

Ejercicios Resueltos Física 2 de Bachillerato 2026 / 2027

48 ejercicios con la solución explicada paso a paso, y la teoría de los 16 temas que trae esta selección.

Lo que vas a practicar

El campo gravitatorio · Intensidad y potencial, órbitas, energía de un satélite y velocidad de escape (ejercicios 1, 2, 3)

El campo eléctrico · Campo y potencial de varias cargas, trabajo con su signo y aceleración de un electrón (ejercicios 4, 5, 6)

El campo magnético y la inducción · Fuerza de Lorentz, campo de un hilo, fuerza entre conductores y ley de Lenz (ejercicios 7, 8, 9)

El movimiento armónico simple · Lectura de la ecuación, energía del oscilador y péndulo simple (ejercicios 10, 11, 12)

Las ondas y el sonido · Lectura de la ecuación de onda, decibelios y ondas estacionarias en una cuerda (ejercicios 13, 14, 15)

La óptica geométrica y la óptica física · Refracción y ángulo límite, lentes con su criterio de signos y doble rendija (ejercicios 16, 17, 18)

La física moderna · Efecto fotoeléctrico y energía de enlace del núcleo (ejercicios 19, 20)

La estructura del átomo y los números cuánticos · Configuraciones electrónicas, validez de los números cuánticos y recuentos de orbitales (ejercicios 21, 22, 23)

El sistema periódico y las propiedades periódicas · Radios atómicos e iónicos y energías de ionización razonadas (ejercicios 24, 25)

El enlace químico y la geometría de las moléculas · Geometría por repulsión de pares, tipos de enlace deducidos de las propiedades y ciclo de Born-Haber (ejercicios 26, 27, 28)

La termoquímica y la espontaneidad · Ley de Hess, entalpías de formación, energías de enlace y criterio de ΔG (ejercicios 29, 30, 31, 32)

La cinética química · Órdenes de reacción por velocidades iniciales y energía de activación con catalizador (ejercicios 33, 34)

El equilibrio químico y el principio de Le Chatelier · Cálculo de K_c y K_p , grado de disociación y desplazamientos razonados (ejercicios 35, 36, 37, 38)

Los ácidos y las bases · pH de fuertes y débiles, hidrólisis, disoluciones reguladoras y valoración (ejercicios 39, 40, 41, 42, 43)

Las reacciones redox y la electroquímica · Ajuste ion-electrón con balance de cargas, pila con su potencial y leyes de Faraday (**ejercicios 44, 45, 46**)

La química orgánica: formulación, isomería y reactividad · Isómeros escritos en línea y estequiometría de una combustión (**ejercicios 47, 48**)

Material propio de solucionario.es. Los enunciados y las soluciones están escritos por nosotros. La versión al día, con más ejercicios y de todos los cursos, está siempre en:

solucionario.es

Qué entra en esta selección y qué no. En 2º de Bachillerato la Física y la Química son dos asignaturas distintas, y esta página cubre **las dos**: 20 ejercicios de Física (campo gravitatorio, campo eléctrico, campo magnético e inducción, movimiento armónico simple, ondas y sonido, óptica y física moderna) y 28 de Química (estructura atómica, sistema periódico, enlace y geometría, termoquímica, cinética, equilibrio, ácidos y bases, redox y electroquímica, y química orgánica). El reparto no es una mitad: sale de que este material sirve también a las fichas de editorial de este curso, y las de Química se consultan aquí bastante más que las de Física. La Física va primero porque es la materia por la que se llega a esta página. Se da por sabido lo de 4º de ESO y lo de 1º de Bachillerato: cinemática y dinámica, el mol, la formulación inorgánica y el ajuste de ecuaciones, los gases ideales y las disoluciones. **Queda fuera a propósito**, y no todo por el mismo motivo. Por el **medio**, porque estas páginas se leen como texto y aquí no hay dibujos: los diagramas de Lewis, los esquemas de pilas y de montajes, los trazados de rayos y las representaciones de líneas de campo. Por eso las geometrías y los montajes se describen con palabras y coordenadas, y los datos que se leerían en una representación vienen dados como lista dentro del enunciado. Por **espacio**, aunque caben de sobra en el curso: la relatividad con cálculo (aquí se queda en la idea, dentro de la teoría), la radiactividad con la ley de desintegración, el campo magnético creado por un solenoide, los espejos, la formulación orgánica con anillos aromáticos y los mecanismos de reacción. **Sobre el examen de acceso a la universidad**: esta página imita el tipo de tarea que se practica en el curso —un problema con todos sus datos y una cuestión razonada—, y no describe ese examen ni promete prepararlo: lo fija cada comunidad autónoma y se revisa de un curso a otro. Aquí no hay puntuaciones, ni modelos oficiales, ni predicciones sobre qué entra. **Una advertencia de notación**: las reacciones reversibles se escriben con la flecha sencilla $\rightarrow$ y el texto dice con palabras que hay equilibrio, porque la doble flecha que se usa en los libros no se puede componer en este formato. Esto sirve para localizar lo que flojea con lápiz, papel y calculadora; no sustituye al libro, ni al laboratorio, ni a las clases.

El campo gravitatorio

Lo que hay que saber

Ley de gravitación universal: dos masas se atraen con $F = G \cdot M \cdot m \div r^2$, donde $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ y r es la distancia entre sus centros. La fuerza va en la recta que los une y es de atracción, así que en este tema el signo negativo aparece solo en las energías, no en el módulo de la fuerza.

Intensidad del campo: $g = F \div m = G \cdot M \div r^2$, en **N/kg**, que es lo mismo que m/s^2 . Es un vector dirigido hacia la masa que crea el campo. En la superficie de un planeta de radio R vale $g_0 = G \cdot M \div R^2$, y a una distancia r del centro cae con el cuadrado: al doble de r , la cuarta parte.

Energía potencial: $E_p = -G \cdot M \cdot m \div r$, en julios, tomando el cero en el infinito. ▲ La expresión $m \cdot g \cdot h$ que se usa en cursos anteriores vale solo cerca de la superficie y con el cero puesto en el suelo; es una aproximación de la variación de esta, no la misma cosa.

Potencial: $V = -G \cdot M \div r$, en **J/kg**. Es un escalar y por eso se suma con su signo. El trabajo que hace el campo al llevar una masa de A a B es $W = -\Delta E_p = E_p(A) - E_p(B) = m \cdot (V_A - V_B)$.

Órbita circular: la atracción hace de fuerza centrípeta, $G \cdot M \cdot m \div r^2 = m \cdot v^2 \div r$, de donde $v = \sqrt{G \cdot M \div r}$ y la masa del satélite se simplifica. Su energía mecánica es $E = -G \cdot M \cdot m \div (2 \cdot r)$: sale **negativa**, y ese signo es lo que significa estar ligado al planeta.

Velocidad de escape: se obtiene imponiendo que la energía mecánica total sea cero, y da $v_e = \sqrt{2 \cdot G \cdot M \div R}$. Tampoco depende de la masa del cuerpo que escapa.

1

En la superficie de la Tierra la intensidad del campo gravitatorio vale $g_0 = 9,80 \text{ m/s}^2$ y el radio terrestre es $R = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$. Con $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, calcula el producto $G \cdot M$ de la Tierra, su masa, el valor de g a una altura igual al radio terrestre y el peso allí de un cuerpo de 80 kg.

Solución

En la superficie, $g_0 = G \cdot M \div R^2$, así que el producto $G \cdot M$ sale despejando: $G \cdot M = g_0 \cdot R^2 = (9,80 \text{ m/s}^2) \times (6,4 \times 10^6 \text{ m})^2 = (9,80 \text{ m/s}^2) \times (4,096 \times 10^{13} \text{ m}^2) = 4,01408 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$. Unidades: $(\text{m/s}^2) \times \text{m}^2 = \text{m}^3/\text{s}^2$.

La masa sale dividiendo ese producto entre G : $M = (4,01408 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2) \div (6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) = 6,02 \times 10^{24} \text{ kg}$ ($6,0181 \times 10^{24} \text{ kg}$ antes de redondear). Las unidades cuadran si se recuerda que $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$: $(\text{m}^3/\text{s}^2) \div (\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)) = \text{kg}$.

A una altura $h = R$ el satélite está a $r = 2 \cdot R$ del centro, no a R . Como g va con $1 \div r^2$, al doblar la distancia el campo se divide entre cuatro: $g = g_0 \div 4 = (9,80 \text{ m/s}^2) \div 4 = 2,45 \text{ m/s}^2$.

Comprobación por el camino largo, sin usar la proporción: $g = G \cdot M \div r^2 = (4,01408 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2) \div (1,28 \times 10^7 \text{ m})^2 = (4,01408 \times 10^{14}) \div (1,6384 \times 10^{14}) \text{ m/s}^2 = 2,45 \text{ m/s}^2$. Coincide.

El peso allí es $P = m \cdot g = (80 \text{ kg}) \times (2,45 \text{ m/s}^2) = 196 \text{ N}$. La masa sigue siendo 80 kg: lo que cambia con la altura es el peso, no la masa.

▲ El error que hay que vigilar aquí es meter en la fórmula la altura en vez de la distancia al centro. Con $r = R$ en vez de $r = 2 \cdot R$ saldría $9,80 \text{ m/s}^2$, y las unidades cuadrarían igual de bien: lo que lo delata es que el resultado tendría que ser menor que en la superficie.

2

Un satélite de **500 kg** describe una órbita circular de radio $r = 1,44 \times 10^7 \text{ m}$ alrededor de un planeta para el que $G \cdot M = 3,6 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ y cuyo radio es $R = 7,2 \times 10^6 \text{ m}$. Calcula la velocidad orbital, el periodo, la energía potencial, la energía cinética y la energía mecánica del satélite.

Solución

En una órbita circular la atracción gravitatoria hace de fuerza centrípeta: $G \cdot M \cdot m \div r^2 = m \cdot v^2 \div r$. La masa del satélite se simplifica y queda $v^2 = G \cdot M \div r$.

$v^2 = (3,6 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2) \div (1,44 \times 10^7 \text{ m}) = 2,5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, y de ahí $v = 5,0 \times 10^3 \text{ m/s}$. La unidad sale bien: la raíz de m^2/s^2 es m/s .

El periodo es el tiempo de una vuelta completa: $T = 2 \cdot \pi \cdot r \div v = 2 \cdot \pi \times (1,44 \times 10^7 \text{ m}) \div (5,0 \times 10^3 \text{ m/s}) = 1,81 \times 10^4 \text{ s}$, que son unas 5,0 horas.

Energía potencial, con el cero en el infinito: $E_p = -G \cdot M \cdot m \div r = - (3,6 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2) \times (500 \text{ kg}) \div (1,44 \times 10^7 \text{ m}) = -1,25 \times 10^{10} \text{ J}$. Sale negativa por el convenio del origen, y eso es lo esperado para un cuerpo atrapado por el planeta.

Energía cinética: $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \times (500 \text{ kg}) \times (2,5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2) = +6,25 \times 10^9 \text{ J}$, positiva por definición.

Energía mecánica: $E = E_c + E_p = 6,25 \times 10^9 \text{ J} - 1,25 \times 10^{10} \text{ J} = -6,25 \times 10^9 \text{ J}$. Comprobación por la expresión general: $-G \cdot M \cdot m \div (2 \cdot r) = - (1,25 \times 10^{10} \text{ J}) \div 2 = -6,25 \times 10^9 \text{ J}$. Coincide, y el signo negativo es lo que significa que el satélite está ligado al planeta: para soltarlo habría que darle energía.

3

Para el mismo planeta del ejercicio anterior ($G \cdot M = 3,6 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, radio $R = 7,2 \times 10^6 \text{ m}$): calcula la velocidad de escape desde su superficie y la energía mínima que hay que suministrar al satélite de 500 kg, que orbita a $r = 1,44 \times 10^7 \text{ m}$, para que escape del planeta. Razona si esas dos respuestas dependen de la masa del cuerpo.

Solución

Escapar significa llegar muy lejos del planeta con velocidad cero, es decir, terminar con energía mecánica total igual a cero. Desde la superficie: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 - G \cdot M \cdot m \div R = 0$, y al simplificar la masa queda $v_e = \sqrt{2 \cdot G \cdot M \div R}$.

$v_e^2 = 2 \times (3,6 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2) \div (7,2 \times 10^6 \text{ m}) = (7,2 \times 10^{14}) \div (7,2 \times 10^6) \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1,0 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{s}^2$, de donde $v_e = 1,0 \times 10^4 \text{ m/s}$.

Para el satélite que ya está en órbita el planteamiento es el mismo pero partiendo de su energía actual, que se calculó antes: $E = -6,25 \times 10^9 \text{ J}$. La energía que hay que darle es la que lo lleva de ese valor hasta cero: $\Delta E = 0 - (-6,25 \times 10^9 \text{ J}) = +6,25 \times 10^9 \text{ J}$.

El signo positivo dice que es energía que hay que **aportar** desde fuera, no que se obtenga. Y es justo el valor absoluto de la energía mecánica del satélite, que por eso se llama energía de ligadura.

La velocidad de escape **no** depende de la masa del cuerpo: se simplificó al plantear la ecuación. La energía sí depende de ella, y de forma proporcional: para 1.000 kg en la misma órbita harían falta $1,25 \times 10^{10} \text{ J}$.

Comprobación de coherencia entre los dos resultados: la velocidad de escape desde la propia órbita sería $\sqrt{2 \cdot G \cdot M \div r} = \sqrt{5,0 \times 10^7} \text{ m/s} = 7,07 \times 10^3 \text{ m/s}$, mayor que los $5,0 \times 10^3 \text{ m/s}$ que lleva. La diferencia de energías cinéticas, $\frac{1}{2} \times 500 \times (5,0 \times 10^7 - 2,5 \times 10^7) \text{ J}$, vale $6,25 \times 10^9 \text{ J}$, el mismo número por otro camino.

El campo eléctrico

Lo que hay que saber

Ley de Coulomb: $F = K \cdot q \cdot q' \div r^2$, con $K = 1 \div (4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0) = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. A diferencia de la gravitatoria, puede ser de atracción o de repulsión según los signos de las cargas.

Intensidad del campo: $E = F \div q$, en **N/C**. El de una carga puntual vale $E = K \cdot q \div r^2$ y apunta **saliendo** de una carga positiva y **entrando** en una negativa. Es un vector: el campo de varias cargas se suma componente a componente.

Potencial: $V = K \cdot q \div r$, en **voltios**. Es un escalar y lleva el signo de la carga: el potencial creado por una carga negativa es **negativo**. El de varias cargas se suma con su signo, sin descomponer en ejes.

Trabajo del campo: $W = q \cdot (V_A - V_B) = -\Delta E_p$. Puede salir positivo o negativo, y el signo se interpreta: positivo, el campo empuja en ese sentido; negativo, hay que empujar desde fuera para hacerlo. La energía potencial de dos cargas es $E_p = K \cdot q \cdot q' \div r$, negativa si son de signos contrarios.

▲ **Campo nulo y potencial nulo son cosas distintas.** En el punto medio entre dos cargas iguales y de signo contrario el potencial vale 0 V y el campo **no** vale cero; y en el punto donde se anula el campo de dos cargas del mismo signo el potencial no es cero. Conviene calcular cada uno por separado.

Una carga q dentro de un campo uniforme cambia su energía cinética a costa del trabajo eléctrico: $\Delta E_c = -q \cdot \Delta V$, con $\Delta V = V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}$. ▲ Ese signo menos es el mismo de $W = -\Delta E_p$, y es lo que hace que un electrón, de carga negativa, gane energía cinética al ir hacia potenciales mayores. Es lo que acelera un electrón en un tubo, y la razón de que el **electronvoltio** ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$) sea una unidad cómoda de energía.

4

Dos cargas puntuales están fijas sobre el eje X: $q_1 = +4 \mu\text{C}$ en el origen y $q_2 = -4 \mu\text{C}$ en $x = 0,30 \text{ m}$. Con $K = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ y $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$, calcula el campo eléctrico y el potencial en el punto medio del segmento que las une, $x = 0,15 \text{ m}$.

Solución

Cada carga está a 0,15 m del punto, así que $r = 0,15 \text{ m}$ y $r^2 = 0,0225 \text{ m}^2$ para las dos.

Campo de la primera: $E_1 = K \cdot q_1 \div r^2 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times (4 \times 10^{-6} \text{ C}) \div (0,0225 \text{ m}^2) = (3,6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}) \div (0,0225 \text{ m}^2) = 1,6 \times 10^6 \text{ N/C}$. Por ser positiva, el campo sale de ella: apunta hacia las x crecientes.

Campo de la segunda: el módulo es el mismo, $E_2 = 1,6 \times 10^6 \text{ N/C}$, porque la carga tiene igual valor absoluto y la misma distancia. Por ser negativa, el campo entra hacia ella: también apunta hacia las x crecientes.

Los dos vectores van por la misma recta y apuntan al mismo lado, de modo que sus módulos se suman: **$E = 3,2 \times 10^6 \text{ N/C}$, en el sentido positivo del eje X.**

El potencial es un escalar y se suma con su signo: $V = K \cdot q_1 \div r + K \cdot q_2 \div r = (3,6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}) \div (0,15 \text{ m}) - (3,6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}) \div (0,15 \text{ m}) = 2,4 \times 10^5 \text{ V} - 2,4 \times 10^5 \text{ V} = 0 \text{ V}$.

▲ El resultado deja claro que campo nulo y potencial nulo son cosas distintas: aquí el potencial vale cero y el campo vale $3,2 \times 10^6 \text{ N/C}$. Lo que dice $V = 0$ es que llevar una carga desde muy lejos hasta ese punto no cuesta trabajo neto, y no que allí no haya fuerza.

5

Una carga $Q = -5 \mu\text{C}$ está fija en el origen. Se lleva una carga $q = +2 \text{ nC}$ desde el punto A, situado en $x = 0,10 \text{ m}$, hasta el punto B, situado en $x = 0,50 \text{ m}$. Con $K = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ y $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$, calcula el potencial en A y en B y el trabajo que realiza el campo en ese traslado. Interpreta el signo del resultado.

Solución

Potencial en A: $V_A = K \cdot Q \div r_A = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times (-5 \times 10^{-6} \text{ C}) \div (0,10 \text{ m}) = (-4,5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}) \div (0,10 \text{ m}) = -4,5 \times 10^5 \text{ V}$. Sale negativo porque la carga que crea el campo es negativa.

Potencial en B, a cinco veces la distancia: $V_B = (-4,5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}) \div (0,50 \text{ m}) = -9,0 \times 10^4 \text{ V}$. Sigue siendo negativo, pero está más cerca de cero: al alejarse de una carga negativa el potencial sube.

Trabajo del campo: $W = q \cdot (V_A - V_B) = (2 \times 10^{-9} \text{ C}) \times (-4,5 \times 10^5 \text{ V} + 9,0 \times 10^4 \text{ V}) = (2 \times 10^{-9} \text{ C}) \times (-3,6 \times 10^5 \text{ V}) = -7,2 \times 10^{-4} \text{ J}$.

El signo negativo significa que el campo se opone al traslado: la carga positiva y la negativa se atraen, así que separarlas obliga a aportar desde fuera $7,2 \times 10^{-4} \text{ J}$. Si el trabajo hubiera salido positivo, el movimiento sería el que el campo hace por sí solo.

Comprobación por energías potenciales: $E_p = K \cdot Q \cdot q \div r$. En A vale $(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times (-5 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (2 \times 10^{-9} \text{ C}) \div (0,10 \text{ m}) = -9,0 \times 10^{-4} \text{ J}$, y en B, $-1,8 \times 10^{-4} \text{ J}$. Entonces $\Delta E_p = -1,8 \times 10^{-4} \text{ J} - (-9,0 \times 10^{-4} \text{ J}) = +7,2 \times 10^{-4} \text{ J}$, y $W = -\Delta E_p = -7,2 \times 10^{-4} \text{ J}$. El mismo número por otro camino.

▲ Este es el ejercicio donde conviene ver que comprobar las unidades **no** basta: con el signo cambiado el resultado seguiría saliendo en julios y el análisis dimensional daría por bueno $+7,2 \times 10^{-4} \text{ J}$. Lo que decide es la pregunta física de si las cargas se atraen o se repelen.

6

Un electrón parte del reposo y se acelera al atravesar una diferencia de potencial de **100 V**. Datos: carga del electrón en valor absoluto **$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$** , masa del electrón **$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$** y velocidad de la luz en el vacío **$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$** . Calcula la energía cinética que adquiere, en julios y en electronvoltios, y su velocidad final.

Solución

El trabajo eléctrico se convierte íntegramente en energía cinética porque parte del reposo. La expresión general es $\Delta E_c = -q \cdot \Delta V$, y como la carga del electrón es negativa, $q = -e$, queda $\Delta E_c = e \cdot \Delta V = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (100 \text{ V}) = 1,6 \times 10^{-17} \text{ J}$, con $\Delta V = +100 \text{ V}$ el aumento de potencial que recorre. Unidades: $\text{C} \times \text{V} = \text{J}$.

En electronvoltios el resultado se lee directamente, porque un electronvoltio es justo la energía que gana un electrón al atravesar 1 V: **$E_c = 100 \text{ eV}$** . Comprobación: $(1,6 \times 10^{-17} \text{ J}) \div (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 100 \text{ eV}$.

De la energía cinética a la velocidad: $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, así que $v^2 = 2 \cdot E_c \div m = 2 \times (1,6 \times 10^{-17} \text{ J}) \div (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) = (3,2 \times 10^{-17}) \div (9,1 \times 10^{-31}) \text{ m}^2/\text{s}^2 = 3,52 \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

$v = \sqrt{(3,52 \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s}^2)} = 5,93 \times 10^6 \text{ m/s}$. La unidad cuadra: $\text{J} \div \text{kg} = \text{m}^2/\text{s}^2$, porque $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$.

Si se duplicase la diferencia de potencial hasta 200 V, la energía cinética se duplicaría, pero la velocidad quedaría multiplicada por $\sqrt{2}$: $v = 5,93 \times 10^6 \text{ m/s} \times 1,414 = 8,39 \times 10^6 \text{ m/s}$. La velocidad va con la raíz de ΔV , no con ΔV .

Comprobación de que el tratamiento clásico vale: $v \div c = (5,93 \times 10^6) \div (3,0 \times 10^8) = 0,020$, es decir, un 2 % de la velocidad de la luz. Por debajo de ese orden los efectos relativistas no cambian la cifra de forma apreciable.

El campo magnético y la inducción

Lo que hay que saber

Fuerza sobre una carga en movimiento: su módulo vale $F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$, y la fuerza es perpendicular a la vez a la velocidad y al campo. ▲ El valor absoluto no es un adorno: sin él, una carga negativa daría un módulo negativo, que no existe. El sentido sale de la regla de la mano derecha para una carga positiva; **para un electrón el sentido es el contrario**, porque su carga es negativa.

▲ Esa fuerza **no cambia el módulo de la velocidad**: al ser perpendicular a ella, su trabajo es cero. Lo que hace es curvar la trayectoria. Si la velocidad entra perpendicular al campo, el resultado es una circunferencia de radio $r = m \cdot v \div (|q| \cdot B)$, con el valor absoluto por el mismo motivo.

Campo creado por un hilo recto y largo: $B = \mu_0 \cdot I \div (2 \cdot \pi \cdot d)$, con $\mu_0 = 4 \cdot \pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, en **teslas**. Sobre un conductor de longitud L por el que circula I , el campo ejerce $F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha$; dos hilos paralelos con corrientes del mismo sentido se atraen.

Flujo magnético: $\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$, en **weber** (Wb), donde α es el ángulo entre el campo y la perpendicular a la superficie. Cambia si cambia B , si cambia el área o si cambia la orientación.

Ley de Faraday y Lenz: $\varepsilon = - \Delta \Phi \div \Delta t$, en voltios. El **signo menos es la ley de Lenz**, y no es decorativo: dice que la corriente inducida circula en el sentido que se opone al cambio de flujo. Si el flujo disminuye, la corriente inducida crea campo en el mismo sentido que el original para sostenerlo; si aumenta, en sentido contrario.

Con una espira de resistencia R , la corriente inducida es $I = \varepsilon \div R$. Una corriente inducida aparece mientras el flujo **cambia**; con flujo constante, por grande que sea, la fem es cero.

7

Un electrón entra con una velocidad de $2,0 \times 10^6 \text{ m/s}$ en el **sentido positivo del eje X** en una región donde hay un campo magnético uniforme de $0,50 \text{ T}$ en el **sentido positivo del eje Y**. Datos: $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (valor absoluto) y $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Calcula el módulo de la fuerza magnética, di en qué sentido apunta y halla el radio de la trayectoria.

Solución

La velocidad y el campo son perpendiculares, así que el ángulo entre ellos es 90° y $\sin 90^\circ = 1$. El módulo de la fuerza es $F = e \cdot v \cdot B = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (2,0 \times 10^6 \text{ m/s}) \times (0,50 \text{ T}) = 1,6 \times 10^{-13} \text{ N}$. Unidades: $\text{C} \times (\text{m/s}) \times \text{T} = \text{N}$, porque $1 \text{ T} = 1 \text{ N} \div (\text{A} \cdot \text{m})$ y $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$.

Para el sentido, primero se resuelve el caso de una carga **positiva** que fuera a la misma velocidad: el producto vectorial de un vector en el eje X por otro en el eje Y apunta en el sentido positivo del eje Z.

Como el electrón tiene carga **negativa**, la fuerza apunta al revés: **en el sentido negativo del eje Z**. Conviene hacer este paso en dos tiempos: primero el producto vectorial, y después el signo de la carga.

Radio de la trayectoria: la fuerza magnética hace de fuerza centrípeta, $e \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 \div r$, de donde $r = m \cdot v \div (e \cdot B) = (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (2,0 \times 10^6 \text{ m/s}) \div [(1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (0,50 \text{ T})] = (1,82 \times 10^{-24}) \div (8,0 \times 10^{-20}) \text{ m} = 2,275 \times 10^{-5} \text{ m}$, unas 23 milésimas de milímetro.

Comprobación por la fuerza ya calculada: $r = m \cdot v^2 \div F = (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (4,0 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}^2) \div (1,6 \times 10^{-13} \text{ N}) = (3,64 \times 10^{-18}) \div (1,6 \times 10^{-13}) \text{ m} = 2,275 \times 10^{-5} \text{ m}$. Coincide.

▲ La fuerza magnética curva la trayectoria y deja el módulo de la velocidad igual: al ser perpendicular a la velocidad en todo momento, su trabajo es nulo y la energía cinética del electrón no cambia. Decir que el campo magnético acelera la partícula solo es correcto en el sentido de que cambia la dirección del vector velocidad.

8

Dos hilos conductores rectos, largos y paralelos están separados **0,20 m**. Por el primero circula una corriente de **10 A** y por el segundo una de **5,0 A**, las dos en el mismo sentido. Con $\mu_0 = 4 \cdot \pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, calcula el campo que crea el primer hilo en la posición del segundo y la fuerza por unidad de longitud entre ellos, indicando si es de atracción o de repulsión.

Solución

Campo creado por un hilo recto y largo a una distancia d : $B = \mu_0 \cdot I \div (2 \cdot \pi \cdot d) = (4 \cdot \pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \times (10 \text{ A}) \div (2 \cdot \pi \times 0,20 \text{ m})$.

El número π se cancela arriba y abajo, lo que conviene hacer antes de tocar la calculadora: queda $B = (4 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}) \div (0,40 \text{ m}) = \mathbf{1,0 \times 10^{-5} \text{ T}}$.

La fuerza sobre un conductor por el que circula I_2 dentro de ese campo es $F = B \cdot I_2 \cdot L$, con el campo perpendicular al hilo. Por unidad de longitud: $F \div L = B \cdot I_2 = (1,0 \times 10^{-5} \text{ T}) \times (5,0 \text{ A}) = \mathbf{5,0 \times 10^{-5} \text{ N/m}}$.

El sentido: con las dos corrientes en el mismo sentido la fuerza es de **atracción**; si se invirtiera una de ellas, el módulo sería idéntico y la fuerza pasaría a ser de repulsión.

Comprobación desde el otro hilo, que es lo que obliga la tercera ley de Newton: el segundo hilo crea en el primero $B' = (4 \cdot \pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \times (5,0 \text{ A}) \div (2 \cdot \pi \times 0,20 \text{ m}) = 5,0 \times 10^{-6} \text{ T}$, y la fuerza por unidad de longitud sobre el primero es $(5,0 \times 10^{-6} \text{ T}) \times (10 \text{ A}) = 5,0 \times 10^{-5} \text{ N/m}$. El mismo valor, como tenía que ser.

9

Una espira cuadrada de **0,20 m de lado** y resistencia **0,40 Ω** está colocada perpendicularmente a un campo magnético uniforme. El campo disminuye de forma constante desde **0,50 T hasta 0,10 T en 0,20 s**. Calcula la variación de flujo, la fuerza electromotriz inducida, la intensidad de la corriente inducida y la carga total que circula, y razona en qué sentido circula esa corriente.

Solución

Área de la espira: $A = (0,20 \text{ m})^2 = 0,040 \text{ m}^2$. Al estar la espira perpendicular al campo, la perpendicular a su superficie es paralela al campo y $\cos \alpha = 1$, así que $\Phi = B \cdot A$.

Flujo inicial: $\Phi_i = (0,50 \text{ T}) \times (0,040 \text{ m}^2) = 0,020 \text{ Wb}$. Flujo final: $\Phi_f = (0,10 \text{ T}) \times (0,040 \text{ m}^2) = 0,0040 \text{ Wb}$. Variación: $\Delta\Phi = 0,0040 \text{ Wb} - 0,020 \text{ Wb} = \mathbf{-1,6 \times 10^{-2} \text{ Wb}}$, negativa porque el flujo disminuye.

Fuerza electromotriz: $\varepsilon = -\Delta\Phi \div \Delta t = -(-1,6 \times 10^{-2} \text{ Wb}) \div (0,20 \text{ s}) = \mathbf{+8,0 \times 10^{-2} \text{ V}}$. Unidades: $\text{Wb} \div \text{s} = \text{V}$. El signo positivo sale del signo menos de la ley de Faraday aplicado a una variación negativa, y no es un detalle decorativo: es lo que fija el sentido.

Intensidad: $I = \varepsilon \div R = (8,0 \times 10^{-2} \text{ V}) \div (0,40 \Omega) = \mathbf{0,20 \text{ A}}$.

Sentido, por la ley de Lenz: la corriente inducida se opone al cambio, y aquí el cambio es que el flujo **disminuye**. Para oponerse, la corriente circula en el sentido que crea dentro de la espira un campo **del mismo sentido** que el original, de modo que sostenga el flujo. Si el campo hubiera aumentado, la corriente iría al revés.

Carga total: $q = I \cdot \Delta t = (0,20 \text{ A}) \times (0,20 \text{ s}) = \mathbf{0,040 \text{ C}}$. Comprobación por otro camino, sin pasar por el tiempo: $q = |\Delta\Phi| \div R = (1,6 \times 10^{-2} \text{ Wb}) \div (0,40 \Omega) = 0,040 \text{ C}$. Coincide, y de paso muestra que la carga desplazada depende del cambio de flujo y no de lo deprisa que se produzca.

El movimiento armónico simple

Lo que hay que saber

Ecuación: $x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$, con A la amplitud en metros, ω la pulsación en rad/s y φ_0 la fase inicial en radianes. De ahí, $T = 2 \cdot \pi \div \omega$ en segundos y $f = 1 \div T$ en hercios.

Velocidad y aceleración: $v = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$, con $v_{\text{máx}} = A \cdot \omega$, y $a = -\omega^2 \cdot x$, con $a_{\text{máx}} = A \cdot \omega^2$. ▲ Ese signo menos define el movimiento: la aceleración apunta **al revés** que la elongación, hacia el centro de la oscilación. En los extremos la velocidad es cero y la aceleración máxima; en el centro, al revés.

Condición dinámica: hay MAS cuando la fuerza recuperadora es proporcional y de signo contrario a la elongación, $F = -k \cdot x$. Para un cuerpo de masa m sujeto a un resorte de constante k , $\omega = \sqrt{(k \div m)}$, con k en N/m.

Energía: $E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$, y se mantiene constante durante la oscilación. Se reparte entre $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ y $E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$. De ahí sale $|v| = \omega \cdot \sqrt{(A^2 - x^2)}$, que da el **módulo** de la velocidad en cualquier punto sin pasar por el tiempo. ▲ Solo el módulo: por cada elongación x la partícula pasa dos veces, una en cada sentido, así que $v = \pm \omega \cdot \sqrt{(A^2 - x^2)}$ y el signo lo fija el sentido del movimiento, que esta expresión no conoce.

Péndulo simple, con oscilaciones de amplitud pequeña: $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L \div g)}$. ▲ No aparece la masa: colgar el doble de masa deja el periodo igual. Lo que sí lo cambia es la longitud y el valor de g del lugar.

- 10** Una partícula describe un movimiento armónico simple según $x = 0,05 \cdot \sin(10 \cdot t + \pi/2)$, con x en metros y t en segundos. Determina la amplitud, la pulsación, la fase inicial, el periodo y la frecuencia, la velocidad máxima y la aceleración máxima, y di dónde está y qué aceleración tiene la partícula en el instante inicial.

Solución

Comparando con $x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$ se leen los tres parámetros: **$A = 0,05 \text{ m}$, $\omega = 10 \text{ rad/s}$ y $\varphi_0 = \pi/2 \text{ rad}$.**

Periodo: $T = 2 \cdot \pi \div \omega = 2 \cdot \pi \div (10 \text{ rad/s}) = \mathbf{0,628 \text{ s}}$. Frecuencia: $f = 1 \div T = \mathbf{1,59 \text{ Hz}}$. Comprobación: $f = \omega \div (2 \cdot \pi) = 10 \div 6,283 = 1,59 \text{ Hz}$, el mismo número por otro camino.

Velocidad máxima: $v_{\text{máx}} = A \cdot \omega = (0,05 \text{ m}) \times (10 \text{ rad/s}) = \mathbf{0,50 \text{ m/s}}$. Ocurre al pasar por el centro.

Aceleración máxima: $a_{\text{máx}} = A \cdot \omega^2 = (0,05 \text{ m}) \times (10 \text{ rad/s})^2 = (0,05 \text{ m}) \times (100 \text{ s}^{-2}) = \mathbf{5,0 \text{ m/s}^2}$. Ocurre en los extremos.

En $t = 0$: $x = 0,05 \times \sin(\pi/2) = 0,05 \times 1 = \mathbf{0,05 \text{ m}}$, es decir, la partícula arranca en el extremo positivo. Eso encaja con la fase inicial $\pi/2$, que es justo la que coloca el seno en su valor máximo.

Aceleración en ese instante: $a = -\omega^2 \cdot x = -(100 \text{ s}^{-2}) \times (0,05 \text{ m}) = \mathbf{-5,0 \text{ m/s}^2}$. Coincide en módulo con $a_{\text{máx}}$, como corresponde a un extremo, y el signo negativo dice que apunta hacia el centro mientras la partícula está en el lado positivo. Ese signo contrario al de la elongación es lo que define el movimiento armónico.

- 11** Un cuerpo de **$0,50 \text{ kg}$** unido a un resorte de constante elástica **$k = 200 \text{ N/m}$** oscila con una amplitud de **$0,10 \text{ m}$** sobre una mesa horizontal en la que el rozamiento es despreciable. Calcula la pulsación y el periodo, la energía mecánica del oscilador, y la energía potencial, la energía cinética, la velocidad y la aceleración cuando la elongación vale $0,060 \text{ m}$.

Solución

Pulsación: $\omega = \sqrt{(k \div m)} = \sqrt{[(200 \text{ N/m}) \div (0,50 \text{ kg})]} = \sqrt{(400 \text{ s}^{-2})} = \mathbf{20 \text{ rad/s}}$. Las unidades cuadran: $(\text{N/m}) \div \text{kg} = (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) \div (\text{m} \cdot \text{kg}) = \text{s}^{-2}$, y su raíz es s^{-1} .

Periodo: $T = 2 \cdot \pi \div \omega = 2 \cdot \pi \div (20 \text{ rad/s}) = \mathbf{0,314 \text{ s}}$.

Energía mecánica: $E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 = \frac{1}{2} \times (200 \text{ N/m}) \times (0,10 \text{ m})^2 = \frac{1}{2} \times (200 \text{ N/m}) \times (0,010 \text{ m}^2) = \mathbf{1,0 \text{ J}}$. Se mantiene constante durante toda la oscilación.

Energía potencial en $x = 0,060$ m: $E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 = \frac{1}{2} \times (200 \text{ N/m}) \times (0,0036 \text{ m}^2) = \mathbf{0,36 \text{ J}}$. Y la cinética es lo que falta hasta el total: $E_c = 1,0 \text{ J} - 0,36 \text{ J} = \mathbf{0,64 \text{ J}}$.

Velocidad: de $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ sale $v^2 = 2 \times (0,64 \text{ J}) \div (0,50 \text{ kg}) = 2,56 \text{ m}^2/\text{s}^2$, de donde $|v| = \mathbf{1,6 \text{ m/s}}$, es decir, $v = \pm \mathbf{1,6 \text{ m/s}}$: el enunciado da la elongación y no el sentido, y por esa posición la partícula pasa dos veces, una de ida y otra de vuelta. Lo que queda determinado es la rapidez. Comprobación con la expresión del MAS: $|v| = \omega \cdot \sqrt{(A^2 - x^2)} = (20 \text{ rad/s}) \times \sqrt{(0,010 \text{ m}^2 - 0,0036 \text{ m}^2)} = 20 \times 0,080 \text{ m/s} = 1,6 \text{ m/s}$. Coincide.

Aceleración: $a = -\omega^2 \cdot x = -(400 \text{ s}^{-2}) \times (0,060 \text{ m}) = \mathbf{-24 \text{ m/s}^2}$. El signo negativo indica que apunta hacia el centro, en sentido contrario a la elongación, que es positiva.

12

Un péndulo simple de **2,45 m** de longitud oscila con amplitud pequeña en un lugar donde la intensidad del campo gravitatorio vale **$g = 9,80 \text{ m/s}^2$** . Halla su periodo. Después razona qué le ocurre al periodo si se cuelga el doble de masa, si se lleva el péndulo a un lugar donde g vale $2,45 \text{ m/s}^2$ y si se cuadruplica la longitud del hilo.

Solución

Periodo de un péndulo simple con oscilaciones de amplitud pequeña: $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L \div g)} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{[(2,45 \text{ m}) \div (9,80 \text{ m/s}^2)]} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(0,25 \text{ s}^2)} = 2 \cdot \pi \times (0,50 \text{ s}) = \mathbf{3,14 \text{ s}}$.

Con el doble de masa el periodo **no cambia**: sigue siendo 3,14 s. La masa no aparece en la expresión, y eso tiene sentido físico, porque la fuerza recuperadora es proporcional al peso, que es proporcional a la masa, y al aplicar la segunda ley de Newton la masa se simplifica.

En un lugar con $g = 2,45 \text{ m/s}^2$, que es la cuarta parte: $L \div g = (2,45 \text{ m}) \div (2,45 \text{ m/s}^2) = 1,0 \text{ s}^2$, y $T = 2 \cdot \pi \times (1,0 \text{ s}) = \mathbf{6,28 \text{ s}}$. El periodo se ha duplicado, porque va con $1 \div \sqrt{g}$ y dividir g entre cuatro multiplica el periodo por dos.

Con el hilo cuadruplicado, $L = 9,80 \text{ m}$: $L \div g = (9,80 \text{ m}) \div (9,80 \text{ m/s}^2) = 1,0 \text{ s}^2$ y $T = \mathbf{6,28 \text{ s}}$. También se duplica, por la misma razón: el periodo va con $\sqrt{L}$.

Comprobación de que los dos cambios anteriores son coherentes: cuadruplicar L y dividir g entre cuatro dan el mismo cociente $L \div g$, así que tienen que dar el mismo periodo, y así sale.

▲ La condición de la amplitud pequeña no es un adorno: con oscilaciones grandes el periodo empieza a depender de la amplitud y esta expresión deja de ser válida. En los ejercicios de este tema se supone que se cumple.

Lo que hay que saber

Ecuación de una onda armónica: $y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - k \cdot x)$. El **número de onda** es $k = 2 \cdot \pi \div \lambda$, en rad/m. El signo menos delante de la x indica que la onda avanza hacia las x positivas; con signo más, hacia las negativas.

Relación fundamental: $v = \lambda \cdot f = \omega \div k$, en m/s. Una onda tiene doble periodicidad: se repite cada T en el tiempo y cada λ en el espacio. Al pasar a otro medio cambia la velocidad y la longitud de onda, y la **frecuencia se mantiene**.

Transversales (la perturbación es perpendicular al avance, como en una cuerda) y **longitudinales** (en la misma dirección del avance). El sonido en el aire es longitudinal y necesita un medio material.

Intensidad de una fuente puntual: $I = P \div (4 \cdot \pi \cdot r^2)$, en W/m^2 . El **nivel de intensidad** es $\beta = 10 \cdot \log(I \div I_0)$, en decibelios, con $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. ▲ Es una escala logarítmica: sumar 10 dB es multiplicar la intensidad por diez, y sumar 20 dB, por cien.

Ondas estacionarias en una cuerda sujeta por los dos extremos: caben las longitudes de onda $\lambda_n = 2 \cdot L \div n$, con $n = 1, 2, 3, \dots$, y las frecuencias $f_n = n \cdot v \div (2 \cdot L)$. La de $n = 1$ es la fundamental y las demás son sus armónicos.

- 13** Una onda armónica que se propaga por una cuerda responde a $y = 0,02 \cdot \text{sen}(4 \cdot \pi \cdot t - 2 \cdot \pi \cdot x)$, con y y x en metros y t en segundos. Determina la amplitud, el periodo, la frecuencia, la longitud de onda, la velocidad de propagación y su sentido, y la velocidad máxima de un punto de la cuerda.

Solución

Comparando con $y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - k \cdot x)$: **$A = 0,02 \text{ m}$, $\omega = 4 \cdot \pi \text{ rad/s}$ y $k = 2 \cdot \pi \text{ rad/m}$.**

Periodo: $T = 2 \cdot \pi \div \omega = 2 \cdot \pi \div (4 \cdot \pi \text{ rad/s}) = \mathbf{0,5 \text{ s}}$. Frecuencia: $f = 1 \div T = \mathbf{2 \text{ Hz}}$.

Longitud de onda: $\lambda = 2 \cdot \pi \div k = 2 \cdot \pi \div (2 \cdot \pi \text{ rad/m}) = \mathbf{1 \text{ m}}$.

Velocidad de propagación: $v = \omega \div k = (4 \cdot \pi \text{ rad/s}) \div (2 \cdot \pi \text{ rad/m}) = \mathbf{2 \text{ m/s}}$. Comprobación por la relación fundamental: $v = \lambda \cdot f = (1 \text{ m}) \times (2 \text{ Hz}) = 2 \text{ m/s}$. Coincide.

Sentido: el signo **menos** delante de la x indica que la onda avanza hacia las x crecientes. Con un signo más avanzaría en sentido contrario.

Velocidad máxima de un punto de la cuerda: $v_{\text{máx}} = A \cdot \omega = (0,02 \text{ m}) \times (4 \cdot \pi \text{ rad/s}) = \mathbf{0,251 \text{ m/s}}$. ▲

No confundir esta velocidad con la de propagación: los 2 m/s son lo que avanza la perturbación, y los 0,251 m/s lo más deprisa que se mueve un punto concreto de la cuerda, que solo sube y baja.

- 14** En un punto situado a **2,0 m** de una fuente sonora puntual la intensidad del sonido vale **$1,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$** . Con **$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$** , calcula el nivel de intensidad en ese punto, el nivel que habría si la intensidad se multiplicara por cien, la intensidad a 4,0 m de la fuente y la potencia que emite la fuente.

Solución

Nivel de intensidad: $\beta = 10 \cdot \log(I \div I_0) = 10 \cdot \log[(1,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2) \div (10^{-12} \text{ W/m}^2)] = 10 \cdot \log(10^6) = 10 \times 6 = \mathbf{60 \text{ dB}}$. El cociente es adimensional, que es lo que permite tomar su logaritmo.

Si la intensidad se multiplica por cien, $I = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ y $\beta = 10 \cdot \log(10^8) = \mathbf{80 \text{ dB}}$: veinte decibelios más. La escala es logarítmica, así que sumar 20 dB equivale a multiplicar la intensidad por cien, y sumar 10 dB, a multiplicarla por diez.

A 4,0 m, el doble de distancia: en una fuente puntual la intensidad va con $1 \div r^2$, así que se divide entre cuatro: $I = (1,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2) \div 4 = \mathbf{2,5 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2}$.

Su nivel: $\beta = 10 \cdot \log[(2,5 \times 10^{-7}) \div (10^{-12})] = 10 \cdot \log(2,5 \times 10^5) = \mathbf{53,98 \text{ dB}}$. Es decir, al doblar la

distancia el nivel baja 6,02 dB, no se reduce a la mitad.

Potencia de la fuente: toda la energía atraviesa la esfera de radio 2,0 m, de área $4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \times (4,0 \text{ m})^2 = 50,27 \text{ m}^2$. Entonces $P = I \times \text{área} = (1,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2) \times (50,27 \text{ m}^2) = \mathbf{5,03 \times 10^{-5} \text{ W}}$.

Comprobación: con esa potencia, la intensidad a 4,0 m tendría que ser $P \div (4 \cdot \pi \times 16,0 \text{ m}^2) = (5,03 \times 10^{-5} \text{ W}) \div (201,1 \text{ m}^2) = 2,5 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$, que es lo calculado antes por la proporción.

15

Una cuerda de **1,20 m** sujeta por sus dos extremos vibra en su **tercer armónico** con una frecuencia de **300 Hz**. Calcula la longitud de onda de ese armónico, la velocidad de propagación de las ondas en la cuerda, la frecuencia fundamental y su longitud de onda, y di cuántos nodos y cuántos vientres hay en el tercer armónico.

Solución

En una cuerda sujeta por los dos extremos las longitudes de onda posibles son $\lambda_n = 2 \cdot L \div n$. Para el tercer armónico, $n = 3$: $\lambda_3 = 2 \times (1,20 \text{ m}) \div 3 = (2,40 \text{ m}) \div 3 = \mathbf{0,80 \text{ m}}$.

Velocidad: $v = \lambda_3 \cdot f_3 = (0,80 \text{ m}) \times (300 \text{ Hz}) = \mathbf{240 \text{ m/s}}$. Depende de la cuerda (de su tensión y de su masa por unidad de longitud) y es la misma para todos los armónicos.

Frecuencia fundamental: $f_1 = v \div (2 \cdot L) = (240 \text{ m/s}) \div (2,40 \text{ m}) = \mathbf{100 \text{ Hz}}$. Comprobación: las frecuencias de los armónicos son múltiplos enteros de la fundamental, y $3 \times 100 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$, que es el dato de partida.

Longitud de onda del fundamental: $\lambda_1 = 2 \cdot L = \mathbf{2,40 \text{ m}}$. Y se comprueba con la velocidad: $(2,40 \text{ m}) \times (100 \text{ Hz}) = 240 \text{ m/s}$, la misma de antes.

Nodos y vientres del tercer armónico: los dos extremos están sujetos, así que son nodos, y entre ellos caben tres semilongitudes de onda. Resultan **4 nodos** (los dos extremos y dos interiores) y **3 vientres**, uno en el centro de cada semilongitud de onda.

Comprobación del recuento con la longitud: tres semilongitudes de onda ocupan $3 \times (0,80 \text{ m} \div 2) = 3 \times 0,40 \text{ m} = 1,20 \text{ m}$, que es exactamente la longitud de la cuerda.

La óptica geométrica y la óptica física

Lo que hay que saber

Índice de refracción: $n = c \div v$, con $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ la velocidad de la luz en el vacío. Es adimensional y, para la luz visible en los medios transparentes de este tema, vale 1 o más, porque en ellos la luz avanza más despacio que en el vacío.

Ley de Snell: $n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r$, con los ángulos medidos desde la **normal** a la superficie. ▲ Al pasar a un medio de **mayor índice de refracción** el rayo se acerca a la normal; lo que manda es el índice, no la densidad de masa, y con incidencia perpendicular ($i = 0^\circ$) no hay desviación alguna.

Ángulo límite: al pasar de un medio a otro de índice menor existe un ángulo L con $\text{sen } L = n_2 \div n_1$ a partir del cual el rayo ya no sale: se produce **reflexión total**. Es lo que hace funcionar la fibra óptica.

Lentes delgadas, con el criterio de signos habitual (origen en el centro de la lente, distancias positivas hacia la derecha, luz incidiendo de izquierda a derecha): $\mathbf{1 \div s' - 1 \div s = 1 \div f'}$. El objeto queda a la izquierda, así que su s es negativa. El **aumento lateral** es $\beta = s' \div s$.

Cómo se leen los signos del resultado: s' positiva, imagen **real** (se recoge en una pantalla); s' negativa, imagen **virtual**. β negativo, imagen **invertida**; β positivo, derecha. Y el valor absoluto de β dice si es mayor o menor que el objeto.

Óptica física: la interferencia y la difracción son las pruebas de que la luz es una onda. En la experiencia de la doble rendija, con una separación d entre rendijas y una pantalla a una distancia D , las franjas brillantes quedan separadas $\Delta y = \lambda \cdot D \div d$.

16

Un rayo de luz pasa del aire, de índice de refracción $n_1 = 1,00$, a un vidrio de $n_2 = 1,50$, con un ángulo de incidencia de 30° medido desde la normal. La luz tiene en el aire una longitud de onda de 600 nm y $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. Calcula el ángulo de refracción, la velocidad y la longitud de onda de la luz dentro del vidrio, su frecuencia y el ángulo límite para pasar del vidrio al aire.

Solución

Ley de Snell: $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$, de donde $\sin r = (1,00 \times \sin 30^\circ) \div 1,50 = (1,00 \times 0,500) \div 1,50 = 0,3333$ y $r = 19,47^\circ$. El rayo se acerca a la normal, porque pasa a un medio de índice mayor.

Velocidad en el vidrio: $v = c \div n_2 = (3,0 \times 10^8 \text{ m/s}) \div 1,50 = 2,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Frecuencia: se calcula en el aire, $f = c \div \lambda = (3,0 \times 10^8 \text{ m/s}) \div (6,0 \times 10^{-7} \text{ m}) = 5,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$, y es la misma dentro del vidrio: al cambiar de medio la frecuencia se mantiene, porque la marca la fuente.

Longitud de onda en el vidrio: $\lambda' = v \div f = (2,0 \times 10^8 \text{ m/s}) \div (5,0 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 4,0 \times 10^{-7} \text{ m} = 400 \text{ nm}$.

Comprobación por el atajo $\lambda' = \lambda \div n = (600 \text{ nm}) \div 1,50 = 400 \text{ nm}$. Coincide.

Ángulo límite del vidrio al aire: $\sin L = n_{\text{aire}} \div n_{\text{vidrio}} = 1,00 \div 1,50 = 0,6667$, de donde $L = 41,81^\circ$. Por encima de ese ángulo de incidencia desde el vidrio, el rayo no sale y se produce reflexión total.

▲ Conviene afinar la regla que se suele memorizar: lo que decide si el rayo se acerca o se aleja de la normal es el **índice de refracción** del medio, no lo denso que sea en masa; y con incidencia perpendicular ($i = 0^\circ$) el rayo entra sin desviarse por mucho que cambie el índice, porque $\sin 0^\circ = 0$ obliga a que el ángulo de refracción también sea cero.

17

Un objeto de $3,0 \text{ cm}$ de altura se coloca 30 cm delante de una lente delgada convergente de distancia focal imagen $f' = +20 \text{ cm}$. Con el criterio de signos habitual (origen en el centro de la lente, luz que incide de izquierda a derecha y distancias positivas hacia la derecha), calcula la posición y el tamaño de la imagen, su aumento lateral y la potencia de la lente, y di si la imagen es real o virtual y si está derecha o invertida.

Solución

Con ese criterio el objeto está a la izquierda de la lente, así que su distancia entra con signo negativo: $s = -30 \text{ cm}$. La distancia focal imagen de una lente convergente es positiva: $f' = +20 \text{ cm}$.

Ecuación de las lentes delgadas: $1 \div s' - 1 \div s = 1 \div f'$, de donde $1 \div s' = 1 \div f' + 1 \div s = 1 \div (20 \text{ cm}) + 1 \div (-30 \text{ cm}) = (3 - 2) \div (60 \text{ cm}) = 1 \div (60 \text{ cm})$.

Por tanto $s' = +60 \text{ cm}$. El signo positivo indica que la imagen se forma a la derecha de la lente, en el lado por el que sale la luz, así que es una imagen **real** y se puede recoger en una pantalla colocada ahí.

Aumento lateral: $\beta = s' \div s = (+60 \text{ cm}) \div (-30 \text{ cm}) = -2$. El signo negativo dice que la imagen está **invertida**, y el valor absoluto, que mide el doble que el objeto.

Tamaño de la imagen: $y' = \beta \cdot y = (-2) \times (3,0 \text{ cm}) = -6,0 \text{ cm}$, es decir, $6,0 \text{ cm}$ de alto y del revés.

Potencia de la lente: $P = 1 \div f'$, con la focal en metros: $P = 1 \div (0,20 \text{ m}) = +5,0 \text{ dioptrías}$.

Comprobación de coherencia: el objeto está más lejos que el foco (30 cm frente a 20 cm), y para una lente convergente eso tiene que dar imagen real e invertida, que es justo lo que han dicho los dos signos.

18

En una experiencia de doble rendija, dos rendijas separadas $d = 0,10 \text{ mm}$ se iluminan con luz de $\lambda = 600 \text{ nm}$ y las franjas se recogen en una pantalla situada a $D = 2,0 \text{ m}$. Calcula la separación entre dos franjas brillantes consecutivas, y repite el cálculo con luz de 450 nm . Razona qué ocurre si se acercan las rendijas entre sí.

Solución

Primero, las unidades al SI: $d = 0,10 \text{ mm} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ m}$ y $\lambda = 600 \text{ nm} = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m}$. Mezclar

milímetros con nanómetros da un resultado sin sentido, y se evita pasando todo a metros antes de sustituir.

Separación entre franjas brillantes consecutivas: $\Delta y = \lambda \cdot D \div d = (6,0 \times 10^{-7} \text{ m}) \times (2,0 \text{ m}) \div (1,0 \times 10^{-4} \text{ m}) = (1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2) \div (1,0 \times 10^{-4} \text{ m}) = \mathbf{1,2 \times 10^{-2} \text{ m}}$, es decir, 1,2 cm.

Con luz de 450 nm = $4,5 \times 10^{-7} \text{ m}$: $\Delta y = (4,5 \times 10^{-7} \text{ m}) \times (2,0 \text{ m}) \div (1,0 \times 10^{-4} \text{ m}) = \mathbf{9,0 \times 10^{-3} \text{ m}}$, o sea 0,90 cm. Las franjas quedan más juntas.

Comprobación por proporciones, sin repetir la cuenta entera: Δy es proporcional a λ , así que $(450 \div 600) \times 1,2 \text{ cm} = 0,75 \times 1,2 \text{ cm} = 0,90 \text{ cm}$. El mismo resultado.

Si se acercan las rendijas, d disminuye y como Δy va con $1 \div d$, las franjas **se separan** más. Por ejemplo, con $d = 0,050 \text{ mm}$ la separación sería el doble, 2,4 cm.

Que aparezcan franjas alternas de luz y de oscuridad es la prueba de que la luz interfiere, y eso solo lo hace una onda: dos haces de partículas **clásicas** se sumarían punto a punto y darían más impactos en todas partes, no zonas oscuras. ▲ Con electrones, en cambio, el experimento también da franjas: es la dualidad onda-corpúsculo del último tema.

La física moderna

Lo que hay que saber

Relatividad especial: la velocidad de la luz en el vacío vale lo mismo para cualquier observador, por deprisa que se mueva. De ahí salen la dilatación del tiempo, la contracción de longitudes y la equivalencia $E = m \cdot c^2$. ▲ En esta página la relatividad se queda en esta idea, sin ejercicio propio: se declara en el alcance.

Efecto fotoeléctrico: la luz entrega su energía en paquetes, $E = h \cdot \nu = h \cdot c \div \lambda$, con $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Un fotón arranca un electrón si su energía supera el **trabajo de extracción** W_0 del metal, y el sobrante se va en energía cinética: $E_{c,\text{máx}} = h \cdot \nu - W_0$.

▲ Lo que decide si hay emisión es la **frecuencia**, no la intensidad: por debajo de la frecuencia umbral $\nu_0 = W_0 \div h$ no se arranca electrón alguno por mucho que se suba la potencia de la lámpara. Subir la intensidad por encima del umbral aumenta el **número** de electrones, no su energía.

Dualidad onda-corpúsculo: a cualquier partícula le corresponde una longitud de onda $\lambda = h \div p$, con p su cantidad de movimiento; mientras la velocidad sea pequeña frente a la de la luz, $p = m \cdot v$ y queda $\lambda = h \div (m \cdot v)$, que es la forma que se usa aquí. Para objetos grandes sale tan pequeña que no se aprecia; para un electrón, comparable a las distancias entre átomos.

Núcleo: la masa de un núcleo es menor que la suma de las masas de sus protones y neutrones. Ese **defecto de masa** Δm equivale a la **energía de enlace** $E = \Delta m \cdot c^2$; en las unidades cómodas del tema, un defecto de masa de **1 u** equivale a **931,5 MeV** de energía, que es lo mismo que escribir $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

Radiactividad: emisión α (núcleos de helio), β (electrones en la β^- y positrones en la β^+) y γ (radiación electromagnética). El número de núcleos sin desintegrar decae de forma exponencial, y el **periodo de semidesintegración** es el tiempo en que queda la mitad.

- 19** Un metal tiene un trabajo de extracción de **2,0 eV** y se ilumina con luz de **400 nm**. Datos: $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$, **1 eV = $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$** y $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Calcula la energía de cada fotón, la energía cinética máxima de los electrones emitidos, su velocidad máxima y la longitud de onda umbral del metal. Razona qué ocurriría con luz de 700 nm.

Solución

Trabajo de extracción en julios: $W_0 = (2,0 \text{ eV}) \times (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = \mathbf{3,2 \times 10^{-19} \text{ J}}$.

Energía de un fotón: $E = h \cdot c \div \lambda = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \times (3,0 \times 10^8 \text{ m/s}) \div (4,0 \times 10^{-7} \text{ m}) = (1,989 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}) \div (4,0 \times 10^{-7} \text{ m}) = \mathbf{4,97 \times 10^{-19} \text{ J}}$, que en electronvoltios son $(4,97 \times 10^{-19}) \div (1,6 \times 10^{-19}) = \mathbf{3,11 \text{ eV}}$.

Energía cinética máxima: $E_{c,m\acute{a}x} = h \cdot \nu - W_0 = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} - 3,2 \times 10^{-19} \text{ J} = \mathbf{1,77 \times 10^{-19} \text{ J}}$, es decir, 1,11 eV. Se llama máxima porque es la de los electrones que salen de la superficie sin perder energía por el camino.

Velocidad máxima: de $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ sale $v^2 = 2 \times (1,77 \times 10^{-19} \text{ J}) \div (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) = 3,90 \times 10^{11} \text{ m}^2/\text{s}^2$, de donde $\mathbf{v = 6,24 \times 10^5 \text{ m/s}}$.

Longitud de onda umbral: es aquella cuyo fotón tiene justo la energía W_0 , $\lambda_0 = h \cdot c \div W_0 = (1,989 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}) \div (3,2 \times 10^{-19} \text{ J}) = 6,22 \times 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{622 \text{ nm}}$. Comprobación con la frecuencia: $\nu_0 = W_0 \div h = 4,83 \times 10^{14} \text{ Hz}$, y $c \div \nu_0$ devuelve los mismos 622 nm.

▲ Con luz de 700 nm, que es mayor que la umbral, cada fotón lleva menos energía que W_0 y **no** se emiten electrones, por mucho que se aumente la potencia de la lámpara. Subir la intensidad envía más fotones por segundo, y cada uno sigue sin llegar: lo que decide la emisión es la frecuencia, y lo que decide cuántos electrones salen (una vez superado el umbral) es la intensidad.

20

Calcula el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón del núcleo de **helio-4**, que tiene 2 protones y 2 neutrones. Datos: masa del protón **1,00728 u**, masa del neutrón **1,00866 u**, masa del núcleo de helio-4 **4,00151 u**, y la equivalencia **un defecto de masa de 1 u = 931,5 MeV de energía** (o sea, $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$).

Solución

Primero, la masa que tendrían las partículas por separado: $2 \times (1,00728 \text{ u}) + 2 \times (1,00866 \text{ u}) = 2,01456 \text{ u} + 2,01732 \text{ u} = \mathbf{4,03188 \text{ u}}$.

Defecto de masa: $\Delta m = 4,03188 \text{ u} - 4,00151 \text{ u} = \mathbf{0,03037 \text{ u}}$. Sale positivo, y significa que el núcleo pesa **menos** que sus piezas sueltas: esa masa es la que se liberó al formarlo.

Energía de enlace: $E = \Delta m \times 931,5 \text{ MeV/u} = (0,03037 \text{ u}) \times (931,5 \text{ MeV/u}) = \mathbf{28,29 \text{ MeV}}$. Es la energía que habría que aportar para deshacer el núcleo en sus dos protones y sus dos neutrones.

Energía de enlace por nucleón: se reparte entre las cuatro partículas, $(28,29 \text{ MeV}) \div 4 = \mathbf{7,07 \text{ MeV por nucleón}}$. Dividir entre el número de nucleones es lo que permite **comparar** núcleos de tamaños distintos con la misma vara; no significa que la cifra sea la misma para todos ni que decida por sí sola si un núcleo se desintegra.

Comprobación de orden de magnitud frente a la química: una reacción química mueve unos pocos electronvoltios por átomo, y aquí se manejan millones de electronvoltios por nucleón. Ese salto de seis órdenes de magnitud es la razón de que una reacción nuclear libere tantísima más energía que una combustión.

▲ Este ejercicio acota una idea que se arrastra desde la ESO: en una reacción **química** dentro de un recipiente cerrado la masa se conserva con una aproximación excelente —el cambio existe, pero es millones de veces menor y ninguna balanza lo aprecia—, mientras que al formarse un núcleo la suma de las masas cambia de forma medible, y ese cambio es justamente la energía de enlace.

La estructura del átomo y los números cuánticos

Lo que hay que saber

Los cuatro números cuánticos y lo que puede valer cada uno: $n = 1, 2, 3 \dots$ (nivel) · $l = 0$ hasta $n - 1$ (subnivel: 0 es s, 1 es p, 2 es d, 3 es f) · $m_l =$ desde $-l$ hasta $+l$ (orbital concreto) · $m_s = +\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ (número cuántico de **espín**). ▲ El espín no es un giro del electrón sobre sí mismo: es una propiedad propia de la partícula, sin equivalente en la mecánica de los cuerpos que giran, y el nombre es herencia histórica.

▲ Un **orbital** es una **función de onda** de un electrón en el átomo; lo que se dibuja como una nube o un lóbulo es la región donde esa función da alta probabilidad de encontrarlo, y no un camino recorrido. Hablar de la órbita del electrón corresponde al modelo de Bohr, que el modelo actual sustituyó; por eso un orbital p se describe por su forma y su orientación, y no por un radio.

Principio de exclusión de Pauli: dos electrones del mismo átomo no pueden tener iguales los cuatro números cuánticos. Como consecuencia, en cada orbital caben dos electrones y con espines opuestos.

Regla de Hund: dentro de un mismo subnivel los electrones se colocan desapareados y con el mismo espín mientras queden orbitales libres. Es lo que decide cuántos electrones desapareados tiene un átomo.

Orden de llenado por energía creciente: $1s\ 2s\ 2p\ 3s\ 3p\ 4s\ 3d\ 4p\ 5s\ 4d\ 5p \dots$ ▲ Al formar el catión de un metal de transición **de la primera serie** (del escandio al cinc) los electrones que salen primero son los del subnivel **4s**, aunque se llenara antes que el 3d; en las series siguientes el papel del 4s lo hace el 5s o el 6s.

Recuentos que resuelven medio tema: en el nivel n hay **n^2 orbitales** y caben **$2 \cdot n^2$ electrones**; en un subnivel de número l hay **$2 \cdot l + 1$ orbitales** y caben **$2 \cdot (2 \cdot l + 1)$ electrones**.

21

Escribe la configuración electrónica del manganeso en su estado fundamental (**$Z = 25$**), comprueba el recuento de electrones, di a qué periodo y a qué grupo del sistema periódico pertenece, cuántos electrones desapareados tiene y cuál es la configuración del ion Mn^{2+} .

Solución

Se llenan los subniveles por orden de energía creciente, $1s\ 2s\ 2p\ 3s\ 3p\ 4s\ 3d$, respetando sus topes (s hasta 2, p hasta 6, d hasta 10): **$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^5$** .

Comprobación del recuento: $2 + 2 + 6 + 2 + 6 + 2 + 5 = 25$ electrones, que es el número atómico de un átomo neutro. Si la suma no da Z , la configuración está mal. Lo que esta suma no ve es un orden de llenado equivocado, porque los mismos electrones colocados en otro orden suman igual: eso hay que revisarlo aparte.

El **periodo** es el mayor valor de n que aparece, aquí 4, así que está en el **cuarto periodo**. Al ser un elemento cuyo último subnivel en llenarse es un d, es un metal de transición, y su **grupo** sale de sumar los electrones del 4s y del 3d: $2 + 5 = 7$, de modo que pertenece al **grupo 7**.

Electrones desapareados: los cinco orbitales del subnivel 3d son de la misma energía, y por la regla de Hund los cinco electrones se colocan uno en cada orbital antes de emparejarse. Quedan **5 electrones desapareados**, y el $4s^2$ está lleno y no aporta ninguno.

Ion Mn^{2+} : pierde dos electrones y quedan 23. ▲ Los que salen son los del **4s**, aunque se llenara antes que el 3d, así que la configuración es **$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^5$** , y no la que saldría quitando dos electrones del 3d.

Comprobación del ion: $2 + 2 + 6 + 2 + 6 + 5 = 23$ electrones, que son los 25 del átomo neutro menos las 2 cargas positivas del ion.

Indica cuáles de estos conjuntos de números cuánticos (n, l, m_l, m_s) pueden corresponder a un electrón de un átomo y cuáles no, razonando el motivo en cada caso, y nombra el orbital de los que sí son posibles: (a) $(3, 2, -2, +\frac{1}{2})$ · (b) $(2, 2, 0, -\frac{1}{2})$ · (c) $(4, 0, 0, +\frac{1}{2})$ · (d) $(3, 1, 2, -\frac{1}{2})$ · (e) $(2, 1, -1, 0)$.

Solución

Las reglas que hay que aplicar, en este orden: n es un entero positivo · l va de 0 hasta $n - 1$ · m_l va de $-l$ hasta $+l$ de uno en uno · m_s solo puede valer $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

(a) $(3, 2, -2, +\frac{1}{2})$: $n = 3$ y $l = 2$ cumple $l \leq n - 1 = 2$; $m_l = -2$ está dentro del intervalo de -2 a $+2$; el espín es correcto. Es **posible**, y corresponde a un orbital **3d**.

(b) $(2, 2, 0, -\frac{1}{2})$: con $n = 2$ el valor máximo de l es $n - 1 = 1$, así que $l = 2$ **no es posible**. Un subnivel 2d no existe.

(c) $(4, 0, 0, +\frac{1}{2})$: $l = 0$ cumple $l \leq 3$, y con $l = 0$ el único valor de m_l es 0. Es **posible**, y corresponde a un orbital **4s**.

(d) $(3, 1, 2, -\frac{1}{2})$: con $l = 1$ los valores de m_l son $-1, 0$ y $+1$, así que $m_l = 2$ queda fuera y **no es posible**. El fallo está en m_l , no en l , que sí es válido con $n = 3$.

(e) $(2, 1, -1, 0)$: los tres primeros son correctos y describen un orbital 2p, pero $m_s = 0$ **no es posible**: el espín solo admite $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$. Conviene revisar los cuatro números uno a uno y no parar en el primero que cuadre.

Para el nivel $n = 4$, calcula cuántos orbitales tiene y cuántos electrones caben en él como máximo, y comprueba el resultado subnivel a subnivel. Calcula además cuántos de esos orbitales corresponden a $l = 2$ y cuántos electrones admiten, y di cuántos electrones desapareados como máximo puede alojar un subnivel d.

Solución

Los recuentos generales del nivel n : hay **n^2 orbitales** y caben **$2 \cdot n^2$ electrones**. Para $n = 4$: $4^2 = 16$ **orbitales** y $2 \times 16 = 32$ **electrones**.

Comprobación subnivel a subnivel, que es la que vale como demostración y no como memoria. Con $n = 4$, l puede valer 0, 1, 2 y 3, es decir, los subniveles 4s, 4p, 4d y 4f. El número de orbitales de cada uno es $2 \cdot l + 1$: 1, 3, 5 y 7.

Suma de orbitales: $1 + 3 + 5 + 7 = 16$, que coincide con n^2 . Suma de electrones, al caber dos en cada orbital: $2 + 6 + 10 + 14 = 32$, que coincide con $2 \cdot n^2$.

Orbitales con $l = 2$, es decir, el subnivel 4d: $2 \cdot l + 1 = 2 \times 2 + 1 = 5$ **orbitales**, que admiten **10 electrones**.

Electrones desapareados máximos en un subnivel d: por la regla de Hund los electrones ocupan primero un orbital cada uno, así que con 5 orbitales el máximo es **5 electrones desapareados**, y se alcanza justo con la configuración d^5 . A partir del sexto empiezan a emparejarse y el número de desapareados baja.

Comprobación de coherencia con el ejercicio del manganeso: allí salían 5 desapareados con un $3d^5$, que es exactamente el caso de máximo que acaba de calcularse.

El sistema periódico y las propiedades periódicas

Lo que hay que saber

De la configuración a su sitio en la tabla periódica: en los elementos de esta página el **periodo** es el mayor valor de n que aparece, y el **grupo** sale de los electrones de la capa de valencia (para los representativos: 1 y 2 tal cual, y del 13 al 18 esos electrones más diez). ▲ Dos excepciones conviene tenerlas a mano: el **helio**, $1s^2$, está en el grupo **18** y no en el 2, porque tiene la capa completa; y el **paladio**, $[\text{Kr}] 4d^{10}$, está en el **periodo 5** aunque el mayor n que ocupa sea 4.

Radio atómico: aumenta al bajar en un grupo, porque se añade una capa, y disminuye al avanzar hacia la derecha en un periodo, porque la carga nuclear crece sobre la misma capa y tira más de ella.

Radio iónico: un **catión es menor** que su átomo neutro (ha perdido una capa o le queda menos repulsión entre electrones) y un **anión es mayor**. Entre iones con el mismo número de electrones, es menor el que tiene más protones.

Energía de ionización: la que hay que dar para arrancar el electrón más externo de un átomo gaseoso. Crece hacia la derecha y hacia arriba. ▲ Con dos escalones conocidos dentro del periodo 2: el boro queda por debajo del berilio y el oxígeno por debajo del nitrógeno, así que la tendencia ordena bien los extremos y no decide una pareja cualquiera.

Afinidad electrónica y electronegatividad siguen a grandes rasgos la misma dirección que la energía de ionización, creciendo hacia arriba y hacia la derecha, dejando aparte los gases nobles. ▲ La electronegatividad sí tiene su máximo en el flúor; la afinidad electrónica, no: el **cloro** libera más energía que el flúor al captar un electrón, porque el flúor es tan pequeño que el electrón que entra sufre mucha repulsión. El **carácter metálico** va justo al revés: crece hacia abajo y hacia la izquierda.

Los **gases nobles** llevan completa su última capa, y por eso reaccionan muy poco. ■ De ahí a llamarlos inertes hay un paso en falso: en el laboratorio se han preparado fluoruros de xenón y de kriptón.

24

Escribe las configuraciones electrónicas del sodio ($Z = 11$), el magnesio ($Z = 12$), el cloro ($Z = 17$) y el potasio ($Z = 19$), ordénalos por radio atómico creciente y razona el orden. Después compara el radio del Na con el del ion Na^+ , y el del Cl con el del ion Cl^- .

Solución

Configuraciones: $\text{Na } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ · $\text{Mg } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ · $\text{Cl } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$ · $\text{K } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$. Los recuentos dan 11, 12, 17 y 19 electrones.

Los tres primeros están en el **periodo 3** (su mayor n es 3) y el potasio en el **periodo 4**. Dentro de un mismo periodo el radio se va acortando conforme se avanza a la derecha, porque la carga nuclear crece mientras los electrones se añaden a la misma capa, y el núcleo tira más de ella. Así que, de los tres del periodo 3: $\text{Cl} < \text{Mg} < \text{Na}$.

El potasio tiene una capa más (su electrón de valencia está en $n = 4$), y una capa nueva pesa más que el aumento de carga nuclear, así que es el mayor de los cuatro.

Orden de menor a mayor radio atómico: **$\text{Cl} < \text{Mg} < \text{Na} < \text{K}$** .

Na frente a Na^+ : al perder el electrón $3s^1$ el ion se queda sin la capa $n = 3$ entera y su configuración pasa a ser la del neón. El **ion es bastante menor** que el átomo, y no por poco: desaparece un nivel completo.

Cl frente a Cl^- : el ion gana un electrón en la misma capa $n = 3$, así que hay 18 electrones para 17 protones. Cada electrón recibe menos atracción y aumenta la repulsión entre ellos, de modo que el **ion es mayor** que el átomo. Comprobación cruzada con un caso isoelectrónico: Na^+ y Ne tienen los mismos 10 electrones, y el Na^+ es menor porque sus 11 protones tiran más que los 10 del neón.

Estos cuatro valores de primera energía de ionización, en kJ/mol, corresponden al litio ($Z = 3$), el berilio ($Z = 4$), el flúor ($Z = 9$) y el sodio ($Z = 11$), en algún orden: **496, 520, 900 y 1.681**. Asigna cada valor a su elemento razonándolo, y calcula la energía necesaria para ionizar 2,0 mol de átomos de sodio.

Solución

Litio y sodio están en el mismo grupo, el 1, y los dos tienen un solo electrón de valencia; el del sodio está en $n = 3$ y el del litio en $n = 2$. Cuanto más lejos del núcleo y más apantallado, menos cuesta arrancarlo, así que el sodio tiene la energía de ionización **menor** de los dos, y los dos valores más bajos de la lista les corresponden: **Na = 496 kJ/mol** y **Li = 520 kJ/mol**.

Litio, berilio y flúor están en el periodo 2. Al avanzar hacia la derecha crece la carga nuclear sobre la misma capa y cuesta más arrancar el electrón, de modo que el orden es $\text{Li} < \text{Be} < \text{F}$. Con los dos valores que quedan: **Be = 900 kJ/mol** y **F = 1.681 kJ/mol**.

Resumen de la asignación: Na 496 · Li 520 · Be 900 · F 1.681 kJ/mol.

Energía para ionizar 2,0 mol de sodio: $E = (2,0 \text{ mol}) \times (496 \text{ kJ/mol}) = \mathbf{992 \text{ kJ}}$. Las unidades lo confirman: $\text{mol} \times (\text{kJ/mol}) = \text{kJ}$.

▲ La tendencia dentro del periodo ordena bien estos tres elementos, y no decide cualquier pareja: dentro del periodo 2 hay dos escalones conocidos, el boro por debajo del berilio y el oxígeno por debajo del nitrógeno. Con B y Be, o con N y O, este razonamiento daría el orden equivocado.

Comprobación de coherencia con el ejercicio anterior: allí salía que el potasio, con una capa más, es mayor que el sodio; aquí sale, por la misma razón, que el sodio —con una capa más que el litio— cuesta menos de ionizar. Es el mismo argumento aplicado a dos parejas del grupo 1: un electrón de valencia más lejano y más apantallado está menos sujeto.

El enlace químico y la geometría de las moléculas

Lo que hay que saber

Energía de red de un compuesto iónico: la que se libera al formar un mol de cristal a partir de sus iones en estado gaseoso. Es **negativa**, y su valor absoluto crece con la carga de los iones y baja cuando crece su tamaño.

Ciclo de Born-Haber: la ley de Hess aplicada a la formación de un compuesto iónico. Encadena sublimación, disociación, ionización, afinidad electrónica y energía de red, y sirve para obtener esta última, que no se mide de forma directa. ▲ Cada etapa entra con **su** signo: las que cuestan energía, positivas; las que la liberan, negativas.

Geometría por repulsión de pares (TRPECV): los pares de electrones de la capa de valencia del átomo central se colocan lo más separados posible. **2 pares** → lineal, 180° · **3 pares** → triangular plana, 120° · **4 pares** → tetraédrica, $109,5^\circ$.

Los pares solitarios ocupan más espacio que los de enlace y cierran un poco los ángulos: con 4 pares de los que 1 es solitario sale una **pirámide trigonal** de unos 107° , y con 2 solitarios una molécula **angular** de unos $104,5^\circ$.

Polaridad: un enlace es polar si los dos átomos tienen electronegatividad distinta. La **molécula** es polar si la suma vectorial de los momentos dipolares no se anula, y eso lo decide la geometría: el CO_2 es lineal y apolar con dos enlaces polares, y el H_2O es angular y polar.

Fuerzas entre moléculas, ordenadas de mayor a menor intensidad **entre moléculas de tamaño parecido**: enlace de hidrógeno (con F, O o N), fuerzas dipolo-dipolo y fuerzas de dispersión. ▲ El orden no sirve para comparar dos sustancias cualesquiera: las fuerzas de dispersión crecen mucho con el tamaño y con la polarizabilidad, y por eso el yodo, apolar, hierve por encima del agua. Son las que explican los puntos de fusión y de ebullición de los compuestos moleculares, que no dependen de la fuerza del enlace interno.

26

Para las moléculas aisladas de **BeCl_2** (en fase gas), **BF_3** , **CH_4** , **NH_3** y **H_2O** , indica cuántos pares de electrones de enlace y cuántos pares solitarios tiene el átomo central, la geometría que resulta, el ángulo aproximado y si la molécula es polar o apolar. Datos de electrones de valencia: Be 2, B 3, C 4, N 5, O 6, H 1, Cl 7, F 7.

Solución

El recuento del átomo central se hace en dos pasos: se cuentan los pares de enlace (uno por cada átomo unido) y después se mira cuántos electrones de valencia sobran, que forman los pares solitarios (dos electrones por par).

BeCl_2 gaseoso: el berilio tiene 2 electrones de valencia y los dos se usan en enlaces, así que hay 2 pares de enlace y 0 solitarios. ▲ Esto describe la molécula suelta: el BeCl_2 sólido no está hecho de moléculas lineales sueltas, sino de cadenas, y su geometría no es esta. Dos pares se separan al máximo colocándose opuestos: geometría **lineal**, ángulo **180°** . Los enlaces Be-Cl son polares, pero los dos momentos son iguales y opuestos y se anulan: molécula **apolar**.

BF_3 : el boro aporta 3 electrones y los tres se usan en enlaces: 3 pares de enlace y 0 solitarios. Geometría **triangular plana**, ángulo **120°** . Los tres momentos dipolares, iguales y a 120° , suman cero: molécula **apolar**.

CH_4 : el carbono aporta 4 y los cuatro se usan: 4 pares de enlace y 0 solitarios. Geometría **tetraédrica**, ángulo **$109,5^\circ$** . Molécula **apolar** por la simetría, aunque los enlaces C-H tengan algo de polaridad.

NH_3 : el nitrógeno aporta 5, tres se usan en enlaces y sobran 2, que forman 1 par solitario. Hay 4 pares alrededor del átomo central, pero uno no se ve en la forma de la molécula: geometría de **pirámide trigonal**, ángulo de unos **107°** , algo menor que el tetraédrico porque el par solitario ocupa más espacio y cierra los enlaces. Molécula **polar**.

H₂O: el oxígeno aporta 6, dos se usan en enlaces y sobran 4, que forman 2 pares solitarios. Otra vez 4 pares en total, ahora con dos solitarios: geometría **angular**, ángulo de unos **104,5°**. Molécula **polar**, y esa polaridad es la razón de que el agua disuelva compuestos iónicos. Compárese con el BeCl₂: las dos tienen dos átomos unidos al central y geometrías distintas, y lo que las separa son los pares solitarios.

27

Cuatro sustancias sólidas, A, B, C y D, se comportan así: **A** funde a 114 °C, no conduce la corriente ni sólida ni fundida y se disuelve en disolventes apolares · **B** funde a 801 °C, no conduce sólida pero sí fundida y en disolución acuosa · **C** funde a 1.085 °C, conduce la corriente en estado sólido y es dúctil y maleable · **D** funde a 1.710 °C, es muy dura, insoluble y no conduce ni sólida ni fundida. Asigna a cada una su tipo de enlace y explica por qué B conduce fundida y no sólida.

Solución

El dato que más separa a unas de otras no es la temperatura de fusión, sino la **conductividad**, porque dice qué partículas con carga hay y si pueden moverse. Conviene empezar por ahí y usar la temperatura de fusión como confirmación.

C es metálica: es la única que conduce en estado sólido, y además es dúctil y maleable. En un metal, los restos positivos ocupan posiciones fijas y su nube de electrones recorre el cristal entero, así que hay carga móvil sin necesidad de fundir nada. Encaja con el cobre, que funde a 1.085 °C.

B es iónica: no conduce sólida y sí fundida o disuelta. En el cristal los iones están fijos en sus posiciones; al fundirlo o al disolverlo quedan libres y son ellos, y no electrones, los que transportan la carga. Su temperatura de fusión alta encaja con una red de iones con cargas opuestas. Corresponde al cloruro de sodio.

D es un sólido covalente en red: fundirlo obliga a romper enlaces covalentes por toda la muestra, de ahí los 1.710 °C y la dureza, y no hay iones ni electrones libres ni siquiera fundido. Corresponde al dióxido de silicio.

A es covalente molecular: al fundir solo hay que vencer las fuerzas entre moléculas, que son mucho más débiles que un enlace, de ahí los 114 °C. Sus moléculas no tienen carga neta, así que no conduce ni sólida ni fundida, y se disuelve en disolventes apolares. Corresponde al yodo.

▲ Conviene no convertir esto en la regla de que los covalentes moleculares sean gases o líquidos: el yodo de este ejercicio es sólido a temperatura ambiente, y el azúcar también. Lo que sí ordena bien es que su temperatura de fusión resulte baja *comparada* con la de los otros tres tipos.

28

Calcula la energía de red del cloruro de sodio a partir de estos datos, todos en kJ/mol: entalpía de formación del NaCl(s) – 411 · entalpía de sublimación del sodio + 108 · energía de disociación del Cl₂(g) + 243 · primera energía de ionización del sodio + 496 · afinidad electrónica del cloro – 349. Justifica el signo de cada término y el del resultado.

Solución

El ciclo de Born-Haber no es otra cosa que la ley de Hess aplicada a la formación del compuesto iónico: la entalpía de formación del NaCl(s) a partir de Na(s) y Cl₂(g) tiene que ser igual a la suma de las etapas del camino largo, que pasa por los iones gaseosos.

Las etapas, con su signo razonado: sublimar el sodio cuesta energía, + 108 · romper el enlace del Cl₂ cuesta energía, y como solo hace falta medio mol de moléculas por cada mol de cloruro, entra la mitad: (+ 243) ÷ 2 = + 121,5 · ionizar el sodio cuesta energía, + 496 · el cloro al captar el electrón libera energía, – 349 · y la energía de red, U, que es la incógnita.

La ecuación del ciclo: – 411 = 108 + 121,5 + 496 – 349 + U.

Se suman los términos conocidos del lado derecho: 108 + 121,5 = 229,5; 229,5 + 496 = 725,5; 725,5 – 349 = 376,5. Queda – 411 = 376,5 + U.

Despejando: $U = -411 - 376,5 = -787,5 \text{ kJ/mol}$. El signo negativo es el esperado: formar el cristal a partir de los iones gaseosos **libera** energía, porque se crean uniones entre cargas opuestas. ▲ Pero que salga negativo **no** confirma el planteamiento: olvidar el coeficiente $\frac{1}{2}$ del cloro, o equivocarse una etapa, deja un resultado igual de negativo. El signo descarta un disparate; no valida el ciclo.

Comprobación sumando el ciclo entero: $108 + 121,5 + 496 - 349 - 787,5 = -411$, que es la entalpía de formación de partida. Esta suma comprueba la **aritmética** y nada más: como U se ha despejado de esa misma ecuación, el ciclo vuelve a cerrar aunque una etapa esté mal puesta. El signo de cada etapa y el coeficiente $\frac{1}{2}$ del cloro hay que revisarlos aparte.

La termoquímica y la espontaneidad

Lo que hay que saber

Entalpía: a presión constante, ΔH es el calor intercambiado. **ΔH negativa** significa reacción **exotérmica** (desprende calor) y **ΔH positiva, endotérmica**. Se mide en kJ por mol de reacción tal como está ajustada.

Entalpía de formación ΔH_f° : la de formar un mol del compuesto a partir de sus elementos en su forma más estable. La de un elemento en esa forma vale **0 kJ/mol** por convenio, y de ahí sale **$\Delta H = \sum n \cdot$**

$\Delta H_f^\circ(\text{productos}) - \sum n \cdot \Delta H_f^\circ(\text{reactivos})$.

Ley de Hess: ΔH no depende del camino. Las etapas se suman; si una se invierte, su ΔH **cambia de signo**, y si se multiplica por un número, su ΔH se multiplica igual.

Energías de enlace: $\Delta H \approx \sum(\text{enlaces rotos}) - \sum(\text{enlaces formados})$. Romper un enlace cuesta energía y formarlo la libera, y por eso el segundo término entra restando. Da un valor aproximado porque la energía de un enlace depende algo de la molécula en que esté.

Entropía ΔS mide el desorden, en $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$. Aumenta al pasar de sólido a líquido y a gas, y al crecer el número de moles de gas. ▲ Cuidado con las unidades: ΔH suele venir en kJ y ΔS en J, y hay que igualarlas antes de restar.

Energía de Gibbs: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$, y la reacción es espontánea cuando **ΔG es negativa**. ▪ Ser exotérmica no basta: con ΔH negativa y ΔS negativa deja de serlo al subir T , y con ΔH positiva y ΔS positiva pasa a serlo por encima de cierta temperatura.

- 29** Calcula la entalpía de la reacción $\text{C(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO(g)}$ a partir de estas dos, medidas en las mismas condiciones: **(1) $\text{C(s)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$, $\Delta H_1 = -393,5 \text{ kJ}$** y **(2) $\text{CO(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$, $\Delta H_2 = -283,0 \text{ kJ}$** . Indica si la reacción buscada es exotérmica o endotérmica.

Solución

La reacción buscada tiene CO como producto, y en la reacción (2) el CO aparece como reactivo. Hay que **invertir la (2)**, y al invertir una reacción su entalpía cambia de signo: $\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$, con $\Delta H = +283,0 \text{ kJ}$.

Ahora se suma la (1) tal cual con la (2) invertida: $\text{C(s)} + \text{O}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + \text{CO(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$. Se cancela el CO_2 , que está a los dos lados, y del oxígeno queda $\text{O}_2 - \frac{1}{2} \text{O}_2 = \frac{1}{2} \text{O}_2$ en los reactivos. El resultado es $\text{C(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO(g)}$, que es justo la reacción pedida.

La entalpía se suma igual que las ecuaciones: $\Delta H = \Delta H_1 + (-\Delta H_2) = -393,5 \text{ kJ} + 283,0 \text{ kJ} = -110,5 \text{ kJ}$.

Al salir **negativa**, la reacción es **exotérmica**: desprende 110,5 kJ por cada mol de CO formado.

Comprobación recorriendo el ciclo al revés: si se forma primero CO ($-110,5 \text{ kJ}$) y después ese CO se quema hasta CO_2 ($-283,0 \text{ kJ}$), el total es $-393,5 \text{ kJ}$, que es la entalpía de la reacción (1). El camino no cambia el resultado, que es lo que afirma la ley de Hess.

30

Calcula la entalpía de combustión del metano, $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$, a partir de las entalpías de formación, en kJ/mol: $\text{CH}_4(\text{g}) = -74,8$, $\text{CO}_2(\text{g}) = -393,5$, $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) = -285,8$, $\text{O}_2(\text{g}) = 0$. Calcula después el calor que se desprende al quemar 8,0 g de metano, sabiendo que su masa molar es 16,0 g/mol.

Solución

La entalpía de formación del $\text{O}_2(\text{g})$ vale cero porque es la forma estable del elemento oxígeno en condiciones estándar, y eso es un convenio, no una medida.

Se aplica $\Delta H = \sum n \cdot \Delta H_f(\text{productos}) - \sum n \cdot \Delta H_f(\text{reactivos})$, respetando los coeficientes de la ecuación ajustada.

Productos: $1 \times (-393,5 \text{ kJ/mol}) + 2 \times (-285,8 \text{ kJ/mol}) = -393,5 \text{ kJ/mol} - 571,6 \text{ kJ/mol} = -965,1 \text{ kJ/mol}$. Reactivos: $1 \times (-74,8 \text{ kJ/mol}) + 2 \times 0 = -74,8 \text{ kJ/mol}$.

$\Delta H = (-965,1 \text{ kJ/mol}) - (-74,8 \text{ kJ/mol}) = -965,1 \text{ kJ/mol} + 74,8 \text{ kJ/mol} = -890,3 \text{ kJ/mol}$. Restar un número negativo es sumarlo: conviene escribir el paréntesis y no quitarlo de memoria.

Cantidad de metano: $n = m \div M = (8,0 \text{ g}) \div (16,0 \text{ g/mol}) = 0,50 \text{ mol}$.

Calor de esa combustión: $Q = (0,50 \text{ mol}) \times (-890,3 \text{ kJ/mol}) = -445,15 \text{ kJ}$, es decir, **se desprenden 445,15 kJ**. El signo negativo pertenece al sistema que reacciona, y por eso se enuncia como calor desprendido y no como calor de valor negativo para el entorno.

31

Calcula la entalpía de la reacción $\text{H}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{HCl}(\text{g})$ a partir de las energías de enlace, en kJ/mol: $\text{H-H} = 436$, $\text{Cl-Cl} = 243$ y $\text{H-Cl} = 431$. Deduce de ahí la entalpía de formación del $\text{HCl}(\text{g})$ y justifica el signo de cada término.

Solución

La estimación por energías de enlace es $\Delta H \approx \Sigma(\text{enlaces rotos}) - \Sigma(\text{enlaces formados})$. Romper un enlace **cuesta** energía y entra sumando; formar un enlace la **libera** y por eso el segundo bloque entra restando.

Enlaces rotos: uno H-H y uno Cl-Cl, es decir, $436 \text{ kJ/mol} + 243 \text{ kJ/mol} = 679 \text{ kJ/mol}$.

Enlaces formados: dos H-Cl, porque la ecuación produce dos moléculas de cloruro de hidrógeno: $2 \times 431 \text{ kJ/mol} = 862 \text{ kJ/mol}$.

$\Delta H = 679 \text{ kJ/mol} - 862 \text{ kJ/mol} = -183 \text{ kJ/mol}$ de reacción. Sale negativa, así que la reacción es exotérmica, y el motivo físico es que se forman enlaces más fuertes en conjunto de los que se rompen.

Entalpía de formación del $\text{HCl}(\text{g})$: la ecuación de formación es $\frac{1}{2} \text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{HCl}(\text{g})$, que es la anterior dividida entre dos. Al dividir una ecuación entre dos, su entalpía se divide igual: $\Delta H_f = (-183 \text{ kJ/mol}) \div 2 = -91,5 \text{ kJ/mol}$.

▲ Estos valores son aproximados y así hay que presentarlos: la energía de un mismo tipo de enlace cambia algo según la molécula en que se encuentre, así que la cifra obtenida por este camino se parece a la tabulada sin coincidir al decimal.

32

Para la descomposición del carbonato de calcio, $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$, se sabe que, en condiciones estándar, $\Delta H = +178,0 \text{ kJ/mol}$ y $\Delta S = +160,0 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$. Calcula ΔG a 298 K, di si la reacción es espontánea en esas condiciones y halla, **suponiendo que ΔH y ΔS no varían con la temperatura**, a partir de qué temperatura ΔG se hace negativa, en kelvin y en grados Celsius.

Solución

Antes de restar hay que igualar las unidades, y ese es el primer paso: ΔH viene en kJ y ΔS en J. Se pasa la entalpía a julios: $\Delta H = +178,0 \text{ kJ/mol} = +178.000 \text{ J/mol}$.

$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = (178.000 \text{ J/mol}) - (298 \text{ K}) \times (160,0 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}) = 178.000 \text{ J/mol} - 47.680 \text{ J/mol} = + 130.320 \text{ J/mol}$, es decir, **+ 130,3 kJ/mol**. Las unidades cuadran: $\text{K} \times \text{J/(mol} \cdot \text{K)} = \text{J/mol}$.

Al ser ΔG **positiva**, la reacción **no es espontánea** a 298 K en condiciones estándar. Es lo esperado: la piedra caliza no se descompone sola a temperatura ambiente.

Temperatura a la que cambia el comportamiento: ΔG pasa por cero cuando $\Delta H = T \cdot \Delta S$, de donde $T = \Delta H \div \Delta S = (178.000 \text{ J/mol}) \div (160,0 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}) = \mathbf{1.112,5 \text{ K}}$. Por encima de esa temperatura el término $- T \cdot \Delta S$ supera a ΔH y ΔG se hace negativa.

En grados Celsius, restando el cero absoluto exacto: $1.112,5 \text{ K} - 273,15 = \mathbf{839,35 \text{ }^\circ\text{C}}$, unos 839,4 °C. Comprobación a 1.200 K: $\Delta G = 178.000 - 1.200 \times 160,0 = 178.000 - 192.000 = - 14.000 \text{ J/mol}$, negativa, como tenía que salir por encima de la temperatura calculada.

▪ Este ejercicio desarma la idea de que una reacción exotérmica sea espontánea y una endotérmica no lo sea: aquí ΔH es **positiva** y aun así la reacción es espontánea por encima de 1.112,5 K, porque ΔS también es positiva. Quien decide es ΔG , y el signo de ΔH por sí solo no basta. Ese umbral vale con las hipótesis declaradas —condiciones estándar, ΔH y ΔS constantes—: en un horno real, con el CO_2 a una presión distinta, la temperatura a la que arranca la descomposición se corre.

La cinética química

Lo que hay que saber

Velocidad de reacción: para $a \text{ A} + b \text{ B} \rightarrow c \text{ C}$, se define $v = - (1 \div a) \cdot \Delta[\text{A}] \div \Delta t = + (1 \div c) \cdot \Delta[\text{C}] \div \Delta t$, en **mol/(L · s)**. Los signos y los coeficientes están para que salga el mismo número se mire por donde se mire.

Ley de velocidad: $v = k \cdot [\text{A}]^m \cdot [\text{B}]^n$. ▲ Los órdenes m y n son **experimentales** y no se leen en los coeficientes de la ecuación ajustada: coinciden por casualidad en algunas reacciones y no en otras. El orden total es $m + n$.

Las unidades de k dependen del orden total, y eso sirve de comprobación: para orden 1 son s^{-1} , para orden 2 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ y para orden 3 $\text{L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Cómo se obtienen los órdenes con el método de las velocidades iniciales: se comparan dos experiencias en las que solo cambie una concentración. Si al doblar $[\text{A}]$ la velocidad se dobla, el orden en A es 1; si se multiplica por cuatro, es 2.

Energía de activación: la barrera que hay que superar en el choque. La de la reacción inversa vale $E_a(\text{inversa}) = E_a(\text{directa}) - \Delta H$, así que en una reacción exotérmica la vuelta cuesta más que la ida.

▪ Un **catalizador** ofrece otro camino con menor energía de activación y lo hace **en los dos sentidos por igual**: acelera la llegada al equilibrio, y deja igual la composición del equilibrio y el valor de la constante.

33

Para la reacción $\text{A} + \text{B} \rightarrow \text{C}$ se han medido estas velocidades iniciales a temperatura constante: **experiencia 1**, $[\text{A}] = 0,10 \text{ mol/L}$ y $[\text{B}] = 0,10 \text{ mol/L}$, $v = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$ · **experiencia 2**, $[\text{A}] = 0,20 \text{ mol/L}$ y $[\text{B}] = 0,10 \text{ mol/L}$, $v = 8,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$ · **experiencia 3**, $[\text{A}] = 0,10 \text{ mol/L}$ y $[\text{B}] = 0,20 \text{ mol/L}$, $v = 4,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$. Halla los órdenes parciales, el orden total, la constante de velocidad con su unidad y la velocidad cuando las dos concentraciones valen 0,30 mol/L.

Solución

Orden respecto de A: se comparan las experiencias 1 y 2, en las que solo cambia $[\text{A}]$. La concentración se ha multiplicado por 2 y la velocidad por $(8,0 \times 10^{-3}) \div (2,0 \times 10^{-3}) = 4$. Como 2 elevado a m tiene que dar 4, el orden es **$m = 2$** .

Orden respecto de B: se comparan las experiencias 1 y 3, donde solo cambia $[\text{B}]$. La concentración se ha multiplicado por 2 y la velocidad por $(4,0 \times 10^{-3}) \div (2,0 \times 10^{-3}) = 2$. Como 2 elevado a n da 2, el orden es **$n = 1$** .

Ley de velocidad y orden total: $v = k \cdot [\text{A}]^2 \cdot [\text{B}]$, con orden total **$2 + 1 = 3$** . ▲ Estos exponentes son

experimentales y no se leen en los coeficientes de la ecuación, que aquí son 1 y 1.

Constante de velocidad, con los datos de la experiencia 1: $k = v \div ([A]^2 \cdot [B]) = (2,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}) \div [(0,10 \text{ mol/L})^2 \times (0,10 \text{ mol/L})] = (2,0 \times 10^{-3}) \div (1,0 \times 10^{-3}) = 2,0 \text{ L}^2 \cdot \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. La unidad sale del arrastre y confirma el orden total 3.

Comprobación con las otras dos experiencias, que es lo que valida los órdenes. Experiencia 2: $v = 2,0 \times (0,20)^2 \times 0,10 = 2,0 \times 0,040 \times 0,10 = 8,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$. Experiencia 3: $v = 2,0 \times (0,10)^2 \times 0,20 = 4,0 \times 10^{-3} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$. Las dos coinciden con lo medido.

Velocidad con $[A] = [B] = 0,30 \text{ mol/L}$: $v = 2,0 \times (0,30)^2 \times (0,30) = 2,0 \times 0,090 \times 0,30 = 5,4 \times 10^{-2} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$, veintisiete veces la de la experiencia 1, que es lo que cabe esperar de un orden total 3 al triplicar las dos concentraciones.

34

Una reacción tiene una energía de activación directa de **60 kJ/mol** y una entalpía de reacción de **- 40 kJ/mol**. Calcula la energía de activación de la reacción inversa. Si un catalizador rebaja la energía de activación directa hasta **35 kJ/mol**, calcula la de la inversa con catalizador y razona si el catalizador modifica la entalpía de la reacción y la composición del equilibrio.

Solución

La relación entre las tres magnitudes es $E_a(\text{inversa}) = E_a(\text{directa}) - \Delta H$, y conviene entenderla antes de usarla: desde los productos hay que subir hasta la misma cima, y los productos están 40 kJ/mol por debajo de los reactivos porque la reacción es exotérmica.

$E_a(\text{inversa}) = 60 \text{ kJ/mol} - (-40 \text{ kJ/mol}) = 60 \text{ kJ/mol} + 40 \text{ kJ/mol} = 100 \text{ kJ/mol}$. Restar un valor negativo suma, y por eso en una reacción exotérmica la vuelta cuesta más que la ida.

Con catalizador, la directa baja a 35 kJ/mol y la inversa se calcula igual: $E_a(\text{inversa}) = 35 \text{ kJ/mol} + 40 \text{ kJ/mol} = 75 \text{ kJ/mol}$.

Comparación de los dos casos: la directa ha bajado $60 - 35 = 25 \text{ kJ/mol}$ y la inversa $100 - 75 = 25 \text{ kJ/mol}$. **La misma cantidad en los dos sentidos**, que es la consecuencia de que el catalizador ofrece un camino nuevo con una cima más baja, y esa cima es la misma para quien va y para quien vuelve.

La entalpía de reacción no cambia: $35 \text{ kJ/mol} - 75 \text{ kJ/mol} = -40 \text{ kJ/mol}$, el mismo valor de partida. La diferencia de energía entre reactivos y productos no depende del camino, igual que decía la ley de Hess.

▪ De ahí sale la respuesta a la última pregunta: el catalizador acelera por igual los dos sentidos, así que el sistema llega antes al equilibrio y la composición de ese equilibrio queda **igual**. Un catalizador no desplaza un equilibrio ni cambia el valor de su constante.

El equilibrio químico y el principio de Le Chatelier

Lo que hay que saber

Equilibrio dinámico: las dos reacciones siguen ocurriendo a la misma velocidad, y por eso las concentraciones dejan de cambiar sin que la reacción se pare. ▲ **Notación de esta página:** las reacciones reversibles se escriben con la flecha sencilla $\rightarrow$ y el texto dice con palabras que hay equilibrio; la doble flecha que se usa en los libros no se puede componer en este formato.

Constante en concentraciones: para $a A + b B \rightarrow c C + d D$ en equilibrio, $K_c = [C]^c \cdot [D]^d \div ([A]^a \cdot [B]^b)$. Los **sólidos puros y los líquidos puros no aparecen** en la expresión, porque su concentración no cambia. ▲ **Convenio de unidades de esta página:** K_c y K_p se escriben con la unidad que sale de su propia expresión —sin unidad cuando arriba y abajo hay el mismo número de factores, y con ella cuando no—, y así se mantiene de un ejercicio al siguiente.

Constante de presiones: K_p se escribe igual con presiones parciales, y se relaciona con la anterior por $K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{\Delta n}$, siendo Δn los moles de gas de los productos menos los de los reactivos. ▲ Las dos coinciden solo cuando $\Delta n = 0$.

El cociente de reacción Q tiene la misma forma que K pero con los valores del momento. Si $Q < K$ la reacción avanza hacia los productos; si $Q > K$, hacia los reactivos; y si son iguales, ya hay equilibrio.

Grado de disociación α : la fracción del reactivo de partida que se ha transformado. Con n_0 moles iniciales, han reaccionado $n_0 \cdot \alpha$ y quedan $n_0 \cdot (1 - \alpha)$; es la forma más rápida de montar el recuento de moles en el equilibrio.

Principio de Le Chatelier: ante un cambio, el sistema evoluciona en el sentido que lo contrarresta. ■ Con la temperatura eso depende del **signo de ΔH** : subirla desplaza hacia el lado **endotérmico**, que en una reacción exotérmica es el de los reactivos.

35

En un recipiente cerrado de **2,0 L** se introducen **4,0 mol de H_2** y **4,0 mol de I_2** y se establece el equilibrio de la reacción reversible **$H_2(g) + I_2(g) \rightarrow 2 HI(g)$** . Cuando se alcanza el equilibrio hay **6,0 mol de HI**. Calcula los moles de cada gas en el equilibrio, sus concentraciones, K_c y K_p .

Solución

Se monta el recuento de moles. Si se han formado 6,0 mol de HI y la ecuación dice que por cada 2 mol de HI reacciona 1 mol de H_2 y 1 mol de I_2 , han reaccionado 3,0 mol de cada uno.

Moles en el equilibrio: $H_2 = 4,0 - 3,0 = 1,0 \text{ mol}$ · $I_2 = 4,0 - 3,0 = 1,0 \text{ mol}$ · $HI = 6,0 \text{ mol}$.

Comprobación de materia antes de seguir: al principio había 8,0 mol de átomos de hidrógeno (4,0 mol de H_2); al final hay 2,0 mol en el H_2 que queda más 6,0 mol en el HI, que son 8,0 mol. Cuadra, y lo mismo con el yodo.

Concentraciones, dividiendo entre el volumen de 2,0 L: $[H_2] = 0,50 \text{ mol/L}$ · $[I_2] = 0,50 \text{ mol/L}$ · $[HI] = (6,0 \text{ mol}) \div (2,0 \text{ L}) = 3,0 \text{ mol/L}$.

$K_c = [HI]^2 \div ([H_2] \cdot [I_2]) = (3,0)^2 \div (0,50 \times 0,50) = 9,0 \div 0,25 = 36$. Sale sin unidades porque en el numerador y en el denominador hay el mismo número de concentraciones.

$K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{\Delta n}$, y aquí $\Delta n = 2 - 2 = 0$, así que $(R \cdot T)^0 = 1$ y $K_p = 36$ también. Comprobación de que el volumen no influye en este caso: calculando directamente con moles, $6,0^2 \div (1,0 \times 1,0) = 36$, el mismo número, porque al ser $\Delta n = 0$ los volúmenes se cancelan.

36

Para la reacción reversible $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NO}_2(\text{g})$, la constante vale $K_c = 0,20 \text{ mol/L}$ a 500 K . Con $R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, calcula K_p a esa temperatura, la constante de la reacción inversa y la de la reacción escrita como $\frac{1}{2} \text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightarrow \text{NO}_2(\text{g})$.

Solución

Incremento de moles gaseosos: $\Delta n = (\text{moles de gas de los productos}) - (\text{moles de gas de los reactivos}) = 2 - 1 = +1$.

$K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{\Delta n} = (0,20 \text{ mol/L}) \times [(0,082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times (500 \text{ K})]^1 = (0,20 \text{ mol/L}) \times (41 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{mol}) = 8,2 \text{ atm}$. Conviene hacer primero el producto $R \cdot T$, que vale $41 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{mol}$, y multiplicar después. Con Δn distinto de cero las constantes llevan unidad, y en esta página se escriben con ella, igual que en el ejercicio siguiente.

▲ Aquí se ve por qué K_c y K_p no son intercambiables: solo coinciden cuando $\Delta n = 0$, como ocurría con el H_2 y el I_2 del ejercicio anterior. Con $\Delta n = 1$ se diferencian en el factor $R \cdot T = 41 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{mol}$, que no es un número suelto.

Constante de la reacción inversa, $2 \text{NO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$: al invertir la reacción la constante se invierte, $K = 1 \div (0,20 \text{ mol/L}) = 5,0 \text{ L/mol}$.

Constante de la reacción dividida entre dos, $\frac{1}{2} \text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightarrow \text{NO}_2(\text{g})$: al dividir los coeficientes entre dos, la constante queda elevada a $\frac{1}{2}$, es decir, su raíz cuadrada: $K = \sqrt{0,20 \text{ mol/L}} = 0,447 (\text{mol/L})^{\frac{1}{2}}$, con la unidad elevada a $\frac{1}{2}$ igual que el número.

Comprobación de esta última: si se eleva $0,447 (\text{mol/L})^{\frac{1}{2}}$ al cuadrado se recupera $0,20 \text{ mol/L}$, que es la constante de la reacción original. Las constantes se combinan con potencias, no con sumas ni con productos por el coeficiente.

37

Se introducen **2,0 mol de PCl_5** en un recipiente cerrado de **2,0 L** a **500 K** y se establece el equilibrio de la reacción reversible $\text{PCl}_5(\text{g}) \rightarrow \text{PCl}_3(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$. En el equilibrio se ha disociado el **50 %** del PCl_5 . Con $R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, calcula los moles de cada gas, K_c , K_p , la presión total y las presiones parciales.

Solución

Grado de disociación $\alpha = 0,50$, así que han reaccionado $2,0 \text{ mol} \times 0,50 = 1,0 \text{ mol}$ de PCl_5 . Por cada mol que se disocia aparece 1 mol de PCl_3 y 1 mol de Cl_2 .

Moles en el equilibrio: $\text{PCl}_5 = 2,0 - 1,0 = 1,0 \text{ mol}$ · $\text{PCl}_3 = 1,0 \text{ mol}$ · $\text{Cl}_2 = 1,0 \text{ mol}$. Total: **3,0 mol** de gas, es decir, **1,5 veces** los 2,0 mol de partida, que es lo que cabe esperar de una disociación.

Concentraciones, dividiendo entre 2,0 L: las tres valen **0,50 mol/L**.

$K_c = ([\text{PCl}_3] \cdot [\text{Cl}_2]) \div [\text{PCl}_5] = (0,50 \times 0,50) \div 0,50 = 0,50 \text{ mol/L}$. Aquí la constante sí lleva unidad, porque arriba hay dos concentraciones y abajo una.

$K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{\Delta n}$ con $\Delta n = 2 - 1 = 1$: $K_p = (0,50 \text{ mol/L}) \times (41 \text{ atm} \cdot \text{L}/\text{mol}) = 20,5 \text{ atm}$.

Presión total y parciales: $P = n \cdot R \cdot T \div V = (3,0 \text{ mol}) \times (0,082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})) \times (500 \text{ K}) \div (2,0 \text{ L}) = 61,5 \text{ atm}$, y como hay 1,0 mol de cada gas, cada presión parcial vale **20,5 atm**. Comprobación de K_p por este camino: $(20,5 \times 20,5) \div 20,5 = 20,5 \text{ atm}$, el mismo valor obtenido antes.

38

Para la síntesis del amoníaco, reacción reversible $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NH}_3(\text{g})$, con $\Delta H = -92 \text{ kJ}$, razona hacia dónde se desplaza el equilibrio en cada caso: (a) se eleva la temperatura · (b) se reduce el volumen del recipiente a temperatura constante · (c) se retira amoníaco a medida que se forma · (d) se añade un catalizador · (e) se introduce argón, que no reacciona, manteniendo el volumen constante. Indica además la relación entre K_p y K_c .

Solución

(a) **Elevar la temperatura**: el sistema responde consumiendo ese calor, es decir, desplazándose hacia el lado **endotérmico**. Como ΔH es negativa, el sentido directo es el exotérmico, de modo que

el equilibrio se desplaza **hacia los reactivos**, hacia la izquierda, y la constante disminuye. Lo que decide es el signo de ΔH , no una regla fija.

(b) **Reducir el volumen** aumenta la presión, y el sistema se opone desplazándose hacia el lado con **menos moles de gas**. A la izquierda hay $1 + 3 = 4$ mol y a la derecha 2 mol, así que se desplaza **hacia los productos**, hacia la derecha.

(c) **Retirar amoníaco** hace que el cociente de reacción Q baje por debajo de K , y el sistema avanza **hacia los productos** para reponerlo. Es la razón por la que en la industria conviene ir separando el producto.

(d) **Añadir un catalizador**: el equilibrio **no se desplaza**. Acelera por igual los dos sentidos, así que el sistema llega antes a la misma composición, y la constante no cambia.

(e) **Añadir argón a volumen y temperatura constantes**, con los gases tratados como ideales: sube la presión total, pero las presiones parciales de N_2 , H_2 y NH_3 no cambian, porque cada una depende de los moles de ese gas, del volumen y de la temperatura, y los tres siguen igual. El cociente Q se mantiene y el equilibrio **no se desplaza**. Este apartado y el (b) se distinguen mirando una sola cosa: si cambia el volumen.

Relación entre las constantes: $\Delta n = 2 - 4 = -2$, así que $K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{-2}$, es decir, $K_p = K_c \div (R \cdot T)^2$.

▲ Comparar los dos números no dice gran cosa, porque no están expresados en las mismas unidades; lo que hay que retener es la relación entre ellos, no cuál sale mayor.

Los ácidos y las bases

Lo que hay que saber

Brønsted y Lowry: un ácido cede H^+ y una base lo acepta. De cada ácido sale su **base conjugada** al perder el protón, y los dos forman un par; cuanto más fuerte es el ácido, más débil es su base conjugada.

Producto iónico del agua: $K_w = [H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}$ a 25 °C. De ahí **pH = $-\log[H^+]$** , **pOH = $-\log[OH^-]$** y **pH + pOH = 14** a esa temperatura.

Fuerte o débil no es lo mismo que concentrado o diluido. Un ácido fuerte **monoprótico** se disocia por completo, y entonces $[H^+]$ es la concentración de partida, con tal de que esta quede bastante por encima de 10^{-7} mol/L. ▲ En disoluciones muy diluidas manda el agua: un HCl 10^{-8} mol/L no da pH 8, que sería básico, sino un pH algo por debajo de 7. Un ácido débil establece un equilibrio con su constante K_a , y ▲ el pH depende de las **dos** cosas: de K_a y de la concentración.

Ácido débil: con K_a pequeña frente a la concentración c , sale $[H^+] = \sqrt{K_a \cdot c}$ y el grado de disociación $\alpha = [H^+] \div c$. Para una base débil se hace lo mismo con K_b y se obtiene $[OH^-]$.

Hidrólisis: la sal de un ácido débil con una base fuerte da disolución **básica**, porque su anión es una base que reacciona con el agua, con $K_b = K_w \div K_a$. La de un ácido fuerte con una base fuerte no se hidroliza y su disolución es neutra.

Disolución reguladora (ácido débil más su sal, en cantidades parecidas): **pH = $pK_a + \log([sal] \div [ácido])$** .

Valoración: en el punto de equivalencia los moles de H^+ y de OH^- añadidos se igualan, y ■ el pH vale 7 ahí si el ácido y la base son los dos fuertes; con un ácido débil sale mayor que 7 y con una base débil, menor.

39

A 25 °C, con $K_w = 10^{-14}$, calcula el pH y la concentración de iones OH^- de: (a) una disolución de HCl **0,010 mol/L** · (b) una disolución de NaOH **$1,0 \times 10^{-3}$ mol/L**. Calcula después el pH de la mezcla de **50 mL** de la primera con **50 mL** de la segunda, suponiendo volúmenes aditivos.

Solución

(a) El HCl es un ácido fuerte y se disocia por completo, así que $[H^+] = 0,010$ mol/L = $1,0 \times 10^{-2}$ mol/L. Entonces **pH = $-\log(1,0 \times 10^{-2}) = 2,00$** .

Los iones hidróxido salen del producto iónico del agua: $[OH^-] = K_w \div [H^+] = (10^{-14}) \div (10^{-2}) = 1,0 \times 10^{-12}$ mol/L. Comprobación: **pOH = 12,00** y **pH + pOH = 14,00**.

(b) El NaOH es una base fuerte: $[\text{OH}^-] = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, $\text{pOH} = 3,00$ y $\text{pH} = 14,00 - 3,00 = 11,00$. Y $[\text{H}^+] = (10^{-14}) \div (10^{-3}) = 1,0 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$.

Mezcla: se cuentan los moles de cada uno antes de nada. $n(\text{H}^+) = (0,050 \text{ L}) \times (0,010 \text{ mol/L}) = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$, y $n(\text{OH}^-) = (0,050 \text{ L}) \times (1,0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}) = 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

Se neutralizan mol a mol, así que sobran H^+ : $5,0 \times 10^{-4} - 5,0 \times 10^{-5} = 4,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$ de H^+ en el volumen final de $0,050 \text{ L} + 0,050 \text{ L} = 0,100 \text{ L}$.

$[\text{H}^+] = (4,5 \times 10^{-4} \text{ mol}) \div (0,100 \text{ L}) = 4,5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, y $\text{pH} = 2,35$. El resultado es ácido, como cabía esperar: el ácido estaba diez veces más concentrado que la base y los volúmenes eran iguales.

40

Un ácido débil monoprotónico HA tiene $K_a = 1,0 \times 10^{-5}$ a 25°C . Calcula el pH, el grado de disociación y la concentración de OH^- de una disolución de ese ácido de concentración **0,10 mol/L**, sabiendo que $K_w = 10^{-14}$. Comprueba después si la aproximación empleada es aceptable.

Solución

El equilibrio de disociación es $\text{HA} \rightarrow \text{H}^+ + \text{A}^-$, reversible, con $K_a = [\text{H}^+] \cdot [\text{A}^-] \div [\text{HA}]$. Si se llama x a la concentración de H^+ en el equilibrio, también vale x la de A^- , y la de HA queda $0,10 - x$.

Suponiendo que x es pequeña frente a $0,10$, el denominador se aproxima por $0,10$ y queda $K_a \approx x^2 \div c$, de donde $x = \sqrt{(K_a \cdot c)} = \sqrt{[(1,0 \times 10^{-5}) \times (0,10)]} = \sqrt{(1,0 \times 10^{-6})} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$.

$\text{pH} = -\log(1,0 \times 10^{-3}) = 3,00$. Y $\text{p}K_a = -\log(1,0 \times 10^{-5}) = 5,00$, un dato que hará falta en el ejercicio de la disolución reguladora.

Grado de disociación: $\alpha = x \div c = (1,0 \times 10^{-3}) \div (0,10) = 0,010$, es decir, el **1,0 %**. Solo uno de cada cien átomos de hidrógeno ácidos está suelto, que es lo que significa que el ácido sea débil.

Concentración de hidróxido: $[\text{OH}^-] = K_w \div [\text{H}^+] = (10^{-14}) \div (10^{-3}) = 1,0 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$.

Comprobación de la aproximación, que es un paso del ejercicio y no un adorno: sin aproximar, $K_a = x^2 \div (0,10 - x) = (1,0 \times 10^{-6}) \div (0,099) = 1,01 \times 10^{-5}$, frente al $1,0 \times 10^{-5}$ de partida. La diferencia es del 1 %, del orden del propio α , así que la aproximación es aceptable aquí; con un ácido bastante más fuerte o una disolución mucho más diluida habría que resolver la ecuación de segundo grado.

41

Calcula el pH de una disolución **0,10 mol/L** de la sal **NaA**, donde A^- es la base conjugada del ácido HA del ejercicio anterior, de $K_a = 1,0 \times 10^{-5}$. Datos: $K_w = 10^{-14}$ a 25°C . Razona después qué pH tendría una disolución $0,10 \text{ mol/L}$ de NaCl.

Solución

La sal se disuelve por completo y da Na^+ y A^- . El catión Na^+ viene de una base fuerte y no reacciona con el agua; el anión A^- , en cambio, es la base conjugada de un ácido débil y sí lo hace: $\text{A}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HA} + \text{OH}^-$, reversible.

Constante de esa hidrólisis: $K_b = K_w \div K_a = (1,0 \times 10^{-14}) \div (1,0 \times 10^{-5}) = 1,0 \times 10^{-9}$.

Con el mismo planteamiento que en un ácido débil, ahora para una base: $[\text{OH}^-] = \sqrt{(K_b \cdot c)} = \sqrt{[(1,0 \times 10^{-9}) \times (0,10)]} = \sqrt{(1,0 \times 10^{-10})} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$.

$\text{pOH} = -\log(1,0 \times 10^{-5}) = 5,00$, y de ahí $\text{pH} = 14,00 - 5,00 = 9,00$. La disolución es **básica**, aunque en la sal no haya grupos hidróxido.

▪ Aquí hay un error muy fácil de cometer, y conviene verlo escrito: quedarse en el $5,00$ y darlo como pH. El $5,00$ es el **pOH**, y $5,00$ es un valor de pH perfectamente posible, así que el resultado equivocado no llama la atención por sí solo; el pH tampoco tiene unidades, de modo que revisar unidades no avisa de nada. Lo que lo delata es el razonamiento químico: la sal de un ácido débil con una base fuerte da disolución básica, luego el pH tiene que salir **mayor** que 7.

NaCl $0,10 \text{ mol/L}$: el Na^+ viene de una base fuerte y el Cl^- de un ácido fuerte, así que ninguno de los dos se hidroliza y el pH es el del agua, **7,00** a 25°C . Es decir, que una sal dé pH 7 depende de qué

ácido y qué base la formaron.

42

Se prepara **1,00 L** de disolución con **0,10 mol de HA** ($K_a = 1,0 \times 10^{-5}$) y **0,10 mol de NaA**. Calcula su pH. Añade después **0,010 mol de HCl**, sin variación apreciable de volumen, y calcula el nuevo pH. Todo a **25 °C**, con $K_w = 10^{-14}$. Compara ese pH con el que se obtendría añadiendo esos mismos 0,010 mol de HCl a 1,00 L de agua pura.

Solución

Es una disolución reguladora: un ácido débil y su base conjugada en cantidades comparables. Se usa $\text{pH} = \text{p}K_a + \log([A^-] \div [HA])$, con $\text{p}K_a = -\log(1,0 \times 10^{-5}) = 5,00$.

Como las dos concentraciones valen 0,10 mol/L, el cociente es 1 y su logaritmo es 0: **pH = 5,00**. En una reguladora con cantidades iguales de los dos componentes el pH coincide con el $\text{p}K_a$.

Al añadir 0,010 mol de HCl, los protones reaccionan con la base conjugada: $A^- + H^+ \rightarrow HA$. Se consume 0,010 mol de A^- y se forma 0,010 mol de HA.

Nuevas cantidades en 1,00 L: $[HA] = 0,10 + 0,010 = \mathbf{0,110 \text{ mol/L}}$ y $[A^-] = 0,10 - 0,010 = \mathbf{0,090 \text{ mol/L}}$. $\text{pH} = 5,00 + \log(0,090 \div 0,110) = 5,00 + \log(0,8182) = 5,00 - 0,0872 = \mathbf{4,91}$. El pH ha bajado **0,09 unidades**.

En agua pura, esos mismos 0,010 mol de HCl en 1,00 L dan $[H^+] = 0,010 \text{ mol/L}$ y **pH = 2,00**, es decir, una caída de 5 unidades desde el 7,00 del agua. La comparación deja claro para qué sirve una reguladora: frente al mismo añadido, 0,09 unidades de variación en un caso y 5 en el otro.

43

Se valoran **25,0 mL** de una disolución de NaOH de concentración desconocida con HCl **0,100 mol/L**, y hasta el punto de equivalencia se gastan **20,0 mL** del ácido. Calcula la concentración de la base, la masa de NaOH que había en la muestra (masa molar 40,0 g/mol) y el pH en el punto de equivalencia. Todo a **25 °C**, con $K_w = 10^{-14}$. Razona si ese pH sería el mismo al valorar un ácido débil con NaOH.

Solución

Moles de ácido gastados: $n(\text{HCl}) = V \cdot c = (0,0200 \text{ L}) \times (0,100 \text{ mol/L}) = \mathbf{2,00 \times 10^{-3} \text{ mol}}$.

En el punto de equivalencia los moles de H^+ añadidos igualan a los de OH^- que había, y como la reacción es $\text{HCl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$, mol a mol: $n(\text{NaOH}) = \mathbf{2,00 \times 10^{-3} \text{ mol}}$.

Concentración de la base: $c = n \div V = (2,00 \times 10^{-3} \text{ mol}) \div (0,0250 \text{ L}) = \mathbf{0,0800 \text{ mol/L}}$. Comprobación de tamaño: como la reacción es mol a mol, se ha gastado menos volumen de ácido que el de base tomado, así que el ácido tiene que estar más concentrado, y así es (0,100 frente a 0,0800 mol/L).

Masa de NaOH en la muestra: $m = n \cdot M = (2,00 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (40,0 \text{ g/mol}) = \mathbf{0,0800 \text{ g}}$, es decir, 80,0 mg.

pH en el punto de equivalencia: lo único que queda en disolución es NaCl, y ni el Na^+ ni el Cl^- se hidrolizan, así que el pH es el del agua, **7,00** a 25 °C.

▪ Ese 7,00 depende de que los dos sean fuertes, y no es una propiedad del punto de equivalencia. Al valorar un ácido débil con NaOH, en el punto de equivalencia queda la sal de ese ácido débil, que se hidroliza y da disolución básica: el pH resultaría **mayor** que 7, como en el ejercicio del NaA.

Las reacciones redox y la electroquímica

Lo que hay que saber

Oxidarse es perder electrones y subir el número de oxidación; **reducirse** es ganarlos y bajarlo. El que se oxida es el agente reductor y el que se reduce, el oxidante. ▲ Que los números de oxidación de una fórmula sumen cero no confirma que la fórmula sea la correcta: el HNO_2 también suma cero.

Ajuste ion-electrón en medio ácido, por pasos: separar las dos semirreacciones · ajustar los átomos distintos de O y H · ajustar el oxígeno con H_2O · ajustar el hidrógeno con H^+ · igualar la carga de los dos lados añadiendo electrones · multiplicar cada semirreacción para que los electrones se cancelen · sumar.

Las dos comprobaciones del ajuste, que conviene hacer las dos: el recuento de **átomos** de cada elemento a los dos lados, y el recuento de **cargas**. Un ajuste puede tener bien los átomos y mal las cargas.

Potenciales estándar: $E^\circ_{\text{pila}} = E^\circ(\text{cátodo}) - E^\circ(\text{ánodo})$, en voltios. La reacción es espontánea si sale **positiva**, y el electrodo con el potencial de reducción mayor es el que se reduce, es decir, el cátodo.

▪ **Los polos:** en una **pila** el ánodo es el polo **negativo** y el cátodo el positivo; en una **electrólisis** ocurre al revés, porque la fuente impone los signos. Lo que no cambia de un caso al otro es que en el ánodo se oxida y en el cátodo se reduce.

Leyes de Faraday: la carga que pasa es $Q = I \cdot t$, en culombios, y los moles de electrones son $Q \div F$ con **F = 96.500 C/mol**. De los moles de electrones se pasa a los moles de sustancia con los de la semirreacción. Y $\Delta G^\circ = -n \cdot F \cdot E^\circ$, con el signo contrario al de E° .

44

Ajusta por el método del ion-electrón, en medio ácido, la reacción $\text{MnO}_4^- + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$. Comprueba el ajuste contando átomos y cargas. Calcula después el volumen de disolución de KMnO_4 **0,020 mol/L** necesario para valorar **25,0 mL** de una disolución de Fe^{2+} **0,10 mol/L**.

Solución

Números de oxidación: en el MnO_4^- el manganeso está a + 7 y pasa a + 2, así que **gana 5 electrones** y se reduce; el hierro pasa de + 2 a + 3, así que **pierde 1 electrón** y se oxida.

Semirreacción de reducción, ajustando el oxígeno con agua y el hidrógeno con protones: $\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}^+ + 5 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$. Su carga cuadra: a la izquierda $-1 + 8 - 5 = +2$, y a la derecha + 2.

Semirreacción de oxidación: $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1 \text{e}^-$. Para que los electrones se cancelen con los 5 de la otra, se multiplica por 5: $5 \text{Fe}^{2+} \rightarrow 5 \text{Fe}^{3+} + 5 \text{e}^-$.

Suma de las dos: **$\text{MnO}_4^- + 5 \text{Fe}^{2+} + 8 \text{H}^+ \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 5 \text{Fe}^{3+} + 4 \text{H}_2\text{O}$** .

Las dos comprobaciones, que conviene hacer las dos porque un ajuste puede tener bien los átomos y mal las cargas. Átomos: Mn 1 y 1 · Fe 5 y 5 · O 4 a la izquierda y 4 en las cuatro moléculas de agua · H 8 a la izquierda y 8 en las cuatro aguas. Cargas: izquierda $(-1) + 5 \times (+2) + 8 \times (+1) = +17$; derecha $(+2) + 5 \times (+3) = +17$. Cuadra.

Valoración: $n(\text{Fe}^{2+}) = (0,0250 \text{ L}) \times (0,10 \text{ mol/L}) = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$. La proporción de la ecuación es 1 mol de MnO_4^- por cada 5 de Fe^{2+} , así que $n(\text{MnO}_4^-) = (2,5 \times 10^{-3}) \div 5 = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$, y $V = (5,0 \times 10^{-4} \text{ mol}) \div (0,020 \text{ mol/L}) = 0,025 \text{ L} = \mathbf{25,0 \text{ mL}}$.

45

Se monta una pila con un electrodo de cinc sumergido en una disolución de Zn^{2+} y otro de cobre sumergido en una disolución de Cu^{2+} , unidos por un puente salino y por un hilo conductor. Datos: **$E^\circ(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) = +0,34 \text{ V}$** , **$E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0,76 \text{ V}$** y **$F = 96.500 \text{ C/mol}$** . Identifica el ánodo y el cátodo, di cuál es el polo positivo, escribe las semirreacciones y la reacción global, y calcula la fuerza electromotriz **estándar** y ΔG° . Supón **condiciones estándar** (los dos iones a 1 mol/L y 25 °C), que es lo que permiten los datos.

Solución

El electrodo con el potencial de reducción **mayor** es el que se reduce, y ese es el del cobre (+ 0,34 V frente a - 0,76 V). Por tanto el cobre es el **cátodo** y el cinc, donde ocurre la oxidación, es el **ánodo**.

Semirreacciones: en el ánodo, $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$; en el cátodo, $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)}$. Los electrones que salen del cinc van por el hilo hasta el cobre.

Reacción global, sumando y cancelando los 2 electrones: **$\text{Zn(s)} + \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + \text{Cu(s)}$** .

Comprobación de cargas: + 2 a la izquierda y + 2 a la derecha.

▪ Los polos, que conviene fijar de una vez: en una **pila** el ánodo es el polo **negativo** (de él salen los electrones hacia el circuito exterior) y el cátodo es el positivo. En una **electrólisis** ocurre justo al revés, porque los signos los impone la fuente. Lo que no cambia, ni en la pila ni en la electrólisis, es que en el ánodo se oxida y en el cátodo se reduce.

Fuerza electromotriz estándar: $E^\circ = E^\circ(\text{cátodo}) - E^\circ(\text{ánodo}) = (+ 0,34 \text{ V}) - (- 0,76 \text{ V}) = + 1,10 \text{ V}$. Al salir positiva, la reacción global es espontánea tal como se ha escrito **en condiciones estándar**; con otras concentraciones la fem de la pila real cambia, y para calcularla harían falta esos datos.

Energía de Gibbs: $\Delta G^\circ = - n \cdot F \cdot E^\circ$, con $n = 2$ electrones intercambiados. $\Delta G^\circ = - 2 \times (96.500 \text{ C/mol}) \times (1,10 \text{ V}) = - 212.300 \text{ J/mol}$, o sea **- 212,3 kJ/mol**. El signo es el contrario al de E° , y al ser negativo confirma la espontaneidad: las dos condiciones dicen lo mismo, E° positiva y ΔG° negativa.

46

Se electroliza una disolución de sulfato de cobre(II) haciendo pasar una corriente de **5,00 A** durante **1.930 s**. Datos: **$F = 96.500 \text{ C/mol}$** y masa atómica del cobre **63,5 u**. Calcula la carga que circula, los moles de electrones, los moles de cobre depositados y su masa. Calcula después el tiempo necesario para depositar 1,27 g de cobre con la misma corriente.

Solución

Carga que circula: $Q = I \cdot t = (5,00 \text{ A}) \times (1.930 \text{ s}) = 9.650 \text{ C}$. La unidad sale sola, porque $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ y $\text{A} \times \text{s} = \text{C}$.

Moles de electrones: $n(\text{e}^-) = Q \div F = (9.650 \text{ C}) \div (96.500 \text{ C/mol}) = 0,100 \text{ mol}$.

La semirreacción del cátodo es $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$, así que hacen falta 2 mol de electrones por cada mol de cobre: $n(\text{Cu}) = (0,100 \text{ mol}) \div 2 = 0,0500 \text{ mol}$.

Masa depositada: $m = n \cdot M = (0,0500 \text{ mol}) \times (63,5 \text{ g/mol}) = 3,175 \text{ g}$. ▲ La masa molar del cobre va en **g/mol**. Tomarla en kg/mol dejaría el mismo número con el resultado en kilogramos, y el arrastre de unidades **no** avisaría: $\text{mol} \times (\text{kg/mol}) = \text{kg}$ es impecable dimensionalmente. Lo que delata el error de escala es el tamaño del resultado, no las unidades: 3,175 kg de cobre no salen de 9.650 C.

Segunda parte, en sentido inverso. Moles de cobre: $n(\text{Cu}) = (1,27 \text{ g}) \div (63,5 \text{ g/mol}) = 0,0200 \text{ mol}$.

Moles de electrones: $2 \times 0,0200 = 0,0400 \text{ mol}$.

Carga: $Q = (0,0400 \text{ mol}) \times (96.500 \text{ C/mol}) = 3.860 \text{ C}$, y el tiempo, $t = Q \div I = (3.860 \text{ C}) \div (5,00 \text{ A}) = 772 \text{ s}$. Comprobación de proporción: 1,27 g es 0,4 veces los 3,175 g de antes, y 772 s es 0,4 veces los 1.930 s. La masa depositada es proporcional al tiempo con la corriente fija.

Lo que hay que saber

Cómo se nombra una cadena: se elige la cadena principal, la más larga que contenga el grupo funcional, y se numera por el extremo que dé los localizadores más bajos al grupo y a los sustituyentes. ▲ En esta página las cadenas se escriben en línea, con guiones: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$.

Prioridad de los grupos funcionales, de mayor a menor: ácido carboxílico ($-\text{COOH}$) · éster ($-\text{COO}-$) · amida ($-\text{CONH}_2$) · aldehído ($-\text{CHO}$) · cetona ($-\text{CO}-$) · alcohol ($-\text{OH}$) · amina ($-\text{NH}_2$). El de mayor prioridad da la terminación y los demás pasan a ser prefijos.

Isomería estructural: de **cadena** (la misma fórmula molecular con el esqueleto ramificado de otra manera) · de **posición** (el grupo funcional en otro carbono) · de **función** (grupos funcionales distintos, como el etanol $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ y el dimetiléter $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$).

Estereoisomería: la **geométrica** aparece en un doble enlace cuando cada carbono del doble enlace lleva dos sustituyentes distintos entre sí; su nombre general es **E/Z**, y cis-trans se reserva a los casos en que la pareja de sustituyentes es clara. La **óptica** pide al menos un carbono unido a cuatro grupos diferentes, ▲ aunque tenerlo no basta: una molécula con dos de esos carbonos y un plano de simetría (un compuesto *meso*) no es quiral.

Reacciones principales: **adición** a dobles y triples enlaces (de H_2 , de halógenos, de agua) · **sustitución** en alcanos y en el benceno · **eliminación**, que crea un doble enlace a partir de un alcohol o un halogenuro · **combustión**, que da CO_2 y H_2O y es muy exotérmica.

- 47 Escribe en línea y nombra los tres isómeros de cadena de fórmula molecular C_5H_{12} , comprobando en cada uno el recuento de carbonos e hidrógenos. Escribe después los dos isómeros de función de fórmula $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ y los dos alcoholes isómeros de posición de fórmula $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, e indica qué tipo de isomería presenta cada pareja.

Solución

Primer isómero del C_5H_{12} , la cadena sin ramificar: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$, el **pentano**. Recuento: 5 carbonos, e hidrógenos $3 + 2 + 2 + 2 + 3 = 12$.

Segundo, con una ramificación de un carbono: $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_3$, el **2-metilbutano**. La cadena principal tiene cuatro carbonos y el metilo va en el segundo. Recuento: $4 + 1 = 5$ carbonos, e hidrógenos $3 + 1 + 3 + 2 + 3 = 12$.

Tercero, con dos ramificaciones sobre el mismo carbono: $\text{CH}_3\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-CH}_3$, el **2,2-dimetilpropano**. La cadena principal tiene tres carbonos y el central lleva dos metilos. Recuento: $3 + 2 = 5$ carbonos, e hidrógenos $3 + 0 + 6 + 3 = 12$. Con cinco carbonos no hay más esqueletos posibles.

Isómeros de función del $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$: el **etanol**, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$, y el **dimetiléter**, $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$. Los dos suman 2 carbonos, 6 hidrógenos y 1 oxígeno, y se diferencian en el grupo funcional: alcohol en uno y éter en el otro.

Sus propiedades no se parecen, que es lo característico de la isomería de función: el etanol tiene un grupo OH y sus moléculas forman enlaces de hidrógeno entre sí, de modo que es líquido a temperatura ambiente, mientras que el dimetiléter no puede formarlos y es un gas.

Alcoholes isómeros de posición del $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$: el **1-propanol**, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$, y el **2-propanol**, $\text{CH}_3\text{-CHOH-CH}_3$. Misma cadena y mismo grupo funcional, que solo cambia de carbono: eso es isomería de **posición**, distinta de la de función del apartado anterior.

Se queman **4,40 g de propano, C_3H_8** . Datos: masas atómicas C = 12,0 u, H = 1,0 u y O = 16,0 u · volumen molar en condiciones normales **22,4 L/mol** · entalpía de combustión del propano – **2.220 kJ/mol**. Escribe y ajusta la reacción, y calcula los moles de propano, el volumen de oxígeno consumido y el de dióxido de carbono producido en condiciones normales, y el calor desprendido.

Solución

Reacción de combustión ajustada: **$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$** . Comprobación del ajuste átomo a átomo: carbono 3 y 3 · hidrógeno 8 y 8 (cuatro aguas con dos hidrógenos) · oxígeno 10 a la izquierda (cinco moléculas de O_2) y $6 + 4 = 10$ a la derecha.

Masa molar del propano: $M = 3 \times (12,0 \text{ g/mol}) + 8 \times (1,0 \text{ g/mol}) = 36,0 + 8,0 = \mathbf{44,0 \text{ g/mol}}$.

Moles de propano: $n = m \div M = (4,40 \text{ g}) \div (44,0 \text{ g/mol}) = \mathbf{0,100 \text{ mol}}$. La unidad confirma que la división va en ese sentido: $\text{g} \div (\text{g/mol}) = \text{mol}$.

Oxígeno consumido: la proporción es 5 mol de O_2 por cada mol de propano, así que $n(O_2) = 5 \times 0,100 = 0,500 \text{ mol}$, y su volumen en condiciones normales $V = (0,500 \text{ mol}) \times (22,4 \text{ L/mol}) = \mathbf{11,2 \text{ L}}$.

Dióxido de carbono producido: 3 mol por cada mol de propano, $n(CO_2) = 3 \times 0,100 = 0,300 \text{ mol}$, y $V = (0,300 \text{ mol}) \times (22,4 \text{ L/mol}) = \mathbf{6,72 \text{ L}}$.

Calor: $Q = n \cdot \Delta H = (0,100 \text{ mol}) \times (-2.220 \text{ kJ/mol}) = \mathbf{-222 \text{ kJ}}$, es decir, **se desprenden 222 kJ**. El signo negativo indica que la energía sale del sistema, y es lo esperado en una combustión, que es la reacción exotérmica por excelencia.