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.

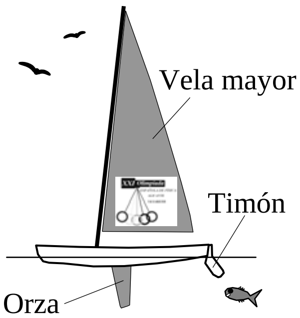

Fig. 1

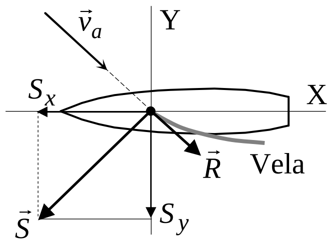

Fig. 2

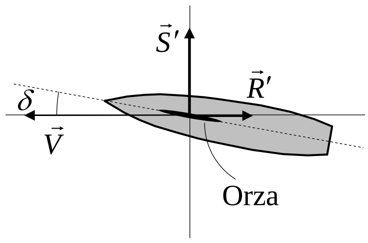

Fig. 3

En la figura 2 se muestra la planta de un velero cuya vela recibe viento con una velocidad $\vec{v}_a$ <u>relativa al barco</u>, 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 δ (*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 δ (figura 4).

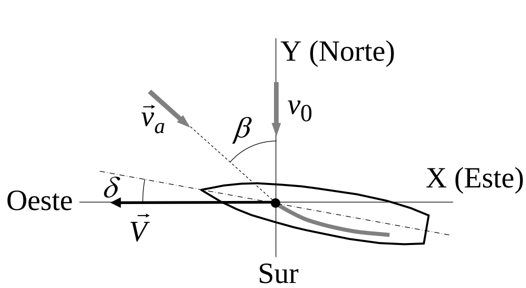

Fig. 4

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

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 θ 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 $F_r' = F_c / 4$.

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

$$\boxed{\beta = \mathrm{arctg}\frac{V}{v_0}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\beta = 50^o}$$

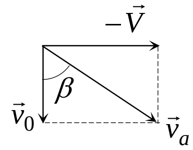

Fig. 5

y el viento soplará respecto al velero con una velocidad

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

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

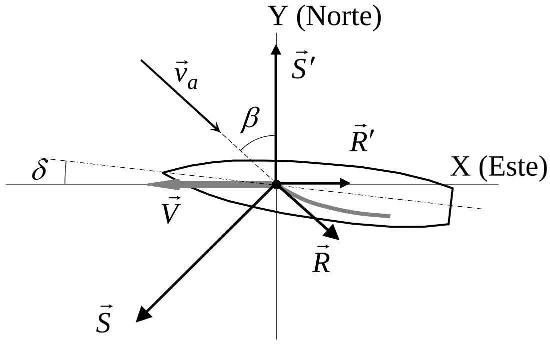

Fig. 6

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

La resistencia total del conjunto vela-orza es

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

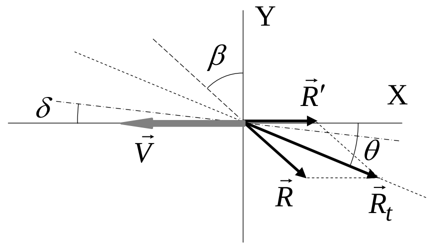

Fig. 7

En componentes,

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

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

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

$$\theta = \mathrm{arctg}\frac{(R_t)_y}{(R_t)_x} \quad \Rightarrow \quad \theta = -13^o$$

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

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

Los datos en el S.I. son

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

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*,

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

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

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

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

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

P2. El experimento de Cavendish.

Henry Cavendish (1731–1810) fue un notable físico y químico británico. Trabajó en prácticamente todas las áreas de la física de su tiempo, destacando particularmente en sus investigaciones sobre la electricidad y la determinación de parámetros de la Tierra. Concretamente, vamos a analizar su experimento para “pesar la Tierra”.

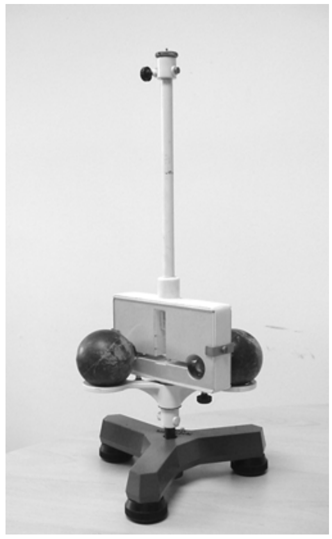

Fig. 1

Desde tiempos de Newton (1643-1727) se conocía que la fuerza gravitatoria era proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, pero se desconocían la constante de proporcionalidad y la masa de la Tierra. Cavendish, cuando realizó su famoso experimento, utilizó una *balanza de torsión* que previamente había diseñado y fabricado John Michell, que murió antes de poder probarla. La figura 1 es una fotografía de una moderna balanza de este tipo que se utiliza para realizar prácticas de laboratorio.

Una balanza de torsión consiste en una ligera varilla con dos esferas de masa *m* en sus extremos, que se mantiene horizontal cuando está suspendida por su punto medio O mediante un hilo sujeto por su extremo superior P, como se muestra en perspectiva en la figura 2. Supondremos que la semilongitud de la varilla es *L* y que su masa es despreciable frente a las de las esferas. En estas condiciones, cuando se aparta la varilla del equilibrio manteniéndola siempre horizontal y girándola un pequeño ángulo θ, las esferas tienden a describir un movimiento circular con velocidad angular $\omega = d\theta / dt$ y con radio *L*.

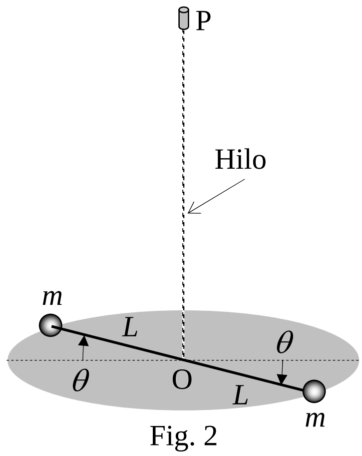

Fig. 2

a) Determine la expresión del módulo del momento angular L_0 de las dos esferas respecto al centro O de la varilla.

Al girar el sistema varilla-esferas el hilo del cual está suspendido se opone a que lo “retuerzan” ejerciendo un *momento de torsión*, τ, sobre la varilla cuyo valor es proporcional al ángulo girado θ, siempre que este ángulo sea muy pequeño. Es decir,

$$\tau = -k\theta$$

en donde *k* es la llamada *constante de torsión* del hilo y el signo tiene en cuenta la oposición del hilo al giro.

En definitiva, si tras apartar al sistema un pequeño ángulo θ respecto a la posición de equilibrio se deja libre, realizará oscilaciones armónicas[1].

b) Demuestre que el periodo de dichas oscilaciones armónicas viene dado por: $T = (8\pi^2 mL^2 / k)^{1/2}$

Si $m = 730{,}0\,\text{g}$ y $L = 90{,}0\,\text{cm}$ y se observa que el periodo de las oscilaciones es $T = 7{,}00\,\text{min}$

c) Calcule el valor de la constante *k* de torsión del hilo.

A continuación, sobre cada esfera se aplican fuerzas $\vec{F}$ y $\vec{F}' = -\vec{F}$ respectivamente, como se indica en la figura 3 en la que se muestra la balanza vista desde arriba. El sistema alcanzará un nuevo estado de equilibrio correspondiente a un pequeño ángulo θ_0, cuando el momento que ejercen dichas fuerzas se equilibre con el momento de torsión del hilo.

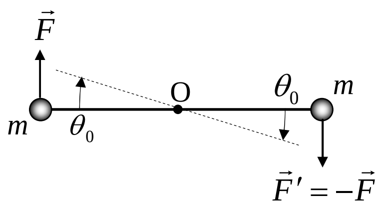

Fig. 3

d) Determine la expresión del módulo de la fuerza *F* aplicada en cada extremo, en función de *L*, *k* y θ_0.

[1] Recuerde que el momento respecto a un punto de las fuerzas exteriores que actúan sobre un sistema viene dado por la variación temporal del momento angular respecto al mismo punto

En el experimento de Cavendish, la fuerzas $\vec{F}$ y $\vec{F}' = -\vec{F}$ aplicadas en las bolas de masa m eran las correspondientes fuerzas de interacción gravitatoria, $\vec{F}_G$ que ejercían otras bolas de masa $M >> m$ colocadas a unas distancias b como se muestra en la figura 4.

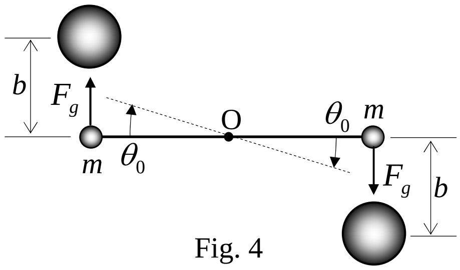

Fig. 4

e) Obtenga la expresión de la masa de la Tierra, M_T, en función de M, m, L, b, θ_0, del radio de la Tierra R_T y de la aceleración de la gravedad g.

Con los datos adicionales siguientes:

$$M = 158{,}0\,\text{kg}\,;\quad \theta_0 = 9{,}87\times 10^{-4}\,\text{rad}\,;\quad b = 23{,}0\,\text{cm}\,;\quad R_T = 6{,}37\times 10^{6}\,\text{m}\,;\quad g = 9{,}81\,\text{m/s}$$

f) Calcule la masa de la Tierra, M_T, y el valor de la constante de Gravitación Universal G.

Solución

a) Cuando al sistema varilla-bolas se aparta del equilibrio, los centros de las esferas describen trayectorias circulares idénticas de radio *L*, como se muestra en la figura 5. Si la velocidad angular es ω, el módulo de las velocidades lineales de cada bola es $v = \omega L$. El momento angular del sistema respecto a O es la suma de los momentos angulares de cada bola, es decir

$$L_0 = 2mLv \quad \Rightarrow \quad \boxed{L_0 = 2mL^2\omega}$$

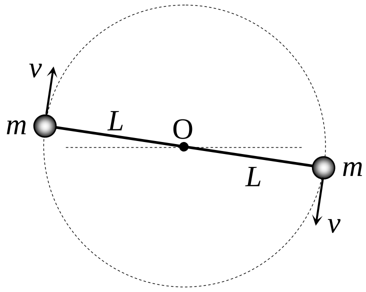

Fig. 5

b) De acuerdo con la nota a pie de página del enunciado,

$$\frac{dL_0}{dt} = \tau \quad \Rightarrow \quad 2mL^2\frac{d\omega}{dt} = -k\,\theta \qquad (1)$$

Como la aceleración angular es $\alpha = d\omega / dt$, de (1) resulta que

$$\alpha = -\frac{k}{2mL^2}\theta = -\Omega\,\theta \qquad \text{con} \qquad \Omega = \sqrt{\frac{k}{2mL^2}}$$

Es decir, la aceleración angular α es proporcional (con signo menos) a la elongación angular θ, lo que significa que $\theta(t)$ es una función armónica con el tiempo, cuyo periodo viene dado por $T = 2\pi / \Omega$. Por lo tanto, tal como había que demostrar, el periodo es

$$\boxed{T = \sqrt{\frac{8\pi^2 m L^2}{k}}}$$

c) Con los datos del enunciado, $m = 730{,}0\,\text{g}$, $L = 90{,}0\,\text{cm}$ y $T = 7{,}00\,\text{min}$, la constante *k* de torsión es

$$\boxed{k = 2{,}65\times10^{-4}\ \text{Nm}}$$

d) De acuerdo con la figura 3, el módulo del momento resultante de las fuerzas que actúan sobre las bolas tiene que estar equilibrado con el momento de torsión. Esto es

$$2FL = k\theta_0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{F = \frac{k\theta_0}{2L_0}}$$

e) Ahora $F = F_G$ es la fuerza de interacción gravitatoria entre las bolas de masas *M* y *m* que se encuentran más próximas. Dado que dicha interacción es muy débil, es lógico despreciar la interacción entre las bolas grandes y las pequeñas más lejanas. Es decir

$$G\frac{M\,m}{b^2} = \frac{k\theta_0}{2L_0} \qquad (2)$$

Aunque se supone que *G* no es conocida, si se sabe que la aceleración de la gravedad *g* viene dada por

$$g = G\frac{M_T}{R_T^2} \qquad (3)$$

donde M_T y R_T son la masa y el radio de la Tierra respectivamente. Eliminando *G* entre (2) y (3) y despejando M_T se obtiene

$$\boxed{M_T = \frac{2g\,R_T^2\,L\,M\,m}{k\,b^2\,\theta_0}}$$

f) Con los datos del enunciado,

$$\boxed{M_T = 5{,}98 \times 10^{24}\ \text{kg}}$$

Por otra parte, conocida ya M_T, la constante de Gravitación Universal G puede deducirse de (3) y resulta ser

$$\boxed{G = 6{,}66 \times 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2}$$

P3. Electrolisis

Para que circule una corriente eléctrica por un medio cualquiera, tiene que contener partículas cargadas libres para desplazarse. En concreto, si el medio es un líquido, dichas partículas pueden ser:

- Electrones, como es el caso del mercurio (elemento metálico)
- Iones, cuando se trata de una sustancia con enlace iónico. En este caso se pueden dar dos situaciones: que la sustancia esté fundida, o que esté disuelta en agua. En ambos casos, los iones que la constituyen pueden desplazarse libremente. Hay que notar que en la conducción iónica participan iones de distinto signo: aniones (−) y cationes (+).

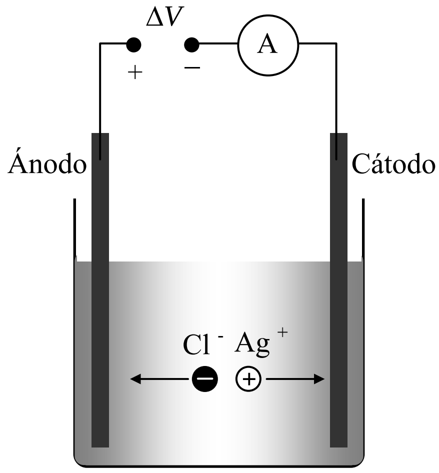

Fig. 1

La figura 1 muestra un esquema de una vasija en la que se produce una corriente eléctrica en un líquido. Las barritas son los electrodos, que reciben el nombre de *cátodo* (−) y *ánodo* (+). Cuando están conectadas a una batería de diferencia de potencial ΔV, crean un campo eléctrico que es el responsable del movimiento de las partículas cargadas en el interior del líquido. Mediante un amperímetro A puede medirse la intensidad I de la corriente eléctrica que circula.

La conducción eléctrica en líquidos iónicos provoca efectos químicos, ya que cada ión, al alcanzar su electrodo, cede o toma de éste los electrones de más o de menos que tiene, y se convierte en átomo o molécula, que se desprende (si es gas), se deposita (si es sólido) o reacciona con el propio medio conductor. En definitiva, la sustancia compuesta original ha quedado separada en sus componentes, cada uno junto a un electrodo. A este proceso de conducción, se le conoce como *electrolisis*.

Sirva de ejemplo la electrolisis de una disolución de cloruro de plata, AgCl. Los cationes Ag^+ toman un electrón en el cátodo y se forma plata metálica que se deposita sobre este electrodo. Los aniones Cl^- ceden un electrón en el ánodo y se forma cloro gaseoso, que se desprende.

La *constante de Faraday*[1], *F*, es la carga que libera, junto a un electrodo, un mol de sustancia monovalente en una disolución electrolítica. Teniendo en cuenta que la carga elemental es $e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C y que el número de Avogadro es $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$ partículas/mol,

a) Calcule el valor de la constante F, en culombios.

Por una disolución iónica de AgCl se hace pasar una corriente $I_1 = 10\,\mathrm{A}$. Sabiendo que la masas molecularers del Cl y de la Ag son respectivamente, $M_{Cl} = 35{,}453\,\mathrm{g/mol}$ y $M_{Ag} = 107{,}87\,\mathrm{g/mol}$,

b) Calcule la masa de cloro desprendida m_{Cl} y la de plata depositada, m_{Ag}, en un tiempo $T_1 = 1\,\mathrm{h}$.

La galvanoplastia es la técnica que utiliza el depósito electrolítico para recubrir de metal un cuerpo sólido colocado como cátodo. Se desea platear una esferita de cobre de radio $r = 10{,}0\,\mathrm{mm}$ con una capa de plata de espesor $d = 0{,}10\,\mathrm{mm}$, para lo cual la esferita se introduce como cátodo en una disolución de AgCl.

c) Si la corriente es $I_2 = 1{,}00\,\mathrm{A}$, y la densidad de la plata $\rho_{Ag} = 10{,}5 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$ ¿Cuánto tiempo T_2 durará el proceso?

Cuando, a partir de cero, se aumenta progresivamente el voltaje entre los electrodos, la corriente que circula es muy débil hasta un cierto valor ΔV_0. Después aumenta de forma prácticamente lineal, como se muestra en la gráfica de la figura 2, que corresponde a una disolución de AgCl. El valor ΔV_0, que marca el principio de la electrolisis propiamente dicha, tiene que ver con el estado superficial de los electrodos (polarización). En consecuencia, depende de la naturaleza del cátodo y del ánodo e incluso de la del electrolito.

---

[1] El Faraday es una unidad de carga eléctrica muy útil en los fenómenos electrolíticos y jugó un importante papel en el desarrollo de la teoría de la electricidad. Por ej., el Culombio se definió inicialmente como una fracción del Faraday.

d₁) ¿Cuál es, en este caso, la diferencia de potencial ΔV_0?[2]

d₂) Calcule a partir de la gráfica, la resistencia eléctrica de la disolución, R, para $\Delta V > \Delta V_0$.

d₃) En esas condiciones, determine y calcule la energía consumida, w, en el proceso por cada mol de sustancia liberada en los electrodos.

d₄) Si se aplica entre los electrodos una diferencia de potencial $\Delta V' = 4{,}5\ \mathrm{V}$, determine y calcule la potencia invertida en la disociación del cloruro de plata, P_{disoc}, y la disipada por efecto Joule, P_{disip}.

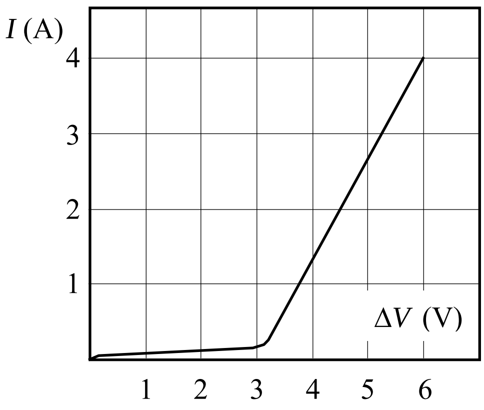

Fig. 2

[2] Si se invirtiera el proceso, es decir, si cloro y plata se ionizaran en los electrodos, pasando a la disolución, se tendría una pila cuya fuerza electromotriz sería precisamente igual a la diferencia de potencial ΔV_0.

Solución

a) En el enunciado de este apartado se dice lo que es la constante *F*, por tanto,

$$\boxed{F = e\,N_A} \quad \Rightarrow \quad \boxed{F = 9{,}647 \times 10^4\ \mathrm{C}}$$

b) Durante un intervalo de tiempo Δt se depositan en cada electrodo Δn moles de Cl^- o de Ag+ con su correspondiente carga $\Delta q = I_1 \Delta t$.

Por una parte, $\Delta q = F\Delta n$ y, por otra, $\Delta n = \Delta m / M$, siendo Δm la masa deposita por uno de los iones y *M* su masa molecular. Resulta entonces que

$$I_1 \Delta T = F\frac{\Delta m}{M} \quad \Rightarrow \quad \Delta m = \frac{M}{F} I_1 \Delta t$$

Cuando $\Delta t = T_1$ la masa *m* depositada de cada ion será

$$\boxed{m = \frac{M}{F} I_1 T_1} \quad \Rightarrow \quad \boxed{m_{Cl} = 13{,}32\,g \qquad m_{Ag} = 40{,}25\,g}$$

c) La masa m' de plata con la que hay que recubrir la esfera será

$$m' = 4\pi r^2 d\,\rho_{Ag}$$

Ahora bien, esta masa depositada vendrá dada por

$$m' = \frac{M_{Ag}}{F} I_2 T_2$$

Luego

$$\boxed{T_2 = 4\pi r^2 d\,\rho_{Ag}\frac{F}{I_2 M_{Ag}}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_2 = 1{,}18 \times 10^3\ \mathrm{s}}$$

d₁) Extrapolando la parte lineal de la gráfica de la figura 2, se encuentra que

$$\boxed{\Delta V_0 = 3\ \mathrm{V}}$$

d₂) En la región correspondiente a la electrólisis la disolución se comporta como un medio óhmico, por lo que

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

De la parte lineal de la gráfica de la figura 2,

$$\boxed{R = \frac{3}{4} = 0{,}75\,\Omega}$$

d₃) La energía por mol será

$$\boxed{w = F\,\Delta V_0} \quad \Rightarrow \quad \boxed{w = 2{,}89 \times 10^5\ \mathrm{J/mol}}$$

d₄) La disociación de Δn moles da lugar a $\Delta q = F\,\Delta n$ cargas de cada signo. Como la intensidad es $I = \Delta q / \Delta t$, se tiene que

$$I = F\frac{\Delta n}{\Delta t} \qquad (1)$$

Para disociar 1 mol ha sido precisa una energía $w = F\,\Delta V_0$. La disociación de Δn requerirá una energía

$$\Delta w = w\,\Delta n = F\,\Delta V_0\,\Delta n$$

Teniendo en cuenta (1)

$$\Delta w = I\, \Delta V_0\, \Delta t$$

En este caso, la intensidad es la que corresponde al potencial aplicado a los electrodos $\Delta V' = 4{,}5\,\mathrm{V}$ que, de la gráfica, es $I' = 2\,\mathrm{A}$. Por tanto, la potencia invertida en la disociación será

$$\boxed{P_{disoc} = I'\, \Delta V_0} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_{disoc} = 6\,\mathrm{W}}$$

En cuanto a la potencia disipada por efecto Joule, tendremos

$$\boxed{P_{disip} = I'\left(\Delta V' - \Delta V_0\right)} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_{disip} = 3\,\mathrm{W}}$$