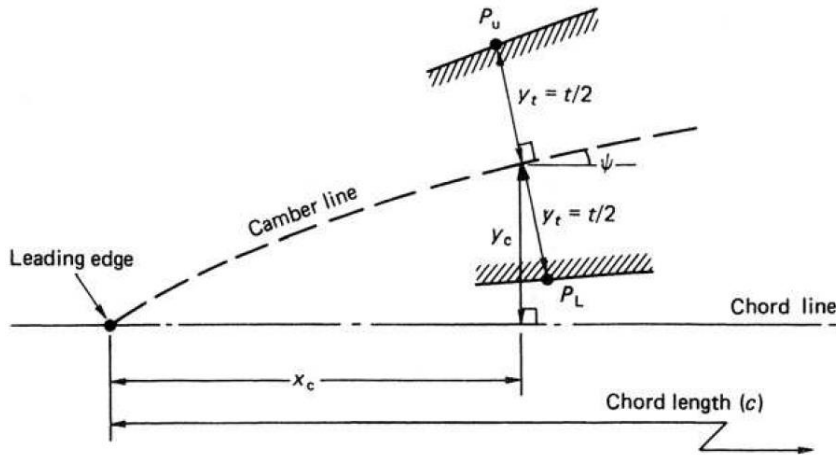
- ✓ Borde de ataque y de salida (*leading and trailing edge*). Son los extremos delanteros y traseros respectivos de la línea de combadura.

- ✓ Línea de cuerda. Es la línea recta que une al borde de ataque y al borde de salida. A su longitud se le conoce como longitud de cuerda ( $c$ ).
- ✓ La combadura (*camber*) es la distancia máxima entre la línea de combadura y la línea de cuerda.
- ✓ Espesor (*thickness*). Es la distancia entre la superficie superior e inferior del perfil, usualmente medida perpendicular a la línea de cuerda o perpendicular con respecto a la línea de combadura.
- ✓ Radio de borde de ataque (*leading edge radius*). Los bordes de ataque generalmente son circulares, teniendo un radio definido sobre un punto extremo en la línea de combadura.

# VII. Propulsión

## 4. Geometría de perfiles

El proceso de combinar una línea de combadura seleccionada con una línea de espesor para obtener la forma del perfil deseado se muestra a continuación.



Aquí la línea de combadura es definida a partir de los *offsets*  $y_c$  y los puntos  $P_u$  y  $P_L$  representan puntos en la superficie superior e inferior del perfil, de forma respectiva.  $P_u$  y  $P_L$  son los puntos extremos de una línea que es perpendicular a la línea de combadura en el punto de interés; y en este caso dicha línea define el espesor del perfil  $t$ .

Las coordenadas en la dirección  $x$  (en dirección de la línea de cuerda) y en la dirección  $y$  (en dirección perpendicular a la línea de cuerda, en el plano del dibujo mostrado) de los puntos  $P_u$  y  $P_L$  serían:

$$x_u = x_c - \frac{t}{2} \sin \psi, y_u = y_c + \frac{t}{2} \cos \psi$$

$$x_L = x_c + \frac{t}{2} \sin \psi, y_L = y_c - \frac{t}{2} \cos \psi$$

Donde  $\psi$  sería la pendiente de la línea de combadura en la posición  $x_c$ :

$$\tan \psi = \frac{dy_c}{dx_c} \rightarrow \psi = \tan^{-1} \left( \frac{dy_c}{dx_c} \right)$$

En el caso de los buques, el ángulo  $\psi$  tiende a ser pequeño por lo que las expresiones anteriores podrían aproximarse a:

# VII. Propulsión

## 4. Geometría de perfiles

$$x_u = x_c, y_u = y_c + \frac{t}{2}$$

$$x_L = x_c, y_L = y_c - \frac{t}{2}$$

Tenga presente de que el espesor  $t = f(x_c)$ .

Detalles referentes a todas las formas de los perfiles correspondientes a las series NACA para diferentes líneas de combadura puede encontrarlas en el documento de acceso público *Theory of Wing Sections*, I.H. Abbott y A.E. Doenhoff; Dover, New York, 1959. De todas estas series las que se suelen usar en propelas son la serie NACA 16, NACA 64, NACA 65, y NACA 66.

## 5. Comentarios generales acerca de la teoría bidimensional y tridimensional para el estudio de perfiles

Existe una gran cantidad de métodos existentes para predecir el flujo alrededor de perfiles bidimensionales o tridimensionales; estos pueden ser caracterizados de la siguiente manera:

1. Enfoque: analítico o numérico.
2. Modelo viscoso: métodos de flujo potencial (flujo no viscoso), métodos de flujos totalmente viscosos, o métodos que acoplan flujo potencial con la teoría de la capa límite.
3. Precisión: métodos exactos o aproximados (linealizados o parcialmente linealizados).

Ha de decirse que no todas estas combinaciones son posibles. Por ejemplo, flujos totalmente viscosos deben ser resueltos de forma numérica.

Algunos de los métodos para resolver el flujo alrededor de perfiles bidimensionales y tridimensionales son los siguientes:

- ✓ Método de mapeo conformal: analítico, no viscoso, y exacto.
- ✓ Métodos en donde se emplea la teoría lineal de flujo no viscoso: analítico o numérico, viscoso, lineal.
- ✓ Método de paneles: numérico, no viscoso, exacto.



# VII. Propulsión

## 5. Comentarios generales acerca de la teoría bidimensional y tridimensional para el estudio de perfiles

- ✓ Métodos en donde se acopla el flujo potencial y la teoría de la capa límite: numéricos, viscosos, aproximado (se supone la capa límite es delgada).
- ✓ Código RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*): numérico, viscoso, aproximado (los modelos turbulentos empleados son aproximaciones).

Una vez se cuentan con el flujo alrededor de los perfiles es posible entonces determinar las fuerzas de sustentación y de arrastre que actúa sobre dichos perfiles.

## 6. Comentarios generales referentes a la teoría hidrodinámica para el análisis de propulsores

La teoría bidimensional y tridimensional de perfiles constituyen las bases de la teoría hidrodinámica relacionada con el análisis de propulsores; y diferentes métodos han sido desarrollados para predecir la acción de los propulsores.

Uno de los trabajos iniciales más notables en esta área fue hecho por Rankine con su teoría de momento para un disco hueco actuador. Luego esta fue remplazada por la teoría de elementos de aspa de Froude, y a medida que han pasado los años y con el desarrollo de otras teorías (Goldstein, Burrills, Lerbs, Eckhardt, Morgan), se ha ido dando paso a los métodos de CFD que hoy día se emplean.