

## P1. Una introducción al arte de navegar.

Alicante es una bella ciudad mediterránea que vive de cara al mar. Su magnífico puerto es un hervidero de barcos de recreo, yates espectaculares y otros más modestos. Los hay de muchos tipos y tamaños, pero de todos ellos destacan los veleros por su elegante belleza. La vocación marinera de Alicante fue recompensada cuando en 2008 fue seleccionada como puerto de salida de la más importante competición náutica: la vuelta al mundo a vela, conocida desde 2001 como la *Volvo Ocean Race*. La regata partió en Octubre de Alicante y, tras circunnavegar el globo, terminó en San Petersburgo en junio de 2009.

¿Cómo y por qué avanza un velero? Hasta los de tierra adentro sabemos contestar a esta pregunta: “porque el viento los empuja”. Esto es evidente cuando el viento viene por la “popa” (aunque ésta no es la condición más favorable para impulsar un velero moderno). Pero, ¿y si el viento es de costado? Esto requiere alguna discusión en la que la Física tiene la palabra y de ello va a tratar este problema.

Por supuesto, el problema está basado en un modelo físico sencillo de velero elemental con una única vela, *la mayor*, es decir sin vela delantera o *foque*. Supondremos también que el velero navega en la dirección (*rumbo*) este a oeste con un viento que sopla de norte a sur.

Los únicos elementos activos del velero que se van a considerar inicialmente son la vela y la *orza* (figura 1). La orza es una especie de vela rígida situada bajo el casco, completamente sumergida y con un gran peso que contribuye a la estabilidad del velero.

La vela y la orza actúan como el ala de un avión, salvo que sus planos son aproximadamente verticales y, en el caso de la orza, el fluido que la circunda es el agua.

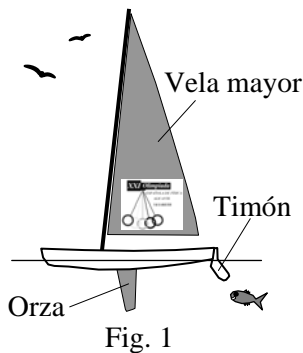


Fig. 1

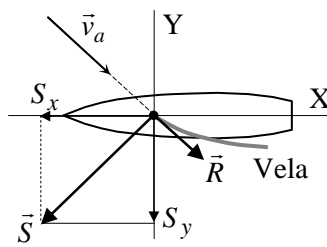


Fig. 2

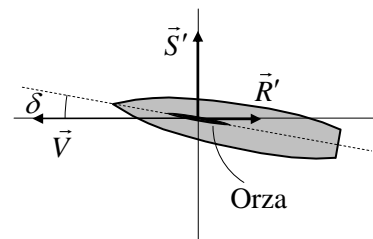


Fig. 3

En la figura 2 se muestra la planta de un velero cuya vela recibe viento con una velocidad  $\vec{v}_a$  relativa al barco, que es la velocidad con que se percibe el viento desde el velero (*viento aparente*). Dicho viento produce dos fuerzas aerodinámicas: una de sustentación  $\vec{S}$  perpendicular a  $\vec{v}_a$ , y otra de resistencia,  $\vec{R}$ , en la dirección de  $\vec{v}_a$ . La componente  $S_x$  de la sustentación es la responsable de hacer avanzar a la nave, mientras que la componente  $S_y$  tiende a desplazarlo de costado, lo que, naturalmente, no interesa. De evitarlo se encarga la *orza*, situada longitudinalmente debajo del casco. Como se muestra en la figura 3, cuando el eje del velero forma un pequeño ángulo  $\delta$  (*abatimiento*) con la dirección de movimiento del velero (*rumbo*), sufre también unas fuerzas, hidrodinámicas en este caso, de sustentación  $\vec{S}'$  perpendicular a la velocidad  $\vec{V}$  del velero, y de resistencia  $\vec{R}'$  paralela a dicha velocidad y en sentido opuesto, en la que también influye el casco del buque y el propio abatimiento.

Una vez establecidas estas nociones elementales de náutica, el problema que se plantea es el siguiente.

Supongamos que un velero está navegando con un viento que sopla del Norte con una velocidad  $v_0 = 15$  nudos. En estas condiciones navega hacia el Oeste a  $V = 18$  nudos de velocidad y con un abatimiento  $\delta$  (figura 4).

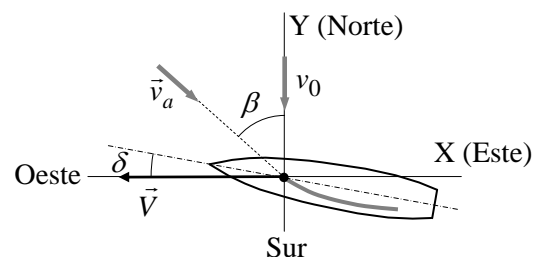


Fig. 4

- a) Determine la velocidad  $\vec{v}_a$  del viento respecto al velero (viento aparente). Calcule su módulo  $v_a$  y su dirección  $\beta$ .

La superficie de la vela de nuestro velero con el viento a disposición y el reglaje (*trimado*) escogido, produce una sustentación  $S = 5,0 \times 10^3$  N. La eficiencia de las actuales velas es muy elevada, de forma que la resistencia que presentan es de tan sólo un 10% de la sustentación. Por lo tanto, en nuestro caso,  $R = 5,0 \times 10^2$  N.

- b) Determine y calcule el módulo de la fuerza de sustentación  $S'$  que tiene que generar la orza para que el velero siga manteniendo su rumbo exactamente hacia el Oeste.

El conjunto del casco en contacto con el agua (*carena*) y la orza son menos eficientes que la vela. En consecuencia, el “precio a pagar” es una fuerza de resistencia,  $R'$  que puede estimarse en este caso como la cuarta parte de la sustentación  $S'$ .

- c) Determine y calcule el módulo de la resistencia debida al conjunto vela y orza,  $\vec{R}_t = \vec{R} + \vec{R}'$ , y el ángulo  $\theta$  que forma  $\vec{R}_t$  con la dirección del movimiento del velero.

Los veleros de recreo, no destinados a competición, suelen estar provistos de un motor para facilitar las maniobras y, naturalmente, para poder navegar en ausencia de viento. Supongamos que, en estas condiciones, un velero de masa  $m = 2500$  kg navega con una velocidad constante,  $V' = 3,0$  nudos, con su motor desarrollando una potencia  $P$  igual al 90% de su potencia máxima,  $P_{max} = 15$  CV.

- d) Calcule la fuerza de resistencia,  $F_r$ , que el agua opone al avance del barco.

El patrón maniobra el timón para cambiar el rumbo, de forma que el barco describe un arco de circunferencia de radio  $a = 10$  m. En estas circunstancias y considerando que el módulo de la velocidad del barco permanece constante,  $V' = 3,0$  nudos, la fuerza neta que el agua hace sobre el barco,  $\vec{F}'_t$ , tiene dos componentes: una,  $F_c$ , que le obliga a describir la trayectoria circular y otra de resistencia igual a la anterior  $F_r$ , más  $F'_t = F_c / 4$ .

- e) Determine y calcule la fuerza  $F_c$ .

- f) Indique razonadamente si el motor del barco tiene suficiente potencia para realizar la maniobra indicada en el apartado anterior.

Nota: El nudo es una unidad náutica de velocidad que equivale a 1 milla/hora.

1 milla (náutica) = 1,852 km

1 CV = 735,5 W

## Solución

- a) Si las velocidades del velero y del viento respecto al mar, que se considera en reposo, son  $\vec{V}$  y  $\vec{v}_0$  respectivamente, la velocidad del viento respecto al velero  $\vec{v}_a$  verificará que

$$\vec{v}_a = \vec{v}_0 - \vec{V}$$

De la figura 5, en la que está representada esta composición vectorial, se deduce que

$$\boxed{\beta = \operatorname{arctg} \frac{V}{v_0}} \Rightarrow \boxed{\beta = 50^\circ}$$

y el viento soplará respecto al velero con una velocidad

$$\boxed{v_a = \sqrt{v_0^2 + V^2}} \Rightarrow \boxed{v_a = 23 \text{ nudos}}$$

- b) En la figura 6 se representan las fuerzas que actúan sobre el velero debidas a la vela y la orza. Para evitar que el velero altere su rumbo es necesario que la fuerza  $\vec{S}'$  de sustentación de la orza compense las componentes, en la dirección Sur-Norte, de la sustentación  $\vec{S}$  de la vela y de su resistencia  $\vec{R}$ . Es decir

$$\boxed{S' = S \operatorname{sen} \beta + R \operatorname{cos} \beta} \Rightarrow \boxed{S' = 4,2 \times 10^3 \text{ N}}$$

La resistencia total del conjunto vela-orza es

$$\vec{R}_t = \vec{R} + \vec{R}'$$

En componentes,

$$\left. \begin{aligned} (R_t)_x &= R' + R \operatorname{sen} \beta \\ (R_t)_y &= -R \operatorname{cos} \beta \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\boxed{R_t = \sqrt{(R' + R \operatorname{sen} \beta)^2 + (-R \operatorname{cos} \beta)^2}}$$

De acuerdo con el enunciado,

$$R' = S' / 4 = 1,0 \times 10^3 \text{ N} \quad \text{y} \quad R = 5,0 \times 10^2 \text{ N},$$

por lo tanto

$$(R_t)_x = 1,4 \times 10^3 \text{ N} \quad \text{y} \quad (R_t)_y = -3,2 \times 10^2 \text{ N} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_t = 1,5 \times 10^3 \text{ N}}$$

Como se indica en la figura 7, el ángulo que forma  $\vec{R}_t$  con la dirección Oeste-Este (eje X) es

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{(R_t)_y}{(R_t)_x} \Rightarrow \theta = -13^\circ$$

El pequeño valor de este ángulo significa que se está *navegando a la caña*, sin tener prácticamente que trabajar de timón, como debe ser.

- c) Cuando el velero navega a motor con velocidad constante  $V' = 3,0$  nudos la potencia,  $P$ , que genera el motor tiene que ser igual a la disipada por la fuerza de resistencia,  $F_r$ . Es decir

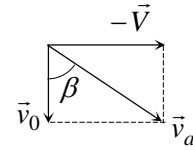


Fig. 5

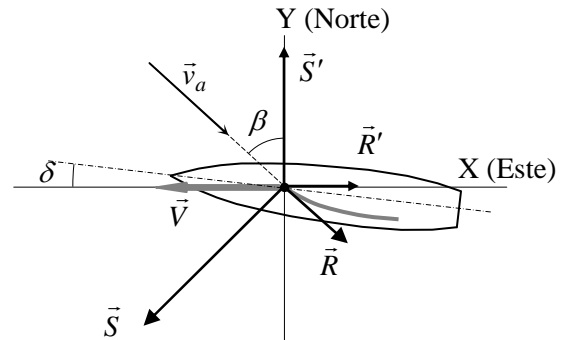


Fig. 6

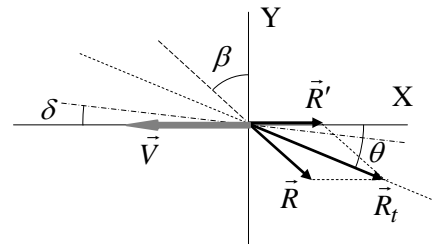


Fig. 7

$$P = F_r V' \Rightarrow \boxed{F_r = \frac{P}{V'}}$$

Los datos en el S.I. son

$$P = 0,9 P_{\max} = 0,9 \times 15 \times 735,5 = 9,9 \times 10^3 \text{ W} \quad V' = \frac{3 \times 1,852 \times 1000}{3600} = 1,5 \text{ m/s}$$

por lo que resulta

$$\boxed{F_r = 6,4 \times 10^3 \text{ N}}$$

- d) La fuerza centrípeta,  $F_c$ , es la responsable de que el barco describa una trayectoria circular de radio  $a$ ,

$$\boxed{F_c = m \frac{V'^2}{a}} \Rightarrow \boxed{F_c = 6,0 \times 10^2 \text{ N}}$$

- e) Esta fuerza  $F_c$  es, de nuevo, una fuerza de sustentación hidrodinámica, perpendicular a la velocidad y, por consiguiente, lleva asociada la fuerza de resistencia  $F'_r$  que se añade a la que actúa sobre el barco cuando se mueve de forma rectilínea. De acuerdo con el enunciado  $F'_r = F_c / 4$ , luego la resistencia total es  $F_r + F_c / 4$ . Por tanto, la potencia necesaria para realizar esta maniobra es

$$P_{nec} = \left( F_r + \frac{F_c}{4} \right) V' \Rightarrow P_{nec} = 1,0 \times 10^4 \text{ W} = 14 \text{ CV}$$

El motor del velero es capaz de realizar la maniobra puesto que

$$\boxed{P_{nec} < P_{\max}}$$