



01

CIENCIAS GENERALES · 2.º BACHILLERATO

Ciencias Generales

Materia de modalidad General de 2.º de Bachillerato: física, química, biología y geología al servicio de una cultura científica común. Material de aula gratuito para el profesorado.

8 UNIDADES · CURRÍCULO ESTATAL LOMLOE · RD 243/2022

POR Adrián Peinado, profesor de Física y Química en Secundaria

EDITORIAL

profedefyq.es

EDICIÓN

Curso 2026/27 · borrador

GENERADO

23 de octubre de 2026

SOBRE ESTE LIBRO

Este libro forma parte de los materiales abiertos de **profedefyq.es**, una plataforma de material de aula para el profesorado de Física y Química de instituto. Todo el contenido se publica bajo licencia *Creative Commons BY-NC-SA*: podéis copiarlo, redistribuirlo y adaptarlo siempre que citéis la autoría y no lo uséis con fines comerciales.

Este libro se basa en el currículo básico estatal LOMLOE para **Ciencias Generales** (RD 243/2022). Cada comunidad autónoma establece concreciones específicas en su currículo propio; conviene consultar la concreción de vuestra CCAA para ajustar la programación al centro.

Composición tipográfica con Fraunces y Outfit. Generado con Astro y paged.js. Comentarios, erratas y propuestas:
contacto@oposicionesfyq.es.

Contenido

01	Construyendo ciencia: método, medida y comunicación	5
	<i>Cronometras diez oscilaciones de un péndulo ocho veces y obtienes ocho tiempos distintos. Ninguno es «el bueno»: la ciencia empieza por saber qué hacer con es...</i>	
02	Sistemas materiales: estados de agregación, modelo de partículas y clasificación	15
	<i>Un aula vacía no está vacía: una de unos 150 m³ contiene unos 170 kg de aire. Lo que no se ve también tiene masa, ocupa espacio y empuja las paredes. Para...</i>	
03	Estructura de la materia: átomo, tabla periódica, enlace y nomenclatura	26
	<i>La sal y el azúcar de la cocina parecen casi iguales: blancos, cristalinos, solubles en agua. Pero la sal funde a unos 800 °C y el azúcar se descompone antes de...</i>	
04	Reacciones químicas: leyes, estequiometría y química en la sociedad	40
	<i>Una bombona de butano de 12,5 kg se vacía en la cocina y, al quemarse, deja en el aire unos 38 kg de dióxido de carbono. No es un error de cuentas: el gas que...</i>	
05	Energía: conservación de la energía mecánica, termodinámica y consumo energético	53
	<i>Un hervidor de 2000 W calienta el agua de una tetera en menos de cinco minutos; una bombilla LED de 9 W necesita unas dieciocho horas encendida...</i>	
06	El universo, el sistema solar y la Tierra: origen y movimientos	65
	<i>En Valencia, el Sol del mediodía sube a unos 74° sobre el horizonte en el solsticio de junio y solo a 27° en el de diciembre. En enero la Tierra está unos cinco...</i>	

La misma fuerza que hace caer una llave al suelo mantiene a la Luna en su órbita, y la que hace que un globo frotado se pegue a la pared sostiene cada...

Un semáforo colgado sobre un cruce no se mueve, y un coche que frena ante ese semáforo recorre todavía decenas de metros antes de detenerse. Las mismas tr...

UNIDAD 1 · BLOQUE A

01

Construyendo ciencia: método, medida y comunicación

Cronometras diez oscilaciones de un péndulo ocho veces y obtienes ocho tiempos distintos. Ninguno es «el bueno»: la ciencia empieza por saber qué hacer con esa dispersión y cómo contarlos con honestidad.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

6 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

hipótesis contrastable ·
variable independiente,
dependiente y controlada ·
Sistema Internacional de
Unidades · incertidumbre
de medida · cifras
significativas · exactitud y
precisión

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Plantear una pregunta investigable sobre un fenómeno del entorno y formular una hipótesis contrastable, identificando variables y controles (criterio 1.1).
- Diseñar y realizar una medida experimental, en laboratorio o en simulación, siguiendo las normas de seguridad (criterio 1.2).
- Expresar el resultado de una serie de medidas con su valor medio, su incertidumbre, sus unidades del SI y las cifras significativas correctas (criterios 1.3 y 4.2).
- Revisar una conclusión cuando los datos o un análisis crítico lo exigen, a partir de casos reales (criterio 4.2).
- Buscar, contrastar y citar información científica fiable, y trabajar en equipo en las fases de una investigación (criterios 6.1 y 6.2).
- Reconocer la ciencia como empresa colectiva e interdisciplinar y el papel de las personas que la hacen (criterios 5.1 y 5.2).

Duración: 6 sesiones · **Saberes:** A.1–A.5 · **Criterios:** 1.1, 1.2, 1.3, 4.2, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 · **Requisitos previos:** las ciencias de la ESO; no se presupone Física y Química de 1.º.

Esta unidad no trata de un fenómeno concreto, sino de la manera de estudiar cualquiera. Física, química, biología y geología preguntan cosas distintas, pero comparten un mismo

oficio: formular preguntas que los datos puedan responder, medir con instrumentos cuyos límites se conocen, analizar resultados sin forzarlos y comunicarlos de forma que otra persona pueda comprobarlos. El currículo agrupa ese oficio en el bloque «Construyendo ciencia» y pide trabajarlo como destreza práctica, no como teoría aislada.

Por eso la unidad es corta y muy aplicada. Lo que aquí se aprende —expresar una medida con su incertidumbre, distinguir una hipótesis de una opinión, citar una fuente— reaparece en todas las unidades del curso: al calcular la presión de un gas, al interpretar un perfil sísmico o al leer un estudio sobre vacunas.

Cómo trabaja la ciencia: preguntas, hipótesis y pruebas

De la observación a la pregunta investigable

Toda investigación parte de algo observado que no se entiende del todo. «¿Por qué el péndulo del reloj de la abuela va más lento en verano?» es una buena curiosidad, pero no todavía una pregunta investigable. Lo es cuando se puede responder midiendo: «¿Depende el período de un péndulo de su longitud?». Una pregunta investigable nombra las magnitudes implicadas y sugiere qué habría que medir para responderla.

No existe un único «método científico» de pasos fijos. Las disciplinas trabajan de forma distinta: la astronomía rara vez puede experimentar con su objeto de estudio y se apoya en la observación sistemática; la química de laboratorio puede repetir una reacción cien veces. Lo que comparten es la exigencia de que las afirmaciones se contrasten con datos obtenidos de forma reproducible.

Hipótesis contrastables

Una **hipótesis** es una respuesta provisional a la pregunta, formulada de manera que los datos puedan contradecirla. «El período del péndulo aumenta con la longitud» es contrastable: si al alargar el hilo el período no cambia, la hipótesis cae. «El péndulo oscila como quiere» no lo es, porque ningún resultado podría refutarla.

El filósofo Karl Popper hizo de esta idea el centro de su *Logik der Forschung* (publicada a finales de 1934, con fecha de 1935): lo que distingue un enunciado científico no es que pueda confirmarse, sino que pueda refutarse. Un experimento que coincide con lo previsto no demuestra la hipótesis; solo la deja en pie de momento.

CONCEPTO CLAVE

Hipótesis contrastable

Enunciado provisional que relaciona magnitudes y que predice un resultado observable concreto, de modo que un experimento u observación podría mostrar que es falso.

Variables y controles

Para contrastar una hipótesis se distinguen tres tipos de variables:

- **Variable independiente:** la que se modifica a propósito (la longitud del hilo).
- **Variable dependiente:** la que se mide para ver si responde (el período).
- **Variables controladas:** las que se mantienen constantes para que no interfieran (la masa, la amplitud de la oscilación, el lugar).

Si se cambian dos cosas a la vez, no se puede saber cuál causó el efecto. En biología y en medicina esta lógica toma la forma del **grupo control**: en un ensayo clínico, un grupo recibe el tratamiento y otro, idéntico en lo demás, recibe un placebo. La unidad 11 vuelve sobre esta idea

al estudiar cómo se evalúan las vacunas: es el mismo razonamiento que el del péndulo, aplicado a personas.

Medir: magnitudes, unidades y el Sistema Internacional

Magnitud, valor y unidad

Una **magnitud** es una propiedad que se puede medir: longitud, masa, tiempo, temperatura. Medir es compararla con una unidad, y por eso un resultado tiene siempre dos partes inseparables: un número y una unidad. «El período es 1,43» no significa nada; «1,43 s» sí.

El SI y sus constantes

El **Sistema Internacional de Unidades (SI)** tiene siete unidades básicas: metro (m), kilogramo (kg), segundo (s), amperio (A), kelvin (K), mol (mol) y candela (cd). Todas las demás —newton, julio, pascal— se derivan de ellas. Desde la revisión aprobada por la 26.^a Conferencia General de Pesas y Medidas en noviembre de 2018, en vigor desde el 20 de mayo de 2019, el SI se define fijando el valor exacto de siete constantes de la naturaleza. Entre ellas, la velocidad de la luz, $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$; la constante de Planck, $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$, y la constante de Avogadro, $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$. Con ese cambio, el kilogramo dejó de depender de un cilindro de platino e iridio guardado en Sèvres y pasó a definirse a partir de h .

Notación científica, prefijos y análisis de unidades

Para manejar valores muy grandes o muy pequeños se usa la **notación científica** (un número a con $1 \leq a < 10$ multiplicado por una potencia de 10) y los prefijos del SI: kilo (10^3), mega (10^6), mili (10^{-3}), micro (10^{-6}), nano (10^{-9}).

Las unidades se operan como factores algebraicos. Para pasar 72 km/h a m/s:

$$72\text{ km/h} \times (1000\text{ m} / 1\text{ km}) \times (1\text{ h} / 3600\text{ s}) = 20\text{ m/s}$$

Comprobar que las unidades de un resultado son las de la magnitud buscada (**análisis dimensional**) detecta muchos errores antes de que lleguen al número final.

EJEMPLO REAL

Mars Climate Orbiter: una sonda perdida por una conversión de unidades

La sonda Mars Climate Orbiter despegó el 11 de diciembre de 1998 y se perdió el 23 de septiembre de 1999, al llegar a Marte. La NASA atribuye la pérdida a un error de navegación: el software de tierra trabajaba con unidades inglesas y el de la nave, con unidades métricas, y nadie tradujo unas a otras. La trayectoria resultante acercó la sonda a Marte mucho más de lo previsto. Una libra-fuerza equivale a 4,448 N: un dato leído en la unidad equivocada no es un error pequeño, sino un factor de más de cuatro.

Fuente: [NASA, Mars Climate Orbiter \(ficha de misión\)](#)

Ninguna medida es exacta: incertidumbre y cifras significativas

Exactitud y precisión

Dos ideas que en el lenguaje común se confunden:

	QUÉ DESCRIBE	QUÉ LA EMPEORA
Exactitud	Cercanía de las medidas al valor verdadero	Errores sistemáticos (balanza mal tarada, cero desplazado) y también aleatorios
Precisión	Cercanía de las medidas entre sí	Errores aleatorios: reflejos al cronometrar, vibraciones, lectura de una escala

El *Vocabulario Internacional de Metrología* (VIM, JCGM 200:2012) llama **veracidad** a la cercanía de la media de muchas medidas al valor verdadero, que solo empeoran los errores sistemáticos; la exactitud de cada medida depende a la vez de la veracidad y de la precisión. Un conjunto de medidas puede ser muy preciso y poco exacto: si la balanza marca siempre 2 g de más, repetir la pesada cien veces no corrige nada. Los errores aleatorios se reducen repitiendo y promediando; los sistemáticos, solo revisando el método o calibrando el instrumento.

La incertidumbre de una medida repetida

La *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida* (GUM, JCGM 100:2008) es el documento internacional de referencia. Distingue dos maneras de evaluar la incertidumbre:

- **Tipo A**, a partir de la dispersión de medidas repetidas. Con n medidas de valor medio $\bar{x}$ y desviación típica s , la incertidumbre del valor medio es $u_A = s / \sqrt{n}$.
- **Tipo B**, por otros medios: la resolución del instrumento, su certificado de calibración. Para un instrumento digital de resolución δ , la GUM propone $u_B = \delta / \sqrt{12}$.

Las dos se combinan como $u = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2}$. En bachillerato basta con entender la idea: la incertidumbre recoge a la vez lo que varían las medidas y lo que el instrumento no puede distinguir.

CONCEPTO CLAVE

Expresión de un resultado

Un resultado experimental se escribe como (valor $\pm$ incertidumbre) unidad, por ejemplo $t = (14,29 \pm 0,03)$ s. La incertidumbre se da con una cifra significativa (dos si la primera es un 1) y el valor se redondea a la misma posición decimal.

Cifras significativas

Las **cifras significativas** de un número son las que se conocen con fiabilidad más la primera dudosa. Los ceros a la izquierda no cuentan (0,0045 tiene dos); los ceros a la derecha tras la coma sí (2,50 tiene tres). Al operar:

- En **productos y cocientes**, el resultado lleva tantas cifras significativas como el dato que menos tenga: $12,4 \text{ cm} \times 3,1 \text{ cm} = 38 \text{ cm}^2$, no $38,44 \text{ cm}^2$.
- En **sumas y restas**, el resultado se redondea a la última posición decimal común: $12,4 + 3,15 = 15,6$.

Una calculadora da diez dígitos; el resultado solo puede llevar los que los datos justifican.

PROCEDIMIENTO

Cómo expresar el resultado de n medidas repetidas

- 1 Anota todas las medidas con la resolución del instrumento y su unidad. Descarta una medida solo si sabes qué falló en ella, nunca porque «no encaja».
- 2 Calcula el valor medio $\bar{x}$ y la desviación típica s de la muestra.
- 3 Calcula $u_A = s / \sqrt{n}$ y $u_B = \delta / \sqrt{12}$, y combínalas: $u = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$.
- 4 Redondea u a una cifra significativa (dos si empieza por 1) y redondea $\bar{x}$ a la misma posición decimal.
- 5 Escribe $(\bar{x} \pm u)$ unidad y calcula la incertidumbre relativa $u / \bar{x}$ en porcentaje.
- 6 Valora el resultado: ¿es razonable el orden de magnitud?, ¿qué fuente de incertidumbre domina?

1.1

EJERCICIO RESUELTO

El período de un péndulo a partir de ocho medidas

ENUNCIADO

Un grupo mide con un cronómetro digital (resolución 0,01 s) el tiempo de 10 oscilaciones completas de un péndulo de 50,7 cm de longitud. Obtiene, en segundos:

14,32 · 14,18 · 14,40 · 14,25 · 14,31 · 14,22 · 14,36 · 14,28

Expresa el tiempo de 10 oscilaciones y el período con su incertidumbre y las cifras significativas correctas, y valora el resultado.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- 1. Valor medio:** $t = (\text{suma de las 8 medidas}) / 8 = 114,32 \text{ s} / 8 = 14,290 \text{ s}$.
- 2. Desviación típica:** $s = \sqrt{[\sum(t_i - t)^2] / (n - 1)} = \sqrt{(0,0370 \text{ s}^2 / 7)} = 0,0727 \text{ s}$.
- 3. Incertidumbre tipo A:** $u_A = s / \sqrt{n} = 0,0727 \text{ s} / \sqrt{8} = 0,0257 \text{ s}$.
- 4. Incertidumbre tipo B:** $u_B = 0,01 \text{ s} / \sqrt{12} = 0,0029 \text{ s}$. Es casi nueve veces menor que u_A : domina la dispersión de las medidas (poner en marcha y parar el cronómetro a mano), no la resolución del aparato.
- 5. Incertidumbre combinada:** $u = \sqrt{(0,0257^2 + 0,0029^2)} \text{ s} = 0,0259 \text{ s} \approx 0,03 \text{ s}$.
- 6. Resultado:** $t_{10} = (14,29 \pm 0,03) \text{ s}$. Incertidumbre relativa: $0,0259 / 14,29 = 0,18 \%$.
- 7. Período:** $T = t_{10} / 10$, y la incertidumbre se divide también por 10: $T = (1,429 \pm 0,003) \text{ s}$. Medir diez oscilaciones en lugar de una reduce diez veces la incertidumbre del período.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: segundos entre un número adimensional (10 oscilaciones) dan segundos.

¿ES RAZONABLE?

Para oscilaciones pequeñas, la física predice $T = 2\pi \sqrt{L/g}$. Con $L = 0,507 \text{ m}$ y $g = 9,80 \text{ m s}^{-2}$ se obtiene 1,429 s, dentro de la incertidumbre medida. El resultado es coherente.

Analizar resultados y revisar conclusiones

Tablas y gráficas

Los datos se recogen en **tablas** con la magnitud y su unidad en la cabecera, no en cada celda. La **gráfica** muestra la relación entre variables: la independiente en el eje horizontal, la dependiente en el vertical, con escalas que aprovechen el papel y, si se puede, barras de incertidumbre.

Muchas relaciones de la naturaleza no son lineales, pero se pueden **linealizar**. El período del péndulo no es proporcional a la longitud, pero su cuadrado sí: $T^2 = (4\pi^2/g) \cdot L$. Representar T^2 frente a L da una recta cuya pendiente permite calcular g , que es lo que se hace en la práctica de esta unidad. El valor de g reaparece en la unidad 15, al estudiar las fuerzas y el movimiento (el peso de un cuerpo es mg).

Cuando los datos obligan a cambiar de idea

Analizar críticamente un resultado (criterio 4.2) significa preguntarse si es físicamente viable, si una fuente de error lo explica mejor que una teoría nueva y qué datos adicionales lo confirmarían o lo descartarían. Una conclusión científica es firme mientras resiste esa revisión, no porque la haya firmado alguien con prestigio.

EJEMPLO REAL

Neutrinos «más rápidos que la luz»: un cable mal conectado

El 23 de septiembre de 2011, el experimento OPERA, en el laboratorio italiano de Gran Sasso, anunció que los neutrinos enviados desde el CERN llegaban antes de lo que permite la velocidad de la luz. La propia colaboración pidió comprobaciones independientes. En febrero de 2012 identificó dos posibles fallos instrumentales, uno de ellos un conector defectuoso de fibra óptica en el sistema de sincronización; en marzo, el experimento ICARUS publicó una medida, hecha con el haz de finales de 2011, con tiempos compatibles con la velocidad de la luz, y el 8 de junio de 2012 cuatro experimentos de Gran Sasso presentaron medidas compatibles con ella. El resultado original se atribuyó a un elemento defectuoso del sistema de fibra óptica. La versión definitiva del artículo (*Journal of High Energy Physics*, 2012) ya no contiene la anomalía. Es un ejemplo de cómo funciona la ciencia cuando funciona bien: publicar los datos, buscar el error y corregir en público.

Fuente: CERN, comunicado de prensa del 23-09-2011 y actualizaciones hasta el 08-06-2012

Información científica: fuentes, comunicación y personas

Fuentes veraces

No toda la información tiene el mismo valor. Una **fuentes primaria** presenta datos originales: un artículo de investigación, una base de datos oficial, un informe técnico. Una **fuentes secundaria** los resume o interpreta: un manual, una noticia, una enciclopedia. Las revistas científicas someten los artículos a **revisión por pares**: otros especialistas los leen antes de publicarlos. Es un filtro, no una garantía.

Preguntas útiles ante cualquier información: quién la firma y con qué competencia, de dónde salen los datos, si está fechada, si otras fuentes independientes dicen lo mismo y si se puede rastrear hasta su origen (un **DOI**, por ejemplo, identifica de forma permanente un artículo).

Las publicaciones se corrigen y, a veces, se retiran: en febrero de 2010 *The Lancet* publicó la retractación del artículo de 1998 que había relacionado la vacuna triple vírica con el autismo (*The Lancet*, 375(9713), 445). Citar un artículo retractado sin decirlo es difundir un error.

Comunicar un trabajo científico

Un **informe de laboratorio** sigue una estructura que permite a otra persona repetir el trabajo: título, objetivo e hipótesis, material y procedimiento, resultados (tablas y gráficas con unidades e incertidumbres), análisis, conclusiones y referencias. La ética de la comunicación (criterio 1.3) incluye no inventar ni descartar datos incómodos, citar lo que no es propio y reconocer las contribuciones de todo el equipo.

La ciencia la hacen personas

La ciencia es un trabajo colectivo y acumulativo: cada resultado se apoya en instrumentos, datos y métodos de otras personas, a menudo de otras disciplinas. El reloj atómico que materializa el segundo es física; la vacuna que se evalúa con grupo control es biología; el sismógrafo que registra un terremoto es ingeniería al servicio de la geología. Durante mucho tiempo, además, buena parte de ese trabajo lo hicieron personas cuyo nombre no aparecía en primer plano.

¿SABÍAS QUE...?

Henrietta Leavitt y la regla para medir el universo

A principios del siglo XX, el observatorio de la Universidad de Harvard empleaba a un grupo de mujeres para analizar placas fotográficas del cielo. Una de ellas, Henrietta Swan Leavitt, estudió estrellas variables de la Pequeña Nube de Magallanes y encontró que cuanto más largo es su período de variación, más brillantes son. El resultado se publicó en 1912 en una circular del observatorio que firmó el director, Edward C. Pickering, indicando que el trabajo era de Leavitt. Esa relación entre período y luminosidad permitió más tarde calcular distancias a otras galaxias. La unidad 6 vuelve sobre ella al estudiar el origen y la escala del universo.

Glosario

- **Pregunta investigable:** pregunta que se puede responder midiendo u observando magnitudes concretas.
- **Hipótesis:** respuesta provisional a una pregunta investigable, formulada de modo que los datos puedan refutarla.
- **Variable independiente:** magnitud que se modifica a propósito en un experimento.
- **Variable dependiente:** magnitud que se mide para ver cómo responde a la independiente.
- **Variable controlada:** magnitud que se mantiene constante para que no interfiera en el resultado.
- **Sistema Internacional (SI):** sistema de unidades basado en siete unidades básicas definidas a partir de siete constantes de valor exacto.
- **Exactitud:** cercanía de un resultado de medida al valor verdadero de la magnitud.
- **Precisión:** cercanía entre sí de medidas repetidas de la misma magnitud.
- **Incertidumbre de medida (GUM):** parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente a la magnitud medida.

- **Veracidad (VIM):** cercanía de la media de un número infinito de medidas al valor de referencia; solo la empeoran los errores sistemáticos.
- **Cifras significativas:** dígitos de un número que se conocen con fiabilidad más el primero dudoso.
- **Revisión por pares:** evaluación de un trabajo científico por especialistas independientes antes de su publicación.

Para profundizar

- **El Sistema Internacional de Unidades (SI)**, 9.^a edición — *BIPM* (2019). El documento oficial del SI, con las siete constantes definitorias y las reglas de escritura de unidades. bipm.org
- **Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM)**, JCGM 100:2008 — *BIPM y organizaciones del JCGM*. Para el profesorado que quiera la base formal de las incertidumbres tipo A y tipo B. [Descarga en PDF](#)
- **Karl Popper** — *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (entrada de S. Thornton). Resumen académico de la falsabilidad y de *Logik der Forschung*, con su bibliografía. plato.stanford.edu
- **Valores de las constantes físicas (CODATA)** — *NIST*. Base de datos con los valores recomendados de las constantes fundamentales. physics.nist.gov
- **Laboratorio de péndulo** — *PhET, Universidad de Colorado*. Simulación en español para practicar el control de variables antes o en lugar de la práctica de laboratorio. phet.colorado.edu

Preguntas para reflexionar

1. Un anuncio afirma que un suplemento «está científicamente probado». ¿Qué preguntas harías para saber si hay un ensayo con grupo control detrás y quién lo ha financiado?
2. El caso OPERA terminó con una corrección pública. ¿Crees que una corrección así resta credibilidad a la ciencia o se la da? Argumenta con el caso.
3. Si dos grupos miden el mismo período y obtienen $(1,43 \pm 0,01)$ s y $(1,47 \pm 0,01)$ s, ¿pueden tener razón los dos? ¿Qué harías para decidirlo?

LO ESENCIAL

- Una hipótesis científica debe poder refutarse con datos; un experimento que coincide con ella no la demuestra, solo la deja en pie.
- Para atribuir un efecto a una causa se cambia una sola variable y se controlan las demás.
- Todo resultado lleva número, unidad del SI e incertidumbre: $(x \pm u)$ unidad.
- La incertidumbre de una serie combina la dispersión ($u_A = s/\sqrt{n}$) y la resolución del instrumento ($u_B = \delta/\sqrt{12}$).
- Las cifras significativas del resultado las fijan los datos, no la calculadora.
- Una conclusión se revisa cuando aparecen datos nuevos o un error en el método: así se corrige la ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales».
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Bureau International des Poids et Mesures (2019). *The International System of Units (SI)*, 9.^a ed.
<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>
3. JCGM (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008).
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
4. JCGM (2012). *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3.^a ed. (JCGM 200:2012).
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf
5. OPERA Collaboration (2012). Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics*, 2012(10), 093.
[https://doi.org/10.1007/JHEP10\(2012\)093](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2012)093)
6. Leavitt, H. S. y Pickering, E. C. (1912). Periods of 25 variable stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1-3.

UNIDAD 2 · BLOQUE B

02

Sistemas materiales: estados de agregación, modelo de partículas y clasificación

Un aula vacía no está vacía: una de unos 150 m^3 contiene unos 170 kg de aire. Lo que no se ve también tiene masa, ocupa espacio y empuja las paredes. Para entenderlo hay que imaginar la materia hecha de partículas que nunca están quietas.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

7 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

sistema material · modelo
cinético-molecular ·
estados de agregación ·
cambios de estado ·
temperatura absoluta ·
ecuación de los gases
ideales

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Explicar las propiedades de sólidos, líquidos y gases y los cambios de estado con el modelo cinético-molecular, representándolos con tablas, gráficas y modelos de partículas (criterios 2.1 y 2.3).
- Interpretar una curva de calentamiento o de enfriamiento y distinguir temperatura de calor (criterios 2.1 y 2.3).
- Relacionar presión, volumen, temperatura y cantidad de sustancia de un gas con la ecuación $pV = nRT$ y resolver problemas con ella, con análisis de unidades (criterios 2.3 y 4.1).
- Clasificar sistemas materiales en sustancias puras (elementos y compuestos) y mezclas (homogéneas y heterogéneas), y elegir un método físico para separar los componentes de una mezcla (criterio 2.3).
- Calcular la concentración de una disolución en g/L, en porcentaje en masa y en mol/L (criterio 4.1).

Duración: 7 sesiones · **Saberes:** B.1, B.2 · **Criterios:** 2.1, 2.3, 4.1 · **Requisitos previos:** unidad 1 (unidades del SI, notación científica, cifras significativas); no se presupone Física y Química de 1.º.

Todo lo que se puede pesar y que ocupa un volumen es materia: el agua de una botella, el aire de una rueda, una roca, la sangre. Cuando se estudia una porción concreta de materia, aislada

mentalmente del resto, se habla de un **sistema material**. Esta unidad responde a dos preguntas sobre los sistemas materiales: por qué se comportan como se comportan (por qué un gas se comprime y un líquido casi no, por qué el hielo funde siempre a la misma temperatura) y de qué están hechos (una sola sustancia o varias mezcladas).

La herramienta para la primera pregunta es un **modelo**: imaginar que la materia está formada por partículas diminutas en movimiento continuo. Nadie ve esas partículas a simple vista, pero el modelo explica y predice lo que sí se ve y se mide. La segunda pregunta lleva a clasificar los sistemas materiales y a expresar su composición con números, algo que reaparece en química, en medicina (la concentración de un suero), en geología (los gases disueltos en un lago) y en el estudio de la atmósfera.

La materia y sus propiedades

Propiedades generales y características

Algunas propiedades las tiene cualquier sistema material y no sirven para identificarlo: la **masa** y el **volumen**. Dos objetos de 1 kg pueden ser de hierro o de madera. Otras propiedades son **características** de cada sustancia y permiten reconocerla: la **densidad** ($\rho = m/V$, en kg/m^3 en el SI), la temperatura de fusión, la temperatura de ebullición o la solubilidad en agua.

La densidad no depende de cuánta sustancia haya: un clavo y una viga del mismo acero tienen la misma densidad. Por eso es una propiedad **intensiva**, como la temperatura. La masa y el volumen, que aumentan con la cantidad de materia, son propiedades **extensivas**.

Cambios físicos y cambios químicos

Cuando el agua se congela o el azúcar se disuelve, las sustancias siguen siendo las mismas: son **cambios físicos**. Cuando la madera arde o el hierro se oxida, aparecen sustancias nuevas con propiedades distintas: son **cambios químicos** o reacciones químicas. La unidad 4 estudia los segundos; en esta unidad todos los procesos que se analizan son físicos.

El modelo cinético-molecular

Los postulados del modelo

El modelo cinético-molecular resume en pocas ideas el comportamiento de la materia:

1. La materia está formada por partículas (átomos, moléculas o iones) muy pequeñas.
2. Las partículas están en **movimiento continuo**. Cuanto mayor es la temperatura, más rápido se mueven por término medio.
3. Entre las partículas hay **fuerzas de atracción** que son mayores cuanto más cerca están unas de otras, aunque a distancias muy cortas se repelen.
4. Entre las partículas **no hay nada**: el espacio que las separa está vacío.

El estado en que se encuentra un sistema depende de la competencia entre las fuerzas de atracción, que tienden a mantener las partículas juntas y ordenadas, y la agitación térmica, que tiende a separarlas.

Sólidos, líquidos y gases

	SÓLIDO	LÍQUIDO	GAS
Disposición de las partículas	Muy juntas, en posiciones fijas (a menudo ordenadas)		

	en una red)	Juntas, pero sin posiciones fijas	Muy separadas, en desorden
Movimiento	Vibran alrededor de su posición	Vibran y se desplazan unas sobre otras	Se mueven libremente en línea recta hasta chocar
Fuerzas de atracción	Intensas	Intermedias	Muy débiles
Forma y volumen	Forma y volumen propios	Volumen propio; forma del recipiente	Ocupan todo el recipiente
Compresibilidad	Prácticamente nula	Muy pequeña	Grande

La tabla explica observaciones cotidianas. Un gas se comprime porque la mayor parte de su volumen es espacio vacío entre partículas; un líquido apenas, porque sus partículas ya están en contacto. Un perfume se huele en toda la habitación porque las partículas del gas se mueven y se mezclan con las del aire (**difusión**).

Temperatura y calor no son lo mismo

En el modelo, la **temperatura** mide la agitación media de las partículas. Para un gas ideal, la energía cinética media de traslación de cada partícula es proporcional a la temperatura absoluta: $\langle E_c \rangle = (3/2) k T$, donde $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ es la constante de Boltzmann, una de las siete constantes con valor exacto que definen el SI (**BIPM, folleto del SI, 9.ª ed., 2019**). A 300 K, $\langle E_c \rangle = 1,5 \times 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \times 300 \text{ K} = 6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$.

El **calor** no es algo que un cuerpo «tenga», sino energía que se **transfiere** de un cuerpo a otro porque están a distinta temperatura. Una bañera de agua tibia y una taza de café caliente: el café está a mayor temperatura (sus partículas se agitan más por término medio), pero la bañera puede ceder mucha más energía al enfriarse, porque tiene muchas más partículas. La unidad 5 vuelve sobre el calor como forma de transferir energía.

La escala absoluta de temperatura

Si la temperatura mide la agitación de las partículas, debe existir un límite inferior. La escala **Kelvin** (unidad SI: el kelvin, K) empieza en él, el **cero absoluto**, y la relación con la escala Celsius es exacta:

$$T (\text{K}) = t (^\circ\text{C}) + 273,15$$

Así, 0 °C son 273,15 K y 25 °C son 298,15 K. Una diferencia de temperatura vale lo mismo en las dos escalas: subir 10 °C es subir 10 K. En las leyes de los gases **siempre** se usa la temperatura absoluta: duplicar la temperatura de 10 °C a 20 °C no duplica nada, porque en kelvin se pasa de 283,15 K a 293,15 K.

ERRORES FRECUENTES

Lo que el modelo de partículas no dice

- **Las partículas no se dilatan ni se funden.** Al calentar un metal, sus átomos no crecen: vibran más y se separan algo más por término medio. Al fundirse el hielo, las moléculas de agua no se funden: dejan de estar fijas en la red. Las propiedades macroscópicas (dilatarse, fundirse, tener color) son del conjunto, no de cada partícula.
- **Entre las partículas de un gas no hay aire.** El aire es, él mismo, un gas formado por partículas; entre ellas solo hay vacío.
- **Temperatura no es calor.** Un cuerpo tiene temperatura; el calor es energía en tránsito entre cuerpos a distinta temperatura.

¿SABÍAS QUE...?

Las partículas que se podían contar: Einstein y Perrin

A comienzos del siglo XX todavía había científicos que consideraban los átomos una hipótesis útil, pero no una realidad. En 1905, Albert Einstein publicó en *Annalen der Physik* un análisis del movimiento desordenado de partículas pequeñas suspendidas en un líquido (el movimiento browniano): según el modelo cinético, ese temblor se debe a los choques de las moléculas del líquido, y su amplitud permite calcular cuántas moléculas hay en un mol. Jean Perrin hizo después las medidas experimentales. En 1926 recibió el Premio Nobel de Física «por su trabajo sobre la estructura discontinua de la materia...», en palabras de la Fundación Nobel. Tras sus medidas, la existencia de las partículas dejó de ser una hipótesis discutida.

Cambios de estado

Nombres y sentido de cada cambio

CAMBIO	DE ... A ...	¿ABSORBE O CEDE ENERGÍA?
Fusión	sólido → líquido	Absorbe
Solidificación	líquido → sólido	Cede
Vaporización (evaporación o ebullición)	líquido → gas	Absorbe
Condensación	gas → líquido	Cede
Sublimación	sólido → gas	Absorbe
Sublimación inversa (deposición)	gas → sólido	Cede

La **evaporación** ocurre solo en la superficie del líquido y a cualquier temperatura; la **ebullición** ocurre en todo el líquido, con formación de burbujas, y a una temperatura concreta que depende de la presión exterior. Por eso en una olla a presión el agua hierve por encima de 100 °C y en lo alto de una montaña hierve por debajo.

La curva de calentamiento: la meseta

Si se calienta hielo a ritmo constante y se registra la temperatura cada cierto tiempo, la gráfica temperatura-tiempo no es una recta. Mientras hay hielo y agua líquida a la vez, la temperatura **se mantiene constante** aunque se siga aportando energía: aparece una **meseta**. Lo mismo sucede durante la ebullición.

El modelo lo explica: durante el cambio de estado, la energía que llega no aumenta la agitación media de las partículas (que es lo que mide la temperatura), sino que se emplea en vencer parte de las atracciones entre ellas. La energía necesaria para cambiar de estado la unidad de masa de una sustancia es su **calor latente**. La temperatura a la que ocurre la meseta es una propiedad característica: sirve para identificar sustancias puras y para comprobar su pureza, porque una mezcla no funde a una temperatura fija, sino en un intervalo. La práctica de esta unidad obtiene así la temperatura de solidificación del ácido láurico.

CONCEPTO CLAVE

Cambio de estado

Proceso físico en el que una sustancia pasa de un estado de agregación a otro sin cambiar de identidad. En una sustancia pura, y a presión constante, ocurre a temperatura constante: la energía intercambiada modifica las atracciones entre partículas, no su agitación media.

Los gases y sus leyes

Presión, volumen y temperatura

Un gas encerrado empuja las paredes del recipiente porque sus partículas chocan continuamente con ellas. La **presión** es la fuerza perpendicular por unidad de superficie, $p = F/S$, y su unidad SI es el **pascal** ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). Otras unidades frecuentes son el bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, valor exacto) y la atmósfera ($1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$, valor exacto por definición).

El estado de una cantidad de gas queda descrito por cuatro magnitudes: presión p , volumen V , temperatura absoluta T y cantidad de sustancia n (en moles). Las leyes de los gases relacionan estas magnitudes dos a dos manteniendo constantes las demás:

- **Ley de Boyle** (n y T constantes): $p \cdot V = \text{constante}$. Si se reduce el volumen a la mitad, la presión se duplica: hay el doble de partículas por unidad de volumen y cada unidad de superficie de las paredes recibe el doble de choques por segundo.
- **Ley de Charles** (n y p constantes): $V / T = \text{constante}$. Un globo se hincha al calentarse.
- **Ley de Gay-Lussac** (n y V constantes): $p / T = \text{constante}$. Por eso un aerosol no debe calentarse: el envase es rígido y la presión crece con T .

La ecuación de los gases ideales

Las tres leyes, junto con el hecho de que a igual p y T el volumen es proporcional a la cantidad de gas, se reúnen en una sola ecuación:

$$pV = nRT$$

R es la **constante molar de los gases**. Su valor es exacto en el SI desde 2019, porque es el producto de dos constantes exactas ($R = N_A \cdot k$): $R = 8,314\,462\,618... \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (CODATA

2022, NIST). Con presiones en atmósferas y volúmenes en litros, $R = 0,082\,06\text{ atm L mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Las dos expresiones son el mismo número en unidades distintas; el error habitual es mezclarlas. Si se usa $R = 8,314\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$, la presión va en Pa y el volumen en m^3 , porque $1\text{ J} = 1\text{ Pa} \cdot \text{m}^3$.

Una consecuencia útil: un mol de cualquier gas ideal a $273,15\text{ K}$ y 100 kPa ocupa $22,71\text{ L}$ (CODATA). A $273,15\text{ K}$ y $101\,325\text{ Pa}$, el valor clásico es $22,41\text{ L}$. Los dos son correctos; cambian las condiciones.

Un gas real se comporta como ideal cuando sus partículas están muy separadas: presiones bajas y temperaturas alejadas de las de condensación. El aire de una habitación lo cumple muy bien; el gas de una bombona de 200 bar , peor.

PROCEDIMIENTO

Cómo resolver un problema de gases

- 1 Identifica el estado (o los estados) del gas y anota p , V , T y n con sus unidades. Marca lo que se mantiene constante.
- 2 Pasa la temperatura a kelvin: $T = t + 273,15$.
- 3 Si te dan la masa, calcula los moles: $n = m / M$, con la masa molar M a partir de las masas atómicas.
- 4 Elige R según las unidades: $8,314\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$ con Pa y m^3 , o $0,082\,06\text{ atm L mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$ con atm y L. Convierte los datos a esas unidades.
- 5 Despeja la incógnita en símbolos y comprueba las unidades antes de sustituir.
- 6 Redondea a las cifras significativas de los datos y valora si el resultado es razonable.

2.1

EJERCICIO RESUELTO

Presión de dióxido de carbono en un recipiente rígido

ENUNCIADO

Un recipiente rígido de 5,00 L contiene 12,0 g de dióxido de carbono (CO_2) a 20,0 °C. a) Calcula la presión del gas en pascuales y en atmósferas. b) El recipiente se deja al sol y el gas alcanza 60,0 °C. ¿Cuál es ahora la presión? Masas atómicas: C = 12,011; O = 15,999. $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Datos en el SI:** $V = 5,00 \text{ L} = 5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; $T_1 = 20,0 + 273,15 = 293,15 \text{ K}$; $T_2 = 60,0 + 273,15 = 333,15 \text{ K}$.
- Masa molar:** $M(\text{CO}_2) = 12,011 + 2 \times 15,999 = 44,009 \text{ g/mol}$.
- Cantidad de sustancia:** $n = m / M = 12,0 \text{ g} / 44,009 \text{ g mol}^{-1} = 0,2727 \text{ mol}$.
- Presión inicial:** $p_1 = n R T_1 / V = (0,2727 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 293,15 \text{ K}) / (5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 1,329 \times 10^5 \text{ Pa} \approx 1,33 \times 10^5 \text{ Pa}$.
- En atmósferas:** $p_1 = 1,329 \times 10^5 \text{ Pa} / 101\,325 \text{ Pa atm}^{-1} = 1,31 \text{ atm}$.
- Presión final:** n y V no cambian, así que p / T es constante (ley de Gay-Lussac): $p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1 = 1,329 \times 10^5 \text{ Pa} \times 333,15 \text{ K} / 293,15 \text{ K} = 1,51 \times 10^5 \text{ Pa} (1,49 \text{ atm})$.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $\text{mol} \cdot \text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot \text{K} / \text{m}^3 = \text{J/m}^3 = \text{N} \cdot \text{m/m}^3 = \text{N/m}^2 = \text{Pa}$. En el apartado b, K/K se cancela y la presión queda en Pa.

¿ES RAZONABLE?

La presión es del orden de la atmosférica, como corresponde a un cuarto de mol en cinco litros (un mol a 0 °C y 1 atm ocupa unos 22 L). Calentar de 20 °C a 60 °C no triplica la presión, aunque 60 sea el triple de 20: la temperatura absoluta solo aumenta un 14 % ($333,15 / 293,15 = 1,136$), y la presión aumenta en la misma proporción. A presiones tan bajas, el CO_2 se comporta casi como un gas ideal.

EJEMPLO REAL

Lago Nyos, 1986: un gas más denso que el aire

El 21 de agosto de 1986, el lago Nyos, en el noroeste de Camerún, liberó de forma súbita una enorme cantidad de gas que causó la muerte de al menos 1700 personas. El equipo que investigó la catástrofe concluyó que el gas era sobre todo dióxido de carbono de origen magmático, acumulado disuelto en las aguas profundas del lago, y que las víctimas murieron por asfixia, sin actividad volcánica directa. La ecuación de los gases explica por qué una nube de CO₂ tiende a quedarse a ras de suelo en lugar de dispersarse hacia arriba: la densidad de un gas es $\rho = pM/(RT)$. A 20 °C y 101 325 Pa, el CO₂ ($M = 44,0 \text{ g/mol}$) tiene una densidad de $1,83 \text{ kg/m}^3$, y el aire seco ($M = 28,96 \text{ g/mol}$, según la *U.S. Standard Atmosphere* de 1976), de $1,20 \text{ kg/m}^3$: el CO₂ es un 50 % más denso y desplaza al aire a ras de suelo. Es también un caso de riesgo geológico, el objeto de la unidad 7.

Fuente: [*Kling et al., Science 236 \(1987\) 169-175*](#)

Clasificación de los sistemas materiales**Sustancias puras y mezclas**

Un sistema material puede estar formado por una sola sustancia o por varias:

- Una **sustancia pura** tiene composición fija y propiedades características constantes (funde y hierve a temperaturas definidas). Puede ser un **elemento**, formado por una sola clase de átomos (oxígeno, O₂; hierro, Fe), o un **compuesto**, formado por átomos de distintos elementos unidos en una proporción fija (agua, H₂O; cloruro de sodio, NaCl). Un compuesto solo se descompone en sus elementos mediante una reacción química.
- Una **mezcla** está formada por dos o más sustancias que conservan sus propiedades y cuya proporción puede variar. Es **heterogénea** si se distinguen partes con propiedades distintas (granito, agua con arena) y **homogénea** o **disolución** si su composición y sus propiedades son iguales en cualquier punto (agua de mar filtrada, aire, bronce).

Entre unas y otras están los **coloides** (leche, niebla, gelatina): a simple vista parecen homogéneos, pero contienen partículas de tamaño intermedio que dispersan la luz, por lo que un haz de luz que los atraviesa se hace visible (efecto Tyndall).

Mezcla no es compuesto; disolver no es fundir

Una mezcla de hidrógeno y oxígeno y el agua contienen los mismos elementos, pero no son lo mismo. En la mezcla, cada gas conserva sus propiedades y la proporción puede ser cualquiera; en el agua, los átomos están unidos en proporción fija (dos de hidrógeno por cada uno de oxígeno) y las propiedades son otras: el agua no arde, mientras que la mezcla de los dos gases es explosiva.

Tampoco es lo mismo disolver que fundir. El azúcar que «desaparece» en el café no se ha fundido (el azúcar común, la sacarosa, funde hacia 186 °C y se descompone al hacerlo, según PubChem): sus moléculas se han separado y dispersado entre las del agua, a temperatura ambiente. La fusión es el cambio de estado de **una** sustancia; la disolución es la formación de una mezcla homogénea de **dos o más**.

CONCEPTO CLAVE

Disolución

Mezcla homogénea de dos o más sustancias. El componente que está en mayor proporción, o que conserva su estado, es el **disolvente**; los demás son **solutos**. Puede ser líquida (agua salada), gaseosa (aire) o sólida (aleaciones como el latón).

Separar los componentes de una mezcla

Como los componentes de una mezcla conservan sus propiedades, se pueden separar por **métodos físicos** que aprovechan sus diferencias:

MÉTODO	PROPIEDAD QUE APROVECHA	EJEMPLO
Filtración	Tamaño de partícula (sólido insoluble frente a líquido)	Arena y agua
Decantación	Densidad (líquidos inmiscibles o sólido que sedimenta)	Agua y aceite
Separación magnética	Magnetismo	Limaduras de hierro y azufre
Evaporación y cristalización	Volatilidad del disolvente	Sal disuelta en agua
Destilación	Diferente temperatura de ebullición	Separar el alcohol de una bebida fermentada
Cromatografía	Diferente afinidad por un soporte y un disolvente	Pigmentos de una tinta o de una hoja

La concentración de una disolución

La composición de una disolución se expresa con su **concentración**:

- **Masa por volumen** (g/L): masa de soluto / volumen de disolución.
- **Porcentaje en masa** (%): (masa de soluto / masa de disolución) × 100.
- **Concentración molar o molaridad** (mol/L): moles de soluto / volumen de disolución en litros.

Por ejemplo, una disolución con 9,0 g de cloruro de sodio por litro tiene una concentración de 9,0 g/L. Como $M(\text{NaCl}) = 22,990 + 35,45 = 58,44 \text{ g/mol}$, su molaridad es $9,0 \text{ g/L} \div 58,44 \text{ g/mol} = 0,15 \text{ mol/L}$. Disolver 10,0 g de azúcar en 190,0 g de agua da 200,0 g de disolución al 5,00 % en masa: la masa de disolución incluye la del soluto.

La concentración es el puente con la biología y la salud: las dosis de un medicamento, la salinidad del agua de mar que condiciona a los organismos que viven en ella o la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (unidad 8) se expresan con estas magnitudes o con otras equivalentes, como las partes por millón.

Glosario

- **Sistema material**: porción de materia que se aísla para estudiarla.

- **Propiedad característica:** propiedad que permite identificar una sustancia (densidad, temperatura de fusión o de ebullición).
- **Modelo cinético-molecular:** modelo según el cual la materia está formada por partículas en movimiento continuo, con atracciones entre ellas y vacío en medio.
- **Temperatura absoluta:** temperatura medida en kelvin desde el cero absoluto; $T\text{ (K)} = t\text{ (}^{\circ}\text{C)} + 273,15$.
- **Calor:** energía que se transfiere entre dos cuerpos a causa de su diferencia de temperatura.
- **Calor latente:** energía necesaria para que la unidad de masa de una sustancia cambie de estado, sin cambiar su temperatura.
- **Presión:** fuerza perpendicular por unidad de superficie; en el SI se mide en pascales (Pa).
- **Gas ideal:** modelo de gas cuyas partículas no ocupan volumen ni se atraen; lo cumplen bien los gases reales a presiones bajas.
- **Sustancia pura:** sistema de composición fija y propiedades características constantes; puede ser elemento o compuesto.
- **Mezcla:** sistema formado por varias sustancias que conservan sus propiedades, en proporción variable.
- **Disolución:** mezcla homogénea; consta de disolvente y uno o más solutos.
- **Concentración:** cantidad de soluto en una cantidad dada de disolución o de disolvente.

Para profundizar

- **Valores de las constantes físicas (CODATA 2022)** — *NIST*. Ficha de la constante molar de los gases y de la constante de Boltzmann, con su condición de valores exactos. physics.nist.gov
- **Masas atómicas estándar** — *Comisión de Abundancias Isotópicas y Pesos Atómicos (CIAAW) de la IUPAC*. Las masas atómicas que se usan para calcular masas molares. ciaaw.org
- **Estados de la materia** — *PhET, Universidad de Colorado*. Simulación en español del modelo de partículas: calentar, enfriar y comprimir sustancias y ver qué hacen sus partículas. phet.colorado.edu
- **Propiedades de los gases** — *PhET, Universidad de Colorado*. Simulación en español para comprobar las leyes de los gases variando p , V , T y n . phet.colorado.edu
- **Jean Perrin, conferencia Nobel (1926)** — *Fundación Nobel*. El propio Perrin explica sus pruebas experimentales de la existencia de las moléculas. nobelprize.org

Preguntas para reflexionar

1. Un anuncio de un agua embotellada dice que es «agua pura sin productos químicos». A partir de la clasificación de los sistemas materiales, ¿qué hay de correcto y qué de incorrecto en esa frase?
2. En el lago Nyos, la causa del desastre no fue un gas tóxico, sino un gas que forma parte del aire que respiramos. ¿Qué nos dice el caso sobre la idea de que una sustancia es «peligrosa» o «inofensiva» en sí misma, sin tener en cuenta la cantidad y las condiciones?
3. Si la temperatura mide la agitación media de las partículas, ¿qué sentido tiene decir que una prenda de lana «da calor»?

LO ESENCIAL

- La materia está formada por partículas en movimiento continuo, con atracciones entre ellas y vacío en medio; el equilibrio entre atracción y agitación decide el estado de agregación.
- Las propiedades macroscópicas son del conjunto: las partículas no se dilatan, no se funden ni tienen color.
- La temperatura mide la agitación media de las partículas; el calor es energía que se transfiere por una diferencia de temperatura.
- Durante un cambio de estado de una sustancia pura la temperatura se mantiene constante.
- Un gas ideal cumple $pV = nRT$ con T en kelvin; con $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, p en Pa y V en m^3 .
- Sustancia pura (elemento o compuesto) frente a mezcla (homogénea o heterogénea): las mezclas se separan por métodos físicos; los compuestos, solo por reacciones químicas.
- La concentración de una disolución se expresa en g/L, en porcentaje en masa o en mol/L.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. NIST (2024). CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2022. Constante molar de los gases. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r>
3. The Nobel Prize in Physics 1926: Jean Baptiste Perrin. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1926/summary/>
4. Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 322(8), 549-560. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
5. Kling, G. W., Clark, M. A., Compton, H. R., Devine, J. D., Evans, W. C., Humphrey, A. M., Koenigsberg, E. J., Lockwood, J. P., Tuttle, M. L. y Wagner, G. N. (1987). The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science*, 236(4798), 169-175. <https://doi.org/10.1126/science.236.4798.169>
6. NOAA, NASA y USAF (1976). *U.S. Standard Atmosphere, 1976*. NOAA-S/T 76-1562. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>

UNIDAD 3 · BLOQUE B

03

Estructura de la materia: átomo, tabla periódica, enlace y nomenclatura

La sal y el azúcar de la cocina parecen casi iguales: blancos, cristalinos, solubles en agua. Pero la sal funde a unos 800 °C y el azúcar se descompone antes de llegar a 190 °C, y el agua con sal conduce la corriente mientras que el agua con azúcar no. La diferencia no se ve: está en cómo se unen sus átomos.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

9 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

número atómico y número másico · isótopos y masa atómica media · modelos atómicos · configuración electrónica · tabla periódica y propiedades periódicas · enlace iónico, covalente y metálico

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Describir la estructura del átomo (núcleo, protones, neutrones y electrones) e interpretar el número atómico, el número másico y los isótopos (criterios 2.2 y 2.3).
- Calcular la masa atómica media de un elemento a partir de las masas y abundancias de sus isótopos, con datos de la IUPAC (criterio 2.3).
- Relacionar la configuración electrónica con la posición de un elemento en la tabla periódica y explicar las tendencias del radio atómico, la energía de ionización y la electronegatividad (criterios 2.2 y 2.3).
- Explicar las propiedades de las sustancias a partir de su tipo de enlace y de las fuerzas intermoleculares (criterios 2.2 y 2.3).
- Formular y nombrar compuestos binarios, hidróxidos y los oxoácidos y oxosales más comunes según las recomendaciones de la IUPAC de 2005 (criterio 2.3).
- Valorar el papel de las personas que construyeron el modelo atómico y la tabla periódica, y su importancia histórica y actual (criterio 5.2).

Duración: 9 sesiones · **Saberes:** B.3, B.4 · **Criterios:** 2.2, 2.3, 5.2 · **Requisitos previos:** unidad 2 (modelo de partículas, elemento y compuesto); no se presupone Física y Química de 1.º.

En la unidad 2 la materia se describió como un conjunto de partículas en movimiento, sin preguntar qué son esas partículas por dentro. Esta unidad abre la partícula. Un átomo tiene un núcleo diminuto con casi toda la masa y, alrededor, electrones cuya disposición decide cómo se comporta el elemento: con quién se une, cuántos enlaces forma y qué propiedades tendrán las sustancias que resulten. El recorrido tiene cuatro etapas. Primero, el átomo y sus isótopos, con el cálculo de la masa atómica que aparece en cualquier tabla periódica. Después, la propia tabla, que ordena los elementos de modo que los que se parecen quedan juntos. Luego, el enlace químico, que explica por qué la sal y el azúcar son tan distintos. Por último, la nomenclatura: el idioma común con el que la comunidad científica nombra los compuestos.

El átomo y sus partículas

Núcleo y corteza

Un átomo está formado por tres tipos de partículas:

PARTÍCULA	DÓNDE ESTÁ	CARGA ELÉCTRICA	MASA (CODATA 2022)
Protón	Núcleo	+e	$1,672\,62 \times 10^{-27}$ kg
Neutrón	Núcleo	0	$1,674\,93 \times 10^{-27}$ kg
Electrón	Corteza	-e	$9,109\,38 \times 10^{-31}$ kg

La carga elemental vale exactamente $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C, una de las constantes que definen el SI. El protón tiene unas 1836 veces la masa del electrón, así que casi toda la masa del átomo está en el núcleo. El núcleo es, a la vez, muchísimo más pequeño que el átomo: un átomo mide del orden de 10^{-10} m, y su núcleo, del orden de 10^{-15} a 10^{-14} m. Un átomo aislado es neutro: tiene tantos electrones como protones. Si gana electrones se convierte en un **anión** (ion negativo); si los pierde, en un **catión** (ion positivo). Los protones no cambian en ningún proceso químico.

Número atómico, número másico e isótopos

- El **número atómico**, Z, es el número de protones. Define el elemento: todo átomo con $Z = 6$ es carbono, y todo átomo de carbono tiene 6 protones.
- El **número másico**, A, es el número total de protones y neutrones. El número de neutrones es $N = A - Z$.

Un núclido se representa con el símbolo del elemento, el número másico arriba a la izquierda y, si se quiere, el atómico abajo: ^{12}C , ^{13}C y ^{14}C son tres núclidos del carbono, con 6, 7 y 8 neutrones. Átomos del mismo elemento con distinto número de neutrones son **isótopos**. Tienen el mismo comportamiento químico, porque este depende de los electrones, pero distinta masa; algunos, como el ^{14}C , son además radiactivos. Ejemplos: el ^{56}Fe tiene 26 protones, 30 neutrones y 26 electrones; el ion Fe^{3+} del mismo isótopo conserva los 26 protones y los 30 neutrones, pero tiene 23 electrones. El ion $^{35}\text{Cl}^-$ tiene 17 protones, 18 neutrones y 18 electrones.

Cómo se llegó al modelo actual

El modelo del átomo se construyó en pocas décadas y por partes, cada una respondiendo a un experimento que el modelo anterior no explicaba:

- J. J. Thomson (1897)** midió la relación entre la carga y la masa de los «rayos catódicos» y mostró que eran partículas mucho más ligeras que cualquier átomo: los electrones (*Philosophical Magazine*, 44, 293-316).

- **Ernest Rutherford (1911)** interpretó los experimentos de Hans Geiger y Ernest Marsden, en los que unas pocas partículas alfa lanzadas contra una lámina muy fina de oro salían desviadas con ángulos grandes, algunas incluso hacia atrás: la carga positiva y casi toda la masa debían estar concentradas en un núcleo muy pequeño (*Philosophical Magazine*, 21, 669-688).
- **Niels Bohr (1913)** propuso que los electrones solo pueden tener ciertas energías, lo que explicaba las rayas del espectro del hidrógeno: cada elemento emite y absorbe luz solo de colores concretos (*Philosophical Magazine*, 26, 1-25).
- **Erwin Schrödinger (1926)** formuló la ecuación de la mecánica cuántica que describe al electrón como una onda (*Annalen der Physik*, 384, 361-376). De ella sale el modelo actual: no se puede dar la trayectoria de un electrón, solo la probabilidad de encontrarlo en cada región del espacio.

ERRORES FRECUENTES

El átomo no es un sistema solar en miniatura

- **Los electrones no giran en órbitas como planetas.** Esa imagen corresponde a los primeros modelos (el de Bohr usaba órbitas circulares) y sigue en muchos logotipos, pero el modelo actual no asigna al electrón una trayectoria. Un **orbital** es una región del espacio donde la probabilidad de encontrar al electrón es alta, no un camino que recorre.
- **Un modelo no es una foto.** Los modelos de Thomson, Rutherford y Bohr no fueron «errores»: cada uno explicó lo que se sabía en su momento y se sustituyó cuando apareció una observación que no podía explicar. Así trabaja la ciencia (unidad 1).
- **Los isótopos no son átomos «defectuosos»** ni necesariamente radiactivos: ^{12}C y ^{13}C son estables y están en todos los seres vivos.

La masa atómica media

Las masas de los átomos se expresan en **unidades de masa atómica unificadas** (u), también llamadas daltons (Da): 1 u es la doceava parte de la masa de un átomo de ^{12}C aislado, en reposo y en su estado fundamental, y vale $1,660\,539\,068\,92 \times 10^{-27}$ kg (CODATA 2022). En esa escala, el protón y el neutrón tienen masas cercanas a 1 u (1,007 28 u y 1,008 66 u). La masa atómica que figura en la tabla periódica no es la de un átomo concreto, sino la **media ponderada** de las masas de los isótopos del elemento según su abundancia en la naturaleza. La **abundancia isotópica** es la fracción de átomos de un elemento que corresponden a cada isótopo (en cantidad de sustancia, no en masa):

$$A_r = \sum x_i \cdot A_r(\text{isótopo } i), \text{ con } \sum x_i = 1.$$

La responsable de estos datos es la **Comisión de Abundancias Isotópicas y Pesos Atómicos (CIAAW)** de la IUPAC, que revisa periódicamente las masas atómicas estándar.

3.1

EJERCICIO RESUELTO

Masa atómica media del cobre

ENUNCIADO

El cobre natural tiene dos isótopos estables. Según la CIAAW, el ^{63}Cu tiene una masa de 62,929 597 u y una abundancia de $0,6915 \pm 0,0015$ (fracción de átomos), y el ^{65}Cu , una masa de 64,927 790 u y una abundancia de $0,3085 \pm 0,0015$. a) Calcula la masa atómica media del cobre. b) Estima cuánto cambia el resultado si las abundancias varían dentro de su incertidumbre.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- 1. Comprobación de los datos:** las abundancias suman $0,6915 + 0,3085 = 1,0000$. No falta ningún isótopo.
- 2. Contribución de cada isótopo:** $0,6915 \times 62,929\,597 = 43,515\,816$; $0,3085 \times 64,927\,790 = 20,030\,223$.
- 3. Media ponderada:** $A_r(\text{Cu}) = 43,515\,816 + 20,030\,223 = 63,546\,04$.
- 4. Efecto de la incertidumbre:** si la abundancia del ^{65}Cu aumenta 0,0015, la del ^{63}Cu disminuye lo mismo, y la media cambia en $0,0015 \times (64,927\,790 - 62,929\,597) \text{ u} = 0,0030 \text{ u}$.
- 5. Resultado:** $A_r(\text{Cu}) = 63,546 \pm 0,003$. La masa molar del cobre es, por tanto, 63,546 g/mol.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: la abundancia es una fracción sin dimensiones, así que cada producto conserva la unidad u. La masa atómica relativa A_r es adimensional (se compara con 1/12 de la masa del ^{12}C); expresada en u o en g/mol tiene el mismo valor numérico.

¿ES RAZONABLE?

El resultado está entre 62,93 y 64,93, y más cerca de 63 porque el ^{63}Cu es más abundante. Coincide con el valor estándar de la CIAAW, 63,546(3), incluida la incertidumbre: la masa atómica del cobre no se conoce mejor porque su composición isotópica varía ligeramente de un mineral a otro.

Hay elementos cuya composición isotópica varía tanto de una muestra a otra que la CIAAW ya no da un único valor, sino un **intervalo**. El cloro (^{35}Cl y ^{37}Cl) es el ejemplo clásico: su masa atómica estándar se expresa como [35,446; 35,457], notación que la Comisión introdujo en 2009, y para el uso diario se recomienda el valor abreviado $35,45 \pm 0,01$. El hidrógeno, el

carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el azufre también tienen intervalo. Para los cálculos de este curso se usan los valores abreviados ($H = 1,0080$; $C = 12,011$; $O = 15,999$; $Cl = 35,45$).

La tabla periódica

La configuración electrónica

Los electrones de un átomo se distribuyen en **niveles de energía** ($n = 1, 2, 3, \dots$) y, dentro de cada nivel, en **subniveles** s, p, d y f, que admiten como máximo 2, 6, 10 y 14 electrones. Los subniveles se llenan en orden de energía creciente, que para los primeros elementos es $1s \rightarrow 2s \rightarrow 2p \rightarrow 3s \rightarrow 3p \rightarrow 4s \rightarrow 3d \rightarrow 4p \rightarrow 5s \rightarrow \dots$. Así, el sodio ($Z = 11$) tiene la configuración $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, y el cloro ($Z = 17$), $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$. Los electrones del último nivel ocupado son los **electrones de valencia**: el sodio tiene 1 y el cloro, 7. Son los que intervienen en las reacciones y en los enlaces.

Grupos, periodos y bloques

La tabla periódica actual ordena los 118 elementos conocidos por número atómico creciente en 7 filas (**periodos**) y 18 columnas (**grupos**). El periodo coincide con el último nivel ocupado; los elementos de un mismo grupo tienen la misma configuración de valencia y, por eso, propiedades químicas parecidas. Los grupos 1 y 2 forman el bloque s (y también el helio, $1s^2$, aunque se coloca en el grupo 18); del 13 al 18, el bloque p; del 3 al 12, el bloque d (metales de transición); lantánidos y actínidos, el bloque f. Algunos grupos tienen nombre propio: alcalinos (grupo 1), alcalinotérreos (2), halógenos (17) y gases nobles (18). Los gases nobles, con su capa de valencia completa ($ns^2 np^6$; el helio, $1s^2$), apenas forman compuestos. La mayoría de los elementos son **metales** (a la izquierda y en el centro de la tabla): brillantes, buenos conductores, tienden a perder electrones y formar cationes. Los **no metales** (arriba a la derecha) tienden a ganar o a compartir electrones. Entre ambos, los semimetales como el silicio, base de la electrónica.

Propiedades periódicas

La posición de un elemento permite predecir tendencias sin consultar ningún dato:

- **Radio atómico**: aumenta al bajar en un grupo (se añaden niveles) y disminuye al avanzar en un periodo (más protones atraen con más fuerza a electrones del mismo nivel).
- **Energía de ionización**, la energía necesaria para arrancar un electrón a un átomo aislado: sigue la tendencia contraria. Es baja en los alcalinos, que pierden su electrón con facilidad, y alta en los gases nobles.
- **Electronegatividad**, la tendencia de un átomo a atraer los electrones de un enlace: aumenta hacia arriba y hacia la derecha. El flúor es el elemento más electronegativo; el oxígeno, el segundo. La escala más usada la propuso Linus Pauling en 1932.

¿SABÍAS QUE...?

Mendeléiev y el hueco debajo del aluminio

En 1869 (el aniversario que la ONU conmemoró en 2019 con el Año Internacional de la Tabla Periódica) Dmitri Mendeléiev ordenó los elementos conocidos por su masa atómica y sus propiedades, y dejó huecos donde, según él, faltaban elementos por descubrir. Para el que iría debajo del aluminio predijo una masa atómica en torno a 68 y una densidad de $5,9 \text{ g/cm}^3$. En 1875 Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran detectó en París una raya violeta desconocida en el espectro de una muestra de zinc extraída de una blenda de los Pirineos, aisló el nuevo metal y lo llamó galio, sin saber que encajaba en aquel hueco (Royal Society of Chemistry, *Periodic Table*). Una tabla que acierta en lo que todavía nadie ha visto es la prueba más fuerte de que un modelo científico funciona.

¿SABÍAS QUE...?

Marguerite Perey, de ayudante a descubridora

El elemento 87 era uno de los huecos que seguían vacíos en el siglo XX. Lo encontró en 1939, en el Instituto Curie de París, Marguerite Perey, que había entrado diez años antes como ayudante de laboratorio de Marie Curie: purificó una muestra de actinio y dedujo que la radiactividad que quedaba solo podía deberse a un elemento nuevo, el francio. Después se doctoró, en 1946, y el 12 de marzo de 1962 fue la primera mujer elegida en la Academia de Ciencias de Francia, como miembro correspondiente (*correspondante*), no como académica de número (Encyclopædia Universalis; archivo del INA, 24 de marzo de 1962). Su trayectoria, de técnica a investigadora reconocida, muestra cuánto talento depende de que alguien tenga la oportunidad de formarse.

EJEMPLO REAL

2016: la tabla periódica completa su séptimo periodo

El 28 de noviembre de 2016 la IUPAC aprobó los nombres y símbolos de los elementos 113, 115, 117 y 118, descubiertos en laboratorios de Japón, Rusia y Estados Unidos. Con ellos quedó completo el séptimo periodo. Las terminaciones siguen la tabla: en inglés, «-ium» para los elementos de los grupos 1 a 16, «-ine» para el 117, del grupo de los halógenos, y «-on» para el 118, del de los gases nobles. Los nombres en español se fijaron el 1 de febrero de 2017 en una reunión de la Real Academia de Ciencias, la RAE, la Real Sociedad Española de Química y la Fundéu: nihonio (Nh), moscovio (Mc), teneso (Ts) y oganesón (Og) (*Anales de Química*, 2017). La tabla periódica no es un documento histórico cerrado: la IUPAC decide todavía hoy cómo se amplía y cómo se nombra.

Fuente: [IUPAC, 30 de noviembre de 2016](#)

El enlace químico

Por qué se unen los átomos

Dos átomos se enlazan cuando el conjunto unido tiene menos energía que los átomos separados. Una regla útil para predecir cómo lo hacen los elementos de los periodos 2 y 3 es la **regla del octeto**: muchos átomos tienden a ganar, perder o compartir electrones hasta quedar con ocho en la capa de valencia, como el gas noble más cercano (dos, en el caso del hidrógeno). Según cómo se resuelva el reparto de electrones, hay tres tipos de enlace.

Enlace iónico

Se forma entre un metal, que pierde electrones con facilidad, y un no metal, que los capta: hay una gran diferencia de electronegatividad. El sodio cede su electrón de valencia al cloro y quedan los iones Na^+ y Cl^- , que se atraen por fuerzas eléctricas. Esas fuerzas actúan en todas direcciones, así que cada ion se rodea de iones de signo contrario y se forma una **red cristalina**: en el cloruro de sodio, cada Na^+ tiene seis Cl^- alrededor y cada Cl^- , seis Na^+ . La fórmula NaCl no describe una molécula, sino la **proporción** entre iones en la red (1:1). En el cloruro de calcio, CaCl_2 , la proporción es 1:2 porque el ion calcio es Ca^{2+} . Propiedades típicas: temperaturas de fusión altas (el NaCl funde a $800,7^\circ\text{C}$ según PubChem), sólidos duros pero frágiles, solubles en agua en muchos casos y conductores de la corriente fundidos o disueltos, pero no en estado sólido, porque solo entonces los iones pueden desplazarse.

Enlace covalente

Se forma entre no metales, que comparten pares de electrones. En la molécula de hidrógeno, H_2 , los dos átomos comparten un par; en el agua, el oxígeno comparte un par con cada hidrógeno y le quedan dos pares sin compartir. Un enlace puede ser simple (un par), doble (dos pares, como los del CO_2 , $\text{O}=\text{C}=\text{O}$) o triple (tres, como en el N_2). La **estructura de Lewis** representa con puntos o rayas los electrones de valencia de cada átomo en la molécula. Si los dos átomos tienen distinta electronegatividad, el par compartido está más cerca del más electronegativo y el enlace es **polar**. Una molécula con enlaces polares puede ser polar en conjunto (el agua, que es angular) o apolar si su forma compensa los enlaces (el CO_2 , que es lineal). El enlace covalente da lugar a dos clases de sustancias muy distintas:

- **Sustancias moleculares** (agua, oxígeno, dióxido de carbono, azúcar): los enlaces dentro de cada molécula son fuertes, pero las moléculas se atraen entre sí débilmente. Funden y hierven a temperaturas bajas y no conducen la corriente.
- **Sólidos covalentes o redes covalentes** (diamante, cuarzo SiO_2): todos los átomos del cristal están unidos por enlaces covalentes. Son durísimos y funden a temperaturas muy altas. El grafito es una red covalente en láminas con electrones deslocalizados, y por eso conduce.

Enlace metálico

En un metal, los átomos ceden sus electrones de valencia a un conjunto común que se mueve con libertad entre los cationes de la red (el «mar de electrones»). Esos electrones móviles explican que los metales conduzcan bien la corriente y el calor, y que sean dúctiles y maleables: las capas de cationes pueden deslizarse sin que la red se rompa.

	IÓNICO	COVALENTE MOLECULAR	COVALENTE EN RED	METÁLICO
Entre	Metal y no metal	No metales	No metales y semimetales (C, Si, SiO_2 ...)	Metales

Partículas	Iones en red	Moléculas	Átomos en red	Cationes y electrones libres
Fusión	Alta	Baja	Muy alta	Variable, en general alta
Conducción	Fundido o disuelto	No	No (salvo grafito)	Sí, en sólido
Ejemplo	NaCl	H ₂ O, CO ₂	Diamante, SiO ₂	Cu, Fe

ERRORES FRECUENTES

Moléculas que no existen y reglas que no son leyes

- **No hay «moléculas de NaCl» en la sal.** Un cristal de sal es una red de iones Na⁺ y Cl⁻ sin parejas privilegiadas: cada ion está igual de unido a sus seis vecinos. La fórmula de un compuesto iónico indica una proporción, la llamada unidad fórmula.
- **La regla del octeto es una regla práctica, no una ley.** Funciona bien con C, N, O y los halógenos, pero tiene excepciones conocidas: el boro queda con seis electrones en el BF₃, el azufre comparte doce en el SF₆ y el NO tiene un número impar de electrones, así que no todos pueden estar emparejados. Los metales de transición la cumplen raramente. El criterio de fondo es energético: el enlace se forma si el conjunto queda más estable.
- **Los enlaces no se «rompen» al fundir una sustancia molecular.** Al fundir hielo se separan moléculas de agua, que siguen intactas; lo que se vence son las fuerzas entre moléculas.

Fuerzas intermoleculares y el puente con la biología

Entre las moléculas actúan **fuerzas intermoleculares**, mucho más débiles que un enlace pero decisivas para las propiedades. La más intensa es el **enlace de hidrógeno**: un átomo de H unido a uno muy electronegativo (F, O o N) es atraído por un par de electrones libre de otra molécula. Explica que el agua hierva a 100 °C, mientras que el sulfuro de hidrógeno, H₂S, de molécula parecida y más pesada, hierve en torno a -60 °C (PubChem): sin enlaces de hidrógeno entre sus moléculas, el agua sería un gas a temperatura ambiente.

Aquí está el puente con la **unidad 12 (Biomoléculas)**. Las biomoléculas son compuestos del carbono, un elemento que forma cuatro enlaces covalentes y puede encadenarse consigo mismo en cadenas y anillos estables. Esos enlaces covalentes forman el esqueleto de proteínas, glúcidos, lípidos y ácidos nucleicos; los enlaces de hidrógeno, más débiles y fáciles de romper y rehacer, mantienen la forma de las proteínas y unen las dos cadenas del ADN. Que el agua disuelva tantas sustancias iónicas y polares, el medio en que ocurre la química de la célula, se debe también a la polaridad de su molécula.

EJEMPLO REAL

Nature, 25 de abril de 1953: la doble hélice y los enlaces de hidrógeno

El mismo número de la revista *Nature* publicó el modelo de la doble hélice del ADN de James Watson y Francis Crick y los datos de difracción de rayos X de Rosalind Franklin y Raymond Gosling, compatibles con una estructura helicoidal. En el modelo, las dos cadenas se mantienen unidas porque cada base de una cadena forma enlaces de hidrógeno con una base de la otra. Es química de esta unidad (enlace covalente dentro de cada cadena, enlace de hidrógeno entre ellas) aplicada a la molécula que guarda la información genética, y también un caso en que el trabajo experimental de una científica fue imprescindible para un modelo que se conoce por otros nombres.

Fuente: [*Watson y Crick, Nature 171 \(1953\) 737-738*](#); [*Franklin y Gosling, Nature 171 \(1953\) 740-741*](#)

Formulación y nomenclatura inorgánica

Un idioma común: las recomendaciones de la IUPAC de 2005

Para que un mismo compuesto tenga el mismo nombre en cualquier laboratorio, la IUPAC publica recomendaciones de nomenclatura. Las vigentes para química inorgánica son las de 2005 (el «Libro Rojo»), con versión española de la propia IUPAC adaptada por Miguel A. Ciriano y Pascual Román Polo (2007). Es la referencia de la nomenclatura que se enseña en secundaria en España. Admite tres maneras de nombrar los compuestos binarios:

- **Nomenclatura de composición con prefijos multiplicadores** (mono-, di-, tri-, tetra-, penta-, hexa-, hepta-): indica cuántos átomos de cada elemento hay. Fe_2O_3 , trióxido de dihierro. El prefijo «mono» se omite salvo para evitar ambigüedades (CO , monóxido de carbono).
- **Con número de oxidación**, en números romanos y entre paréntesis tras el nombre del elemento que tiene más de uno: Fe_2O_3 , óxido de hierro(III). Si el elemento tiene un único número de oxidación, no se indica: Al_2O_3 , óxido de aluminio.
- **Con número de carga** del ion, en cifras arábicas con su signo: FeCl_3 , cloruro de hierro(3+).

Números de oxidación y reglas de formulación

El **número de oxidación** es la carga que tendría un átomo si todos sus enlaces fueran iónicos. Algunos valores fijos sirven de punto de partida: los metales alcalinos tienen +1; los alcalinotérreos, +2; el aluminio, +3; el oxígeno, -2 (salvo en los peróxidos, -1); el hidrógeno, +1 con no metales y -1 con metales; el flúor, siempre -1. En un compuesto neutro, la suma de los números de oxidación de todos los átomos es cero. En la fórmula de un compuesto binario se escribe primero el elemento que va antes en la secuencia de elementos de la IUPAC (tabla VI del Libro Rojo). Se parece al orden de electronegatividad, pero no coincide en dos casos que aparecen en este curso: el oxígeno va delante de los halógenos (OCl_2), y el hidrógeno va detrás de los elementos de los grupos 13 a 15 (BH_3 , CH_4 , NH_3) y delante de los de los grupos 16 y 17 (H_2O , H_2S , HCl). El compuesto se nombra al revés: primero el elemento que va detrás en la secuencia, terminado en «-uro» (o «óxido» si es el oxígeno), y después «de» y el otro elemento.

PROCEDIMIENTO**Cómo formular un compuesto binario a partir de su nombre**

- 1** Identifica los dos elementos y cuál va primero en la fórmula según la secuencia de elementos de la IUPAC: el metal, si lo hay; entre no metales, el que va antes en la secuencia (el oxígeno, delante de los halógenos: OCl_2 ; el hidrógeno, detrás del C y del N: CH_4 , NH_3 , y delante del O, el S y los halógenos: H_2O , HCl).
- 2** Si el nombre lleva prefijos, escribe directamente los subíndices: «dicloruro de calcio» $\rightarrow \text{CaCl}_2$.
- 3** Si lleva número de oxidación o de carga, asigna a cada elemento el suyo: hierro(III) $\rightarrow +3$; oxígeno en un óxido $\rightarrow -2$.
- 4** Busca los subíndices más pequeños que hagan cero la suma de cargas: el mínimo común múltiplo de 3 y 2 es 6, así que 2 Fe (+6) y 3 O (-6) $\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$.
- 5** Simplifica si es posible (no en los peróxidos, donde el grupo O_2^{2-} se mantiene) y comprueba que la suma de números de oxidación es cero.

Los tipos de compuestos de este curso

TIPO	EJEMPLO	NOMBRE CON PREFIJOS	NOMBRE CON NÚMERO DE OXIDACIÓN O NOMBRE ACEPTADO
Óxido metálico	Fe_2O_3	trióxido de dihierro	óxido de hierro(III)
Óxido no metálico	CO_2	dióxido de carbono	—
Oxígeno con halógeno	OCl_2	dicloruro de oxígeno	—
Peróxido	H_2O_2	dióxido de dihidrógeno	peróxido de hidrógeno
Hidruro metálico	NaH	hidruro de sodio	hidruro de sodio
Hidrógeno con halógeno o anfígeno (calcógeno)	HCl , H_2S	cloruro de hidrógeno, sulfuro de dihidrógeno	en disolución acuosa: ácido clorhídrico
Hidruros con nombre propio	H_2O , NH_3 , CH_4	—	agua, amoníaco, metano
Sal binaria	CuCl_2	dicloruro de cobre	cloruro de cobre(II)
Hidróxido	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	trihidróxido de hierro	hidróxido de hierro(III)
Oxoácido	H_2SO_4	—	ácido sulfúrico

Oxosal	CaCO_3	—	carbonato de calcio
--------	-----------------	---	---------------------

Tres detalles de las recomendaciones de 2005. Primero: el oxígeno se escribe antes que los halógenos en la fórmula, porque en el orden de elementos de la IUPAC va delante: el compuesto que antes se escribía Cl_2O es hoy OCl_2 , dicloruro de oxígeno. Segundo: en los oxoácidos y oxosales comunes (ácido sulfúrico, ácido nítrico, sulfatos, nitratos, carbonatos) la IUPAC sigue aceptando los nombres tradicionales, que son los que se usan en la práctica. Tercero: nombres como «óxido férrico» o «cloruro ferroso», en los que las terminaciones «-ico» y «-oso» indicaban el número de oxidación mayor o menor del metal, aparecen todavía en etiquetas y textos antiguos. Las recomendaciones de 2005 los declaran expresamente no aceptables (tabla III del Libro Rojo), así que no se usan en este curso.

3.2

EJERCICIO RESUELTO

Formular y nombrar: un mineral de hierro y una sal de cobre

ENUNCIADO

a) Formula el óxido de hierro(III), componente principal del mineral hematites, y da su nombre con prefijos multiplicadores. b) Calcula su masa molar y el porcentaje en masa de hierro. c) Nombra CuCl_2 de dos maneras. Masas atómicas (IUPAC): Fe = 55,845; O = 15,999; Cu = 63,546; Cl = 35,45.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Números de oxidación:** hierro(III) $\rightarrow +3$; oxígeno en un óxido $\rightarrow -2$.
- Neutralidad:** el mínimo común múltiplo de 3 y 2 es 6. Dos átomos de Fe aportan +6 y tres de O, -6: **Fe_2O_3** . Comprobación: $2(+3) + 3(-2) = 0$.
- Nombre con prefijos:** dos hierros y tres oxígenos $\rightarrow$ **trióxido de dihierro**.
- Masa molar:** $M(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2 \times 55,845 + 3 \times 15,999 = 111,690 + 47,997 = 159,687 \text{ g/mol} \approx 159,69 \text{ g/mol}$.
- Porcentaje de hierro:** $111,690 / 159,687 \times 100 = 69,94 \%$.
- CuCl_2 :** el cloro en un cloruro tiene -1; para que la suma sea cero, el cobre tiene +2.
Nombres: **cloruro de cobre(II)** y **dicloruro de cobre** (también cloruro de cobre(2+)).

ANÁLISIS DE UNIDADES

: (g/mol) / (g/mol) se cancela; el porcentaje en masa es adimensional y, por ser una proporción, vale para cualquier cantidad de óxido.

¿ES RAZONABLE?

Casi el 70 % de la masa del óxido es hierro: el hierro pesa más que el oxígeno (55,8 frente a 16,0), aunque haya menos átomos de hierro. Por eso la hematites es una mena de hierro tan apreciada. El nombre «óxido férrico» describiría la misma sustancia, pero ya no es un nombre aceptado.

Glosario

- Número atómico (Z):** número de protones del núcleo; identifica el elemento.
- Número másico (A):** número total de protones y neutrones del núcleo.
- Isótopos:** átomos de un mismo elemento con distinto número de neutrones.

- **Masa atómica media:** media de las masas de los isótopos de un elemento ponderada por su abundancia natural.
- **Orbital:** región del espacio en la que es alta la probabilidad de encontrar un electrón.
- **Configuración electrónica:** distribución de los electrones de un átomo en niveles y subniveles.
- **Electrones de valencia:** electrones del último nivel ocupado; son los que intervienen en los enlaces.
- **Electronegatividad:** tendencia de un átomo a atraer los electrones de un enlace.
- **Enlace iónico:** unión por atracción eléctrica entre iones de signo contrario, que forman una red cristalina.
- **Enlace covalente:** unión entre átomos que comparten uno o más pares de electrones.
- **Enlace de hidrógeno:** atracción entre un H unido a F, O o N y un par de electrones libre de otra molécula.
- **Número de oxidación:** carga que tendría un átomo si todos sus enlaces fueran iónicos.

Para profundizar

- **Masas atómicas estándar e isótopos de cada elemento** — CIAAW, IUPAC. Tablas oficiales, con la explicación de la notación en intervalos y la historia de cada valor. ciaaw.org
- **Nomenclature of Inorganic Chemistry. IUPAC Recommendations 2005** — IUPAC. El texto completo del Libro Rojo, en acceso abierto. iupac.org
- **Isótopos y masa atómica** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español para construir isótopos y ver cómo cambia la masa atómica media con las abundancias. phet.colorado.edu
- **Construye un átomo** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español para añadir protones, neutrones y electrones y ver qué elemento, isótopo o ion resulta. phet.colorado.edu

Preguntas para reflexionar

1. Mendeléiev predijo elementos que nadie había visto, y Marguerite Perey encontró uno de ellos tras empezar como ayudante de laboratorio. ¿Qué dice esto sobre cómo avanza la ciencia y sobre quién puede hacerla?
2. Algunas etiquetas de cosméticos y alimentos presumen de no contener «químicos» y, en la misma etiqueta, enumeran cloruro de sodio, agua o ácido cítrico. ¿Qué papel cumple una nomenclatura común para que el consumidor pueda informarse y no ser engañado?
3. La CIAAW da la masa atómica del cloro como un intervalo y no como un número. ¿Es eso una debilidad de la ciencia o una muestra de honestidad sobre lo que se sabe?

LO ESENCIAL

- El átomo tiene un núcleo diminuto con protones y neutrones, que concentra casi toda la masa, y una corteza de electrones; Z identifica el elemento y A – Z da los neutrones. Los electrones no siguen órbitas como planetas: el modelo actual describe orbitales, regiones de probabilidad.
- La masa atómica de la tabla es la media de las masas de los isótopos ponderada por su abundancia; la CIAAW da algunos valores como intervalo porque la composición isotópica varía en la naturaleza.
- La configuración de valencia decide el grupo y las propiedades químicas; el radio disminuye y la electronegatividad aumenta hacia la derecha de cada periodo.
- Enlace iónico (red de iones, sin moléculas), covalente (moléculas o redes) y metálico (electrones libres) explican la fusión, la dureza y la conducción; la regla del octeto es una guía con excepciones, no una ley.
- Los enlaces covalentes y de hidrógeno sostienen las biomoléculas: es el puente con la unidad 12.
- La nomenclatura IUPAC 2005 admite nombres con prefijos, con número de oxidación y con número de carga; «-ico» y «-oso» ya no se aceptan para los compuestos binarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Prohaska, T., Irrgeher, J., Benefield, J., Böhlke, J. K., Chesson, L. A., Coplen, T. B. et al. (2022). Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 94(5), 573-600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>
3. Connelly, N. G., Damhus, T., Hartshorn, R. M. y Hutton, A. T. (eds.) (2005). *Nomenclature of Inorganic Chemistry. IUPAC Recommendations 2005*. Cambridge: RSC Publishing. <https://iupac.org/what-we-do/books/redbook/>
4. IUPAC (2007). *Nomenclatura de Química Inorgánica. Recomendaciones de la IUPAC de 2005*. Versión española de M. A. Ciriano y P. Román Polo. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-7733-905-2.
5. Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, 21(125), 669-688. <https://doi.org/10.1080/14786440508637080>
6. Franklin, R. E. y Gosling, R. G. (1953). Molecular configuration in sodium thymonucleate. *Nature*, 171(4356), 740-741. <https://doi.org/10.1038/171740a0>

UNIDAD 4 · BLOQUE B

04

Reacciones químicas: leyes, estequiometría y química en la sociedad

Una bombona de butano de 12,5 kg se vacía en la cocina y, al quemarse, deja en el aire unos 38 kg de dióxido de carbono. No es un error de cuentas: el gas que sale pesa el triple que el que entra, porque se lleva consigo el oxígeno del aire. Saber cuánto se forma y cuánto se gasta en una reacción es lo que permite fabricar abonos, diseñar un motor o medir lo que emitimos.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

9 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

cambio físico y cambio químico · ley de conservación de la masa · ley de las proporciones definidas · ecuación química y ajuste · cantidad de sustancia, mol y masa molar · estequiometría

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Distinguir un cambio físico de uno químico e interpretar una reacción como una reorganización de átomos con el modelo de partículas (criterio 2.3).
- Explicar las leyes de conservación de la masa y de las proporciones definidas, y aplicarlas también a reacciones en las que intervienen gases (criterio 2.3).
- Ajustar ecuaciones químicas sin modificar las fórmulas y relacionar los coeficientes con cantidades de sustancia (criterios 2.3 y 4.1).
- Resolver problemas de estequiometría con masas, volúmenes de gases, reactivo limitante y rendimiento, con análisis de unidades y cifras significativas (criterio 4.1).
- Analizar críticamente un resultado estequiométrico, como un rendimiento superior al 100 %, y revisar el procedimiento o las conclusiones (criterio 4.2).
- Reconocer la importancia de las reacciones químicas en procesos industriales y ambientales reales, como la síntesis del amoníaco o la destrucción del ozono estratosférico (criterio 2.3).

Duración: 9 sesiones · **Saberes:** B.5 · **Criterios:** 2.3, 4.1, 4.2 · **Requisitos previos:** unidad 2 (modelo de partículas, $pV = nRT$) y unidad 3 (fórmulas y masas atómicas); no se presupone Física y Química de 1.º.

En la unidad 3 se vio de qué están hechas las sustancias y cómo se nombran. Esta unidad trata de cómo se transforman unas en otras. Una reacción química no crea ni destruye átomos: los separa de unas sustancias y los recombina en otras. De esa idea tan simple salen dos consecuencias muy útiles. La primera es que la masa se conserva, siempre que se cuenten todas las sustancias, también los gases que no se ven. La segunda es que las cantidades que reaccionan guardan proporciones fijas, que se pueden calcular de antemano. A ese cálculo se le llama **estequiometría**, y es la base de cualquier proceso químico, desde una práctica de instituto hasta una planta de fertilizantes. La unidad termina con dos casos reales en los que la química ha cambiado la vida de miles de millones de personas: la síntesis del amoníaco y la capa de ozono.

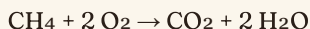
Qué ocurre en una reacción química

Cambio físico y cambio químico

En un **cambio físico** las sustancias siguen siendo las mismas: el hielo que se funde sigue siendo agua y la sal disuelta se recupera evaporando el agua. En un **cambio químico** o **reacción química**, unas sustancias (los **reactivos**) desaparecen y aparecen otras nuevas (los **productos**), con propiedades distintas. Algunos indicios de que ha habido reacción son la formación de un gas o de un sólido (precipitado) al mezclar dos disoluciones, un cambio de color o un desprendimiento o absorción de energía. Ninguno es una prueba definitiva por sí solo: el agua que hierve también desprende gas, y es un cambio físico. La prueba es que se forma una sustancia nueva.

El modelo de partículas: átomos que cambian de pareja

Con el modelo de partículas de la unidad 2, una reacción es una **reorganización de átomos**. Cuando el metano arde, sus moléculas chocan con las de oxígeno; se rompen los enlaces C-H y O=O y se forman enlaces nuevos C=O y O-H. Al final hay moléculas de dióxido de carbono y de agua, pero los átomos son los mismos que había al principio, en el mismo número y del mismo tipo:



Para que dos moléculas reaccionen tienen que chocar con energía suficiente y con la orientación adecuada (**teoría de colisiones**). Eso explica qué hace más rápida una reacción: subir la temperatura (choques más frecuentes y más energéticos), aumentar la concentración de los reactivos (más choques), dividir un sólido en trozos pequeños (más superficie de contacto) o añadir un **catalizador**, una sustancia que hace la reacción más rápida sin consumirse en ella. Los catalizadores aparecen dos veces en esta unidad: uno que la humanidad ha aprovechado (el hierro en la síntesis del amoníaco) y otro que ha causado un problema global (el cloro en la estratosfera).

Reacciones y energía

Toda reacción va acompañada de un intercambio de energía con el entorno, porque romper enlaces cuesta energía y formarlos la libera. Si el balance es una salida de energía, la reacción es **exotérmica** (las combustiones, que se aprovechan para calentar y mover motores); si es una entrada, **endotérmica** (la descomposición de la caliza en un horno de cal, $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, que necesita calentarse continuamente). El cálculo de esa energía y del consumo energético se trata en la **unidad 5**.

Las leyes de las reacciones químicas

La conservación de la masa

En un sistema cerrado, la masa total de los productos es igual a la masa total de los reactivos. Antoine-Laurent de Lavoisier convirtió esa idea en el principio de trabajo de la química al pesar con cuidado reactivos y productos en recipientes cerrados, y la formuló en su *Traité élémentaire de chimie* (1789). Desde el modelo de partículas es inmediata: si los átomos no se crean ni se destruyen, y cada átomo conserva su masa, la masa total no puede cambiar.

La ley parece fallar cuando en la reacción entra o sale un gas en un recipiente abierto, y por eso costó tanto establecerla:

- Una cinta de magnesio que arde se convierte en un polvo blanco, óxido de magnesio, que **pesa más** que la cinta: $2 \text{ Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ MgO}$. El oxígeno del aire queda incorporado al producto.
- Un trozo de madera que arde deja unas cenizas que **pesan menos**: el dióxido de carbono y el vapor de agua formados escapan al aire.

En ambos casos la masa se conserva si se pesan también los gases. Lavoisier insistió en hacer las reacciones en recipientes cerrados justamente por eso.

ERRORES FRECUENTES

Los gases también tienen masa

- «**Al quemarse, la materia desaparece**». No desaparece: se convierte en gases que no se ven. Un litro de gasolina que se quema no deja casi nada en el depósito, pero sale del tubo de escape una masa de dióxido de carbono y agua mayor que la del combustible, porque incluye el oxígeno del aire.
- «**Si se desprende un gas, la masa disminuye**». Disminuye la masa de lo que queda en un recipiente abierto. En un recipiente cerrado la balanza marca lo mismo antes y después (lo comprobaréis en la práctica de esta unidad).
- «**Los gases no pesan porque flotan**». Un gas tiene masa como cualquier sustancia; que un globo suba o baje depende de si el gas de dentro es menos o más denso que el aire que lo rodea, no de que el gas carezca de masa. Ya se vio en la unidad 2 que el aire de un aula tiene una masa de más de cien kilos.

Las proporciones definidas

Un compuesto puro tiene siempre la misma composición, sea cual sea su origen o el método con que se haya preparado: el agua tiene un 11,19 % de hidrógeno en masa, tanto si procede de un glaciar como si se forma en una pila de combustible. Es la **ley de las proporciones definidas**, que defendió Joseph-Louis Proust, químico francés que a finales del siglo XVIII dirigió en Segovia el Real Laboratorio de Química (UCM, *El Real Laboratorio de Química dirigido por Luis Proust*). Desde el modelo de partículas se explica también de forma inmediata: si el agua está formada por moléculas H_2O , la proporción entre hidrógeno y oxígeno es la misma en todas ellas. La comprobación numérica: $2 \times 1,0080 / 18,015 = 0,1119$.

Los volúmenes de los gases

En 1808 Joseph-Louis Gay-Lussac observó que, cuando reaccionan gases medidos a la misma presión y temperatura, sus volúmenes guardan relaciones de números enteros sencillos: dos volúmenes de hidrógeno con uno de oxígeno dan dos de vapor de agua. Amedeo Avogadro lo explicó en 1811 con una hipótesis que hoy es una consecuencia de la ecuación de los gases

ideales de la unidad 2: **volúmenes iguales de gases distintos, a la misma presión y temperatura, contienen el mismo número de moléculas**. En efecto, de $pV = nRT$, si p , V y T son iguales, n también lo es.

¿SABÍAS QUE...?

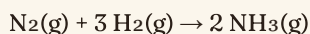
Marie-Anne Paulze Lavoisier, la mitad del laboratorio

La ley de conservación de la masa se asocia a un solo nombre, pero el laboratorio de Lavoisier funcionaba en pareja. Marie-Anne Paulze aprendió inglés para traducir obras de química que su marido no leía con soltura, entre ellas el *Essay on Phlogiston* de Richard Kirwan (1788), una defensa del flogisto, la teoría que Lavoisier quería desmontar; la traducción salió con notas críticas. Además dibujó los instrumentos del laboratorio: las trece láminas del *Traité élémentaire de chimie* de 1789 van firmadas «Paulze Lavoisier sculpsit», y sus acuarelas preparatorias se conservan en la Universidad Cornell (*American Scientist*, «Mme. Lavoisier», 2002). Sin esas láminas, otros químicos no habrían podido reproducir los experimentos con los que se estableció la ley.

La ecuación química y su ajuste

Qué dice una ecuación química

Una **ecuación química** escribe los reactivos a la izquierda y los productos a la derecha de una flecha, cada uno con su fórmula y, si se quiere, su estado: (s) sólido, (l) líquido, (g) gas, (aq) en disolución acuosa. Los números delante de las fórmulas son los **coeficientes estequiométricos**. En



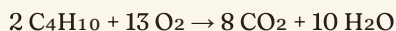
la ecuación dice que una molécula de nitrógeno reacciona con tres de hidrógeno para dar dos de amoníaco, y también, multiplicando todo por el mismo número enorme, que **1 mol** de N_2 reacciona con **3 mol** de H_2 para dar **2 mol** de NH_3 . Los coeficientes son proporciones entre cantidades de sustancia, no entre masas.

Una ecuación está **ajustada** cuando hay el mismo número de átomos de cada elemento a los dos lados de la flecha (y, si hay iones, la misma carga total). Ajustar es imponer la conservación de los átomos y, con ella, la de la masa.

PROCEDIMIENTO**Cómo ajustar una ecuación química por tanteo**

- 1 Escribe las fórmulas correctas de reactivos y productos. A partir de aquí no se tocan: solo se añaden coeficientes delante.
- 2 Empieza por el elemento que aparezca en menos sustancias, dejando para el final el hidrógeno y el oxígeno si están en varias, y los elementos que aparecen solos (como el O₂).
- 3 Ajusta un elemento cada vez poniendo coeficientes; vuelve a contar los demás después de cada cambio.
- 4 Si para ajustar un elemento que va solo necesitas una fracción (13/2 O₂), multiplica toda la ecuación por el denominador para quedarte con números enteros.
- 5 Comprueba elemento por elemento y asegúrate de que los coeficientes son los enteros más pequeños posibles.

Ejemplo, la combustión del butano: $\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. El carbono pide 4 CO₂; el hidrógeno, 5 H₂O. A la derecha hay entonces $4 \times 2 + 5 = 13$ átomos de O, así que hacen falta 13/2 O₂. Multiplicando por 2:



Comprobación: C, 8 = 8; H, 20 = 20; O, 26 = 16 + 10.

Coeficientes y subíndices: no son intercambiables

El **subíndice** forma parte de la fórmula e indica cuántos átomos hay en una molécula o unidad fórmula; el **coeficiente** indica cuántas moléculas o unidades fórmula intervienen. Al ajustar $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ falta un oxígeno a la derecha. La tentación es escribir H₂O₂, que tiene los oxígenos que faltan, pero entonces la ecuación ya no describe la formación de agua sino la de peróxido de hidrógeno, otra sustancia con otras propiedades (unidad 3). El ajuste correcto cambia coeficientes: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$.

Cantidad de sustancia y estequiometría**El mol, la masa molar y el volumen molar**

Los átomos son tan pequeños que se cuentan por paquetes. La unidad de **cantidad de sustancia** del SI es el **mol**: desde 2019 se define fijando el valor exacto de la **constante de Avogadro**, $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (BIPM, *El Sistema Internacional de Unidades*, 9.^a ed.). Un mol de cualquier sustancia contiene $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entidades (átomos, moléculas, iones o unidades fórmula, según se especifique).

La **masa molar**, M , es la masa de un mol. Su valor en g/mol coincide con la masa relativa de la fórmula, que se obtiene sumando las masas atómicas de la unidad 3: $M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 1,0080 + 15,999 = 18,015 \text{ g/mol}$. Las relaciones que se usan en todos los problemas son:

- $n = m / M$ (cantidad de sustancia a partir de la masa).

- $N = n \cdot N_A$ (número de entidades).
- Para un gas ideal, $n = pV / (RT)$ (unidad 2). A 0 °C y 100 kPa, un mol de cualquier gas ideal ocupa $V = RT/p = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 273,15 \text{ K} / 100\,000 \text{ Pa} = 0,022\,71 \text{ m}^3 = 22,71 \text{ L}$; a 0 °C y 101,325 kPa, 22,41 L. Este **volumen molar** no hace falta memorizarlo: se calcula con $pV = nRT$ en las condiciones de cada problema.

El método estequiométrico

Las masas no se pueden comparar directamente porque cada sustancia tiene su masa molar; las cantidades de sustancia sí, porque son proporcionales a los coeficientes. Todo cálculo estequiométrico sigue tres pasos: **masa (o volumen) del dato** → **mol del dato** → **mol de la incógnita (con los coeficientes)** → **masa (o volumen) de la incógnita**.

4.1

EJERCICIO RESUELTO

Cuánto CO₂ emite un metro cúbico de gas natural

ENUNCIADO

El gas natural es casi todo metano. Una caldera quema 1,00 m³ de metano medido a 15 °C y 101,325 kPa. a) ¿Qué masa de metano se quema? b) ¿Qué masa de CO₂ se forma? c) Comprueba que se conserva la masa. Datos: $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; masas atómicas (CIAAW): H = 1,0080; C = 12,011; O = 15,999.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Ecuación ajustada:** $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Masas molares: $M(\text{CH}_4) = 16,043 \text{ g/mol}$; $M(\text{O}_2) = 31,998 \text{ g/mol}$; $M(\text{CO}_2) = 44,009 \text{ g/mol}$; $M(\text{H}_2\text{O}) = 18,015 \text{ g/mol}$.
- Cantidad de metano** (gas ideal, $T = 288,15 \text{ K}$): $n = pV/(RT) = 101\,325 \text{ Pa} \times 1,00 \text{ m}^3 / (8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 288,15 \text{ K}) = 42,29 \text{ mol}$.
- Masa de metano:** $m = n M = 42,29 \text{ mol} \times 16,043 \text{ g/mol} = 678,5 \text{ g} \approx 0,679 \text{ kg}$.
- Proporción:** 1 mol de CH₄ da 1 mol de CO₂, así que $n(\text{CO}_2) = 42,29 \text{ mol}$, y $m(\text{CO}_2) = 42,29 \text{ mol} \times 44,009 \text{ g/mol} = 1861 \text{ g} \approx 1,86 \text{ kg}$.
- Conservación de la masa:** se consumen $2 \times 42,29 = 84,58 \text{ mol}$ de O₂ (2706,7 g) y se forman 84,58 mol de H₂O (1523,9 g). Reactivos: $678,5 + 2706,7 = 3385,2 \text{ g}$. Productos: $1861,4 + 1523,9 = 3385,3 \text{ g}$. La diferencia de 0,1 g se debe solo al redondeo: sin redondear, los dos lados suman 3385,24 g.

Análisis de unidades: $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 = (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$, y $\text{J} / (\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot \text{K}) = \text{mol}$. Después, $\text{mol} \times \text{g/mol} = \text{g}$. Los datos tienen tres cifras significativas, así que el resultado es **1,86 kg de CO₂**.

¿ES RAZONABLE?

El CO₂ que sale pesa casi el triple que el metano que entra, porque cada molécula de CO₂ lleva dos átomos de oxígeno tomados del aire. No es una paradoja, sino la ley de conservación de la masa aplicada a todas las sustancias, incluidas las que no se ven.

Reactivo limitante y rendimiento

Si los reactivos no están en la proporción de la ecuación, uno se acaba antes: es el **reactivo limitante**, y decide cuánto producto se forma. El otro queda en parte sin reaccionar: es el **reactivo en exceso**. Para identificarlos se calcula cuánto haría falta de uno para consumir todo el otro, y se compara con lo que hay.

En la práctica casi nunca se obtiene todo el producto que predice la ecuación: hay reacciones que no se completan, reacciones secundarias y pérdidas al filtrar o trasvasar. El **rendimiento** compara lo obtenido con lo teórico:

$\text{rendimiento (\%)} = \text{masa real de producto} / \text{masa teórica de producto} \times 100$

Un rendimiento mayor del 100 % no es un éxito, sino la señal de un error: el producto está húmedo, lleva impurezas o se ha pesado mal.

ERRORES FRECUENTES

El reactivo limitante no es el que menos pesa

- **«El limitante es el reactivo del que hay menos masa».** Falso. Hay que comparar cantidades de sustancia y, además, tener en cuenta los coeficientes. En la síntesis del amoníaco del ejercicio 4.2, hay cinco veces más masa de nitrógeno que de hidrógeno y, aun así, el limitante es el hidrógeno.
- **«El limitante es el reactivo del que hay menos moles».** Tampoco siempre. Si la ecuación pide 3 mol de H₂ por cada mol de N₂, 2 mol de N₂ con 5 mol de H₂ tienen al H₂ como limitante, aunque haya más moles de H₂.
- **«Los coeficientes indican las masas que reaccionan».** Indican proporciones entre moles (y entre volúmenes de gases a igual p y T), nunca entre masas.

4.2

EJERCICIO RESUELTO

Reactivo limitante y rendimiento en la síntesis del amoníaco

ENUNCIADO

En un reactor de síntesis de amoníaco se introducen 1,00 t de nitrógeno y 0,200 t de hidrógeno. a) ¿Cuál es el reactivo limitante? b) ¿Qué masa de amoníaco se podría obtener como máximo? c) ¿Qué masa del reactivo en exceso sobra? d) Si en el conjunto del proceso se recogen 1,05 t de amoníaco, ¿cuál es el rendimiento? Masas atómicas (CIAAW): H = 1,0080; N = 14,007.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Ecuación ajustada:** $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$. Masas molares: $M(\text{N}_2) = 28,014 \text{ g/mol}$; $M(\text{H}_2) = 2,016 \text{ g/mol}$; $M(\text{NH}_3) = 17,031 \text{ g/mol}$.
- Cantidades:** $n(\text{N}_2) = 1,00 \times 10^6 \text{ g} / 28,014 \text{ g/mol} = 3,570 \times 10^4 \text{ mol}$; $n(\text{H}_2) = 2,00 \times 10^5 \text{ g} / 2,016 \text{ g/mol} = 9,921 \times 10^4 \text{ mol}$.
- Limitante:** para consumir todo el N_2 harían falta $3 \times 3,570 \times 10^4 = 1,071 \times 10^5 \text{ mol}$ de H_2 , y solo hay $9,921 \times 10^4 \text{ mol}$. **El limitante es el hidrógeno**, aunque su masa sea la quinta parte.
- Amoníaco teórico:** $n(\text{NH}_3) = (2/3) \times 9,921 \times 10^4 \text{ mol} = 6,614 \times 10^4 \text{ mol}$; $m = 6,614 \times 10^4 \text{ mol} \times 17,031 \text{ g/mol} = 1,126 \times 10^6 \text{ g} = \mathbf{1,13 \text{ t}}$.
- Nitrógeno en exceso:** reaccionan $(1/3) \times 9,921 \times 10^4 \text{ mol} = 3,307 \times 10^4 \text{ mol}$ de N_2 , es decir, 0,926 t. Sobran $1,00 - 0,926 = \mathbf{0,074 \text{ t}}$ de N_2 .
- Rendimiento:** $1,05 \text{ t} / 1,126 \text{ t} \times 100 = \mathbf{93,2 \%}$.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: t $\rightarrow$ g ($\times 10^6$) antes de dividir entre g/mol; mol $\times$ g/mol = g; en el rendimiento, t / t se cancela.

¿ES RAZONABLE?

Conservación de la masa: 1,126 t de NH_3 + 0,074 t de N_2 sobrante = 1,200 t, lo mismo que entró. El rendimiento es menor que el 100 %, como debe ser. (El 93,2 % es un dato del ejercicio, no el de una planta concreta.)

La química en la sociedad

Pan a partir del aire: la síntesis del amoniaco

Las plantas necesitan nitrógeno para fabricar proteínas y ácidos nucleicos, y aunque el aire tiene un 78 % de N_2 en volumen, casi ninguna puede usarlo directamente: el triple enlace de la molécula es muy difícil de romper. A comienzos del siglo XX los abonos nitrogenados procedían de depósitos naturales limitados, como el nitrato de Chile. La reacción $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$ resolvió el problema: el amoniaco es la materia prima de casi todos los fertilizantes nitrogenados.

EJEMPLO REAL

Haber y Bosch: de la reacción de laboratorio a la industria

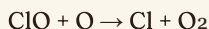
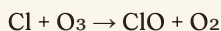
Fritz Haber recibió el premio Nobel de Química de 1918 (entregado en 1919) «por la síntesis del amoniaco a partir de sus elementos». Según el discurso de entrega del Nobel de 1931, Haber presentó su procedimiento a la empresa BASF en 1908; sus catalizadores, de osmio y de uranio, no servían para la operación industrial, y la síntesis a escala de fábrica se hizo a unas 200 atmósferas y unos 500 °C. Ese premio lo compartieron Carl Bosch, que dirigió el paso a la industria, y Friedrich Bergius, por el desarrollo de los métodos químicos a alta presión. El catalizador industrial fue hierro con otras sustancias añadidas, como explicó el propio Bosch en su conferencia Nobel de 1932 (Fundación Nobel; véase también Smil, 2001). Un siglo después, Jan Willem Erisman y sus colaboradores estimaron en *Nature Geoscience* que en 2008 cerca del 48 % de la población mundial dependía, para su alimentación, del nitrógeno fijado por este proceso. El mismo artículo recuerda la otra cara: el amoniaco sintético sirvió también para fabricar explosivos, y el exceso de nitrógeno reactivo contamina aguas y aire.

Fuente: Fundación Nobel (premios de Química de 1918 y 1931; conferencia Nobel de C. Bosch, 1932); Smil (2001); Erisman et al., Nature Geoscience 1 (2008) 636-639

La síntesis del amoniaco ilustra todo lo que se ha visto en la unidad: una ecuación ajustada que fija las proporciones, un catalizador que hace viable la reacción y unas condiciones elegidas para obtener el máximo producto con el mínimo gasto. También muestra que la química industrial no es neutral: el mismo proceso alimenta a miles de millones de personas y contribuye a la contaminación por nitratos, un problema que se retoma en la **unidad 10**.

La química de la atmósfera: el agujero de la capa de ozono

En la estratosfera, el ozono (O_3) absorbe gran parte de la radiación ultravioleta del Sol. Los clorofluorocarbonos (CFC), gases muy estables que se usaban en frigoríficos y aerosoles, llegan sin descomponerse hasta allí, donde la radiación ultravioleta libera átomos de cloro. Cada átomo de cloro actúa como catalizador:



Sumando las dos etapas, el cloro se cancela y queda la reacción global $\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow 2 \text{O}_2$. El átomo de cloro se regenera y puede destruir muchas moléculas de ozono antes de quedar retenido en otro compuesto.

EJEMPLO REAL

1974: un artículo de dos páginas que cambió la política ambiental

En 1974, el químico mexicano Mario Molina y F. Sherwood Rowland, de la Universidad de California en Irvine, publicaron en *Nature* que los CFC, una vez en la estratosfera, liberarían cloro capaz de destruir ozono mediante el ciclo catalítico anterior. La predicción se confirmó en los años siguientes y condujo al Protocolo de Montreal (1987), que restringió la producción de estas sustancias. En 1995 Molina, Rowland y Paul Crutzen recibieron el premio Nobel de Química «por sus trabajos en química atmosférica, en particular sobre la formación y descomposición del ozono». Una ecuación química ajustada y una pregunta sobre adónde iban a parar unos gases que parecían inofensivos bastaron para identificar un problema global antes de que nadie lo hubiera medido.

Fuente: [*Molina y Rowland, Nature 249 \(1974\) 810-812; Fundación Nobel, premio de Química de 1995*](#)

Puente con la biología: las reacciones de la vida

Los seres vivos son también reactores químicos, y sus reacciones obedecen las mismas leyes. La fotosíntesis y la respiración celular son, en su balance global, reacciones inversas:

$6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$ (fotosíntesis, endotérmica: usa energía de la luz)

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$ (respiración, exotérmica)

Ambas están ajustadas: C, 6 = 6; H, 12 = 12; O, 18 = 18. Lo que la célula hace en muchas etapas, cada una con su enzima (un catalizador biológico), se resume en una sola ecuación con las mismas proporciones que la combustión de la glucosa. Las biomoléculas se estudian en la **unidad 12**, y el papel de la fotosíntesis en los ecosistemas, en la **unidad 9**.

Glosario

- **Reacción química:** proceso en el que unas sustancias (reactivos) se transforman en otras (productos) por reorganización de sus átomos.
- **Ley de conservación de la masa:** en un sistema cerrado, la masa total de los productos es igual a la de los reactivos.
- **Ley de las proporciones definidas:** un compuesto puro tiene siempre la misma composición en masa.
- **Ecuación química ajustada:** representación de una reacción con el mismo número de átomos de cada elemento en ambos lados.
- **Coefficiente estequiométrico:** número que precede a una fórmula en una ecuación ajustada; indica proporciones entre cantidades de sustancia.
- **Mol:** unidad de cantidad de sustancia del SI; contiene exactamente $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entidades.
- **Masa molar:** masa de un mol de una sustancia, en g/mol.
- **Estequiometría:** cálculo de las cantidades de reactivos y productos a partir de la ecuación ajustada.

- **Reactivo limitante:** reactivo que se consume por completo y determina la cantidad de producto.
- **Rendimiento:** cociente entre la cantidad de producto obtenida y la teórica, en porcentaje.
- **Catalizador:** sustancia que aumenta la velocidad de una reacción sin consumirse en ella.

Para profundizar

- **El Sistema Internacional de Unidades (SI), 9.ª edición** — BIPM. La definición del mol y del valor exacto de la constante de Avogadro desde 2019. bipm.org
- **Balanceo de ecuaciones químicas** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español para ajustar ecuaciones contando átomos a cada lado. phet.colorado.edu
- **Reactivos, productos y excedentes** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español sobre reactivo limitante y reactivo en exceso. phet.colorado.edu
- **Smil, V. (2001). *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*** — MIT Press. Historia de la síntesis del amoníaco y de sus consecuencias para la alimentación mundial.

Preguntas para reflexionar

1. La síntesis del amoníaco permite alimentar a una parte enorme de la humanidad y, a la vez, contribuye a contaminar ríos y acuíferos. ¿Cómo debería decidir una sociedad sobre una tecnología con efectos tan opuestos?
2. Molina y Rowland predijeron un daño a la capa de ozono antes de que se midiera. ¿Qué papel debe tener una predicción científica bien fundamentada en las decisiones políticas cuando todavía no hay pruebas directas del daño?
3. Si la masa se conserva siempre, ¿adónde va el combustible que gasta un coche? ¿Por qué esa respuesta es importante para entender el cambio climático?

LO ESENCIAL

- En una reacción química los átomos se reorganizan: no se crean ni se destruyen. Por eso se conserva la masa, siempre que se cuenten también los gases que entran o salen.
- Un compuesto puro tiene composición fija (Proust), y los gases reaccionan en volúmenes de proporción sencilla (Gay-Lussac), que Avogadro explicó con el número de moléculas.
- Ajustar una ecuación es cambiar coeficientes, nunca subíndices: cambiar un subíndice cambia la sustancia.
- Los coeficientes son proporciones entre moles. El método estequiométrico pasa siempre por la cantidad de sustancia: masa o volumen → mol → mol → masa o volumen.
- El reactivo limitante se identifica comparando moles con la proporción de la ecuación, no masas. Un rendimiento mayor del 100 % indica un error.
- La síntesis del amoníaco y la destrucción del ozono por el cloro son dos ejemplos reales de cómo la química, con sus catalizadores y sus ecuaciones, transforma la sociedad y el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Bureau International des Poids et Mesures (2019). *Le Système international d'unités (SI) / The International System of Units (SI)*, 9.^a ed. Sèvres: BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>
3. Prohaska, T., Irrgeher, J., Benefield, J., Böhlke, J. K., Chesson, L. A., Coplen, T. B. et al. (2022). Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 94(5), 573-600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>
4. Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z. y Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
5. Molina, M. J. y Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
6. Lavoisier, A.-L. (1789). *Traité élémentaire de chimie*. París: Cuchet.

UNIDAD 5 · BLOQUE B

05

Energía: conservación de la energía mecánica, termodinámica y consumo energético

Un hervidor de 2000 W calienta el agua de una tetera en menos de cinco minutos; una bombilla LED de 9 W necesita unas dieciocho horas encendida para gastar la misma energía. El hervidor no es «el que más gasta»: es el que gasta más deprisa. Distinguir potencia y energía, y la energía que se paga de la que se aprovecha, es el primer paso para entender una factura, un motor o una red eléctrica.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

8 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

energía cinética y energía potencial gravitatoria · trabajo de una fuerza · conservación de la energía mecánica · pérdidas por rozamiento · calor, trabajo, energía interna y temperatura · primer y segundo principios de la termodinámica

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Identificar las formas de energía de un sistema y explicar sus transformaciones con el principio de conservación de la energía (criterio 2.3).
- Aplicar la conservación de la energía mecánica, incluidas las pérdidas por rozamiento, a situaciones cotidianas, con análisis de unidades y cifras significativas (criterios 2.3 y 4.1).
- Distinguir calor, trabajo, energía interna y temperatura, y aplicar el primer principio de la termodinámica y la ecuación $Q = m c \Delta T$ (criterios 2.3 y 4.1).
- Diferenciar potencia y energía, y calcular el consumo, el coste y el rendimiento de un aparato eléctrico (criterio 4.1).
- Interpretar datos oficiales sobre la generación eléctrica en España y argumentar hábitos de consumo energético compatibles con un desarrollo sostenible (criterio 3.1).

Duración: 8 sesiones · **Saberes:** B.6 · **Criterios:** 2.3, 3.1, 4.1 · **Requisitos previos:** unidad 2 (modelo de partículas, temperatura y cambios de estado) y unidad 4 (reacciones exotérmicas y endotérmicas); no se presupone Física y Química de 1.º.

La palabra *energía* se usa a diario con mucha libertad: se habla de «gastar energía», de «energías limpias» o de «tener poca energía» por la mañana. En física tiene un significado preciso. La **energía** es una magnitud que tiene un sistema y que se puede transferir a otros sistemas o transformar de una forma en otra, pero cuyo total no cambia nunca. Esa última propiedad, la **conservación de la energía**, es uno de los principios mejor comprobados de toda la ciencia, y se aplica igual a una montaña rusa, a una célula o a una central eléctrica. Esta unidad recorre tres escalas. Primero, la mecánica: objetos que suben, bajan y se frenan. Después, la termodinámica: qué ocurre con la energía cuando aparece el calor, y por qué ninguna máquina puede aprovecharla entera. Por último, el consumo: cuánta energía usa un aparato, cuánto cuesta y de dónde sale la electricidad en España. Los cálculos de esta última parte se reutilizan en la **unidad 10**, dedicada a los problemas ambientales y al desarrollo sostenible.

La energía y sus formas

Una magnitud que se conserva

La unidad de energía del SI es el **julio** (J): $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$. Es la energía que se transfiere al empujar con una fuerza de 1 N a lo largo de 1 m, una cantidad pequeña: levantar una manzana de 100 g a un metro de altura requiere aproximadamente 1 J. Por eso en la práctica se usan múltiplos (kJ, MJ) y otras unidades que se verán más adelante, como el kilovatio hora.

La energía se presenta en formas distintas según de qué dependa:

- **Energía cinética**, asociada al movimiento. Para un cuerpo de masa m que se mueve con rapidez v : $E_c = \frac{1}{2} m v^2$. Depende del cuadrado de la velocidad: a doble velocidad, cuádruple energía cinética, lo que explica por qué la distancia de frenado de un coche crece tanto con la velocidad (**unidad 15**).
- **Energía potencial gravitatoria**, asociada a la posición en un campo gravitatorio. Cerca de la superficie terrestre: $E_p = m g h$, donde h es la altura sobre un nivel de referencia elegido libremente y g es la aceleración de la gravedad. El valor normal convencional es $g_n = 9,806 65 \text{ m s}^{-2}$ (exacto por convenio; CODATA 2022); en los problemas se usa $9,81 \text{ m s}^{-2}$.
- **Energía potencial elástica**, la de un muelle comprimido o un arco tenso.
- **Energía interna**, la suma de las energías de las partículas de un sistema (unidad 2): su movimiento de agitación y las interacciones entre ellas, incluidas las de los enlaces químicos (unidad 4) y las de los núcleos atómicos.
- **Energía radiante**, la que transporta la luz y, en general, la radiación electromagnética, y **energía eléctrica**, la que transporta una corriente.

El trabajo: transferir energía con una fuerza

Una fuerza que desplaza su punto de aplicación transfiere energía. Esa energía transferida se llama **trabajo**. Si la fuerza F es constante y forma un ángulo α con el desplazamiento d :

$$W = F \cdot d \cdot \cos \alpha$$

Si la fuerza va a favor del movimiento ($\alpha = 0^\circ$), el trabajo es positivo y el cuerpo gana energía; si va en contra ($\alpha = 180^\circ$), como el rozamiento, es negativo y el cuerpo pierde energía; si es perpendicular ($\alpha = 90^\circ$), como el peso de una maleta que se lleva en horizontal, no hay trabajo,

por mucho que canse sostenerla. El trabajo se mide en julios, igual que la energía, porque no es otra cosa que energía en tránsito.

La conservación de la energía mecánica

Cuando solo actúa el peso

La **energía mecánica** de un cuerpo es la suma de su energía cinética y su energía potencial: $E_m = E_c + E_p$. Si sobre un cuerpo solo hacen trabajo el peso y otras fuerzas del mismo tipo, llamadas **conservativas** (la fuerza elástica de un muelle, por ejemplo), su energía mecánica se mantiene constante:

$$E_{c,1} + E_{p,1} = E_{c,2} + E_{p,2}$$

Lo que pierde en altura lo gana en velocidad, y al revés. Un cuerpo que cae desde 2,0 m partiendo del reposo llega al suelo con $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 2,0 \text{ m}} = 6,3 \text{ m/s}$, sea cual sea su masa: la masa aparece en los dos lados de la igualdad y se simplifica. Es la misma conclusión a la que llegó Galileo para la caída libre.

Cuando hay rozamiento

En el mundo real siempre hay rozamiento con el suelo o con el aire. El rozamiento es una fuerza **no conservativa**: su trabajo es negativo y la energía mecánica disminuye. La energía no desaparece: se convierte en energía interna de los cuerpos que rozan y del aire, que se calientan un poco. El balance se escribe así:

$$E_{m,\text{inicial}} - |W_{\text{roz}}| = E_{m,\text{final}}$$

y la energía «perdida» se calcula como la diferencia entre la energía mecánica inicial y la final. «Perdida» significa aquí que ya no está disponible como energía mecánica, no que haya dejado de existir.

PROCEDIMIENTO

Cómo resolver un problema de conservación de la energía

- 1 Dibuja la situación, elige el sistema y fija el nivel de referencia de alturas ($h = 0$) donde te resulte más cómodo.
- 2 Identifica dos estados, inicial y final, y anota en cada uno la masa, la rapidez y la altura, todas en unidades del SI.
- 3 Decide si hay rozamiento u otras fuerzas no conservativas. Si no las hay, iguala las energías mecánicas; si las hay, la diferencia entre ambas es el trabajo de esas fuerzas.
- 4 Despeja la incógnita antes de sustituir números; a menudo la masa se simplifica.
- 5 Comprueba las unidades ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} = \text{J}$), redondea a las cifras significativas de los datos y pregúntate si el resultado es razonable.

5.1

EJERCICIO RESUELTO

La bajada de una montaña rusa

ENUNCIADO

Un vagón de montaña rusa de 500 kg, con sus ocupantes, parte prácticamente del reposo desde lo alto de una rampa de 32,0 m de altura y baja hasta el punto más bajo del recorrido. a) ¿Con qué rapidez llegaría abajo si no hubiera rozamiento? b) En la realidad llega con 23,0 m/s. ¿Cuánta energía mecánica se ha transformado por el rozamiento y qué fracción representa? c) Si el tramo recorrido mide 80,0 m, ¿cuál es la fuerza media de rozamiento? Dato: $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Referencia:** $h = 0$ en el punto más bajo. Estado inicial: $v_1 = 0$, $h_1 = 32,0 \text{ m}$. Estado final: $h_2 = 0$.
- Sin rozamiento:** $m g h_1 = \frac{1}{2} m v_2^2$, así que $v_2 = \sqrt{2 g h_1} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 32,0 \text{ m}} = \mathbf{25,1 \text{ m/s}}$ (unos 90 km/h). La masa se simplifica.
- Energía inicial:** $E_p = m g h_1 = 500 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 32,0 \text{ m} = 1,570 \times 10^5 \text{ J}$.
- Energía final real:** $E_c = \frac{1}{2} \times 500 \text{ kg} \times (23,0 \text{ m/s})^2 = 1,323 \times 10^5 \text{ J}$.
- Energía transformada por el rozamiento:** $1,570 \times 10^5 \text{ J} - 1,323 \times 10^5 \text{ J} = \mathbf{2,47 \times 10^4 \text{ J}}$, que es el 15,7 % de la energía inicial ($2,471 \times 10^4 / 1,570 \times 10^5 = 0,157$).
- Fuerza media de rozamiento:** $|W_{\text{roz}}| = F \cdot d$, así que $F = 2,47 \times 10^4 \text{ J} / 80,0 \text{ m} = \mathbf{309 \text{ N}}$.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $\text{m s}^{-2} \cdot \text{m} = \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$, y su raíz es m s^{-1} . $\text{kg} \cdot \text{m s}^{-2} \cdot \text{m} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} = \text{J}$. $\text{J} / \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} / \text{m} = \text{N}$. Los datos tienen tres cifras significativas, y los resultados también.

¿ES RAZONABLE?

La rapidez real es menor que la ideal, como debe ser: si saliera mayor, habría un error en los datos o en las cuentas. Una fuerza de 309 N frente a un peso de $500 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m s}^{-2} = 4,91 \times 10^3 \text{ N}$ es un 6 % del peso, un valor plausible para ruedas sobre raíles con resistencia del aire.

Errores frecuentes: la energía no se gasta, se transforma

- «Con el rozamiento se pierde energía». Se pierde energía *mecánica*, que pasa a energía interna (los frenos y las ruedas se calientan). La energía total se conserva.

- «**Un cuerpo más pesado cae más deprisa**». Sin rozamiento con el aire, la rapidez al llegar abajo es $\sqrt{2gh}$ para cualquier masa. Lo que cambia con la masa es la energía que lleva.
- «**Si un cuerpo no se mueve, no tiene energía**». Puede tener energía potencial (un embalse lleno) o energía interna (un litro de gasóleo).
- «**Cansarse es hacer trabajo**». Sostener una maleta quieta cansa porque los músculos consumen energía química, pero sobre la maleta no se hace trabajo: no se desplaza.

¿SABÍAS QUE...?

Émilie du Châtelet y la «fuerza viva»

A comienzos del siglo XVIII se discutía qué magnitud medía la «fuerza» de un cuerpo en movimiento: los seguidores de Descartes defendían el producto de la masa por la velocidad; los de Leibniz, la llamada *vis viva* o fuerza viva, proporcional a la masa por el cuadrado de la velocidad, el antecedente de la energía cinética actual. Émilie du Châtelet publicó en 1740 sus *Institutions de physique*, presentadas como un libro de física para su hijo y que la Stanford Encyclopedia of Philosophy describe como una obra original de filosofía natural. En ellas defendió la fuerza viva de Leibniz, lo que le valió una polémica pública con el físico Jean-Jacques Dortous de Mairan. Su traducción comentada de los *Principia* de Newton al francés no se publicó hasta 1759.

Calor, trabajo y energía interna: la termodinámica

Cuatro conceptos que no conviene mezclar

La **termodinámica** estudia las transferencias de energía en las que interviene la temperatura. Su vocabulario se confunde con el de la vida diaria, así que conviene fijarlo con cuidado:

CONCEPTO	QUÉ ES	¿LO «TIENE» UN SISTEMA?	UNIDAD SI
Energía interna, U	Energía total de las partículas del sistema: agitación e interacciones	Sí: es una propiedad del estado del sistema	J
Temperatura, T	Magnitud que indica el nivel de agitación de las partículas; en un gas ideal es proporcional a su energía cinética media de traslación	Sí, pero no es una energía	K (o °C)
Calor, Q	Energía transferida de un sistema a otro <i>por una diferencia de temperatura</i>	No: es energía en tránsito	J
Trabajo, W	Energía transferida por fuerzas que desplazan algo (por ejemplo, un pistón)	No: es energía en tránsito	J

Una bañera de agua tibia tiene **más energía interna** que una taza de café hirviendo, porque contiene muchísimas más partículas, pero está a **menor temperatura**. Si se echa el café en la

bañera, el calor pasa del café al agua, no al revés: lo decide la temperatura, no la energía interna.

El primer principio

La energía interna de un sistema solo puede cambiar si recibe o cede energía en forma de calor o de trabajo:

$$\Delta U = Q + W$$

En este libro se sigue el convenio de la IUPAC: Q y W son positivos cuando la energía **entra** en el sistema. Algunos textos de física e ingeniería escriben $\Delta U = Q - W$, porque llaman W al trabajo que *hace* el sistema; las dos expresiones dicen lo mismo, y lo importante es declarar el convenio. El primer principio no es más que la conservación de la energía extendida a los procesos en los que hay calor. Un mismo aumento de temperatura del agua se puede conseguir calentándola en un fogón (Q) o agitándola con unas palas (W): el agua no «sabe» cómo le llegó la energía.

EJEMPLO REAL

1845-1850: Joule y el equivalente mecánico del calor

James Prescott Joule hizo girar unas palas dentro de un recipiente aislado con agua, accionadas por unas pesas que descendían una altura conocida. La energía potencial que perdían las pesas era el trabajo hecho sobre el agua, y el termómetro registraba la subida de temperatura. En la memoria que publicó en 1850 en las *Philosophical Transactions* concluyó que elevar en 1 °F la temperatura de una libra de agua requiere el mismo efecto que la caída de 772 libras desde un pie de altura. Pasado a unidades actuales, equivale a unos $4,15 \times 10^5$ J por kilogramo y kelvin, a menos de un 1 % del valor aceptado hoy para el agua ($4,18 \times 10^5$ J kg^{-1} K⁻¹). El experimento mostró que calor y trabajo son dos maneras de transferir la misma magnitud. La unidad de energía del SI lleva hoy su nombre.

Fuente: Joule, J. P. (1850). On the mechanical equivalent of heat. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 140, 61-82

Calentar una sustancia: $Q = m c \Delta T$

Cuando una sustancia recibe calor sin cambiar de estado ni reaccionar, su temperatura sube en proporción a la energía recibida e inversamente a su masa:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

donde c es la **capacidad calorífica específica** (o calor específico) de la sustancia, la energía necesaria para elevar 1 K la temperatura de 1 kg. Para el agua líquida a 25 °C, $c = 4,18 \times 10^5$ J kg^{-1} K⁻¹ (NIST-JANAF, a partir de $C_p = 75,4$ J mol^{-1} K⁻¹), uno de los valores más altos entre las sustancias comunes: por eso el mar suaviza el clima de las zonas costeras y el agua se usa para refrigerar motores y centrales. Una diferencia de temperatura vale lo mismo en kelvin que en grados Celsius, así que ΔT puede calcularse con cualquiera de las dos escalas. Durante un cambio de estado la temperatura no cambia aunque se siga aportando calor: la energía se invierte en separar las partículas, como se vio en las curvas de calentamiento de la **unidad 2**.

El segundo principio: no todo el calor se puede aprovechar

El primer principio dice que la energía se conserva, pero no dice hacia dónde van los procesos. Eso lo establece el **segundo principio**, que tiene dos enunciados equivalentes:

- El calor pasa espontáneamente de los cuerpos calientes a los fríos, nunca al revés. Un frigorífico consigue lo contrario, pero solo consumiendo energía eléctrica.
- Ninguna máquina que funcione por ciclos puede convertir íntegramente en trabajo el calor que recibe: una parte se cede siempre a un foco frío.

Una **máquina térmica** (el motor de un coche, la turbina de una central de gas o nuclear) toma calor de un foco caliente, convierte una parte en trabajo y cede el resto al entorno. Sadi Carnot razonó en 1824 que el rendimiento máximo posible depende solo de las temperaturas de los dos focos; con la escala absoluta de temperaturas, introducida después, ese límite se escribe $\eta_{\text{máx}} = 1 - T_{\text{frío}} / T_{\text{caliente}}$, con las temperaturas en kelvin. Por ejemplo, entre un vapor a 550 °C (823,15 K) y un condensador a 30 °C (303,15 K), $\eta_{\text{máx}} = 1 - 303,15 / 823,15 = 0,632$: ni siquiera una máquina ideal aprovecharía más del 63 % del calor, y las reales se quedan bastante por debajo. La energía no se pierde, pero se **degrada**: pasa a formas cada vez más dispersas y menos útiles.

ERRORES FRECUENTES

El calor no es algo que los cuerpos tengan

- **«Este cuerpo tiene mucho calor».** Tiene mucha energía interna o una temperatura alta. El calor es solo la energía que pasa de un cuerpo a otro.
- **«El frío entra por la ventana».** Lo que ocurre es que sale calor de la casa hacia el exterior, más frío.
- **«Una manta da calor».** Una manta no aporta energía: reduce la que el cuerpo cede al aire. Por eso abrigar un helado lo mantiene frío más tiempo.
- **«Temperatura y calor son lo mismo».** La temperatura es una propiedad de un cuerpo; el calor, una transferencia entre dos cuerpos a temperaturas distintas.

Potencia, consumo y rendimiento

Potencia: lo deprisa que se transfiere la energía

La **potencia** es la energía transferida (o el trabajo realizado) por unidad de tiempo:

$$P = E / t$$

Su unidad SI es el **vatio**: 1 W = 1 J/s. La potencia de un aparato indica lo deprisa que consume energía, no cuánta consume en total. De ahí sale la unidad que aparece en las facturas: el **kilovatio hora** (kWh), la energía que consume un aparato de 1 kW funcionando durante una hora:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Las relaciones que se usan en todos los problemas de consumo, y que se retoman en la unidad 10, son:

- Energía consumida: **$E = P \cdot t$** (en kWh si P está en kW y t en horas; en J si P está en W y t en s).
- Coste: **$\text{coste} = E \text{ (kWh)} \times \text{precio (€/kWh)}$** .
- Rendimiento: **$\eta = E_{\text{útil}} / E_{\text{consumida}}$** (sin unidades; se suele dar en %).
- Emisiones asociadas: **$\text{masa de CO}_2 = E \text{ (kWh)} \times \text{factor de emisión (kg CO}_2\text{/kWh)}$** .

CONCEPTO CLAVE

kW y kWh, rendimiento y potencia: cuatro magnitudes distintas

- El **kW** mide potencia (rapidez); el **kWh** mide energía (cantidad). «Este aparato consume 2000 W por hora» es una frase sin sentido: o consume 2000 W de potencia, o consume tantos kWh en tantas horas.
- En la factura doméstica española aparecen las dos cosas: la **potencia contratada**, en kW, limita cuántos aparatos pueden funcionar a la vez; la **energía consumida**, en kWh, es la que se ha usado a lo largo del periodo.
- La **potencia** de un aparato no dice nada de su **rendimiento**. Un hervidor de 2000 W puede ser más eficiente que uno de 1500 W: lo que importa es qué fracción de la energía consumida acaba en el agua.
- Un rendimiento nunca supera el 100 %. Si un cálculo da más, hay un error en los datos o falta alguna entrada de energía.

5.2

EJERCICIO RESUELTO

Consumo, coste y rendimiento de un hervidor eléctrico

ENUNCIADO

Un hervidor eléctrico de 2000 W calienta 1,50 L de agua desde 15,0 °C hasta 100,0 °C en 4 min 50 s. a) ¿Cuánta energía eléctrica consume, en J y en kWh? b) ¿Qué energía recibe el agua y cuál es el rendimiento del hervidor? c) Si el kWh cuesta 0,150 € (precio supuesto para el ejercicio), ¿cuánto cuesta calentarla? d) ¿Cuánta energía se consume en un año si se usa así dos veces al día? Datos: $c(\text{agua}) = 4,18 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; densidad del agua $\approx 1,00 \text{ kg/L}$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Tiempo en el SI:** $t = 4 \times 60 \text{ s} + 50 \text{ s} = 290 \text{ s}$.
- Energía consumida:** $E = P t = 2000 \text{ W} \times 290 \text{ s} = 5,80 \times 10^5 \text{ J}$. En kWh: $5,80 \times 10^5 \text{ J} / 3,6 \times 10^6 \text{ J/kWh} = \mathbf{0,161 \text{ kWh}}$. (También: $2,000 \text{ kW} \times 290/3600 \text{ h} = 0,161 \text{ kWh}$.)
- Energía útil:** $m = 1,50 \text{ kg}$; $\Delta T = 100,0 \text{ °C} - 15,0 \text{ °C} = 85,0 \text{ K}$; $Q = m c \Delta T = 1,50 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 85,0 \text{ K} = 5,33 \times 10^5 \text{ J}$.
- Rendimiento:** $\eta = 5,33 \times 10^5 \text{ J} / 5,80 \times 10^5 \text{ J} = 0,919$, es decir, **91,9 %**.
- Coste:** $0,161 \text{ kWh} \times 0,150 \text{ €/kWh} = \mathbf{0,024 \text{ €}}$, unos dos céntimos y medio.
- Consumo anual:** $0,161 \text{ kWh} \times 2 \times 365 = \mathbf{118 \text{ kWh}}$ al año, unos 17,6 € con el precio supuesto.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $W \cdot s = (\text{J/s}) \cdot s = \text{J}$. $\text{kg} \cdot \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot \text{K} = \text{J}$. En el rendimiento, J/J se cancela. $\text{kWh} \times \text{€/kWh} = \text{€}$.

¿ES RAZONABLE?

El rendimiento es alto pero menor que el 100 %: una parte de la energía calienta el propio hervidor y el aire, y otra se va con el vapor. Comparación con el lema: una bombilla LED de 9 W tarda $0,161 \text{ kWh} / 0,009 \text{ kW} = 17,9 \text{ h}$ en consumir lo mismo, pero si está encendida 5 h diarias consume $9 \text{ W} \times 5 \text{ h} \times 365 = 16,4 \text{ kWh}$ al año. El hervidor tiene una potencia 222 veces mayor y, aun así, en un año gasta solo unas siete veces más energía que la bombilla, porque funciona muy poco tiempo.

Puente con la biología: el cuerpo humano como máquina

Los seres vivos obedecen las mismas leyes. La energía de los alimentos es energía química que la respiración celular libera (unidad 4), y las etiquetas nutricionales la expresan en kJ y en kcal.

El Reglamento (UE) n.º 1169/2011 fija como ingesta de referencia para un adulto medio 8400 kJ (2000 kcal) al día. Repartidos a lo largo de 24 h, son $8,4 \times 10^6 \text{ J} / 86\,400 \text{ s} = 97 \text{ W}$: en promedio a lo largo del día, contando reposo y actividad, una persona disipa como calor una potencia parecida a la de una bombilla incandescente antigua. Como cualquier máquina, el cuerpo convierte solo una parte de esa energía en trabajo muscular; el resto mantiene la temperatura corporal. El flujo de energía a través de las cadenas tróficas, que pierde una parte en cada eslabón por el mismo motivo, se estudia en la **unidad 9**.

Energía y sostenibilidad: el caso de España

De dónde sale la electricidad

La electricidad no es una fuente de energía, sino una forma cómoda de transportarla. Se obtiene transformando otras formas: la energía cinética del viento y del agua, la radiante del Sol, la química de los combustibles o la nuclear. Las fuentes **renovables** (eólica, solar, hidráulica, biomasa) se reponen al ritmo al que se usan; las **no renovables** (carbón, petróleo, gas natural, uranio) se agotan, y las fósiles emiten CO_2 al quemarse.

EJEMPLO REAL

2024: más de la mitad de la electricidad española, de origen renovable

Según Red Eléctrica, el operador del sistema eléctrico español, en 2024 la generación renovable alcanzó 148 999 GWh, el **56,8 %** de toda la electricidad generada en el país. La eólica fue la primera tecnología (23,2 % de la generación), seguida de la nuclear (20 %), la solar fotovoltaica (17 %), el ciclo combinado de gas (13,6 %) y la hidráulica (13,3 %). Las emisiones de la producción eléctrica bajaron a 27 millones de toneladas de CO_2 equivalente, el mínimo de la serie. El parque instalado sumaba 129 GW, el 66 % renovable, y 3356 MW de almacenamiento (baterías y bombeo). Los datos se presentaron en el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Fuente: Red Eléctrica, nota de prensa «Informes del sistema eléctrico español 2024», 18 de marzo de 2025

Con estos datos se puede estimar un indicador que la unidad 10 usará para calcular emisiones. Si 148 999 GWh son el 56,8 % del total, la generación total fue de unos $148\,999 / 0,568 \approx 2,62 \times 10^5 \text{ GWh}$ (262 TWh). Las emisiones medias por kWh generado fueron entonces $27 \times 10^9 \text{ kg} / 2,62 \times 10^{11} \text{ kWh} \approx \mathbf{0,10 \text{ kg de } \text{CO}_2 \text{ equivalente por kWh}}$. Es una media anual de todo el sistema: el valor real de cada hora depende de qué centrales estén funcionando.

Almacenar y ahorrar energía

El viento y el Sol no producen cuando se necesita, sino cuando sopla o luce. Una forma de guardar la energía sobrante es la **central de bombeo**, que es conservación de la energía mecánica a gran escala: cuando sobra electricidad, se bombea agua a un embalse superior; cuando falta, se deja caer por una turbina. Cada metro cúbico de agua (1000 kg) subido 500 m almacena $E_p = 1000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 500 \text{ m} = 4,91 \times 10^6 \text{ J}$, es decir, 1,36 kWh. Por eso estas centrales necesitan embalses enormes y grandes desniveles. En cada ciclo, además, se recupera menos energía de la invertida: el rozamiento del agua y los rendimientos de bombas y turbinas se llevan una parte.

Ahorrar energía tiene dos caminos que se confunden a menudo. La **eficiencia** consiste en obtener el mismo servicio con menos energía (un aparato de mayor rendimiento, una casa

mejor aislada); el **ahorro** o la suficiencia, en usar menos el servicio (apagar lo que no se usa, ajustar el termostato). Los dos se miden en kWh y se pueden calcular con las expresiones de esta unidad.

Glosario

- **Energía:** magnitud que posee un sistema, que puede transferirse o transformarse y cuyo total se conserva. Unidad SI: julio (J).
- **Energía cinética:** energía asociada al movimiento; $E_c = \frac{1}{2} m v^2$.
- **Energía potencial gravitatoria:** energía asociada a la altura en un campo gravitatorio; cerca de la superficie, $E_p = m g h$.
- **Trabajo:** energía transferida por una fuerza que desplaza su punto de aplicación; $W = F d \cos \alpha$.
- **Energía mecánica:** suma de las energías cinética y potencial; se conserva si solo actúan fuerzas conservativas.
- **Energía interna:** energía total de las partículas de un sistema, debida a su agitación y a sus interacciones.
- **Calor:** energía transferida entre dos sistemas a causa de una diferencia de temperatura.
- **Capacidad calorífica específica:** energía necesaria para elevar 1 K la temperatura de 1 kg de una sustancia.
- **Primer principio de la termodinámica:** $\Delta U = Q + W$; la energía interna cambia solo por calor o trabajo intercambiados.
- **Potencia:** energía transferida por unidad de tiempo. Unidad SI: vatio ($W = J/s$).
- **Kilovatio hora:** energía que consume un aparato de 1 kW durante una hora; $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$.
- **Rendimiento:** cociente entre la energía útil y la energía consumida; siempre menor que el 100 %.

Para profundizar

- **Energía en la pista de patinaje** — *PhET, Universidad de Colorado*. Simulación en español para ver cómo se reparten energía cinética, potencial y térmica, con y sin rozamiento. phet.colorado.edu
- **Formas y cambios de energía** — *PhET, Universidad de Colorado*. Simulación en español sobre calentamiento, transferencias de energía y sistemas energéticos. phet.colorado.edu
- **Informe del sistema eléctrico español** — *Red Eléctrica*. Datos oficiales anuales de generación, demanda, potencia instalada y emisiones. ree.es
- **Émilie du Châtelet** — *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Su obra y su defensa de la fuerza viva. plato.stanford.edu

Preguntas para reflexionar

1. En 2024 más de la mitad de la electricidad española fue renovable, pero el consumo de energía no se limita a la electricidad: el transporte y la calefacción usan todavía muchos combustibles fósiles. ¿Qué cambios de hábitos y de tecnología harían falta para que el conjunto de la energía consumida, y no solo la eléctrica, fuera mayoritariamente renovable?
2. Si la energía se conserva siempre, ¿por qué se habla de «crisis energética» o de «gastar energía»? Explícalo con el segundo principio.
3. Algunos anuncios prometen aparatos que «generan más energía de la que consumen». ¿Qué principio incumplen? ¿Cómo comprobarías una afirmación así antes de comprar?

LO ESENCIAL

- La energía se mide en julios, se transfiere (como trabajo o como calor) y se transforma, pero su total se conserva.
- Si solo actúan el peso y otras fuerzas conservativas, la energía mecánica $E_c + E_p$ se mantiene. El rozamiento convierte energía mecánica en energía interna; la diferencia entre la energía mecánica inicial y la final mide esa transformación.
- Calor y trabajo son energía en tránsito; la energía interna es una propiedad del sistema; la temperatura indica la agitación de sus partículas y decide hacia dónde fluye el calor.
- Primer principio: $\Delta U = Q + W$ (convenio IUPAC). Segundo principio: el calor fluye de lo caliente a lo frío y ninguna máquina térmica convierte todo el calor en trabajo. $Q = m c \Delta T$ permite calcular el calor necesario para calentar una sustancia; el agua tiene una capacidad calorífica específica muy alta.
- La potencia (W, kW) es rapidez; la energía (J, kWh) es cantidad: $E = P t$, y $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$. El rendimiento $\eta = E_{\text{útil}} / E_{\text{consumida}}$ nunca supera el 100 % y no depende de la potencia.
- En 2024 el 56,8 % de la electricidad generada en España fue renovable (Red Eléctrica); las emisiones medias del sistema, estimadas a partir de esos datos, rondaron los 0,10 kg de CO_2 equivalente por kWh.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Cohen, E. R., Cvitaš, T., Frey, J. G., Holmström, B., Kuchitsu, K., Marquardt, R. et al. (2007). *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* (IUPAC Green Book), 3.^a ed. Cambridge: RSC Publishing.
3. Joule, J. P. (1850). On the mechanical equivalent of heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 140, 61-82. <https://doi.org/10.1098/rstl.1850.0004>
4. Red Eléctrica (2025). *Informes del sistema eléctrico español 2024* (nota de prensa, 18 de marzo de 2025). https://www.ree.es/sites/default/files/2025-03/1803_ISE_Nacional_1.pdf
5. Chase, M. W. Jr. (1998). NIST-JANAF Thermochemical Tables, 4.^a ed. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Monograph 9, 1-1951 (consultado en NIST Chemistry WebBook, agua). <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=2>
6. Reglamento (UE) n.º 1169/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2011, sobre la información alimentaria facilitada al consumidor, art. 32 y anexo XIII. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2011-82311>

UNIDAD 6 · BLOQUE C

06

El universo, el sistema solar y la Tierra: origen y movimientos

En Valencia, el Sol del mediodía sube a unos 74° sobre el horizonte en el solsticio de junio y solo a 27° en el de diciembre. En enero la Tierra está unos cinco millones de kilómetros más cerca del Sol que en julio, y aun así es invierno. Explicar por qué, y saber calcular cuánto tarda la Luna en dar una vuelta, es empezar a leer el cielo con las leyes de la física.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

6 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

modelo del Big Bang y
expansión del universo ·
radiación cósmica de fondo
· hipótesis nebular y disco
protoplanetario · leyes de
Kepler · período orbital y
órbita geoestacionaria ·
rotación y traslación de la
Tierra

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Explicar el origen del universo, del sistema solar y de la Tierra según el consenso científico actual, distinguiendo las pruebas observacionales de las hipótesis abiertas (criterio 2.2).
- Relacionar las características del sistema solar (planetas rocosos y gigantes, edades de los materiales) con su proceso de formación (criterio 2.2).
- Aplicar la tercera ley de Kepler para calcular períodos y radios orbitales de planetas y satélites, con análisis de unidades y cifras significativas (criterio 4.1).
- Explicar con la geometría de la órbita y del eje terrestre el día y la noche, las estaciones, las fases de la Luna y los eclipses, y refutar las explicaciones erróneas más frecuentes (criterio 2.2).
- Reconocer la astronomía como ciencia integrada, que necesita la física, la química y la geología, y valorar la aportación de las personas que la construyeron (criterio 5.1).

Duración: 6 sesiones · **Saberes:** C.1, C.2 · **Criterios:** 2.2, 4.1, 5.1 · **Requisitos previos:** unidad 1 (medida e incertidumbre) y unidad 3 (los elementos químicos); trigonometría básica (tangente de un ángulo). No se presupone Física y Química de 1.º.

Esta unidad abre el bloque «El sistema Tierra» mirando hacia fuera. Antes de estudiar la geosfera, la atmósfera o los seres vivos conviene saber de dónde salió la materia de la que están hechos, cuándo y cómo se formó el planeta y por qué se mueve como se mueve. Las respuestas no son especulaciones: se apoyan en medidas de la luz de galaxias lejanas, en la edad radiométrica de meteoritos y en unas pocas leyes de la física que permiten calcular órbitas con precisión de segundos.

Conviene separar desde el principio dos tipos de afirmaciones. Unas están medidas con mucha precisión, como el período de la Luna o la inclinación del eje terrestre. Otras son el **consenso actual**: la explicación que mejor encaja con todas las pruebas disponibles, que se expresa con un intervalo de incertidumbre y que puede afinarse con datos nuevos. La edad del universo es de este segundo tipo, y la unidad dice en cada caso de dónde sale el número. La unidad termina con los movimientos de la Tierra y de la Luna y con sus efectos cotidianos: el día y la noche, las estaciones, las fases y los eclipses. La explicación completa de por qué los astros se mueven así, la ley de la gravitación universal, se estudia en la **unidad 14**; aquí se usa ya en su forma más útil, la tercera ley de Kepler.

El origen del universo

Un universo en expansión

En 1912 Henrietta Swan Leavitt publicó que las estrellas variables cefeidas más brillantes de la Pequeña Nube de Magallanes tienen períodos de pulsación más largos. Esa relación período-luminosidad convirtió a las cefeidas en «reglas» para medir distancias. En 1927 Georges Lemaître propuso, a partir de la relatividad general y de los datos disponibles, que el universo se expande; en 1929 Edwin Hubble publicó en *PNAS* una relación entre la distancia de las galaxias y la velocidad con que se alejan. Hoy se escribe

$$v = H_0 \cdot d$$

donde v es la velocidad de alejamiento, d la distancia y H_0 la **constante de Hubble**. En 2018 los miembros de la Unión Astronómica Internacional (IAU) votaron recomendar que se llame **ley de Hubble-Lemaître**, en reconocimiento a los dos. Si todas las galaxias lejanas se alejan unas de otras, en el pasado estaban más juntas. Retrocediendo en el tiempo se llega a un estado muy denso y caliente: es el **modelo del Big Bang**. No describe una explosión en un punto del espacio, sino la expansión del propio espacio a partir de ese estado inicial, que ocurrió en todas partes a la vez.

Las tres pruebas principales

El modelo se acepta porque explica, con los mismos parámetros, tres observaciones independientes:

1. **La expansión**: la ley de Hubble-Lemaître.
2. **La radiación cósmica de fondo** (CMB): un resplandor de microondas que llega de todas las direcciones, el rastro de cuando el universo se volvió transparente a la luz, unos 380 000 años después del inicio. La detectaron Arno Penzias y Robert Wilson en 1965 y recibieron por ello el premio Nobel de Física de 1978. Su espectro corresponde al de un cuerpo negro a $2,725\,48 \pm 0,000\,57\text{ K}$ (Fixsen, 2009).
3. **La abundancia de los elementos ligeros**: en los primeros minutos solo pudieron formarse núcleos de hidrógeno, helio y trazas de litio. Las estrellas y el gas más antiguos están hechos casi solo de eso, como predice el modelo.

Los demás elementos se fabricaron después, dentro de las estrellas y en sus explosiones. Así lo establecieron en 1957 Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle en un artículo clásico de *Reviews of Modern Physics*. El carbono de las proteínas y el hierro de la

sangre se formaron en estrellas anteriores al Sol. La tabla periódica de la **unidad 3** es, también, un registro de historia cósmica.

Cuánto tiempo hace: un número con su incertidumbre

El ajuste del modelo cosmológico a los mapas de la radiación de fondo del satélite Planck da una edad del universo de **13 787 ± 20 millones de años**, unos 13 800 millones (Planck Collaboration, 2020, combinación con oscilaciones acústicas de bariones). Una estimación rápida sale de la propia constante de Hubble: si la expansión hubiera sido siempre igual de rápida, la edad sería $1/H_0$. Con $H_0 = 67,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ y $1 \text{ Mpc} = 3,086 \times 10^{19} \text{ km}$, $1/H_0 = 3,086 \times 10^{19} \text{ km} / 67,4 \text{ km s}^{-1} = 4,58 \times 10^{17} \text{ s}$, unos 14 500 millones de años. Es del mismo orden; no coincide porque la expansión no ha tenido siempre el mismo ritmo.

CIENCIA EN CONSTRUCCIÓN

La «tensión de Hubble»

El valor de H_0 que se deduce de la radiación de fondo ($67,4 \pm 0,5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, Planck Collaboration, 2020) no coincide con el que se mide con cefeidas y supernovas en galaxias cercanas ($73,04 \pm 1,04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, Riess et al., 2022). La diferencia es mayor que las incertidumbres y todavía no tiene explicación aceptada. No pone en duda que el universo se expande ni su edad aproximada, pero muestra cómo funciona la ciencia: dos medidas cuidadosas que discrepan son una pista, no un fracaso.

¿SABÍAIS QUE...?

Henrietta Swan Leavitt y la regla para medir el universo

Leavitt trabajaba en el Observatorio del Harvard College midiendo el brillo de estrellas en placas fotográficas. En la circular 173 del observatorio (1912), firmada por el director, Edward Pickering, pero que reconoce que la preparó ella, mostró que en 25 cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes el período crece con el brillo. Como todas esas estrellas están prácticamente a la misma distancia, la relación tenía que ser con el brillo real. Sin ese hallazgo Hubble no habría podido medir distancias a otras galaxias. Leavitt murió en 1921, antes de que se comprendiera todo el alcance de su trabajo.

El origen del sistema solar y de la Tierra

La hipótesis nebular

El sistema solar se formó a partir de una nube de gas y polvo que se contrajo por su propia gravedad. Al contraerse giró cada vez más deprisa y se aplanó en un **disco protoplanetario**, con el protosol en el centro. La idea se remonta a Kant (1755) y Laplace (1796); hoy está respaldada por simulaciones y, sobre todo, por la observación directa de discos alrededor de estrellas jóvenes.

En el disco, el polvo se aglomeró en cuerpos cada vez mayores (**planetesimales**), que chocaron y se unieron hasta formar planetas. La temperatura del disco explica la principal característica del sistema solar:

- **Cerca del Sol** solo podían condensarse metales y silicatos: se formaron planetas pequeños, rocosos y densos (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte).

- **Más lejos**, más allá de la llamada **línea de la nieve**, también se condensaban hielos de agua, amoníaco y metano. Había mucho más material sólido, los núcleos crecieron más y pudieron atraer gas: se formaron los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno).

Que todos los planetas giren alrededor del Sol en el mismo sentido y casi en el mismo plano es otra huella de ese disco común.

EJEMPLO REAL

2014: el primer disco protoplanetario fotografiado con detalle

En 2014, la red de radiotelescopios ALMA, en el desierto de Atacama (Chile), observó con una resolución sin precedentes la estrella joven HL Tauri. La imagen, publicada en 2015, muestra un disco de polvo con anillos brillantes separados por huecos oscuros. Los huecos son compatibles con la presencia de planetas en formación que van limpiando su órbita, aunque esa interpretación se sigue discutiendo. Lo que Kant y Laplace propusieron por razonamiento se puede ver hoy alrededor de otras estrellas.

Fuente: ALMA Partnership, Brogan et al., The Astrophysical Journal Letters 808 (2015) L3

Las edades: meteoritos, la Tierra y la Luna

Los materiales más antiguos del sistema solar son unas inclusiones ricas en calcio y aluminio que aparecen en ciertos meteoritos. Su datación con isótopos de plomo da **4567,30 ± 0,16 millones de años** (Connelly et al., 2012), y se toma como el «tiempo cero» del sistema solar. La edad de la Tierra se estima en **4540 ± 50 millones de años**, a partir de los isótopos de plomo de meteoritos y de minerales terrestres (USGS). Las rocas terrestres más antiguas son más jóvenes, porque la tectónica de placas (**unidad 7**) recicla la corteza; los cristales de circón más antiguos, de Jack Hills (Australia Occidental), tienen unos 4400 millones de años (Wilde et al., 2001, *Nature* 409, 175-178; Valley et al., 2014, *Nature Geoscience* 7, 219-223).

La hipótesis más aceptada sobre el **origen de la Luna** es el **gran impacto**: un cuerpo de tamaño planetario chocó con la Tierra joven y el material expulsado formó la Luna. Se propuso en los años setenta (Hartmann y Davis, 1975) y las simulaciones de Canup y Asphaug (2001) mostraron que es físicamente viable. Explica, por ejemplo, que la Luna tenga un núcleo de hierro muy pequeño. Algunos detalles, como el gran parecido isotópico entre las rocas lunares y las terrestres, siguen investigándose.

¿Qué es un planeta?

En 2006 la IAU definió **planeta** como un cuerpo que orbita alrededor del Sol, tiene masa suficiente para adoptar una forma casi esférica y ha limpiado de otros cuerpos las proximidades de su órbita. Plutón cumple las dos primeras condiciones, pero no la tercera, y pasó a la nueva categoría de **planeta enano** (NASA, *What is a planet?*). Es un buen ejemplo de que una clasificación científica es una convención que se revisa cuando aparecen datos nuevos, en este caso el descubrimiento de muchos cuerpos parecidos a Plutón más allá de Neptuno.

Las leyes de Kepler

Tres leyes empíricas

Johannes Kepler, con las observaciones de Tycho Brahe, formuló entre 1609 y 1619 tres leyes que describen el movimiento de los planetas:

1. **Primera ley:** las órbitas son elipses, con el Sol en uno de los focos. Las de los planetas son casi circulares; la de la Tierra tiene una excentricidad de 0,0167.
2. **Segunda ley:** la línea que une el Sol con el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. El planeta va más deprisa cerca del Sol: la Tierra, a 30,29 km/s en el perihelio y a 29,29 km/s en el afelio (NASA).
3. **Tercera ley:** el cuadrado del período orbital es proporcional al cubo del semieje mayor de la órbita, $T^2 \propto a^3$.

Si T se expresa en años y a en **unidades astronómicas** (1 au = 149 597 870 700 m, valor exacto fijado por la IAU en 2012; BIPM, 9.^a ed.), la constante de proporcionalidad para los planetas vale 1 y la ley queda $T^2 = a^3$. Con los datos de la NASA:

PLANETA	A (AU)	T (AÑOS)	T^2 / A^3
Mercurio	0,387	0,241	1,00
Venus	0,723	0,615	1,00
Tierra	1,000	1,000	1,00
Marte	1,524	1,881	1,00
Júpiter	5,204	11,86	1,00

(Calculado con las distancias medias y los períodos de la *Planetary Fact Sheet* de la NASA: a = distancia / $149,598 \times 10^6$ km; T = período en días / 365,256.)

La explicación de Newton

Kepler describió cómo se mueven los planetas; Newton explicó por qué. En la **unidad 14** se estudia la ley de la gravitación universal, $F = G M m / r^2$. Para una órbita circular de radio r alrededor de un cuerpo de masa M , mucho mayor que la del cuerpo que orbita, la fuerza gravitatoria es la que mantiene el movimiento circular, y de ahí se obtiene:

$$T^2 = (4\pi^2 / GM) \cdot r^3$$

La constante de la tercera ley depende solo de la masa del cuerpo central. Por eso vale lo mismo para todos los planetas (todos giran alrededor del Sol) y otro valor para la Luna y los satélites artificiales, que giran alrededor de la Tierra. El producto GM se conoce con mucha más precisión que G y M por separado: para la Tierra, $GM = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ (NASA, *Earth Fact Sheet*).

6.1

EJERCICIO RESUELTO

El período de la Luna a partir de la tercera ley de Kepler

ENUNCIADO

La Luna describe alrededor de la Tierra una órbita de semieje mayor $a = 3,844 \times 10^8$ m. a) Calcula su período orbital con la tercera ley de Kepler, en segundos y en días. b) Compáralo con el valor medido, 27,3217 días. Dato: $GM(\text{Tierra}) = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ (NASA).

SOLUCIÓN PASO A PASO

1. **Ley:** $T^2 = 4\pi^2 a^3 / (GM)$, así que $T = 2\pi \sqrt{a^3 / GM}$.
2. **Cubo del semieje:** $a^3 = (3,844 \times 10^8 \text{ m})^3 = 5,680 \times 10^{25} \text{ m}^3$.
3. **Cociente:** $a^3 / GM = 5,680 \times 10^{25} \text{ m}^3 / 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} = 1,425 \times 10^{11} \text{ s}^2$.
4. **Período:** $T = 2\pi \times \sqrt{(1,425 \times 10^{11} \text{ s}^2)} = 2\pi \times 3,775 \times 10^5 \text{ s} = 2,372 \times 10^6 \text{ s}$.
5. **En días:** $T = 2,372 \times 10^6 \text{ s} / 86\,400 \text{ s/día} = \mathbf{27,45 \text{ días}}$.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $\text{m}^3 / (\text{m}^3 \text{ s}^{-2}) = \text{s}^2$, y $\sqrt{(\text{s}^2)} = \text{s}$. El dato menos preciso, a , tiene cuatro cifras significativas, así que el resultado se da con cuatro.

¿ES RAZONABLE?

El valor medido es 27,32 días: el cálculo se desvía un 0,5 %. La causa principal es que la fórmula supone que la Tierra está quieta y que la Luna tiene una masa despreciable. La masa de la Luna es el 1,23 % de la de la Tierra. Si se usa $G(M + m)$ en lugar de GM , sale 27,28 días, a un 0,14 % del valor medido. El resto se debe a que el Sol también perturba la órbita lunar. Que un cálculo de cinco líneas acierte con ese error es una prueba fuerte de que la ley es correcta.

6.2

EJERCICIO RESUELTO

A qué altura está un satélite geoestacionario

ENUNCIADO

Un satélite geoestacionario está siempre sobre el mismo punto del ecuador. Para eso su período debe ser igual al de rotación de la Tierra respecto a las estrellas, el

DÍA SIDÉREO

: 23,9345 h = 86 164 s (NASA). Calcula el radio de su órbita y su altura sobre la superficie.

Datos: $GM(\text{Tierra}) = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$; radio ecuatorial terrestre, $6,378 \times 10^6 \text{ m}$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Despeje:** de $T^2 = 4\pi^2 r^3 / (GM)$, $r = \sqrt[3]{(GM T^2 / 4\pi^2)}$.
- Sustitución:** $GM T^2 = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \times (86 164 \text{ s})^2 = 2,959 \times 10^{24} \text{ m}^3$. Dividido entre $4\pi^2 = 39,48$: $7,496 \times 10^{22} \text{ m}^3$.
- Raíz cúbica:** $r = \sqrt[3]{(7,496 \times 10^{22} \text{ m}^3)} = 4,2164 \times 10^7 \text{ m} = \mathbf{42 164 \text{ km}}$.
- Altura:** $h = r - R = 42 164 \text{ km} - 6378 \text{ km} = \mathbf{35 786 \text{ km}}$.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $(\text{m}^3 \text{ s}^{-2}) \cdot \text{s}^2 = \text{m}^3$, y $\sqrt[3]{(\text{m}^3)} = \text{m}$.

¿ES RAZONABLE?

Es la altura de la órbita geoestacionaria que usan los satélites de comunicaciones y meteorológicos, unos 36 000 km. Cuanto mayor es el período, mayor es la órbita: la Estación Espacial Internacional, a unos 420 km de altura, tarda unos 93 minutos en dar una vuelta.

Forma y movimientos de la Tierra

La forma: una esfera ligeramente achatada

Que la Tierra es redonda se sabe desde la Antigüedad. Aristóteles lo argumentó con la sombra siempre circular que la Tierra proyecta sobre la Luna en los eclipses, y con que al viajar hacia el sur aparecen estrellas que no se ven desde el norte. En el siglo III a. C. Eratóstenes estimó su tamaño. Según el relato de Cleomedes, en Siena (la actual Asuán) el Sol del mediodía del solsticio de verano no proyectaba sombra; en Alejandría, más al norte, el mismo día formaba con la vertical un ángulo de $1/50$ de circunferencia ($7,2^\circ$). Con una distancia de 5000 estadios entre las dos ciudades, la circunferencia resultaba $50 \times 5000 = 250 000$ estadios. Otras fuentes antiguas le atribuyen 252 000 estadios, y no se sabe con seguridad cuánto medía el estadio que

usó, así que no tiene sentido decir que «acertó» con un porcentaje concreto. Lo valioso es el método, que se repite en la práctica de esta unidad.

La rotación achata la Tierra por los polos. Su radio ecuatorial es de 6378,137 km y el polar de 6356,752 km (NASA): una diferencia de 21 km, un 0,34 %. Vista desde el espacio, es indistinguible de una esfera.

PROCEDIMIENTO

Cómo calcular la latitud con la sombra del mediodía

- 1 Clava un palo (gnomon) perfectamente vertical, comprobado con una plomada, en un suelo horizontal comprobado con un nivel. Mide su altura L .
- 2 Marca la punta de la sombra cada 5 minutos alrededor del mediodía solar. En la España peninsular, con horario de verano, cae hacia las 14:00, y en invierno hacia las 13:00, según la longitud del lugar y la fecha (la llamada ecuación del tiempo lo adelanta o retrasa hasta unos 16 minutos).
- 3 La marca más cercana al pie del palo corresponde al mediodía solar: mide esa sombra mínima, s . La línea que va del pie del palo a esa marca señala el norte geográfico.
- 4 Calcula la altura del Sol: $\tan h = L / s$.
- 5 Calcula la latitud (hemisferio norte): $\varphi = 90^\circ - h + \delta$, donde δ es la declinación del Sol ese día. En los equinoccios $\delta \approx 0^\circ$; otros días se obtiene de un programa planetario o de un anuario astronómico.

Rotación: el día y la noche

La Tierra gira sobre su eje de oeste a este: por eso el Sol y las estrellas parecen salir por el este. Respecto a las estrellas, una vuelta completa dura 23 h 56 min 4 s, el **día sidéreo**. El **día solar**, de mediodía a mediodía, dura de media 24 h: como en ese tiempo la Tierra ha avanzado un poco en su órbita, tiene que girar algo más de una vuelta para que el Sol vuelva a la misma posición. La rotación explica la sucesión del día y la noche y también la forma achatada del planeta.

En 1851, Léon Foucault colgó en París un péndulo pesado de un hilo largo y mostró que su plano de oscilación giraba lentamente respecto al suelo: primero en el Observatorio y después, en marzo, en el Panteón, con un hilo de 67 m y una esfera de 28 kg (Sommeria, 2017, *Comptes Rendus Physique* 18, 520-525). El péndulo no cambia su plano: es el suelo el que gira por debajo. A una latitud φ , el plano da una vuelta completa en un día sidéreo dividido entre $\sin \varphi$; en París ($\varphi \approx 48,85^\circ$), unas 31,8 h, o 271° por día. Experimentos anteriores con cuerpos en caída ya habían detectado una pequeña desviación hacia el este, pero el péndulo fue la primera demostración directa y visible de la rotación terrestre sin mirar al cielo.

Traslación y estaciones

La Tierra da una vuelta alrededor del Sol en 365,256 días respecto a las estrellas (**año sidéreo**). El calendario sigue el **año trópico**, de equinoccio a equinoccio: 365,242 días. Su eje de rotación está inclinado $23,44^\circ$ respecto a la perpendicular al plano de la órbita y apunta siempre en la

misma dirección del espacio, hacia las cercanías de la estrella Polar. A lo largo del año, el hemisferio norte está unos meses más orientado hacia el Sol y otros meses, menos.

Esa inclinación causa las estaciones, por dos efectos:

- **Altura del Sol:** al mediodía, $h = 90^\circ - \varphi + \delta$, y la declinación δ varía entre $+23,44^\circ$ (solsticio de junio) y $-23,44^\circ$ (solsticio de diciembre). En Valencia ($\varphi = 39,47^\circ$), el Sol del mediodía sube a $73,97^\circ$ en junio y solo a $27,09^\circ$ en diciembre. La energía que recibe cada metro cuadrado de suelo horizontal es proporcional a $\sin h$: $\sin 73,97^\circ / \sin 27,09^\circ = 2,11$. En verano llega más del doble por metro cuadrado.
- **Duración del día:** en Valencia el Sol está sobre el horizonte unas 14,8 h en el solsticio de verano y unas 9,2 h en el de invierno (sin contar la refracción atmosférica, que alarga unos minutos el día).

La distancia al Sol apenas influye. La Tierra está en el **perihelio** (147,095 millones de km) a principios de enero y en el **afelio** (152,100 millones de km) a principios de julio (NASA). La radiación varía con el inverso del cuadrado de la distancia: $(152,100 / 147,095)^2 = 1,069$, así que en enero llega un 7 % más que en julio. Ese efecto es mucho menor que el factor 2 de la inclinación, y va en sentido contrario al de las estaciones del hemisferio norte.

ERRORES FRECUENTES

Las estaciones no dependen de la distancia al Sol

- «**En verano hace calor porque la Tierra está más cerca del Sol**». Falso. En julio está en el punto más lejano de su órbita. Además, si fuera la distancia, sería verano a la vez en los dos hemisferios, y en Argentina o Australia es invierno cuando en España es verano.
- «**En verano los rayos llegan más directos, y por eso queman más**». Es parte de la verdad: el Sol está más alto y su energía se reparte sobre menos superficie. Pero también cuenta que el día es más largo.
- «**El eje de la Tierra se balancea a lo largo del año**». No: apunta siempre en la misma dirección. Lo que cambia es la posición de la Tierra en su órbita y, con ella, qué hemisferio queda más orientado hacia el Sol.

La dirección del eje tampoco es eterna: describe un cono muy lento, la **precesión de los equinoccios**, con un período de unos 26 000 años. Dentro de unos milenios la estrella Polar ya no señalará el norte.

La Luna: fases, eclipses y mareas

Las fases

La Luna no emite luz: siempre tiene iluminada la mitad que mira al Sol. Las **fases** dependen de qué parte de esa mitad iluminada se ve desde la Tierra:

- **Luna nueva:** la Luna está entre la Tierra y el Sol; su cara iluminada mira hacia el otro lado y no se ve.
- **Cuarto creciente:** la Luna forma un ángulo recto con la línea Tierra-Sol; se ve iluminada la mitad derecha del disco desde el hemisferio norte.
- **Luna llena:** la Tierra está entre el Sol y la Luna, y se ve entera la cara iluminada.
- **Cuarto menguante:** de nuevo en ángulo recto, iluminada la mitad izquierda.

Las fases **no** se deben a la sombra de la Tierra. Si fuera así, la Luna estaría siempre llena salvo en los eclipses, y el borde de la parte oscura tendría la forma de la sombra terrestre, que no es la que se observa.

La Luna da una vuelta respecto a las estrellas en 27,3217 días (**mes sidéreo**), pero de una luna llena a la siguiente pasan 29,53 días (**mes sinódico**), porque mientras tanto la Tierra ha avanzado en su órbita. Se cumple $1/T_{\text{sin}} = 1/T_{\text{sid}} - 1/T_{\text{año}}$: $1/27,3217 - 1/365,256$ da $T_{\text{sin}} = 29,53$ días. La Luna gira sobre sí misma en el mismo tiempo que tarda en dar la vuelta a la Tierra (**rotación sincrónica**), y por eso vemos siempre la misma cara.

Los eclipses

Un **eclipse de Sol** ocurre cuando la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra, y solo puede pasar en luna nueva. Un **eclipse de Luna** ocurre cuando la Luna entra en la sombra de la Tierra, y solo puede pasar en luna llena. Si las órbitas estuvieran en el mismo plano, habría dos eclipses cada mes. No los hay porque la órbita lunar está inclinada $5,145^\circ$ respecto a la eclíptica (NASA): casi siempre la Luna nueva pasa por encima o por debajo del Sol. Solo hay eclipse cuando la luna nueva o la llena coinciden con los puntos donde la órbita de la Luna corta el plano de la órbita terrestre, los **nodos**. Eso ocurre en dos «temporadas de eclipses» al año.

En un eclipse total de Sol, la Luna tapa por completo el disco solar porque, por coincidencia, el diámetro del Sol es unas 400 veces mayor que el de la Luna y el Sol está unas 400 veces más lejos. Las fases parciales de un eclipse de Sol nunca se miran sin filtros homologados para observación solar directa (norma ISO 12312-2); solo durante la totalidad, y solo dentro de la franja de totalidad, se puede mirar sin ellos, y hay que volver a ponerlos en cuanto reaparece el primer punto de Sol. Fuera de esa franja no hay ningún momento seguro sin filtro (NASA, *Eclipse Safety*).

EJEMPLO REAL

España, eclipses de 2026 y 2027

El 12 de agosto de 2026 se produjo un eclipse total de Sol cuya franja de totalidad cruzó el Ártico, Groenlandia, Islandia y España, a última hora de la tarde y con el Sol muy bajo. Fue el primer eclipse total visible desde la península en más de un siglo. El 2 de agosto de 2027 habrá otro, con una totalidad máxima de 6 min 23 s, que cruzará el sur de España, el norte de África y Oriente Próximo. Las fechas, las franjas y las duraciones se calculan con años de antelación a partir de los movimientos de la Tierra y de la Luna, con las mismas leyes de esta unidad.

Fuente: NASA, tabla de eclipses de Sol 2021-2030 (F. Espenak); Instituto Geográfico Nacional, «Eclipse total de Sol del día 12 de agosto de 2026»

Puente con la gravitación y con las capas fluidas

La Luna también deja su huella en los océanos. La **marea** se debe a que la Luna atrae con más fuerza el agua del lado de la Tierra que mira hacia ella que el centro de la Tierra, y a este más que al agua del lado opuesto. Por eso se forman dos abultamientos y hay, en general, dos pleamares al día. El Sol produce un efecto parecido, más débil. Cuando los dos se alinean (luna nueva y luna llena), las mareas son más amplias: son las **mareas vivas**. La explicación cuantitativa requiere la ley de la gravitación, que se estudia en la **unidad 14**; sus efectos en las costas y en la dinámica de los océanos se retoman en la **unidad 8**. La misma interacción frena poco a poco la rotación terrestre y aleja la Luna unos 3,8 cm al año (NASA).

Glosario

- **Modelo del Big Bang:** modelo cosmológico según el cual el universo se expande desde un estado inicial muy denso y caliente, hace unos 13 800 millones de años.
- **Ley de Hubble-Lemaître:** proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento de las galaxias y su distancia, $v = H_0 d$.
- **Radiación cósmica de fondo:** radiación de microondas que llega de todas las direcciones y procede del universo primitivo.
- **Disco protoplanetario:** disco de gas y polvo que gira alrededor de una estrella joven y en el que se forman los planetas.
- **Unidad astronómica (au):** unidad de longitud igual a 149 597 870 700 m, del orden de la distancia media Tierra-Sol.
- **Tercera ley de Kepler:** el cuadrado del período orbital es proporcional al cubo del semieje mayor, $T^2 = 4\pi^2 a^3 / (GM)$.
- **Día sidéreo:** tiempo que tarda la Tierra en girar una vez respecto a las estrellas, 23 h 56 min 4 s.
- **Órbita geoestacionaria:** órbita ecuatorial de período igual al día sidéreo, a unos 35 786 km de altura.
- **Oblicuidad:** inclinación del eje de rotación terrestre, $23,44^\circ$, respecto a la perpendicular al plano de la órbita.
- **Declinación del Sol:** ángulo del Sol respecto al plano del ecuador celeste; varía entre $-23,44^\circ$ y $+23,44^\circ$ a lo largo del año.
- **Mes sinódico:** tiempo entre dos fases iguales de la Luna, 29,53 días.
- **Nodos:** puntos en los que la órbita de la Luna corta el plano de la órbita terrestre; solo cerca de ellos puede haber eclipses.

Para profundizar

- **Planetary Fact Sheet** — NASA, National Space Science Data Center. Datos orbitales y físicos de los planetas, la Tierra y la Luna, con las unidades de cada magnitud. nssdc.gsfc.nasa.gov
- **Gravedad y Órbitas** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español para ver cómo la masa del cuerpo central y la distancia cambian la órbita y el período. phet.colorado.edu
- **Bowen, A. C. y Todd, R. B. (2004). Cleomedes' Lectures on Astronomy: A Translation of The Heavens** — University of California Press. Traducción comentada del texto antiguo que transmite la medida de Eratóstenes.
- **Tabla de eclipses de Sol 2021-2030** — NASA, Goddard Space Flight Center. Fechas, tipos, duraciones y zonas de visibilidad. eclipse.gsfc.nasa.gov
- **Eclipse Safety** — NASA. Cómo observar un eclipse de Sol sin dañar la vista. science.nasa.gov

Preguntas para reflexionar

1. La edad del universo se da como $13\,787 \pm 20$ millones de años, y aun así hay una discrepancia sin resolver sobre la constante de Hubble. ¿Es contradictorio confiar en un resultado y reconocer a la vez un problema abierto? ¿Qué diferencia esto de una creencia?
2. Todavía hay personas que defienden que la Tierra es plana. Elige dos observaciones que puedas hacer tú mismo (o con otro centro a cientos de kilómetros) y explica por qué un modelo de Tierra plana no puede explicarlas.

3. Plutón dejó de ser planeta por una votación de la IAU. ¿Cambió Plutón? ¿Qué nos dice este caso sobre la diferencia entre los hechos y las clasificaciones científicas?

LO ESENCIAL

- El universo se expande (ley de Hubble-Lemaître). El modelo del Big Bang lo explica junto con la radiación de fondo y la abundancia de hidrógeno y helio. Su edad es de $13\,787 \pm 20$ millones de años (Planck, 2020).
- Los elementos más pesados que el litio se formaron en las estrellas: somos materia procesada en estrellas anteriores al Sol.
- El sistema solar nació de un disco de gas y polvo hace 4567 millones de años; la temperatura del disco explica que haya planetas rocosos cerca del Sol y gigantes lejos. La Tierra tiene unos 4540 millones de años.
- Tercera ley de Kepler: $T^2 = 4\pi^2 a^3 / (GM)$. La constante depende solo de la masa del cuerpo central, y la explica la gravitación de Newton (unidad 14).
- Las estaciones se deben a la inclinación del eje ($23,44^\circ$), que cambia la altura del Sol y la duración del día. No se deben a la distancia al Sol.
- Las fases dependen de cómo vemos la mitad iluminada de la Luna; los eclipses, de alineaciones que solo se dan cerca de los nodos, porque la órbita lunar está inclinada $5,1^\circ$.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Planck Collaboration: Aghanim, N. et al. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
3. Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D. e Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338, 651-655. <https://doi.org/10.1126/science.1226919>
4. NASA, National Space Science Data Center. *Planetary Fact Sheet, Earth Fact Sheet y Moon Fact Sheet*. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
5. Riess, A. G. et al. (2022). A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SHOES team. *The Astrophysical Journal Letters*, 934, L7. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5c5b>
6. Bureau International des Poids et Mesures (2019). *Le Système international d'unités (SI) / The International System of Units (SI)*, 9.^a ed. Sèvres: BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>

UNIDAD 14 · BLOQUE E

14

Las fuerzas fundamentales de la naturaleza

La misma fuerza que hace caer una llave al suelo mantiene a la Luna en su órbita, y la que hace que un globo frotado se pegue a la pared sostiene cada enlace químico de tu cuerpo. Cuatro interacciones bastan para explicar todo lo que se mueve, se une o se desintegra en la naturaleza; esta unidad las presenta y enseña a calcular las dos que se notan a simple vista.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

7 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

interacción y fuerza · las cuatro interacciones fundamentales · ley de la gravitación universal · peso y masa · órbitas de planetas y satélites · carga eléctrica y ley de Coulomb

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Identificar las cuatro interacciones fundamentales y explicar qué fenómenos del entorno se deben a cada una, según el consenso científico actual (criterio 2.2).
- Explicar el peso, el movimiento de los planetas y las mareas con la ley de la gravitación universal, y distinguir con claridad peso y masa (criterio 2.3).
- Explicar los fenómenos electrostáticos y el papel de la interacción electromagnética en la materia ordinaria con la ley de Coulomb (criterio 2.3).
- Calcular fuerzas gravitatorias y eléctricas, el valor de g y magnitudes orbitales con análisis de unidades y cifras significativas, y comparar órdenes de magnitud (criterio 4.1).
- Relacionar las interacciones nucleares con la energía del Sol, la radiactividad natural y el calor interno de la Tierra (criterio 2.2).

Duración: 7 sesiones · **Saberes:** E.1 · **Criterios:** 2.2, 2.3, 4.1 · **Requisitos previos:** unidad 1 (notación científica y cifras significativas), unidad 3 (estructura del átomo) y unidad 6 (leyes de Kepler). No se presupone Física y Química de 1.º.

Esta unidad abre el bloque «Las fuerzas que nos mueven». Las anteriores han descrito la materia, la energía y el movimiento de los astros; ahora se trata de la causa: qué tira de qué, con cuánta intensidad y a qué distancia. La respuesta de la física actual es sorprendentemente

corta. Todo lo que ocurre en la naturaleza, desde la caída de una hoja hasta el brillo del Sol, se explica con **cuatro interacciones fundamentales**: la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil.

Dos de ellas se notan a simple vista y tienen leyes sencillas que se pueden aplicar con una calculadora: la ley de la gravitación de Newton y la ley de Coulomb. Las otras dos actúan solo dentro del núcleo atómico, pero sin ellas no habría Sol, ni elementos químicos más allá del hidrógeno, ni calor en el interior de la Tierra. La unidad sigue ese orden: primero el mapa de las cuatro interacciones, después las dos de largo alcance con sus cálculos y al final los procesos nucleares del entorno. La **unidad 15** aplica estas fuerzas a estructuras en equilibrio y a cuerpos en movimiento.

Cuatro interacciones para explicarlo todo

Fuerza e interacción

Una **fuerza** es la acción de un cuerpo sobre otro capaz de cambiar su movimiento o de deformarlo. Se mide en **newtons** (N): 1 N es la fuerza que comunica a una masa de 1 kg una aceleración de 1 m/s², es decir, 1 N = 1 kg m s⁻². Para hacerse una idea, una manzana de 100 g pesa aproximadamente 1 N.

Las fuerzas siempre aparecen por parejas, por eso los físicos prefieren hablar de **interacciones**. Si la Tierra atrae a una manzana, la manzana atrae a la Tierra con una fuerza igual y de sentido contrario (tercera ley de Newton). La Tierra no se mueve de forma apreciable porque su masa es unas 6×10^{25} veces mayor que la de una manzana de 100 g, no porque la fuerza sea menor.

Muchas fuerzas cotidianas parecen de contacto: el empuje de una mano, el rozamiento, la tensión de una cuerda, la fuerza con que el suelo nos sostiene. A escala microscópica, ninguna lo es: son repulsiones y atracciones eléctricas entre los electrones y los núcleos de las superficies que se acercan. Las fuerzas que actúan a distancia, como el peso o la atracción de un imán, muestran que no hace falta contacto para interaccionar.

Las cuatro interacciones fundamentales

INTERACCIÓN	ACTÚA SOBRE	ALCANCE	INTENSIDAD COMPARADA	PARTÍCULA MEDIADORA	EJEMPLOS EN EL ENTORNO
Gravitatoria	Todo lo que tiene masa (y energía)	Infinito, disminuye con $1/r^2$	La más débil con diferencia	Gravitón (hipotético, no detectado)	Peso, órbitas, mareas
Electromagnética	Cargas eléctricas	Infinito, disminuye con $1/r^2$	Unas 10^{36} veces más intensa que la gravitatoria entre dos protones (ejercicio 14.1)	Fotón	Enlace químico, rozamiento, rayos, luz, brújula
Nuclear fuerte	Quarks, y a través				

	de ellos protones y neutrones	Muy corto, del orden del tamaño de un núcleo (10^{-15} m)	La más intensa de las cuatro	Gluones	Cohesión de los núcleos, fusión en el Sol
Nuclear débil	Quarks y leptones (electrones, neutrinos...)	Muy corto, solo dentro del núcleo y entre partículas	Más débil que la fuerte y la electromagnética, pero mucho más intensa que la gravitatoria	Bosones W y Z	Desintegración beta, primer paso de la fusión solar

(Clasificación, alcances relativos e intensidades relativas según la descripción del Modelo Estándar del CERN. La comparación entre gravitatoria y electromagnética es un cálculo de esta unidad.)

Que la más débil sea la que gobierna el universo a gran escala parece una paradoja, pero tiene explicación. La gravedad siempre atrae y se suma: cada kilogramo de la Tierra contribuye al peso de una manzana. La fuerza eléctrica puede atraer o repeler, y la materia ordinaria tiene casi exactamente tantas cargas positivas como negativas, así que a gran distancia sus efectos se cancelan. Las dos nucleares, por su parte, no salen del núcleo.

Un modelo en construcción

La física actual describe tres de las cuatro interacciones (electromagnética, fuerte y débil) con una misma teoría, el **Modelo Estándar** de la física de partículas, desarrollado a principios de los años setenta y confirmado por casi todos los experimentos realizados desde entonces (CERN). La electromagnética y la débil se entienden incluso como dos caras de una sola interacción, la **electrodébil**: Glashow, Salam y Weinberg recibieron por esa teoría el premio Nobel de Física de 1979, y los bosones W y Z que precedía se descubrieron en el CERN en 1983 (Nobel de 1984 para Carlo Rubbia y Simon van der Meer).

La gravedad queda fuera. Su mejor descripción es la relatividad general de Einstein (1915), que la interpreta como una curvatura del espacio-tiempo y que predijo las **ondas gravitacionales**. El 14 de septiembre de 2015 los detectores LIGO registraron por primera vez una, producida por la fusión de dos agujeros negros (Abbott et al., 2016); el Nobel de Física de 2017 premió ese trabajo. Unir la gravedad con las otras tres interacciones en una teoría cuántica común es todavía un problema abierto. Para todo lo que se estudia en esta unidad, la ley de Newton es más que suficiente.

La interacción gravitatoria

La ley de la gravitación universal

En 1687, en los *Principia*, Isaac Newton propuso que la fuerza que hace caer los cuerpos y la que mantiene a la Luna en su órbita son la misma. Dos cuerpos de masas m_1 y m_2 cuyos centros están separados una distancia r se atraen con una fuerza dirigida a lo largo de la línea que los une, de módulo

$$F = G \cdot m_1 m_2 / r^2$$

donde **G** es la **constante de gravitación universal**: $G = 6,674\,30(15) \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ (CODATA 2022). Para cuerpos esféricos, r es la distancia entre sus centros. La fuerza es proporcional a cada masa y disminuye con el cuadrado de la distancia: a doble distancia, la cuarta parte. Es

una de las constantes fundamentales peor conocidas, con una incertidumbre relativa de 2×10^{-5} , porque la atracción entre objetos de laboratorio es minúscula: dos masas de 1 kg separadas 1 m se atraen con $6,7 \times 10^{-11}$ N.

EJEMPLO REAL

1798: Cavendish «pesa» la Tierra

Henry Cavendish publicó en 1798 la primera medida de la atracción gravitatoria entre objetos de laboratorio. Usó una balanza de torsión ideada por John Michell, que había muerto sin llegar a usarla, como explica el propio artículo: dos esferas pequeñas de plomo colgadas de una varilla giraban un ángulo diminuto al acercarles dos esferas grandes. Su objetivo era determinar la densidad media de la Tierra. Con ese dato, la masa de la Tierra y el valor de G quedan determinados, por eso se dice que Cavendish «pesó» la Tierra. El valor actual de la densidad media terrestre es 5513 kg/m^3 (NASA).

Fuente: Cavendish, H. (1798). Experiments to determine the density of the Earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 88, 469-526

Peso y masa

El **peso** de un cuerpo es la fuerza con que lo atrae la Tierra (o el astro en el que esté). Cerca de la superficie, aplicando la ley de Newton con la masa M y el radio R de la Tierra:

$$P = G M m / R^2 = m \cdot g, \text{ con } g = G M / R^2$$

g es la **intensidad del campo gravitatorio**, o aceleración de la gravedad, y se mide en N/kg, que equivale a m/s^2 . Con $GM = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ y $R = 6,371 \times 10^6 \text{ m}$ (NASA, radio medio), $g = 9,820 \text{ m/s}^2$. El valor real depende del lugar: según el modelo WGS 84, va de $9,780 \text{ m/s}^2$ en el ecuador a $9,832 \text{ m/s}^2$ en los polos. Hay dos causas: la Tierra está achatada, de modo que en los polos se está más cerca de su centro, y su rotación hace que una pequeña parte de la atracción se emplee en mantener el giro, lo que reduce el **peso aparente** (el que marca un dinamómetro en reposo respecto al suelo) en las latitudes bajas. En la península ronda los $9,80 \text{ m/s}^2$. El valor normal convencional, $g_n = 9,806 65 \text{ m/s}^2$, es exacto por definición (CODATA 2022). La práctica del péndulo de la **unidad 1** permitía medirlo; esta unidad explica de dónde sale.

ASTRO	G EN LA SUPERFICIE (M/S²)	PESO DE UNA PERSONA DE 70,0 KG
Tierra	9,81	687 N
Marte	3,73	261 N
Luna	1,62	113 N

(Valores de g de las *Fact Sheets* de la NASA para la Luna y Marte. Para la Tierra se usa $9,81 \text{ m/s}^2$, el valor redondeado habitual en los problemas; la NASA da $9,820 \text{ m/s}^2$ como valor medio de GM/R^2 .)

CONCEPTO CLAVE***Peso y masa son magnitudes distintas***

- La **masa** mide la cantidad de materia y la inercia de un cuerpo. Se mide en kilogramos, es la misma en la Tierra, en la Luna o en el espacio, y se mide con una **balanza**, que compara masas.
- El **peso** es una fuerza. Se mide en newtons, depende del lugar ($P = m \cdot g$) y se mide con un **dinamómetro**.
- Una báscula de baño mide en realidad una fuerza, pero está calibrada para mostrar kilogramos con el valor de g de la Tierra. En la Luna marcaría unos 12 kg para una persona de 70 kg, aunque su masa no habría cambiado.

El movimiento de los planetas

La **unidad 6** presentó las leyes de Kepler como una descripción del movimiento planetario. La ley de Newton explica por qué se cumplen. Si un planeta de masa m describe una órbita circular de radio r alrededor del Sol, de masa M , la atracción gravitatoria es la fuerza que curva continuamente su trayectoria. Para un movimiento circular con rapidez v , esa fuerza debe valer $m \cdot v^2 / r$ (la llamada fuerza centrípeta). Igualando:

$$G M m / r^2 = m v^2 / r \rightarrow v = \sqrt{G M / r}$$

La masa del planeta se simplifica: la órbita no depende de ella. Como la rapidez es la circunferencia entre el período, $v = 2\pi r / T$, y sustituyendo se obtiene $T^2 = (4\pi^2 / G M) \cdot r^3$, la **tercera ley de Kepler** que usaba la unidad 6. La constante solo depende de la masa del cuerpo central. Para la Tierra alrededor del Sol, con $G M_{\odot} = 1,327 \cdot 10^{20} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ y $r = 1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$ (NASA), $v = 2,978 \cdot 10^4 \text{ m/s} = 29,78 \text{ km/s}$, que coincide con la velocidad orbital media que da la NASA. Y al revés: con el período y el radio de una órbita se puede calcular la masa del cuerpo central. Así se han medido las masas del Sol, de los planetas con satélites y de las estrellas dobles.

Las órbitas reales son elipses, como dice la primera ley de Kepler, porque cada planeta llega a su posición con una velocidad que no es exactamente la del movimiento circular. Newton demostró que una fuerza que disminuye con $1/r^2$ produce precisamente órbitas elípticas, y esa demostración fue uno de los grandes argumentos a favor de su ley.

Las mareas

La unidad 6 dejó pendiente la explicación cuantitativa de las mareas. El Sol atrae a la Tierra con mucha más fuerza que la Luna: con las masas y distancias de la NASA, $F_{\odot} / F_{\text{Luna}} = (M_{\odot} / M_{\text{Luna}}) \cdot (d_{\text{Luna}} / d_{\odot})^2 = 179$. Sin embargo, la marea no depende de la atracción total, sino de la **diferencia** de atracción entre el lado de la Tierra más cercano al astro y el más lejano, y esa diferencia disminuye con el **cuadrado** de la distancia. El efecto de marea de la Luna frente al del Sol es $(M_{\text{Luna}} / M_{\odot}) \cdot (d_{\odot} / d_{\text{Luna}})^3 = 2,2$: la Luna, mucho más cercana, produce mareas unas dos veces mayores que el Sol. Cuando los dos efectos se suman (luna nueva y llena), aparecen las mareas vivas.

ERRORES FRECUENTES**La ingravidez no significa ausencia de gravedad**

- **«En la Estación Espacial no hay gravedad».** Falso. A 420 km de altura, $g = GM / (R + h)^2 = 8,64 \text{ m/s}^2$, un 88 % del valor en la superficie. Los astronautas flotan porque la estación y ellos caen juntos alrededor de la Tierra (están en órbita), no porque la Tierra deje de atraerlos.
- **«Los cuerpos pesados caen más deprisa».** Sin rozamiento del aire, no: el peso es proporcional a la masa, pero también lo es la inercia, y la aceleración de caída es g para todos.
- **«La gravedad necesita aire» o «en el vacío no hay gravedad».** La gravedad actúa a través del vacío: así llega la atracción del Sol a la Tierra.

La interacción electromagnética**La carga eléctrica**

La **carga eléctrica** es una propiedad de la materia, como la masa, pero con dos signos. Los protones tienen carga positiva, los electrones negativa, y en un átomo neutro el número de ambos es igual (**unidad 3**). Cargas del mismo signo se repelen y de signo contrario se atraen. La carga se mide en **culombios** (C) y tiene dos propiedades experimentales básicas:

- **Se conserva:** no se crea ni se destruye, solo pasa de unos cuerpos a otros. Al frotar un globo con lana, los electrones pasan de un material al otro y los dos quedan cargados con cargas opuestas.
- **Está cuantizada:** cualquier carga libre es un múltiplo entero de la **carga elemental**, $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$, valor exacto desde la revisión del SI de 2019 (CODATA 2022). Un culombio equivale a la carga de unos $6,24 \times 10^{18}$ electrones, una cantidad enorme en electrostática: los objetos que se cargan por frotamiento adquieren solo una pequeñísima fracción de culombio.

Un cuerpo cargado puede atraer a uno neutro, como un globo a trozos de papel, porque desplaza ligeramente sus cargas: acerca las de signo opuesto y aleja las del mismo signo (**polarización** o inducción). La atracción sobre las cercanas gana a la repulsión sobre las lejanas.

La ley de Coulomb

En 1785 Charles-Augustin de Coulomb publicó en el volumen de 1785 de las memorias de la Academia de Ciencias de París su *Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme*, con medidas hechas con una balanza de torsión: la repulsión entre dos esferas cargadas con el mismo tipo de electricidad disminuía con el cuadrado de la distancia. Para dos cargas puntuales q_1 y q_2 separadas una distancia r :

$$F = k \cdot |q_1 q_2| / r^2, \text{ con } k = 1 / (4\pi \epsilon_0) = 8,988 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

donde $\epsilon_0 = 8,854\,187\,8188 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ es la permitividad del vacío (CODATA 2022). La fuerza es de repulsión si las cargas tienen el mismo signo y de atracción si tienen signo contrario. En un medio material, como el agua, la fuerza es menor que en el vacío; eso explica en parte por qué el agua disuelve tan bien las sales.

	LEY DE NEWTON	LEY DE COULOMB
Propiedad que interviene	Masa (siempre positiva)	Carga (positiva o negativa)

Sentido	Siempre atractiva	Atractiva o repulsiva
Dependencia con la distancia	$1/r^2$	$1/r^2$
Constante (SI)	$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$	$k = 8,988 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$
Depende del medio	No	Sí

MÉTODO**Cómo calcular una fuerza a distancia entre dos cuerpos**

- 1 Identifica la interacción: si intervienen masas, gravitatoria; si hay cargas netas, eléctrica. Si hay las dos, calcula ambas.
- 2 Pasa todos los datos al SI: masas en kg, cargas en C ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$, $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$) y distancias en m, medidas entre los centros.
- 3 Escribe la ley con letras, $F = G m_1 m_2 / r^2$ o $F = k |q_1 q_2| / r^2$, y comprueba las unidades antes de sustituir.
- 4 Calcula en notación científica: primero las potencias de diez, después las mantisas. Redondea al final, con las cifras significativas del dato menos preciso.
- 5 Indica el sentido: la gravitatoria siempre atrae; la eléctrica atrae si los signos son opuestos y repele si son iguales.
- 6 Valora el resultado: compáralo con una fuerza conocida (el peso del cuerpo, por ejemplo) y comprueba que el orden de magnitud tiene sentido.

14.1

EJERCICIO RESUELTO

Dos protones: gravedad frente a electricidad

ENUNCIADO

Dentro de un núcleo atómico, dos protones están separados una distancia $r = 2,0 \times 10^{-15} \text{ m}$. a) Calcula la fuerza eléctrica entre ellos. b) Calcula la fuerza gravitatoria. c) ¿Cuántas veces es mayor una que otra? ¿Depende el resultado de la distancia? Datos (CODATA 2022): $G = 6,674\,30 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$; $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$; $\epsilon_0 = 8,854\,187\,8188 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$; $m_p = 1,672\,621\,925\,95 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- 1. Constante de Coulomb:** $k = 1 / (4\pi \epsilon_0) = 1 / (4\pi \times 8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}) = 8,988 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$.
- 2. Fuerza eléctrica:** $F_e = k e^2 / r^2 = 8,988 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})^2 / (2,0 \times 10^{-15} \text{ m})^2 = 8,988 \times 10^9 \times 2,567 \times 10^{-38} / 4,0 \times 10^{-30} \text{ N} = \mathbf{58 \text{ N}}$, de repulsión.
- 3. Fuerza gravitatoria:** $F_g = G m_p^2 / r^2 = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \times (1,673 \times 10^{-27} \text{ kg})^2 / (2,0 \times 10^{-15} \text{ m})^2 = 6,674 \times 10^{-11} \times 2,798 \times 10^{-54} / 4,0 \times 10^{-30} \text{ N} = \mathbf{4,7 \times 10^{-35} \text{ N}}$, de atracción.
- 4. Cociente:** $F_g / F_e = G m_p^2 / (k e^2) = 1,867 \times 10^{-64} / 2,307 \times 10^{-28} = \mathbf{8,09 \times 10^{-37}}$. La eléctrica es $1,24 \times 10^{36}$ veces mayor: unos 36 órdenes de magnitud.
- 5. ¿Depende de r?** No: las dos fuerzas disminuyen con $1/r^2$ y r^2 se simplifica. El cociente vale lo mismo a cualquier distancia.

ANÁLISIS DE UNIDADES

$:(\text{N m}^2 \text{ C}^{-2}) \cdot \text{C}^2 / \text{m}^2 = \text{N}$ y $(\text{N m}^2 \text{ kg}^{-2}) \cdot \text{kg}^2 / \text{m}^2 = \text{N}$. El cociente es adimensional. Las fuerzas se dan con dos cifras significativas, las de r ; el cociente no depende de r y se da con tres.

¿ES RAZONABLE?

58 N sobre una partícula de $1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ es una fuerza enorme, del orden del peso de un objeto de 6 kg. Si solo existieran la gravedad y la electricidad, los núcleos con varios protones saltarían en pedazos. Que no lo hagan obliga a admitir otra interacción, atractiva y mucho más intensa a esas distancias: la nuclear fuerte. El resultado también explica por qué la química (eléctrica) no nota la gravedad entre átomos, y por qué, aun así, la gravedad manda a escala planetaria, donde la materia es eléctricamente neutra.

La interacción electromagnética en el entorno

La electricidad y el magnetismo son dos manifestaciones de una misma interacción, como mostró Maxwell en el siglo XIX; la luz es una onda electromagnética. En el entorno natural aparece en todas partes:

- **La materia y la química:** el enlace químico (**unidad 3**), la cohesión de los sólidos y líquidos, la tensión superficial y la forma de las biomoléculas (**unidad 12**) son atracciones y repulsiones eléctricas entre núcleos y electrones.
- **Las fuerzas de contacto:** el rozamiento, la fuerza normal del suelo y la elasticidad de un muelle, que la **unidad 15** trata como fuerzas mecánicas, tienen origen eléctrico.
- **Los rayos:** según la explicación más aceptada, en una nube de tormenta los choques entre partículas de granizo blando, cristales de hielo y gotas separan cargas, y la parte alta de la nube queda positiva y la media y baja, negativa (NOAA, National Weather Service, *Understanding Lightning: Thunderstorm Electrification*); cuando la diferencia de potencial es suficiente, el aire se vuelve conductor y se descarga.
- **El campo magnético terrestre:** se genera por el movimiento del hierro líquido conductor del núcleo externo (**unidad 7**). Orienta las brújulas y desvía buena parte de las partículas cargadas que llegan del Sol.

EJEMPLO REAL

Mayo de 2024: una tormenta geomagnética de nivel máximo

El 10 de mayo de 2024, el Centro de Predicción del Clima Espacial de la NOAA (Estados Unidos) informó de que se observaban en la Tierra condiciones G5, el nivel más alto de su escala de tormentas geomagnéticas. La causa eran nubes de partículas cargadas expulsadas por el Sol. Al llegar a la Tierra, el campo magnético terrestre las desvía y canaliza hacia las regiones polares, donde chocan con el oxígeno y el nitrógeno de la alta atmósfera y producen auroras. Según la escala de la propia NOAA, en una tormenta G5 las variaciones del campo magnético pueden inducir corrientes en las redes eléctricas y dañar transformadores, y degradar durante días la navegación por satélite. Todo el fenómeno es interacción electromagnética.

Fuente: NOAA Space Weather Prediction Center, «G5 Conditions Observed!», 10-05-2024

Las interacciones nucleares

La interacción fuerte: lo que mantiene unido el núcleo

El ejercicio 14.1 deja una pregunta: si dos protones del núcleo se repelen con unos 58 N, ¿qué los mantiene juntos? La **interacción nuclear fuerte**. Actúa entre los quarks que forman protones y neutrones y, como efecto residual, entre los propios protones y neutrones (nucleones). Es atractiva y mucho más intensa que la eléctrica a distancias del orden de 10^{-15} m, pero se anula prácticamente a distancias algo mayores. Por eso no se nota fuera del núcleo y por eso los núcleos tienen un tamaño máximo: en los muy grandes, la repulsión eléctrica, que actúa entre todos los protones, acaba compitiendo con la atracción fuerte, que solo actúa entre vecinos. Los núcleos con más de 82 protones son todos inestables. El bismuto-209 ($Z = 83$) lo es

tan poco que su desintegración alfa, con una semivida de unos 2×10^{19} años, no se detectó hasta 2003 (de Marcillac et al., *Nature*, 422, 876-878).

Esa competencia explica las dos formas de obtener energía del núcleo. En la **fusión**, núcleos ligeros se unen y forman uno más estable; en la **fisión**, un núcleo pesado se divide en dos más ligeros. En ambos casos la masa de los productos es algo menor que la de los reactivos y la diferencia se libera como energía, $E = m c^2$.

¿SABÍAS QUE...?

Lise Meitner y la explicación de la fisión

A finales de 1938, Otto Hahn y Fritz Strassmann encontraron bario después de bombardear uranio con neutrones, un resultado que no sabían interpretar. Lise Meitner, física austriaca que había colaborado con Hahn durante tres décadas y que ese año tuvo que huir de Alemania por su origen judío, lo explicó desde Suecia junto con su sobrino Otto Frisch: el núcleo de uranio se había partido en dos. Lo publicaron en *Nature* en febrero de 1939 con el título «Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction». El premio Nobel de Química de 1944 fue solo para Hahn, «por su descubrimiento de la fisión de núcleos pesados». El elemento 109 de la tabla periódica, el meitnerio, lleva hoy su nombre.

La interacción débil: cuando un neutrón se convierte en protón

La **interacción nuclear débil** es la responsable de la **desintegración beta**: un neutrón de un núcleo se transforma en un protón y emite un electrón y un antineutrino (o, en el proceso inverso, un protón se convierte en neutrón y emite un positrón y un neutrino). Es la única interacción que puede cambiar un tipo de quark en otro y, con él, un elemento químico en otro. También fue la que dio una de las grandes sorpresas de la física del siglo XX: en 1957, el experimento dirigido por Chien-Shiung Wu mostró que la desintegración beta distingue entre un proceso y su imagen en un espejo, algo que ninguna otra interacción hace (Wu, C. S. et al., 1957, «Experimental test of parity conservation in beta decay», *Physical Review*, 105, 1413-1415, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1413>).

Procesos nucleares en el entorno

- **El Sol:** en su núcleo, a unos $1,6 \times 10^7$ K (NASA), los núcleos de hidrógeno se funden y forman helio. Hacen falta las cuatro interacciones: la gravedad comprime y calienta el gas; la temperatura altísima permite que algunos protones se acerquen lo suficiente pese a su repulsión eléctrica, con ayuda de un efecto cuántico, el efecto túnel, porque su energía no bastaría para vencerla; la débil convierte protones en neutrones; y la fuerte une los nucleones en un núcleo de helio. Casi toda la energía de la biosfera procede, en última instancia, de ese proceso.
- **La radiactividad natural:** rocas, suelos, aire y el propio cuerpo humano contienen isótopos radiactivos, como el potasio-40 o el radón que emana de algunos granitos. Su desintegración es obra de las interacciones nucleares.
- **El calor interno de la Tierra:** la Tierra emite al espacio $44,2 \pm 1,0$ TW de calor interno. Midiendo los geoneutrinos que producen las desintegraciones de uranio y torio, el experimento KamLAND concluyó que la desintegración radiactiva aporta aproximadamente la mitad (KamLAND Collaboration, 2011). Ese calor mantiene en movimiento el manto y, con él, la tectónica de placas de la **unidad 7**: una interacción que solo actúa dentro del núcleo atómico ayuda a mover continentes.

Glosario

- **Interacción fundamental:** cada uno de los cuatro tipos básicos de acción entre partículas (gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil) a los que se reducen todas las fuerzas conocidas.
- **Newton (N):** unidad SI de fuerza; $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$.
- **Constante de gravitación universal (G):** constante de la ley de Newton, $6,674 \ 30 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ (CODATA 2022).
- **Peso:** fuerza con que un astro atrae a un cuerpo; $P = m g$, en newtons.
- **Masa:** medida de la cantidad de materia y de la inercia de un cuerpo, en kilogramos; no depende del lugar.
- **Intensidad del campo gravitatorio (g):** fuerza gravitatoria por unidad de masa en un punto, $g = G M / r^2$, en N/kg o m/s^2 .
- **Carga elemental (e):** carga del protón, $1,602 \ 176 \ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$, exacta en el SI.
- **Ley de Coulomb:** la fuerza entre dos cargas puntuales es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia.
- **Polarización:** separación de cargas que un cuerpo cargado produce en uno neutro cercano, y que permite que lo atraiga.
- **Nucleón:** protón o neutrón, componentes del núcleo atómico.
- **Desintegración beta:** transformación de un neutrón en protón (o al revés) dentro de un núcleo, debida a la interacción débil.
- **Fusión nuclear:** unión de núcleos ligeros para formar uno más pesado, con liberación de energía; es la fuente de energía del Sol.

Para profundizar

- **The Standard Model** — CERN. Presentación oficial de las partículas y de las cuatro interacciones, con sus mediadores. home.cern
- **Fundamental Physical Constants** — NIST (CODATA 2022). Valores, incertidumbres y definiciones de G , e , ϵ_0 y las masas de las partículas. physics.nist.gov
- **Ley de Coulomb y Lab de Fuerza de Gravedad** — PhET, Universidad de Colorado. Simulaciones en español para explorar cómo cambian las dos fuerzas con las cargas, las masas y la distancia. [Ley de Coulomb](#) · [Lab de Fuerza de Gravedad](#)
- **Meitner, L. y Frisch, O. R. (1939). Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction** — *Nature*, 143, 239-240. El artículo, de dos páginas, en el que se interpreta la fisión. [doi.org](https://doi.org/10.1038/143239a0)

Preguntas para reflexionar

1. La gravedad es la más débil de las cuatro interacciones y, sin embargo, determina la forma de los planetas, las órbitas y las galaxias. ¿Cómo se explica? ¿Qué pasaría si la materia no fuera, en conjunto, eléctricamente neutra?
2. Algunas pulseras y colgantes se venden con la promesa de que sus «imanes» o «energías» equilibran el cuerpo. Con lo que sabes de las cuatro interacciones y de cómo disminuyen con la distancia, ¿qué preguntas harías al vendedor y qué prueba pedirías para creerle?
3. El premio Nobel por la fisión fue solo para Otto Hahn, aunque Lise Meitner dio la explicación física. ¿Qué factores pueden hacer que una aportación científica no se reconozca? ¿Cómo se podría evitar?

LO ESENCIAL

- Todas las fuerzas conocidas se reducen a cuatro interacciones: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. Tres de ellas las describe el Modelo Estándar; la gravedad, la relatividad general.
- Ley de Newton: $F = G m_1 m_2 / r^2$, siempre atractiva. El peso es $P = m g$, con $g = G M / R^2$ (unos $9,80 \text{ m/s}^2$ en la península). La masa no cambia de un lugar a otro; el peso sí.
- La gravitación explica las órbitas ($v = \sqrt{GM/r}$ y la tercera ley de Kepler) y las mareas, que dependen de la diferencia de atracción y por eso dominan las de la Luna.
- Ley de Coulomb: $F = k |q_1 q_2| / r^2$, atractiva o repulsiva. Entre dos protones, la fuerza eléctrica es unas 10^{36} veces mayor que la gravitatoria a cualquier distancia.
- La interacción electromagnética explica el enlace químico, las fuerzas de contacto, los rayos, la luz y el magnetismo terrestre.
- La fuerte mantiene unidos los núcleos y la débil permite la desintegración beta; juntas hacen brillar al Sol y aportan cerca de la mitad del calor interno de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales».
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>
2. Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N. y Tiesinga, E. (2025). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022. *Reviews of Modern Physics*, 97, 025002. Valores consultados en NIST, *Fundamental Physical Constants*. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
3. NASA, National Space Science Data Center. *Earth Fact Sheet, Moon Fact Sheet, Mars Fact Sheet y Sun Fact Sheet*. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
4. National Geospatial-Intelligence Agency (2014). *Department of Defense World Geodetic System 1984*, NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84. <https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=coord-wgs84>
5. Abbott, B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration y Virgo Collaboration) (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116, 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
6. The KamLAND Collaboration (2011). Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geoscience*, 4, 647-651. <https://doi.org/10.1038/ngeo1205>

UNIDAD 15 · BLOQUE E

15

Fuerzas en equilibrio y en movimiento: estática, dinámica y seguridad vial

Un semáforo colgado sobre un cruce no se mueve, y un coche que frena ante ese semáforo recorre todavía decenas de metros antes de detenerse. Las mismas tres leyes de Newton explican las dos situaciones. Esta unidad las aplica a estructuras que deben quedarse quietas y a vehículos que deben pararse a tiempo.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

DURACIÓN

9 sesiones

CONCEPTOS CLAVE

movimiento rectilíneo
uniforme y uniformemente
acelerado · leyes de
Newton · fuerza neta y
equilibrio · rozamiento
estático y dinámico · plano
inclinado · momento de una
fuerza

OBJETIVOS DE LA UNIDAD

- Reconocer las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y explicar con las leyes de Newton su estado de reposo o de movimiento, identificando las ideas previas erróneas más comunes (criterio 2.3).
- Aplicar las condiciones de equilibrio a estructuras sencillas de la ingeniería, la biología y la geología (criterio 2.3).
- Resolver problemas de cinemática y dinámica (movimientos rectilíneos, rozamiento, plano inclinado, curvas) con análisis de unidades y cifras significativas (criterio 4.1).
- Calcular la distancia de detención de un vehículo y analizar críticamente el resultado y el modelo empleado al cambiar la velocidad, el tiempo de reacción o el estado de la calzada (criterios 4.1 y 4.2).

Duración: 9 sesiones · **Saberes:** E.2, E.3 · **Criterios:** 2.3, 4.1, 4.2 · **Requisitos previos:** unidad 1 (cifras significativas y el valor de g medido con el péndulo), unidad 5 (energía cinética) y unidad 14 (peso, $P = m g$, y origen eléctrico de las fuerzas de contacto). No se presupone Física y Química de 1.º.

La unidad 14 explicó de dónde salen las fuerzas: cuatro interacciones fundamentales, de las que en la vida diaria solo se notan la gravitatoria y la electromagnética. Esta unidad deja a un lado

el origen y se pregunta por el efecto: qué le pasa a un cuerpo cuando sobre él actúan varias fuerzas a la vez. Si se compensan, el cuerpo sigue en reposo o se mueve sin cambiar de velocidad, y se habla de **estática**; si no se compensan, su velocidad cambia, y se habla de **dinámica**.

Las dos partes se rigen por las mismas tres leyes, que Newton publicó en 1687 en los *Principia*. Con ellas y con unas pocas ecuaciones del movimiento se puede calcular la tensión de un cable, el ángulo al que una caja empieza a deslizar por una rampa o la distancia que necesita un coche para detenerse. Este último cálculo da sentido físico a normas que todos conocen: los límites de velocidad, la distancia de seguridad o la prohibición de usar el móvil al volante. La unidad empieza por describir el movimiento, sigue con las leyes de Newton y el rozamiento, aplica todo a estructuras en equilibrio y termina con la seguridad vial.

Describir el movimiento

Posición, velocidad y aceleración

Para describir un movimiento rectilíneo basta una coordenada x , medida desde un origen. La **velocidad** indica cuánto cambia la posición por unidad de tiempo (en m/s) y la **aceleración**, cuánto cambia la velocidad por unidad de tiempo (en m/s²). Las dos tienen sentido: en esta unidad, positivo en el sentido del movimiento. Una aceleración de sentido contrario a la velocidad hace que el cuerpo frene, y se llama a veces **deceleración**.

En carretera la velocidad se da en km/h. Como 1 km/h = 1000 m / 3600 s, para pasar a m/s se divide entre 3,6: 90 km/h son 25 m/s, y 120 km/h son 33,3 m/s. Olvidar esta conversión es el error más frecuente en los problemas de seguridad vial.

Dos movimientos modelo

MOVIMIENTO	ACELERACIÓN	VELOCIDAD	POSICIÓN
Rectilíneo uniforme (MRU)	$a = 0$	v constante	$x = x_0 + v t$
Rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA)	a constante	$v = v_0 + a t$	$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$

Eliminando el tiempo entre las dos ecuaciones del MRUA se obtiene una tercera, muy útil cuando no se conoce t : $v^2 = v_0^2 + 2 a \Delta x$. Para un vehículo que frena desde v_0 hasta pararse ($v = 0$) con una deceleración de módulo a , la distancia recorrida es

$$d_f = v_0^2 / (2 a)$$

La distancia de frenado es proporcional al **cuadrado** de la velocidad: a doble velocidad, cuádruple distancia. Es la misma dependencia que la de la energía cinética, $\frac{1}{2} m v^2$, de la unidad 5, y no es casualidad: frenar es convertir toda esa energía en energía interna de frenos y neumáticos.

La **caída libre** es el MRUA más conocido. Sin rozamiento con el aire, todos los cuerpos caen cerca de la superficie terrestre con la misma aceleración, $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$, el valor que se obtenía en la práctica del péndulo de la unidad 1 y cuyo origen gravitatorio explicó la unidad 14.

Las leyes de Newton

Primera ley: la inercia

Un cuerpo sobre el que no actúa ninguna fuerza, o sobre el que las fuerzas se compensan, sigue en reposo o se mueve en línea recta con velocidad constante. Esta propiedad de mantener su estado de movimiento se llama **inercia**, y su medida es la masa.

La primera ley contradice una intuición muy extendida: que para mantener algo en movimiento hace falta empujarlo. En la vida diaria todo acaba parándose porque siempre hay rozamiento. Un coche que circula a 90 km/h constantes por una recta necesita que el motor empuje, sí, pero solo para compensar el rozamiento con el aire y la rodadura: la **fuerza neta** sobre él es cero. El cinturón de seguridad existe por la primera ley. Si el coche se detiene de golpe, el ocupante sigue moviéndose a la velocidad que llevaba hasta que algo lo frena: el cinturón, el airbag o el parabrisas.

Segunda ley: fuerza y aceleración

Si la fuerza neta sobre un cuerpo de masa m no es nula, el cuerpo se acelera en la dirección y el sentido de esa fuerza:

$$F_{\text{neta}} = m \cdot a$$

La fuerza neta es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. La ecuación define el newton ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$) y explica la inercia: con la misma fuerza, el doble de masa adquiere la mitad de aceleración. Un turismo de 1200 kg que frena con una deceleración de $6,87 \text{ m/s}^2$ (la del ejercicio 15.2) necesita una fuerza neta de $1200 \text{ kg} \times 6,87 \text{ m/s}^2 = 8,24 \times 10^3 \text{ N}$ en sentido contrario al movimiento, que hacen las ruedas contra el suelo.

Tercera ley: acción y reacción

Si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre B, B ejerce sobre A una fuerza del mismo módulo y dirección y de sentido contrario. Las dos fuerzas de la pareja actúan **sobre cuerpos distintos**, por eso nunca se anulan entre sí.

Un coche avanza gracias a esta ley. El neumático empuja el asfalto hacia atrás y el asfalto empuja el neumático hacia delante; esa fuerza del suelo, que es un rozamiento estático, es la que acelera el coche. Sobre hielo el rozamiento máximo es muy pequeño: las ruedas patinan y el coche apenas avanza, por mucho que empuje el motor.

ERRORES FRECUENTES

Tres ideas previas que las leyes de Newton desmienten

- **«Si un cuerpo se mueve, alguna fuerza lo empuja en el sentido del movimiento».** No: la fuerza neta determina la aceleración, no la velocidad. Una nave en el espacio con los motores apagados sigue moviéndose indefinidamente. Si la velocidad es constante, la fuerza neta es cero.
- **«Acción y reacción se anulan, así que nada debería moverse».** Las dos fuerzas actúan sobre cuerpos distintos. Para saber si un cuerpo se acelera hay que sumar solo las fuerzas que actúan **sobre él**. El peso de un libro y la fuerza normal de la mesa sobre el libro se compensan, pero no son una pareja de acción y reacción: las dos actúan sobre el libro. La pareja del peso es la atracción del libro sobre la Tierra.
- **«En una curva, la fuerza centrífuga te empuja hacia fuera».** Visto desde la carretera, nada empuja al pasajero hacia fuera. El pasajero tiende a seguir en línea recta (primera ley) y es la puerta o el asiento el que lo empuja **hacia dentro**, hacia el centro de la curva. La «fuerza centrífuga» solo aparece como fuerza ficticia si se describe el movimiento desde el coche, un sistema de referencia que gira; no tiene pareja de reacción ni la ejerce ningún cuerpo.

Movimiento en una curva

Para que un cuerpo describa una circunferencia de radio r con rapidez v , la fuerza neta debe apuntar hacia el centro y valer $m v^2/r$ (la **fuerza centrípeta** que la unidad 14 aplicaba a las órbitas). En una curva plana, esa fuerza solo puede darla el rozamiento entre los neumáticos y el asfalto, que como mucho vale $\mu m g$. La velocidad máxima a la que se puede tomar la curva sin derrapar es

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{(\mu g r)}$$

La masa se simplifica: un camión y una moto tienen el mismo límite si sus neumáticos agarran igual. En la curva el neumático no desliza, así que actúa el rozamiento estático; aun así, se toma como valor prudente el dinámico de la tabla siguiente para caucho sobre hormigón (0,70 en seco y 0,50 en mojado). Con $r = 50 \text{ m}$ y $\mu = 0,70$ (seco), $v_{\text{máx}} = 18,5 \text{ m/s} = 67 \text{ km/h}$; con $\mu = 0,50$ (mojado), $15,7 \text{ m/s} = 56 \text{ km/h}$. La lluvia reduce la velocidad segura en curva aunque la carretera sea la misma.

¿SABÍAS QUE...?

Émilie du Châtelet y la traducción francesa de los Principia

Émilie du Châtelet (1706-1749) fue una filósofa natural francesa que publicó en 1740 sus *Institutions de physique* y trabajó desde principios de la década de 1740 en una traducción al francés de los *Principia* de Newton, acompañada de un comentario propio. La terminó poco antes de morir, en 1749; se publicó en 1759 y, según la Stanford Encyclopedia of Philosophy, sigue siendo la principal traducción francesa del libro de Newton.

El rozamiento

Rozamiento estático y dinámico

Cuando una superficie se apoya sobre otra, el contacto produce dos fuerzas: la **normal** N , perpendicular a la superficie, y el **rozamiento**, paralelo a ella y opuesto al deslizamiento (o a la tendencia a deslizar). Como recordó la unidad 14, las dos tienen origen eléctrico.

- **Rozamiento estático:** mientras el cuerpo no desliza, el rozamiento vale exactamente lo necesario para impedirlo, hasta un máximo: $F_r \leq \mu_e N$.
- **Rozamiento dinámico** (o cinético): una vez que desliza, vale aproximadamente $F_r = \mu_d N$, casi independiente de la velocidad.

Los **coeficientes de rozamiento** μ_e y μ_d no tienen unidades y dependen de los dos materiales y del estado de las superficies, no del área de contacto. Normalmente $\mu_d < \mu_e$: cuesta más arrancar un mueble que mantenerlo en movimiento. Son valores aproximados, con una o dos cifras significativas:

SUPERFICIES	μ_e	μ_d
Caucho sobre hormigón seco	1,0	0,7
Caucho sobre hormigón mojado	0,7	0,5
Madera sobre madera	0,5	0,3
Acero sobre acero (seco)	0,6	0,3

Acero sobre acero (lubricado)	0,05	0,03
Hueso lubricado por líquido sinovial	0,016	0,015

(Valores aproximados de OpenStax, *College Physics 2e*, tabla 5.1. Para neumáticos sobre asfalto real, el coeficiente varía con el dibujo y el desgaste del neumático, la textura del pavimento y la presencia de agua, por lo que conviene tratarlo como un intervalo y no como un número fijo.)

La última fila es un puente con la **biología**: las articulaciones sinoviales, como la rodilla, deslizan con un coeficiente aún menor que el del acero lubricado.

El plano inclinado

Sobre un cuerpo de masa m apoyado en una rampa de ángulo θ actúan tres fuerzas: el peso $m g$, vertical; la normal, perpendicular a la rampa; y el rozamiento, paralelo a ella. Conviene descomponer el peso en dos componentes:

- paralela a la rampa, hacia abajo: $m g \sin \theta$;
- perpendicular a la rampa: $m g \cos \theta$, que compensa la normal, así que $N = m g \cos \theta$.

El cuerpo empieza a deslizar cuando la componente paralela supera el rozamiento estático máximo: $m g \sin \theta > \mu_e m g \cos \theta$, es decir, **$\tan \theta > \mu_e$** . El ángulo crítico no depende de la masa, y medirlo es una forma sencilla de obtener μ_e , que es lo que se hace en la práctica de esta unidad. Una vez en movimiento, la aceleración de bajada es $a = g (\sin \theta - \mu_d \cos \theta)$.

El mismo razonamiento conecta con la **geología**: un bloque de roca o una masa de suelo sobre una ladera está en equilibrio mientras la componente del peso a lo largo de la pendiente no supere la resistencia al deslizamiento. El agua que empapa el terreno puede reducir esa resistencia, y por eso las lluvias intensas son un desencadenante habitual de deslizamientos (unidad 7, riesgos geológicos). Los modelos geotécnicos reales son más complejos, pero parten de este balance de fuerzas.

Estática: estructuras en equilibrio

Las condiciones de equilibrio

Un cuerpo está en **equilibrio estático** si está en reposo y sigue en reposo. Para un cuerpo que se puede tratar como un punto, basta que la fuerza neta sea cero:

$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{0}$, es decir, $\Sigma F_x = 0$ y $\Sigma F_y = 0$

Para un cuerpo extenso, como una viga o una puerta, además no debe girar. La capacidad de una fuerza para hacer girar un cuerpo alrededor de un punto se mide con su **momento**: $M = F \cdot d$, donde d es la distancia perpendicular del punto a la línea de acción de la fuerza (en N m). La segunda condición de equilibrio es que la suma de momentos respecto a cualquier punto sea cero: **$\Sigma \mathbf{M} = \mathbf{0}$** . Para una palanca, $F_1 d_1 = F_2 d_2$: un balancín está equilibrado cuando el niño más pesado se sienta más cerca del eje.

CONCEPTO CLAVE

Equilibrio no significa ausencia de fuerzas

- Un cuerpo en equilibrio puede soportar fuerzas enormes; lo que es nulo es su **suma** (y la suma de sus momentos).
- Equilibrio significa aceleración cero, no velocidad cero: un coche a velocidad constante en una recta también está en equilibrio de fuerzas.
- Las condiciones de equilibrio se aplican a las fuerzas que actúan **sobre** un solo cuerpo, aislado en un diagrama de fuerzas.

MÉTODO

Cómo resolver un problema de equilibrio

- 1 Elige el cuerpo y aislalo: dibuja solo ese cuerpo, como un punto o una figura simple.
- 2 Dibuja todas las fuerzas que actúan sobre él (peso, normales, tensiones, rozamiento), cada una con el cuerpo que la ejerce. No dibujes las fuerzas que él ejerce sobre otros.
- 3 Elige unos ejes, normalmente horizontal y vertical, o paralelo y perpendicular a una rampa, y descompón cada fuerza: $F_x = F \cos \alpha$, $F_y = F \sin \alpha$, con α el ángulo con el eje x.
- 4 Escribe $\Sigma F_x = 0$ y $\Sigma F_y = 0$ (y $\Sigma M = 0$ si el cuerpo es extenso) y resuelve el sistema.
- 5 Comprueba las unidades y valora el resultado: una tensión negativa indica que el sentido supuesto era el contrario; un valor desproporcionado indica un error de ángulo o de componente.

15.1

EJERCICIO RESUELTO

Un semáforo colgado de un cable

ENUNCIADO

Un semáforo de 15,0 kg cuelga del punto medio de un cable sujeto a dos postes a la misma altura. Cada mitad del cable forma un ángulo de $20,0^\circ$ con la horizontal. a) Calcula la tensión de cada mitad del cable. b) ¿Por qué no se puede tensar el cable hasta dejarlo horizontal? Dato: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- Cuerpo aislado:** el punto del cable del que cuelga el semáforo. Sobre él actúan el peso del semáforo, $P = m g = 15,0 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 147 \text{ N}$, vertical hacia abajo, y las dos tensiones T , cada una dirigida a lo largo de su mitad de cable, a $20,0^\circ$ por encima de la horizontal.
- Eje x:** $T \cos 20,0^\circ - T \cos 20,0^\circ = 0$. Se cumple siempre: por simetría, las dos tensiones son iguales. Cada una tiene una componente horizontal de $T \cos 20,0^\circ$.
- Eje y:** $2 T \sin 20,0^\circ - m g = 0$, así que $T = m g / (2 \sin 20,0^\circ) = 147,15 \text{ N} / (2 \times 0,3420) = 215 \text{ N}$.
- Componente horizontal:** $T \cos 20,0^\circ = 215 \text{ N} \times 0,9397 = 202 \text{ N}$. Es lo que cada poste soporta tirando hacia el semáforo.
- Cable horizontal:** si el ángulo tiende a 0° , $\sin \theta$ tiende a 0 y $T = m g / (2 \sin \theta)$ crece sin límite. Con 5° ya serían 844 N. Ningún cable real lo aguanta: siempre debe combarse un poco.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$; el seno es adimensional, así que T sale en newtons. Datos con tres cifras significativas, resultado con tres.

¿ES RAZONABLE?

La tensión (215 N) es mayor que el peso (147 N), y es lo esperable: cada mitad del cable tira casi en horizontal, y solo una pequeña componente vertical sostiene el semáforo. Con un ángulo de 45° la tensión bajaría a 104 N. Los ingenieros dimensionan cables y tirantes con este cálculo, más un margen de seguridad.

Equilibrio en la naturaleza y en la técnica

- **Ingeniería:** puentes colgantes, grúas, tirantes de una pérgola o andamios se calculan con $\Sigma F = 0$ y $\Sigma M = 0$ aplicadas a cada nudo y a cada barra.
- **Biología:** el antebrazo funciona como una palanca con el apoyo en el codo. Con distancias ilustrativas (el bíceps se inserta a unos 4,0 cm del codo y la mano sostiene un objeto de 20 N a unos 35 cm), $\Sigma M = 0$ da una fuerza del bíceps de $20 \text{ N} \times 0,35 \text{ m} / 0,040 \text{ m} \approx 1,8 \times 10^2 \text{ N}$, despreciando el peso del propio antebrazo. Los músculos trabajan con palancas desfavorables a cambio de mover la mano deprisa y lejos, y por eso soportan fuerzas varias veces mayores que la carga.
- **Geología:** la estabilidad de una ladera o de un bloque sobre un plano de falla es un problema de equilibrio entre el peso y las fuerzas de contacto (sección anterior y unidad 7).

Dinámica aplicada: la seguridad vial

La distancia de detención

Desde que un conductor percibe un peligro hasta que el coche se para, el vehículo recorre la **distancia de detención**, suma de dos tramos:

- **Distancia de reacción:** mientras el conductor percibe, decide y lleva el pie al freno, el coche sigue a velocidad constante (MRU): $d_r = v \cdot t_r$.
- **Distancia de frenado:** con el freno pisado, el coche decelera (MRUA) hasta pararse: $d_f = v^2 / (2a)$. Si los neumáticos agarran con un coeficiente μ , la deceleración máxima es $a = \mu g$. Con las ruedas bloqueadas actúa el coeficiente dinámico; el ABS evita el bloqueo y se acerca al estático, algo mayor. En los cálculos de esta unidad se usa el dinámico de caucho sobre hormigón (0,70 en seco, 0,50 en mojado), que es la opción prudente.

El **tiempo de reacción** no es una constante. En una revisión de numerosos estudios, Green (2000) estimó unos 0,70-0,75 s cuando el conductor sabe cuándo y dónde aparecerá la señal, unos 1,25 s ante una señal inesperada pero habitual, como las luces de freno del coche de delante, y unos 1,5 s ante una sorpresa, como un objeto que irrumpe en la calzada. La distracción, el alcohol y el cansancio lo alargan; mirar el móvil 2 s a 120 km/h equivale a recorrer 67 m sin mirar la carretera.

15.2

EJERCICIO RESUELTO

¿Cuánto necesita un coche para detenerse?

ENUNCIADO

Un turismo circula a 90 km/h por una carretera llana y seca. Las luces de freno del coche de delante se encienden y el conductor reacciona en 1,25 s. Después frena con una deceleración constante correspondiente a $\mu = 0,70$. a) Calcula la distancia de reacción, la de frenado y la de detención. b) Repite el cálculo con la calzada mojada ($\mu = 0,50$). Dato: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

SOLUCIÓN PASO A PASO

- 1. Velocidad en el SI:** $v = 90 \text{ km/h} / 3,6 = 25,0 \text{ m/s}$.
- 2. Distancia de reacción (MRU):** $d_r = v t_r = 25,0 \text{ m/s} \times 1,25 \text{ s} = 31,25 \text{ m} \approx \mathbf{31 \text{ m}}$.
- 3. Deceleración en seco:** $a = \mu g = 0,70 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 6,87 \text{ m/s}^2$.
- 4. Distancia de frenado en seco (MRUA):** $d_f = v^2 / (2 a) = (25,0 \text{ m/s})^2 / (2 \times 6,87 \text{ m/s}^2) = 625 / 13,73 \text{ m} = \mathbf{46 \text{ m}}$. Tarda $t = v / a = 3,6 \text{ s}$ en pararse.
- 5. Distancia de detención en seco:** $31,25 \text{ m} + 45,5 \text{ m} = 76,8 \text{ m} \approx \mathbf{77 \text{ m}}$.
- 6. Calzada mojada:** $a = 0,50 \times 9,81 = 4,91 \text{ m/s}^2$; $d_f = 625 / 9,81 \text{ m} = 64 \text{ m}$; distancia de detención = $31,25 + 63,7 = \mathbf{95 \text{ m}}$. La reacción no cambia; el frenado aumenta un 40 %.

ANÁLISIS DE UNIDADES

: $(\text{m/s}) \cdot \text{s} = \text{m}$; $(\text{m}^2 \text{ s}^{-2}) / (\text{m} \text{ s}^{-2}) = \text{m}$. El coeficiente μ es adimensional y limita el resultado final a dos cifras significativas.

¿ES RAZONABLE?

77 m equivalen a unas 15-20 longitudes de coche, y más del 40 % se recorre antes de tocar el freno. El modelo supone deceleración constante y el máximo agarre durante toda la frenada, y un tiempo de reacción de conductor atento: es un límite optimista. La Norma 3.1-IC de carreteras (Orden FOM/273/2016) usa para el diseño 2 s de percepción y reacción y, a 90 km/h, un coeficiente movilizado de 0,334, que según la propia norma corresponde a deceleraciones cómodas; con esos valores, la distancia de parada en llano es $25,0 \times 2 + 625 / (2 \times 9,81 \times 0,334) = 145 \text{ m}$. Las carreteras se diseñan para que un conductor normal pueda parar sin apurar los neumáticos.

Qué dice la física sobre las normas de tráfico

- **La velocidad pesa al cuadrado.** A 120 km/h, con los datos del ejercicio 15.2 en seco, la distancia de detención es $42\text{ m} + 81\text{ m} = 123\text{ m}$, frente a 77 m a 90 km/h: un 33 % más de velocidad, un 60 % más de distancia.
- **La distancia de seguridad** con el vehículo de delante debe cubrir al menos la distancia de reacción, porque los dos coches frenan de forma parecida, pero el de detrás empieza tarde.
- **La distracción y el alcohol** no cambian la distancia de frenado, sino la de reacción, que crece en proporción a la velocidad.
- **El cinturón** convierte un frenado brusco en uno controlado: sujeta al ocupante para que decelere con el habitáculo, en lugar de chocar a la velocidad original contra el volante o el parabrisas.

EJEMPLO REAL

2024: siniestralidad vial en España

Según el informe anual de la DGT con datos consolidados, en 2024 murieron 1785 personas en 101 996 siniestros de tráfico con víctimas en España (fallecidos hasta 30 días después del siniestro): 1291 en vías interurbanas y 494 en vías urbanas; otras 9561 personas resultaron heridas hospitalizadas. En los siniestros mortales, los factores concurrentes más frecuentes fueron la distracción (30 %), el alcohol (28 %, en los siniestros en que se hizo la prueba a todos los conductores) y la velocidad inadecuada (22 %); en un mismo siniestro puede concurrir más de un factor, y estos porcentajes excluyen Cataluña y el País Vasco. Además, el 26 % de las personas fallecidas en turismos y furgonetas en vías interurbanas no llevaba el cinturón (de los casos en que se conoce). En términos físicos, la distracción y el alcohol alargan el tiempo de reacción, la velocidad inadecuada alarga la reacción y, sobre todo, el frenado, y no llevar cinturón es ignorar la primera ley de Newton.

Fuente: DGT, Observatorio Nacional de Seguridad Vial. Principales cifras de la siniestralidad vial. Año 2024 (datos consolidados, cómputo a 30 días), 24-10-2025

EJEMPLO REAL

2021: 30 km/h en las calles de un carril por sentido

El Real Decreto 970/2020 rebajó el límite genérico en vía urbana de 50 km/h a 30 km/h en las calles con un solo carril por sentido; esa modificación entró en vigor a los seis meses de su publicación en el BOE (11-11-2020), es decir, en mayo de 2021. La física de esta unidad ayuda a entenderlo. Ante un peatón que irrumpe en la calzada (una sorpresa, unos 1,5 s de reacción según Green, 2000) y con $\mu = 0,70$, un coche a 30 km/h se detiene en $12,5 \text{ m} + 5,1 \text{ m} = 18 \text{ m}$. A 50 km/h, en esos 18 m el conductor todavía no ha empezado a frenar (la distancia de reacción ya es de 20,8 m), así que llegaría al mismo punto a 50 km/h, con una energía cinética $(50/30)^2 = 2,8$ veces la que tendría a 30 km/h.

Fuente: Real Decreto 970/2020, de 10 de noviembre (BOE-A-2020-13969), que modifica el artículo 50 del Reglamento General de Circulación

Glosario

- **Velocidad:** cambio de posición por unidad de tiempo, en m/s ($1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$).
- **Aceleración:** cambio de velocidad por unidad de tiempo, en m/s^2 .
- **MRUA:** movimiento rectilíneo con aceleración constante; cumple $v = v_0 + a t$, $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ y $v^2 = v_0^2 + 2 a \Delta x$.
- **Inercia:** tendencia de un cuerpo a conservar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme; su medida es la masa.
- **Fuerza neta:** suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo; es igual a $m a$.
- **Fuerza normal:** fuerza perpendicular que ejerce una superficie sobre un cuerpo apoyado en ella.
- **Coeficiente de rozamiento:** número adimensional (μ_e estático, μ_d dinámico) que relaciona la fuerza de rozamiento máxima o de deslizamiento con la normal.
- **Fuerza centrípeta:** fuerza neta dirigida hacia el centro que necesita un cuerpo para describir una curva; vale $m v^2/r$.
- **Equilibrio estático:** estado de un cuerpo en reposo en el que la suma de fuerzas y la suma de momentos son nulas.
- **Momento de una fuerza:** producto de la fuerza por la distancia perpendicular de su línea de acción al punto de giro, en N m.
- **Tiempo de reacción:** intervalo entre la aparición de un estímulo y el inicio de la respuesta (en conducción, hasta pisar el freno).
- **Distancia de detención:** suma de la distancia de reacción y la de frenado.

Para profundizar

- **Principales cifras de la siniestralidad vial** — DGT, Observatorio Nacional de Seguridad Vial. Informes anuales con datos consolidados por tipo de vía, usuario y factor concurrente. [dgt.es](https://www.dgt.es)
- **College Physics 2e, capítulos 4 y 5** — OpenStax (Rice University). Texto abierto con las leyes de Newton y el rozamiento, con tablas de coeficientes. openstax.org

- **Fuerzas y Movimiento: Intro** — PhET, Universidad de Colorado. Simulación en español para aplicar fuerzas, cambiar el rozamiento y ver cómo responde el movimiento. phet.colorado.edu
- **Émilie du Châtelet** — *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (K. Detlefsen). Su obra y su traducción comentada de los *Principia*. plato.stanford.edu

Preguntas para reflexionar

1. Mucha gente cree que conducir a 120 km/h en lugar de a 100 km/h solo es «un poco más rápido». Con la física de esta unidad, ¿cómo le explicarías que la distancia de detención no aumenta en la misma proporción? ¿Qué otros factores, además de la velocidad, tendrías en cuenta?
2. Un anuncio afirma que unos neumáticos «frenan un 20 % antes». ¿Qué magnitud física tendría que cambiar para que eso fuera cierto? ¿Qué datos y en qué condiciones pedirías para creerlo?
3. La idea de que hace falta una fuerza para mantener el movimiento parece de sentido común y es falsa. ¿Por qué crees que es tan persistente? ¿Qué experiencia diseñarías para ponerla a prueba?

LO ESENCIAL

- MRU: $x = x_0 + v t$. MRUA: $v = v_0 + a t$, $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, $v^2 = v_0^2 + 2 a \Delta x$. Para pasar de km/h a m/s se divide entre 3,6.
- Primera ley: sin fuerza neta, la velocidad no cambia. Segunda: $F_{\text{net}} = m a$. Tercera: las fuerzas van por parejas que actúan sobre cuerpos distintos y por eso no se anulan.
- La «fuerza centrífuga» no la ejerce ningún cuerpo: en una curva, el rozamiento empuja el coche hacia dentro; $v_{\text{máx}} = \sqrt{\mu g r}$.
- Rozamiento estático hasta $\mu_e N$; dinámico, $\mu_d N$. En un plano inclinado, el cuerpo desliza si $\tan \theta > \mu_e$, sea cual sea su masa.
- Equilibrio: $\Sigma F = 0$ y, para cuerpos extensos, $\Sigma M = 0$. Un cable casi horizontal soporta una tensión mucho mayor que el peso que sostiene.
- Distancia de detención = $v t_r + v^2 / (2 \mu g)$: la reacción crece con v y el frenado con v^2 . En 2024 hubo en España 1785 fallecidos en siniestros de tráfico (DGT, a 30 días); distracción, alcohol y velocidad inadecuada fueron los factores más frecuentes en los mortales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. BOE-A-2022-5521, anexo II, «Ciencias Generales». <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5521>

-
2. Dirección General de Tráfico, Observatorio Nacional de Seguridad Vial (2025). *Principales cifras de la siniestralidad vial. Año 2024. Cómputo de las personas fallecidas a 30 días. Datos consolidados*. https://www.dgt.es/export/sites/web-DGT/.galleries/downloads/dgt-en-cifras/publicaciones/Principales_Cifras_Siniestralidad/INF_ANUAL_2024_v4_FINAL.pdf
 3. Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1-IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras. BOE n.º 55, de 4 de marzo de 2016, BOE-A-2016-2217, apartado 3.2.1 y tabla 3.1. <https://www.boe.es/boe/dias/2016/03/04/pdfs/BOE-A-2016-2217.pdf>
 4. Real Decreto 970/2020, de 10 de noviembre, por el que se modifican el Reglamento General de Circulación y el Reglamento General de Vehículos en materia de medidas urbanas de tráfico. BOE-A-2020-13969. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2020/11/10/970>
 5. Green, M. (2000). «How long does it take to stop?» Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transportation Human Factors*, 2(3), 195-216. https://doi.org/10.1207/sthf0203_1
 6. Urone, P. P., Hinrichs, R. et al. (2022). *College Physics 2e*. OpenStax, Rice University. Sección 5.1, «Friction», tabla 5.1. <https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/5-1-friction>

APÉNDICE

Guía PAU

Para llegar al examen con la cabeza en su sitio.

Material en revisión por el autor. Si ves un error, [avísanos](#).

Guía de la prueba PAU de Ciencias Generales

Esta guía resume cómo es el ejercicio de Ciencias Generales de la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU) en las dos comunidades cuyas comisiones de materia han publicado documentos que hemos podido leer: la **Comunitat Valenciana** y las **Illes Balears**. El resumen es de redacción propia y se cerró en **octubre de 2026** a partir de los documentos que se citan en cada caso. La estructura puede cambiar de un curso a otro: antes de la convocatoria, consulta el acta o las orientaciones vigentes de tu comunidad.

Aviso: si te presentas en otra comunidad, la estructura y la puntuación pueden ser distintas. De Andalucía existe un documento de orientaciones (curso 2023-2024), pero no se pudo descargar y su contenido no está verificado; del resto de comunidades no hemos revisado todavía ningún documento.

Lo común: un ejercicio competencial

El Real Decreto 534/2024, de 11 de junio, establece que los ejercicios de la PAU tienen un diseño competencial y evalúan las competencias específicas de cada materia a través de sus criterios de evaluación, los del Real Decreto 243/2022 en el caso de Ciencias Generales (art. 13.1; **texto consolidado en el BOE**). La estructura concreta (cuántas preguntas, cuánto vale cada bloque, qué optatividad hay) la decide cada comunidad.

En las dos comunidades revisadas se repiten tres rasgos:

- El examen se organiza **por bloques de saberes**, y el bloque A (*Construyendo ciencia: método, medida, comunicación*) **no tiene pregunta propia**: se evalúa dentro de los demás, en cómo se plantea un problema, cómo se trabaja con unidades y cifras significativas y cómo se argumenta.
- Los dos bloques fisicoquímicos, **B** (*Un universo de materia y energía*) y **E** (*Las fuerzas que nos mueven*), valen **la mitad del examen**.
- La optatividad es **interna a cada bloque**: no se elige entre dos exámenes completos, sino entre preguntas del mismo bloque. Solo algunos bloques tienen, además, una pregunta obligatoria (en la Comunitat Valenciana, Sistema Tierra y Biología; en las Illes Balears, B y C); en los demás se elige una de dos, sin parte obligatoria.

Comunitat Valenciana

Fuente: **acta de la reunión de coordinación de Ciencias Generales, noviembre de 2025, para la PAU 2026** (Conselleria y universidades valencianas). La estructura de la PAU 2025 se mantiene en 2026, pero el acta advierte de que **puede cambiar para la PAU 2027**; en ese caso, la comisión celebraría una segunda reunión con el profesorado durante el curso 2025-2026.

La comisión valenciana numera los bloques a su manera, y es la numeración que verás en los enunciados reales: **Bloque 1, Las fuerzas que nos mueven** (bloque E del currículo estatal); **Bloque 2, Un universo de materia y energía** (B); **Bloque 3, El sistema Tierra** (C); **Bloque 4, Biología para el siglo XXI** (D). Cada uno corresponde al apartado del mismo número del examen. En este cuaderno se usan las letras del Real Decreto 243/2022.

La misma acta remite a un documento de la comisión, *Matizaciones al currículo establecido en el Decreto 108/2022*, que delimita los contenidos evaluables. Es válido solo para el curso 2025-2026 y está en revisión continua: consúltalo antes de estudiar.

APARTADO	PESO	OPTATIVIDAD
Fuerzas (bloque E)	25 % (2,5 puntos)	Elegir 1 de 2 actividades
Materia y energía (bloque B)	25 % (2,5 puntos)	Elegir 1 de 2 actividades
Sistema Tierra (bloque C)	25 % (2,5 puntos)	1 actividad obligatoria + elegir 1 de 2
Biología del siglo XXI (bloque D)	25 % (2,5 puntos)	1 actividad obligatoria + elegir 1 de 2

Los puntos entre paréntesis son el 25 % de una calificación sobre 10. No hay preguntas específicas del bloque de método científico: se evalúa de forma transversal.

Illes Balears

Fuente: *acta de la reunión de coordinación de Ciències Generals de la Universitat de les Illes Balears, 23 de octubre de 2024*, referida a la PAU 2025. Es el último documento que hemos leído; comprueba si hay uno posterior. El acta enlaza la *matriz de especificaciones de la materia* y un *modelo de examen con la nueva estructura*, los dos de la UIB.

APARTADO	PUNTOS	OPTATIVIDAD
Bloque B (materia y energía)	3	3 preguntas: 1 obligatoria + elegir 1 de 2
Bloque C (sistema Tierra)	3	3 preguntas: 1 obligatoria + elegir 1 de 2
Bloque D (biología)	2	Elegir 1 de 2
Bloque E (fuerzas)	2	Elegir 1 de 2

Otros acuerdos del acta: se permite una **calculadora científica básica**, se entrega una **tabla periódica** y se pueden descontar **hasta 1 punto por la corrección lingüística**. Tampoco hay preguntas específicas del bloque A.

Qué contiene, por ahora, este cuaderno

Las secciones siguientes son **series de preguntas de estilo PAU para los bloques B y E**, que cubren la mitad del examen en las dos comunidades. Todas las preguntas son **originales**: siguen la estructura que describen las actas, pero no reproducen ningún examen. Cada una lleva su solución desarrollada y unos criterios de corrección orientativos, que son nuestros y no los de ningún tribunal.

SECCIÓN	COMUNIDAD	BLOQUE	UNIDADES DEL LIBRO
Materia y energía	Comunitat Valenciana	B	2, 3, 4 y 5
Fuerzas	Comunitat Valenciana	E	14 y 15
Bloque B	Illes Balears	B	2, 3 y 4

Todavía no hay preguntas de los bloques C (sistema Tierra) y D (biología). Las unidades de esos bloques están en preparación, y las preguntas llegarán con ellas. La unidad 6 (el universo y la Tierra), ya publicada, pertenece al bloque C y por eso tampoco tiene preguntas aquí.

Cómo se corrige un problema de ciencias

Las actas no publican un baremo pregunta a pregunta, pero sí dejan claro qué se valora: en los problemas numéricos, el **método de resolución** y la **valoración del resultado**; en las preguntas argumentativas, el **uso correcto del lenguaje científico**. En la práctica eso significa:

- **Plantea antes de sustituir.** Escribe la ley o la ecuación con letras ($pV = nRT$, $F = ma$), después sustituye con unidades. Un resultado correcto sin planteamiento puede no puntuar entero; un planteamiento correcto con un error de cálculo suele conservar buena parte de la nota.
- **Trabaja en el SI y escribe las unidades.** Pasa km/h a m/s, °C a K, L a m³ (o usa R en atm L mol⁻¹ K⁻¹ de forma coherente). Un número sin unidad no es un resultado.
- **Redondea con sentido.** El resultado no puede tener más cifras significativas que el dato menos preciso. Arrastra una o dos cifras más en los pasos intermedios y redondea al final.
- **Valora el resultado en una frase.** ¿Es razonable el orden de magnitud? ¿Cuadra con la conservación de la masa o de la energía? Un rendimiento mayor del 100 % o una velocidad absurda indican un error, y decirlo también puntúa.
- **En las preguntas de razonar, usa el vocabulario preciso:** calor no es temperatura, peso no es masa, una pareja de acción y reacción actúa sobre cuerpos distintos. En las Illes Balears, además, la corrección lingüística puede restar hasta un punto.
- **Si eliges entre dos preguntas, responde solo a una** y deja claro cuál es.

Materia y energía (bloque B): actividades modelo Comunitat Valenciana

Materia y energía: actividades de estilo PAU (Comunitat Valenciana)

En la Comunitat Valenciana el apartado de materia y energía vale el 25 % del examen (2,5 puntos) y se responde **una de dos actividades** (acta de coordinación de noviembre de 2025; véase la guía). Las dos actividades de esta sección son originales y siguen ese formato: cada una mezcla un problema numérico con una parte de razonamiento. El reparto de puntos de cada apartado es una propuesta nuestra para practicar.

Cómo usar esta sección. Elige una actividad, como en el examen, y resuélvela sin mirar la solución. Después compara método, unidades, cifras significativas y la frase final de valoración, no solo el número.

Datos para las dos actividades: $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; masas atómicas (CIAAW): $H = 1,0080$; $C = 12,011$; $O = 15,999$; capacidad calorífica específica del agua líquida, $c = 4,18 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$.

Actividad 1. La bombona de butano (2,5 puntos)

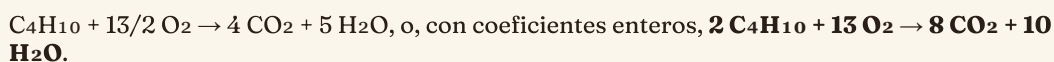
Enunciado

Una bombona doméstica contiene 12,5 kg de butano, C_4H_{10} , que se quema por completo con el oxígeno del aire y forma dióxido de carbono y agua.

- Escribe y ajusta la ecuación química de la combustión. (0,5 puntos)
- Calcula la masa de dióxido de carbono que se emite al quemar toda la bombona y comprueba que se cumple la ley de conservación de la masa. (1 punto)
- ¿Qué volumen de oxígeno, medido a $20,0 \text{ °C}$ y $101\,325 \text{ Pa}$, se consume? Si el aire contiene un 21 % de oxígeno en volumen, ¿qué volumen de aire hace falta? (0,5 puntos)
- Si la combustión es incompleta por falta de aire, se forma CO , un gas tóxico. Nombra este compuesto y formula o nombra, según corresponda: CaO , SO_3 , hidróxido de calcio, peróxido de hidrógeno. (0,5 puntos)

Solución

a) Se ajusta primero el carbono, después el hidrógeno y por último el oxígeno:



Comprobación: $C, 8 = 8$; $H, 20 = 20$; $O, 26 = 16 + 10$.

b) Masas molares: $M(C_4H_{10}) = 4 \times 12,011 + 10 \times 1,0080 = 58,124 \text{ g/mol}$; $M(CO_2) = 44,009 \text{ g/mol}$; $M(O_2) = 31,998 \text{ g/mol}$; $M(H_2O) = 18,015 \text{ g/mol}$.

- $n(C_4H_{10}) = m / M = 12\,500 \text{ g} / 58,124 \text{ g mol}^{-1} = 215,06 \text{ mol}$.

- Por la ecuación, 2 mol de butano dan 8 mol de CO₂: $n(\text{CO}_2) = 4 \times 215,06 \text{ mol} = 860,2 \text{ mol}$.
- $m(\text{CO}_2) = 860,2 \text{ mol} \times 44,009 \text{ g/mol} = 3,786 \times 10^4 \text{ g} = \mathbf{37,9 \text{ kg}}$.

Conservación de la masa: se consumen $(13/2) \times 215,06 = 1397,9 \text{ mol}$ de O₂ (44,73 kg) y se forman $5 \times 215,06 = 1075,3 \text{ mol}$ de H₂O (19,37 kg). Reactivos: 12,5 kg + 44,73 kg = 57,23 kg. Productos: 37,86 kg + 19,37 kg = 57,23 kg. Las dos sumas coinciden.

c) Con la ecuación de los gases ideales, $T = 20,0 + 273,15 = 293,15 \text{ K}$:

$$V(\text{O}_2) = n R T / p = 1397,9 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 293,15 \text{ K} / 101\,325 \text{ Pa} = \mathbf{33,6 \text{ m}^3}.$$

Como el oxígeno es el 21 % del volumen de aire: $V(\text{aire}) = 33,6 \text{ m}^3 / 0,21 = \mathbf{1,6 \times 10^2 \text{ m}^3}$ (dos cifras significativas, las del 21 %).

d) CO: **monóxido de carbono** (aquí el prefijo «mono» se mantiene). CaO: **óxido de calcio** (el calcio solo tiene número de oxidación +2, así que no se indica). SO₃: **trióxido de azufre**. Hidróxido de calcio: $\text{Ca}^{2+} + \text{OH}^- \rightarrow \mathbf{\text{Ca}(\text{OH})_2}$. Peróxido de hidrógeno: **H₂O₂** (el grupo O₂²⁻ no se simplifica).

Análisis de unidades: $\text{g} / (\text{g mol}^{-1}) = \text{mol}$; $\text{mol} \times \text{g mol}^{-1} = \text{g}$; $\text{mol} \cdot \text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot \text{K} / \text{Pa} = \text{J} / (\text{N m}^{-2}) = \text{N m} / (\text{N m}^{-2}) = \text{m}^3$.

Valoración: la masa de CO₂ (37,9 kg) es unas tres veces la del butano porque cada molécula de CO₂ incorpora dos átomos de oxígeno tomados del aire; no hay contradicción con la conservación de la masa, como muestra el balance. El volumen de aire necesario equivale al de un local de 60 m² de planta y 2,7 m de altura (162 m³): de ahí la importancia de ventilar los locales con aparatos de gas.

Criterios de corrección orientativos

- a) Ecuación correcta y ajustada: 0,5. Fórmulas correctas mal ajustadas: 0,25.
- b) Paso a moles y relación estequiométrica: 0,5; masa de CO₂ con unidades: 0,25; balance de masas: 0,25.
- c) Uso correcto de $p V = n R T$ con T en kelvin: 0,25; volumen de aire: 0,25.
- d) 0,1 por cada fórmula o nombre correcto.

Actividad 2. Un termo eléctrico y una máquina térmica (2,5 puntos)

Enunciado

Un termo eléctrico de 1500 W calienta 80,0 L de agua desde 15,0 °C hasta 60,0 °C. El 90,0 % de la energía eléctrica que consume llega al agua. Toma la densidad del agua como 1,00 kg/L.

- Calcula la energía que recibe el agua, en julios y en kWh. (0,5 puntos)
- Calcula la energía eléctrica consumida, el tiempo que tarda en calentar el agua y el coste si el kWh cuesta 0,150 € (precio supuesto). (1 punto)
- Un estudiante afirma: «Cuando el agua está a 60 °C, el termo tiene más calor que cuando está a 15 °C». Corrige la frase utilizando con precisión los conceptos de calor, temperatura y energía interna. (0,5 puntos)
- La electricidad que alimenta el termo puede venir de una central térmica. Calcula el rendimiento máximo de una máquina térmica que trabaja entre 600 °C y 25 °C y explica por qué el rendimiento real es menor. (0,5 puntos)

Solución

a) $m = 80,0 \text{ L} \times 1,00 \text{ kg/L} = 80,0 \text{ kg}$; $\Delta T = 60,0 \text{ °C} - 15,0 \text{ °C} = 45,0 \text{ K}$.

$Q = m c \Delta T = 80,0 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 45,0 \text{ K} = \mathbf{1,50 \times 10^7 \text{ J}}$. En kWh: $1,505 \times 10^7 \text{ J} / 3,6 \times 10^6 \text{ J kWh}^{-1} = \mathbf{4,18 \text{ kWh}}$.

b) Del rendimiento, $\eta = E_{\text{útil}} / E_{\text{consumida}}$:

• $E_{\text{consumida}} = 1,505 \times 10^7 \text{ J} / 0,900 = \mathbf{1,67 \times 10^7 \text{ J} = 4,64 \text{ kWh}}$.

- $t = E / P = 1,672 \times 10^7 \text{ J} / 1500 \text{ W} = 1,11 \times 10^4 \text{ s} = \mathbf{3,10 \text{ h}}$ (unas 3 h y 6 min).
- Coste = $4,644 \text{ kWh} \times 0,150 \text{ €/kWh} = \mathbf{0,70 \text{ €}}$.

c) Un cuerpo no «tiene» calor. El calor es la energía que se **transfiere** de un cuerpo a otro por una diferencia de temperatura. La frase correcta sería: «A 60°C el agua tiene **mayor temperatura y más energía interna** que a 15°C , porque ha **recibido calor** de la resistencia eléctrica». La temperatura indica el grado de agitación de las partículas; la energía interna es la energía total de esas partículas.

d) Con las temperaturas en kelvin, $T_c = 873,15 \text{ K}$ y $T_f = 298,15 \text{ K}$:

$\eta_{\text{máx}} = 1 - T_f / T_c = 1 - 298,15 \text{ K} / 873,15 \text{ K} = 0,659$, es decir, **65,9 %**.

Es el límite de una máquina ideal (segundo principio): ninguna máquina que funcione por ciclos convierte en trabajo todo el calor que recibe, porque una parte se cede siempre al foco frío. Las máquinas reales se quedan por debajo porque, además, hay rozamientos, pérdidas de calor por las paredes y procesos irreversibles. La energía no desaparece: se degrada a formas menos aprovechables.

Análisis de unidades: $\text{kg} \cdot \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot \text{K} = \text{J}$; $\text{J} / \text{W} = \text{J} / (\text{J s}^{-1}) = \text{s}$; $\text{kWh} \times \text{€/kWh} = \text{€}$; K / K se cancela en el rendimiento.

Valoración: el rendimiento del termo (90 %) es alto porque la resistencia está dentro del agua; la energía que falta calienta el depósito y el aire. Calentar 80 L de agua para duchas consume en una sola vez tanta energía como una bombilla LED de 9 W encendida unas 500 h ($4,64 \text{ kWh} / 0,009 \text{ kW} = 516 \text{ h}$), lo que explica el peso del agua caliente en la factura doméstica.

Criterios de corrección orientativos

- a) $Q = m c \Delta T$ con ΔT correcto: 0,25; conversión a kWh: 0,25.
- b) Energía consumida a partir del rendimiento: 0,4; tiempo: 0,3; coste: 0,3.
- c) Distingue calor (transferencia) de temperatura y energía interna (propiedades): 0,5. Sin vocabulario preciso: 0,25 como máximo.
- d) Cálculo con temperaturas absolutas: 0,25 (con $^\circ\text{C}$, 0); explicación: 0,25.

Fuerzas (bloque E): actividades modelo Comunitat Valenciana

Fuerzas: actividades de estilo PAU (Comunitat Valenciana)

El apartado de fuerzas vale el 25 % del examen (2,5 puntos) y se responde **una de dos actividades** (acta de coordinación de noviembre de 2025). Las dos actividades son originales; el reparto de puntos de cada apartado es una propuesta nuestra para practicar.

Datos para las dos actividades: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ en la superficie terrestre; $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$; producto $G M$ de la Tierra, $GM = 3,9860 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$; radio medio de la Tierra, $R = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$ (NASA); $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$; $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (CODATA 2022).

Actividad 1. Una curva con la calzada mojada (2,5 puntos)

Enunciado

Un turismo de 1200 kg se aproxima a una curva plana (sin peralte) de 80,0 m de radio. La calzada está mojada y el coeficiente de rozamiento entre neumáticos y asfalto que se toma como prudente es $\mu = 0,50$.

- Calcula la velocidad máxima, en m/s y en km/h, a la que puede tomar la curva sin derrapar, y la fuerza de rozamiento que actúa sobre el coche a esa velocidad. (0,75 puntos)
- El coche circula a 90 km/h. ¿Qué distancia mínima necesita, frenando con la máxima deceleración que permite el rozamiento, para llegar a la curva a la velocidad del apartado anterior? (0,75 puntos)
- En la curva, un pasajero dice que «la fuerza centrífuga le empuja contra la puerta». Explica lo que ocurre con las leyes de Newton e identifica la fuerza que hace girar al coche y su pareja de acción y reacción. (0,75 puntos)
- Con la calzada seca ($\mu = 0,70$), ¿cuál sería la velocidad máxima en la misma curva? ¿Depende de la masa del vehículo? (0,25 puntos)

Solución

a) Para describir la curva, la fuerza neta sobre el coche debe apuntar al centro y valer $m v^2 / r$. En una curva plana esa fuerza solo puede darla el rozamiento, cuyo valor máximo es $\mu N = \mu m g$:

$$m v^2 / r = \mu m g \rightarrow v_{\text{máx}} = \sqrt{(\mu g r)} = \sqrt{(0,50 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 80,0 \text{ m})} = \mathbf{19,8 \text{ m/s} \approx 71 \text{ km/h.}$$

A esa velocidad el rozamiento es el máximo: $F_r = \mu m g = 0,50 \times 1200 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{5,9 \times 10^3 \text{ N}}$, dirigido hacia el centro de la curva.

b) Velocidad inicial: 90 km/h / 3,6 = 25,0 m/s. Deceleración máxima: $a = \mu g = 0,50 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 4,91 \text{ m/s}^2$. Del MRUA, $v^2 = v_0^2 - 2 a \Delta x$:

$$\Delta x = (v_0^2 - v^2) / (2 a) = [(25,0 \text{ m/s})^2 - (19,8 \text{ m/s})^2] / (2 \times 4,91 \text{ m/s}^2) = (625 - 392) \text{ m}^2/\text{s}^2 / 9,81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{24 \text{ m.}}$$

Tarda $(25,0 - 19,8) \text{ m/s} / 4,91 \text{ m/s}^2 = 1,1 \text{ s}$. A esa distancia hay que sumar la de reacción del conductor: con 1 s de reacción, 25 m más.

c) Visto desde la carretera, ninguna fuerza empuja al pasajero hacia fuera. Por la **primera ley** (inercia), el pasajero tiende a seguir en línea recta; el coche gira y la puerta se encuentra con él, y es **la puerta la que empuja al pasajero hacia dentro**, hacia el centro de la curva, proporcionándole la fuerza centrípeta. La «fuerza centrífuga» solo aparece como fuerza ficticia si se describe el movimiento desde el propio coche, que es un sistema acelerado.

La fuerza que hace girar al coche es el **rozamiento estático que el asfalto ejerce sobre los neumáticos**, hacia el centro. Su pareja (**tercera ley**) es la fuerza que los neumáticos ejercen sobre el asfalto, del mismo módulo y sentido contrario, hacia fuera. Actúan sobre cuerpos distintos, por eso no se anulan.

d) $v_{\text{máx}} = \sqrt{(0,70 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 80,0 \text{ m})} = 23,4 \text{ m/s} \approx \mathbf{84 \text{ km/h}}$. No depende de la masa: aparece en los dos miembros de $m v^2 / r = \mu m g$ y se simplifica.

Análisis de unidades: $\sqrt{(m \text{ s}^{-2} \cdot m)} = m/s$; $kg \cdot m \text{ s}^{-2} = N$; $(m^2 \text{ s}^{-2}) / (m \text{ s}^{-2}) = m$. El coeficiente μ tiene dos cifras significativas, y por eso los resultados se dan con dos (salvo 19,8 m/s, que se arrastra con una más para el apartado b).

Valoración: con agua, la velocidad máxima baja de 84 a 71 km/h. Un coche que llega a 90 km/h necesita empezar a frenar al menos 24 m antes de la curva, y bastante antes si se cuenta el tiempo de reacción. El modelo es optimista: supone el agarre máximo durante toda la maniobra.

Criterios de corrección orientativos

- a) Igualar el rozamiento máximo a la fuerza centrípeta: 0,4; velocidad en las dos unidades: 0,2; fuerza: 0,15.
- b) Conversión a m/s: 0,15; deceleración μg : 0,2; ecuación del MRUA y resultado: 0,4.
- c) Inercia y fuerza hacia el centro: 0,4; rozamiento y su pareja sobre cuerpos distintos: 0,35.
- d) 0,15 el cálculo y 0,1 la justificación.

Actividad 2. Gravedad en órbita y fuerzas en el átomo (2,5 puntos)

Enunciado

La Estación Espacial Internacional orbita a unos 420 km sobre la superficie terrestre. Considera una órbita circular a esa altura.

- Calcula la intensidad del campo gravitatorio terrestre a esa altura y el peso de un astronauta de 75,0 kg dentro de la estación. Compáralo con su peso en la superficie y explica por qué el astronauta flota. (0,75 puntos)
- Calcula la velocidad orbital de la estación y el tiempo que tarda en dar una vuelta. (0,75 puntos)
- En un átomo de hidrógeno, el electrón y el protón están separados una distancia típica de $5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$. Calcula la fuerza eléctrica y la fuerza gravitatoria entre ellos y su cociente. (0,75 puntos)
- Si la repulsión eléctrica entre protones es tan grande, ¿qué interacción mantiene unidos los núcleos atómicos? Indica dos de sus características. (0,25 puntos)

Solución

a) Distancia al centro de la Tierra: $r = R + h = 6,371 \times 10^6 \text{ m} + 0,420 \times 10^6 \text{ m} = 6,791 \times 10^6 \text{ m}$.
 $g(h) = GM / r^2 = 3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} / (6,791 \times 10^6 \text{ m})^2 = \mathbf{8,64 \text{ m/s}^2}$.

Peso en la estación: $P = m g(h) = 75,0 \text{ kg} \times 8,64 \text{ m/s}^2 = \mathbf{648 \text{ N}}$, frente a $75,0 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 736 \text{ N}$ en la superficie: un 88 %. El astronauta flota no porque no haya gravedad, sino porque él y la estación **caen juntos** alrededor de la Tierra con la misma aceleración: el suelo de la estación no tiene que sostenerlo.

b) La atracción gravitatoria es la fuerza centrípeta: $GMm / r^2 = m v^2 / r$, de donde

$$v = \sqrt{GM / r} = \sqrt{(3,9860 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} / 6,791 \times 10^6 \text{ m})} = \mathbf{7,66 \times 10^3 \text{ m/s}} \text{ (unos 27 600 km/h).}$$

$$T = 2\pi r / v = 2\pi \times 6,791 \times 10^6 \text{ m} / 7,661 \times 10^3 \text{ m/s} = 5,57 \times 10^3 \text{ s} \approx \mathbf{92,8 \text{ min.}}$$

c) Fuerza eléctrica (ley de Coulomb):

$$F_e = k e^2 / r^2 = 8,988 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2} \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})^2 / (5,29 \times 10^{-11} \text{ m})^2 = \mathbf{8,24 \times 10^{-8} \text{ N}}, \text{ de atracción.}$$

Fuerza gravitatoria (ley de Newton):

$$F_g = G m_p m_e / r^2 = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \times 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} / (5,29 \times 10^{-11} \text{ m})^2 = \mathbf{3,63 \times 10^{-47} \text{ N}}, \text{ de atracción.}$$

Cociente: $F_e / F_g = 8,24 \times 10^{-8} / 3,63 \times 10^{-47} = \mathbf{2,27 \times 10^{39}}$. No depende de la distancia, porque las dos fuerzas disminuyen con $1/r^2$.

d) La **interacción nuclear fuerte**. Es atractiva y, a distancias del orden del tamaño de un núcleo (10^{-15} m), mucho más intensa que la repulsión eléctrica; pero tiene un alcance muy corto y es despreciable fuera del núcleo.

Análisis de unidades: $(\text{m}^3 \text{ s}^{-2}) / \text{m}^2 = \text{m s}^{-2}$; $\sqrt{(\text{m}^3 \text{ s}^{-2} / \text{m})} = \text{m/s}$; $\text{m} / (\text{m s}^{-1}) = \text{s}$; $(\text{N m}^2 \text{ C}^{-2}) \cdot \text{C}^2 / \text{m}^2 = \text{N}$; $(\text{N m}^2 \text{ kg}^{-2}) \cdot \text{kg}^2 / \text{m}^2 = \text{N}$.

Valoración: g a 420 km sigue siendo casi el 90 % del valor en superficie, lo que desmiente la idea de que «en órbita no hay gravedad». En el átomo, la gravedad es unas 10^{39} veces más débil que la fuerza eléctrica: la química y la estructura de la materia son cosa de la interacción electromagnética, y la gravedad solo domina a gran escala, donde la materia es eléctricamente neutra y las masas se suman.

Criterios de corrección orientativos

- a) r medido desde el centro de la Tierra: 0,25; g y peso: 0,25; explicación de la ingravidez: 0,25.
- b) Igualdad gravitatoria-centrípeta: 0,3; velocidad: 0,2; período: 0,25.
- c) 0,3 cada fuerza; 0,15 el cociente.
- d) Nombre de la interacción: 0,1; dos características: 0,15.

Bloque B (materia y energía): preguntas modelo Illes Balears

Bloque B: preguntas de estilo PAU (Illes Balears)

En las Illes Balears el bloque B vale 3 puntos y tiene **tres preguntas: una obligatoria y dos para elegir una** (acta de coordinación de la UIB de 23 de octubre de 2024). El acta fija el total del bloque, no el reparto entre preguntas; aquí se reparte a partes iguales (1,5 + 1,5 puntos) solo para practicar. Las preguntas son originales.

Cómo usar esta sección. Resuelve la pregunta obligatoria y elige una de las otras dos, como en el examen. En la prueba se entrega una tabla periódica y se usa una calculadora científica básica: practica con las mismas condiciones.

Datos para las tres preguntas: $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$; masas atómicas (CIAAW): $\text{Al} = 26,982$; $\text{Cl} = 35,45$.

Pregunta 1 (obligatoria). Una botella de buceo (1,5 puntos)

Enunciado

Una botella de buceo de 12,0 L contiene aire a 200 bar y 20,0 °C. Considera el aire como un gas ideal.

- Calcula la cantidad de aire, en moles, que contiene la botella. (0,4 puntos)
- ¿Qué volumen ocuparía ese aire a 1,013 bar y a la misma temperatura? (0,3 puntos)
- La botella se deja al sol y el aire alcanza 50,0 °C. Calcula la nueva presión y explica, con el modelo cinético-molecular, por qué aumenta. (0,5 puntos)
- Clasifica como elemento, compuesto o mezcla (homogénea o heterogénea): el aire de la botella, el nitrógeno puro y el agua destilada. ¿Por qué el aire no es un compuesto, aunque su composición sea casi constante? (0,3 puntos)

Solución

a) Datos en el SI: $p = 200 \times 10^5 \text{ Pa} = 2,00 \times 10^7 \text{ Pa}$; $V = 12,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; $T = 20,0 + 273,15 = 293,15 \text{ K}$.

$n = pV / (RT) = 2,00 \times 10^7 \text{ Pa} \times 12,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 293,15 \text{ K}) = \mathbf{98,5 \text{ mol}}$.

b) Con n y T constantes se cumple la ley de Boyle, $p_1 V_1 = p_2 V_2$:

$V_2 = p_1 V_1 / p_2 = 200 \text{ bar} \times 12,0 \text{ L} / 1,013 \text{ bar} = \mathbf{2,37 \times 10^3 \text{ L}}$ (2,37 m³).

c) Con n y V constantes, p / T es constante (ley de Gay-Lussac), con T en kelvin ($T_2 = 323,15 \text{ K}$):

$p_2 = p_1 T_2 / T_1 = 200 \text{ bar} \times 323,15 \text{ K} / 293,15 \text{ K} = \mathbf{220 \text{ bar}}$.

Según el modelo cinético-molecular, al subir la temperatura aumenta la energía cinética media de las partículas del gas: se mueven más deprisa, chocan con las paredes con más frecuencia y con más fuerza, y la fuerza por unidad de superficie, la presión, aumenta. Como el recipiente es rígido, el volumen no puede crecer para compensarlo.

d) El aire es una **mezcla homogénea** (una disolución gaseosa, sobre todo de nitrógeno y oxígeno). El nitrógeno puro es un **elemento** (una sustancia pura formada por moléculas N₂). El

agua destilada es un **compuesto** (sustancia pura con hidrógeno y oxígeno unidos en proporción fija, H₂O). El aire no es un compuesto porque sus componentes no están unidos químicamente: cada gas conserva sus propiedades, la proporción puede variar (por ejemplo, el vapor de agua) y se pueden separar por métodos físicos, como la destilación del aire licuado.

Análisis de unidades: $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot \text{K}) = (\text{N m}^{-2} \cdot \text{m}^3) / (\text{J mol}^{-1}) = \text{J} / (\text{J mol}^{-1}) = \text{mol}$. En b y c, las unidades de presión o de temperatura se cancelan: basta con usar las mismas en los dos estados (en c, obligatoriamente kelvin).

Valoración: 12 L de botella equivalen a unos 2,4 m³ de aire a presión atmosférica, el volumen de un armario grande; por eso la botella permite respirar bajo el agua durante un tiempo razonable. A 200 bar el aire ya no es un gas ideal perfecto, así que los resultados son una aproximación. El aumento de presión al sol (un 10 %) explica por qué las botellas no deben dejarse expuestas al calor.

Criterios de corrección orientativos

- a) Conversión de unidades y T en kelvin: 0,2; resultado: 0,2.
- b) Ley de Boyle bien aplicada: 0,3.
- c) Cálculo: 0,25 (0 si se usa °C); explicación microscópica: 0,25.
- d) 0,05 por cada clasificación; 0,15 la justificación.

Pregunta 2 (opcional). El cloro: átomo, enlace y nomenclatura (1,5 puntos)

Enunciado

El cloro (Z = 17) tiene dos isótopos estables: ³⁵Cl, de masa 34,968 853 u y abundancia 75,76 %, y ³⁷Cl, de masa 36,965 903 u y abundancia 24,24 %. Las masas son las de la CIAAW. La CIAAW publica hoy las abundancias como intervalos ([75,5 %; 76,1 %] y [23,9 %; 24,5 %]), porque varían de una muestra natural a otra. Los valores del enunciado son la composición isotópica representativa de la IUPAC (Berglund y Wieser, *Isotopic compositions of the elements 2009*, Pure Appl. Chem. 83, 397-410, 2011) y caen dentro de esos intervalos.

- a) Indica el número de protones, neutrones y electrones de cada isótopo en el átomo neutro y calcula la masa atómica media del cloro. (0,4 puntos)
- b) Escribe la configuración electrónica del cloro, indica su grupo y su periodo, y justifica qué ion forma con más facilidad. (0,35 puntos)
- c) Explica qué tipo de enlace hay en el cloruro de sodio, en el cloro (Cl₂) y en el cloruro de hidrógeno, y por qué a temperatura ambiente el cloruro de sodio es un sólido que funde a temperatura alta y el cloro es un gas. (0,45 puntos)
- d) Formula o nombra, según corresponda: MgCl₂, OCl₂, cloruro de hierro(III), FeCl₂. (0,3 puntos)

Solución

a) Los dos tienen Z = 17: **17 protones** y, en el átomo neutro, **17 electrones**. Neutrones, N = A - Z: **18** en el ³⁵Cl y **20** en el ³⁷Cl.

Masa atómica media, ponderada por las abundancias:

$$A_r(\text{Cl}) = 34,968\,853 \times 0,7576 + 36,965\,903 \times 0,2424 = \mathbf{35,45}.$$

b) **1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁵**. El último nivel ocupado es el 3: **periodo 3**. Tiene 7 electrones de valencia (3s² 3p⁵): **grupo 17** (halógenos). Le falta un electrón para completar el octeto y tiene una electronegatividad alta, así que tiende a ganar un electrón y formar el ion **cloruro**, Cl⁻, con la configuración del argón.

- c)
 - **NaCl, enlace iónico:** el sodio (metal, electronegatividad baja) cede un electrón al cloro (no metal, electronegatividad alta). Se forman iones Na⁺ y Cl⁻ que se atraen en todas direcciones

y forman una red cristalina. Para fundirlo hay que vencer esas atracciones entre iones, que son fuertes: por eso es sólido y funde a temperatura alta.

- **Cl₂, enlace covalente** (apolar): dos átomos iguales comparten un par de electrones. El enlace dentro de la molécula es fuerte, pero las moléculas se atraen entre sí muy débilmente, así que basta poca energía para separarlas: a temperatura ambiente es un gas.
- **HCl, enlace covalente polar**: comparten un par de electrones, pero el cloro, más electronegativo, lo atrae más; la molécula tiene un extremo parcialmente negativo (Cl) y otro positivo (H). También es un gas a temperatura ambiente, por las mismas razones que el Cl₂.

d) MgCl₂: **cloruro de magnesio** (o dicloruro de magnesio; el magnesio solo tiene +2). OCl₂: **dicloruro de oxígeno** (según las recomendaciones de la IUPAC de 2005, el oxígeno se escribe antes que los halógenos). Cloruro de hierro(III): **FeCl₃**. FeCl₂: **cloruro de hierro(II)** o **dicloruro de hierro**.

Valoración: la masa media (35,45) está más cerca de 35 que de 37 porque el ³⁵Cl es unas tres veces más abundante; coincide con el valor de la tabla periódica. Que no sea un número entero no es un error: es una media ponderada de isótopos.

Criterios de corrección orientativos

- a) Partículas: 0,15; masa media ponderada: 0,25.
- b) Configuración: 0,15; grupo y periodo: 0,1; ion y justificación: 0,1.
- c) 0,1 por cada tipo de enlace bien explicado; 0,15 la comparación de propiedades.
- d) 0,075 por cada fórmula o nombre.

Pregunta 3 (opcional). Aluminio y ácido clorhídrico (1,5 puntos)

Enunciado

Se echan 5,40 g de aluminio en polvo en 500 mL de ácido clorhídrico (HCl en disolución acuosa) de concentración 1,00 mol/L. Se forman cloruro de aluminio en disolución e hidrógeno gaseoso.

- Escribe y ajusta la ecuación química y nombra el cloruro de aluminio que se forma. (0,3 puntos)
- Determina el reactivo limitante. (0,4 puntos)
- Calcula el volumen de hidrógeno que se obtiene, medido a 25,0 °C y 101 325 Pa, y la masa del reactivo en exceso que sobra. (0,5 puntos)
- Si se recogen 5,50 L de hidrógeno en esas condiciones, ¿cuál es el rendimiento? ¿Qué indicaría un rendimiento mayor del 100 %? (0,3 puntos)

Solución

a) **2 Al + 6 HCl → 2 AlCl₃ + 3 H₂**. Comprobación: Al, 2 = 2; H, 6 = 6; Cl, 6 = 6. AlCl₃: **cloruro de aluminio** (el aluminio solo tiene número de oxidación +3, así que no se indica; con prefijos, triclورو de aluminio).

b) Cantidades de partida:

- $n(\text{Al}) = 5,40 \text{ g} / 26,982 \text{ g mol}^{-1} = 0,2001 \text{ mol}$.
- $n(\text{HCl}) = c V = 1,00 \text{ mol/L} \times 0,500 \text{ L} = 0,500 \text{ mol}$.

Para consumir todo el aluminio harían falta $3 \times 0,2001 = 0,600 \text{ mol}$ de HCl, y solo hay 0,500 mol. **El limitante es el HCl**; el aluminio está en exceso.

c) Con el HCl como limitante, 6 mol de HCl dan 3 mol de H₂: $n(\text{H}_2) = 0,500 \text{ mol} / 2 = 0,250 \text{ mol}$. Con T = 298,15 K:

$V(\text{H}_2) = n R T / p = 0,250 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 298,15 \text{ K} / 101 325 \text{ Pa} = 6,12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = \mathbf{6,12 \text{ L}}$.

Aluminio que reacciona: $n(\text{Al}) = 0,500 \text{ mol} / 3 = 0,1667 \text{ mol}$, es decir, $0,1667 \text{ mol} \times 26,982 \text{ g/mol} = 4,50 \text{ g}$. Sobran $5,40 \text{ g} - 4,50 \text{ g} = \mathbf{0,90 \text{ g de aluminio}}$.

d) Rendimiento = $5,50 \text{ L} / 6,12 \text{ L} \times 100 = \mathbf{89,9 \%}$. Un rendimiento mayor del 100 % sería imposible: indicaría un error de medida (por ejemplo, el gas recogido contiene vapor de agua o aire) o un error en los cálculos.

Análisis de unidades: $\text{mol/L} \times \text{L} = \text{mol}$; $\text{mol} \cdot \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot \text{K} / \text{Pa} = \text{m}^3$; en el rendimiento, L / L se cancela.

Valoración: el reactivo limitante no es el que menos pesa, ni siquiera el que menos moles tiene (hay más moles de HCl que de Al): hay que comparar con los coeficientes. El aluminio sobrante (0,90 g, una sexta parte del inicial) se vería como polvo metálico en el fondo del recipiente al terminar la reacción.

Criterios de corrección orientativos

- a) Ecuación ajustada: 0,2; nombre: 0,1.
- b) Moles de cada reactivo: 0,2; comparación con los coeficientes: 0,2.
- c) Volumen de H₂: 0,3; masa en exceso: 0,2.
- d) Rendimiento: 0,2; interpretación: 0,1.

Bloque E (fuerzas): preguntas modelo Illes Balears

Bloque E: preguntas de estilo PAU (Illes Balears)

En las Illes Balears el bloque E vale 2 puntos y se responde **una de dos preguntas** (acta de coordinación de la UIB de 23 de octubre de 2024). Las dos preguntas son originales; el reparto de puntos de cada apartado es una propuesta nuestra para practicar.

Dato para las dos preguntas: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Pregunta 1. Un bloque en un plano inclinado (2 puntos)

Enunciado

Un bloque de madera de $4,00 \text{ kg}$ se deja en reposo sobre una tabla de madera inclinada $30,0^\circ$ respecto a la horizontal. Para madera sobre madera, el coeficiente de rozamiento estático es $\mu_e = 0,5$ y el dinámico, $\mu_d = 0,3$ (valores aproximados).

- Dibuja las fuerzas que actúan sobre el bloque, calcula la fuerza normal y justifica si el bloque empieza a deslizar. (0,5 puntos)
- Calcula la aceleración con la que baja y su velocidad después de recorrer $2,00 \text{ m}$ por la tabla. (0,6 puntos)
- Comprueba el resultado de b con un balance de energía e indica qué ocurre con la energía mecánica que se pierde. (0,5 puntos)
- ¿A partir de qué ángulo empezaría a deslizar el bloque? ¿Dependería de su masa? Relaciona este resultado con la estabilidad de las laderas. (0,4 puntos)

Solución

a) Actúan tres fuerzas: el **peso**, vertical hacia abajo; la **normal**, perpendicular a la tabla; y el **rozamiento**, paralelo a la tabla y hacia arriba (opuesto a la tendencia a deslizar). Con ejes paralelo y perpendicular a la tabla:

- Peso: $P = m g = 4,00 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 39,2 \text{ N}$. Componentes: paralela, $m g \sin 30,0^\circ = 19,6 \text{ N}$; perpendicular, $m g \cos 30,0^\circ = 34,0 \text{ N}$.
- Normal: no hay movimiento perpendicular a la tabla, así que $N = m g \cos 30,0^\circ = \mathbf{34,0 \text{ N}}$.
- Rozamiento estático máximo: $\mu_e N = 0,5 \times 34,0 \text{ N} \approx 17 \text{ N}$.

Como la componente paralela del peso ($19,6 \text{ N}$) supera el rozamiento estático máximo (unos 17 N), **el bloque desliza**. Equivale a comprobar que $\tan 30,0^\circ = 0,577 > \mu_e = 0,5$.

b) Una vez en movimiento actúa el rozamiento dinámico, $\mu_d N$. Segunda ley en la dirección de la tabla:

$$m g \sin \theta - \mu_d m g \cos \theta = m a \rightarrow a = g (\sin \theta - \mu_d \cos \theta) = 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,500 - 0,3 \times 0,866) = \mathbf{2,4 \text{ m/s}^2}.$$

Partiendo del reposo, $v^2 = 2 a \Delta x$: $v = \sqrt{(2 \times 2,36 \text{ m/s}^2 \times 2,00 \text{ m})} = \mathbf{3,1 \text{ m/s}}$.

c) Altura que desciende: $h = 2,00 \text{ m} \times \sin 30,0^\circ = 1,00 \text{ m}$.

- Energía potencial perdida: $m g h = 4,00 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1,00 \text{ m} = 39,24 \text{ J}$.
- Trabajo del rozamiento (en valor absoluto): $\mu_d N d = 0,3 \times 33,98 \text{ N} \times 2,00 \text{ m} = 20,39 \text{ J}$.

- Energía cinética final: $39,24 \text{ J} - 20,39 \text{ J} = 18,85 \text{ J}$, y $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 4,00 \text{ kg} \times (3,070 \text{ m/s})^2 = 18,85 \text{ J}$. Coincide (con las cifras significativas de los datos, unos 19 J).

Los 20 J de energía mecánica «perdida» no desaparecen: se transforman en energía interna del bloque y de la tabla, que se calientan ligeramente.

d) El bloque empieza a deslizar cuando $m g \sin \theta > \mu_e m g \cos \theta$, es decir, cuando $\tan \theta > \mu_e$: $\theta_{\text{crítico}} = \arctan 0,5 = 27^\circ$ (26,6°). **No depende de la masa**, porque aparece en los dos miembros y se simplifica. Con una ladera ocurre lo mismo: una masa de roca o de suelo se mantiene mientras la componente del peso a lo largo de la pendiente no supere la resistencia al deslizamiento; si el agua de una lluvia intensa reduce esa resistencia (en el modelo, un μ menor), el ángulo crítico baja y la ladera puede deslizar.

Análisis de unidades: $\text{kg} \cdot \text{m s}^{-2} = \text{N}$; $\text{m s}^{-2} \cdot (\text{adimensional}) = \text{m s}^{-2}$; $\sqrt{(\text{m s}^{-2} \cdot \text{m})} = \text{m/s}$; $\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$; $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \text{s}^{-2} = \text{J}$.

Valoración: los coeficientes de rozamiento tienen una sola cifra significativa, así que la aceleración y la velocidad se dan con dos (en los pasos intermedios se arrastra una cifra más). Más de la mitad de la energía potencial (20,4 de 39,2 J, el 52 %) se disipa por rozamiento: sin rozamiento el bloque llegaría a $\sqrt{(2 g h)} = 4,4 \text{ m/s}$.

Criterios de corrección orientativos

- a) Diagrama con las tres fuerzas bien orientadas: 0,2; normal: 0,15; justificación del deslizamiento: 0,15.
- b) Segunda ley con μ_d (no μ_e): 0,35; velocidad: 0,25.
- c) Balance correcto: 0,35; destino de la energía: 0,15.
- d) Ángulo: 0,15; independencia de la masa: 0,1; relación con las laderas: 0,15.

Pregunta 2. Una carretilla: momentos, leyes de Newton e interacciones (2 puntos)

Enunciado

Una carretilla cargada tiene una masa total de 60,0 kg. Su centro de gravedad está a 0,40 m (en horizontal) del eje de la rueda, y una persona la sostiene por los mangos, a 1,20 m del eje, con una fuerza vertical. La carretilla está en reposo, con los mangos levantados.

- Calcula la fuerza vertical que debe hacer la persona y la fuerza que el suelo ejerce sobre la rueda. (0,8 puntos)
- ¿Qué fuerza haría falta si la carga se colocara de modo que el centro de gravedad quedara a 0,20 m del eje? Explica por qué conviene cargar la carretilla cerca de la rueda. (0,3 puntos)
- La persona empuja la carretilla por un camino horizontal con una fuerza horizontal de 45 N y la carretilla avanza con velocidad constante. ¿Cuánto vale la resistencia total al avance? Justifícalo con las leyes de Newton. (0,4 puntos)
- La fuerza del suelo sobre la rueda y el rozamiento son fuerzas de contacto. ¿A qué interacción fundamental se deben? Si la interacción gravitatoria es la más débil de las cuatro, ¿por qué es la que notamos como peso? (0,5 puntos)

Solución

a) Peso total: $P = m g = 60,0 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 588,6 \text{ N}$. Sobre la carretilla actúan el peso (en el centro de gravedad), la fuerza F de la persona (en los mangos, hacia arriba) y la fuerza N del suelo sobre la rueda (en el eje, hacia arriba).

Suma de momentos respecto al eje de la rueda (la fuerza N no tiene momento respecto a ese punto):

$$F \times 1,20 \text{ m} - P \times 0,40 \text{ m} = 0 \rightarrow F = 588,6 \text{ N} \times 0,40 \text{ m} / 1,20 \text{ m} = \mathbf{196 \text{ N}}.$$

Suma de fuerzas verticales: $F + N - P = 0 \rightarrow N = 588,6 \text{ N} - 196,2 \text{ N} = \mathbf{392 \text{ N}}$.

La persona sostiene un tercio del peso y la rueda, dos tercios.

b) $F = 588,6 \text{ N} \times 0,20 \text{ m} / 1,20 \text{ m} = \mathbf{98,1 \text{ N}}$, la mitad. Cuanto más cerca de la rueda está la carga, menor es el brazo del peso respecto al eje y menor el momento que debe compensar la persona; la carretilla es una palanca en la que la rueda es el punto de apoyo.

c) A velocidad constante la aceleración es cero y, por la **primera ley** (o por la segunda con $a = 0$), la fuerza neta es nula: la resistencia total al avance (rozamiento de rodadura, rozamiento en el eje) vale **45 N**, en sentido contrario al empuje. Que la carretilla se mueva no exige una fuerza neta hacia delante: la fuerza neta determina la aceleración, no la velocidad.

d) Las fuerzas de contacto se deben a la **interacción electromagnética**: cuando dos superficies se aprietan, las nubes electrónicas de sus átomos se repelen (normal), y las atracciones y repulsiones entre los átomos de las dos superficies se oponen al deslizamiento (rozamiento).

La gravitatoria es la más débil, pero siempre es atractiva y se suma: cada kilogramo de la Tierra contribuye al peso. La electromagnética es mucho más intensa, pero la materia ordinaria es casi exactamente neutra y las atracciones y repulsiones se compensan a gran escala. Las interacciones nucleares, por su parte, solo actúan a distancias del tamaño de un núcleo. Por eso, a la escala de los cuerpos y los astros, la gravedad es la que se manifiesta como peso.

Análisis de unidades: $\text{kg} \cdot \text{m s}^{-2} = \text{N}$; $\text{N} \cdot \text{m}$ es la unidad de momento; $(\text{N} \cdot \text{m}) / \text{m} = \text{N}$.

Valoración: 196 N equivalen a sostener unos 20 kg, una carga razonable para una persona; la rueda soporta el resto. Que las fuerzas de la persona y de la rueda sumen exactamente el peso es la comprobación de que el equilibrio está bien planteado.

Criterios de corrección orientativos

- a) Fuerzas identificadas y punto de giro bien elegido: 0,2; ecuación de momentos y F: 0,35; N: 0,25.
- b) Cálculo: 0,15; explicación: 0,15.
- c) Resultado: 0,15; justificación con la primera ley: 0,25.
- d) Origen electromagnético de las fuerzas de contacto: 0,2; explicación del predominio de la gravedad a gran escala: 0,3.