

# FÍSICA Y QUÍMICA

**1º BACHILLERATO. LOMCE**

**Autores de este libro:**

JAIME CARRASCOSA ALÍS  
JOAQUÍN MARTÍNEZ TORREGROSA  
SALVADOR MARTÍNEZ SALA  
JUAN JOSÉ RUÍZ RUÍZ

Revisado en Valencia, 07-junio-2016

## NOTA PREVIA

*Los contenidos de esta obra se pueden reproducir total o parcialmente de forma libre y gratuita. Los autores no solo lo autorizamos expresamente sino que nos congratulamos de ello. Tan solo pedimos que se indique la fuente y que, por favor, siempre que sea posible, se colabore en su difusión dándolos a conocer a otras personas a las que también pudieran resultar útiles.*

*Nuestro objetivo es contribuir, en lo que podamos, a la mejora de la enseñanza y aprendizaje de la Física y Química.*



Depósito legal: V-3006-2009

ISBN: 978-84-692-4324-4

PERMITIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE LIBRO,  
CITANDO SIEMPRE AUTORES Y FUENTE

didactica fisica quimica.es

# PRESENTACIÓN

La existencia de materiales de trabajo valorados positivamente por quienes han de usarlos, contribuye a que el proceso de enseñanza y aprendizaje pueda desarrollarse de una manera más eficaz. Ésta ha sido la intención que nos ha guiado al escribir: diseñar un libro de texto de física y química que pueda ser útil a la mayor parte posible de profesores y alumnos.

Para conseguir el objetivo anterior, hemos partido del convencimiento de que todo conocimiento y aprendizaje científico es la respuesta a problemas de interés, lo que nos ha llevado a plantear los contenidos y su secuenciación en base a unos cuantos grandes problemas estructurantes como:

- ✓ **¿Qué son y cómo se producen los cambios materiales?**
- ✓ **¿A qué se debe la gran diversidad de sustancias existentes?**
- ✓ **¿Cómo pueden cambiar unas sustancias en otras de propiedades diferentes?**

Por eso comenzamos con el estudio de los cambios más sencillos (mecánica) y acabamos con otros más complejos (química orgánica). Análogamente se procede en cada uno de los temas concretos: se comienza planteando uno o varios problemas susceptibles de generar interés y proporcionar una idea preliminar de qué se va a tratar y en qué orden.

Por otra parte, las abundantes situaciones problemáticas que se plantean en el libro, se hacen con el propósito explícito de que alumnos y alumnas desarrollen unos conocimientos científicos, entendiendo ese saber en sentido amplio: no sólo conceptos, leyes, principios fundamentales, etc., sino también contenidos de tipo metodológico (cómo se hace ciencia) y actitudinal (por qué se investiga algo, cuáles son sus repercusiones...). Hemos tratado de presentar todos ellos integrados y de forma funcional. Las actividades prácticas, por ejemplo, no se plantean separadas, como mera ilustración de la teoría vista anteriormente, sino en el momento en que surge un problema de interés que puede dar lugar a una investigación experimental.

Hemos procurado que con este libro se pueda aprender ciencia a través de una metodología coherente con la naturaleza de la ciencia y las características esenciales del trabajo científico. Así, por ejemplo, se hace hincapié en la utilización de los principios (como el de la conservación de la energía) que pueden aplicarse al estudio de numerosos y diversos cambios, la búsqueda de regularidades, de expresiones generales, de puentes y conexiones entre dominios que aparecían históricamente como esencialmente distintos, etc. También se trata de familiarizar a los alumnos con la emisión de hipótesis, el diseño de experimentos, el análisis crítico de resultados, las relaciones existentes entre ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente, etc.

Dado que se trata de un libro de texto, las respuestas a las actividades que se proponen se pueden encontrar si se continúa leyendo. Sin embargo ello no invalida que, aquellos profesores que lo deseen, puedan servirse de los enunciados de tales actividades (u otras similares) para proponerlas a sus alumnos distribuidos en pequeños grupos de trabajo (por eso normalmente hemos utilizado el plural en el enunciado de las mismas). En cualquier caso pensamos que, incluso cuando se utiliza el libro para estudiar en casa, conviene que después de leer cada actividad se haga una pausa tratando de resolverla, de avanzar en lo que en ella se plantea y luego se coteje lo que se haya hecho con la información existente en el texto al respecto.

En general hemos preferido claridad y detenimiento en los contenidos (que no complejidad) a un tratamiento superficial (que no sencillo) de muchos contenidos diversos. Ello hace que si se quiere sacar provecho del texto sea necesario un esfuerzo de lectura atenta y activa al que muchos estudiantes habrán de acostumbrarse. Los contenidos se distribuyen en 9 temas (5 de física y 4 de

química) acompañados de tres anexos (uno sobre cálculo vectorial y dos más sobre formulación química).

Hemos puesto especial cuidado en que los contenidos del tema y su secuenciación respondan a los problemas planteados al comienzo y, que de esa forma, se vaya progresando en la adquisición de un cuerpo de conocimientos de física y química dotado de una cierta globalidad y coherencia, que constituya una base sólida sobre la que apoyarse para el curso siguiente. Al final de cada tema se proponen una serie de problemas, ejercicios y cuestiones ordenados de tal forma que con ellos se vuelve a hacer un barrido de lo que se ha tratado a lo largo del capítulo.

En cuanto a los conceptos científicos siempre que ha sido posible se han introducido primero de forma cualitativa. Se ha resaltado el significado físico, el campo de validez de las expresiones manejadas, aplicaciones de interés, etc. También hemos tenido en cuenta la existencia de posibles ideas alternativas, y confusiones que suelen darse respecto de diversos conceptos como fuerza, calor, etc. En los enunciados de los problemas hemos tratado de huir de la abstracción y relacionarlos, siempre que ha sido posible, con aspectos reales concretos que puedan tener interés o ser capaces de despertarlo entre el alumnado.

Hemos procurado advertir de la necesidad de aprender a desarrollar actuaciones respetuosas con el medio ambiente, incluyendo enunciados relacionados con el tema, advirtiendo de la peligrosidad ambiental de algunas sustancias que se usan en el laboratorio y recomendando utilizar las menores cantidades posibles.

También queremos resaltar el uso del lenguaje del cómic en algunas actividades. Pensamos que es un buen recurso didáctico por su capacidad de motivación (entre otras cosas). En cuanto a las gráficas e ilustraciones incluidas en los temas, en general han sido elaboradas por nosotros y con la intención de que guarden la mayor relación posible con el texto. Además, hemos procurado que en ellas se refleje un adecuado tratamiento de la diversidad, incluyendo, en su caso, mujeres y hombres, de distinto color, con alguna discapacidad, etc.

Respecto al tratamiento matemático, hemos tenido en cuenta qué es lo que se requiere para poder aprender de forma significativa los contenidos mínimos que conforman el programa oficial de la mayoría de las Comunidades del Estado. Por ello hemos creído conveniente incluir un anexo sobre álgebra de vectores al final del libro (utilizando mayoritariamente ejemplos concretos de física), que el profesor puede utilizar en el momento que estime oportuno. No obstante, aconsejamos estudiarlo como primer capítulo, antes del tema de cinemática.

Finalmente, queremos pedir a quienes utilicen el libro que nos hagan llegar sus valoraciones y comentarios críticos para así poder mejorarlo, y desear al profesorado y alumnado que le saquen el mayor provecho posible.

Los autores:

Jaime Carrascosa Alís, Salvador Martínez Sala, Joaquín Martínez Torregrosa, Juan José Ruíz Ruíz

*Este y otros materiales educativos y de Didáctica de las Ciencias Experimentales, pueden descargarse libremente desde:*

didacticafisicaquimica.es

# ÍNDICE DE LOS CONTENIDOS

## 1. El movimiento de los cuerpos. Cinemática ----- 1

1. ¿Cómo podemos saber si un objeto está realmente quieto o se mueve? Carácter relativo del movimiento. Necesidad de un sistema de referencia
2. Introducción de algunas magnitudes útiles para estudiar el movimiento de los cuerpos
  - 2.1. ¿Cómo podemos expresar dónde se encuentra un cuerpo en un instante dado? Posición sobre la trayectoria
  - 2.2. ¿Cómo hallar el cambio de posición experimentado por un objeto en movimiento? Desplazamiento sobre la trayectoria
  - 2.3. ¿Cómo podemos cuantificar lo aprisa que se ha realizado un determinado cambio de posición? Rapidez media y rapidez instantánea
  - 2.4. ¿Cómo podemos cuantificar lo aprisa que cambia la rapidez con que se mueve un cuerpo? Aceleración sobre la trayectoria
3. ¿Cómo podemos predecir dónde estará y lo rápido que se moverá un cuerpo en un cierto instante? Ecuaciones de la posición sobre la trayectoria y de la rapidez en función del tiempo
  - 3.1. Cuerpos que se mueven sin aceleración sobre la trayectoria (movimiento uniforme)
  - 3.2. Cuerpos que se mueven con aceleración sobre la trayectoria constante (movimiento uniformemente acelerado)
4. Introducción de algunas magnitudes útiles para estudiar el movimiento que se realiza a lo largo de una trayectoria que no se conoce de antemano
  - 4.1. Vector de posición y vector desplazamiento
  - 4.2. Vector velocidad y vector aceleración
5. Utilidad del cuerpo de conocimientos construido
  - 5.1. Movimiento de caída libre
  - 5.2. Tiro horizontal
  - 5.3. Tiro oblicuo
  - 5.4. Movimiento circular y uniforme. Magnitudes angulares
  - 5.5. Movimiento armónico simple

## 2. ¿Por qué los cuerpos se mueven de una forma u otra? Dinámica ----- 51

1. ¿A qué es debido que un cuerpo se mueva de una forma u otra? La respuesta de Aristóteles
  - 1.1. La materia terrestre
  - 1.2. La materia celeste
2. ¿A qué es debido que un cuerpo se mueva de una forma u otra? La respuesta de Newton
  - 2.1. ¿Cómo conseguir que un cuerpo se mueva en línea recta y con velocidad constante? Primer Principio de la Dinámica o Principio de la Inercia
  - 2.2. ¿Cómo conseguir que un cuerpo se mueva con una cierta aceleración? Segundo Principio o Ecuación Fundamental de la Dinámica
  - 2.3. ¿Pueden los cuerpos acelerarse a sí mismos? Tercer Principio de la Dinámica o Principio de Acción y Reacción
3. Capacidad predictiva de los principios de la dinámica
4. Interacciones sin acceso directo a lo que ocurre durante las mismas. Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento
5. Fin de una barrera histórica: La teoría de la Gravitación Universal
6. Introducción al campo gravitatorio terrestre
7. Las leyes de Kepler
8. Deducción teórica de leyes de Kepler
9. El descubrimiento de nuevos planetas

10. Estudio particular de otras fuerzas de especial interés
  - 10.1. Fuerza de rozamiento por deslizamiento
  - 10.2. Tensiones en cuerdas
  - 10.3. Fuerzas elásticas. Ley de Hooke. Dinámica del movimiento armónico simple
11. Dinámica del movimiento circular y uniforme

### **3. Energía, trabajo y cambios mecánicos ----- 111**

1. Primeras ideas sobre los cambios y la forma en que se producen
  - 1.1. Idea cualitativa de energía
  - 1.2. Formas de energía
  - 1.3. Una forma de intercambiar energía: trabajo
  - 1.4. Concepción espontánea y concepción física de trabajo
  - 1.5. Rapidez con que se realiza un trabajo: Potencia.
2. ¿Cuánto cambia la energía de un sistema cuando se realiza trabajo?
  - 2.1. Realización cuantitativa entre trabajo exterior y energía de un sistema
  - 2.2. Expresión de la energía mecánica de un sistema en función de sus propiedades (energía cinética, energía potencial gravitatoria y energía potencial elástica)
3. Principio de Conservación de la Energía Mecánica
4. Teorema de las fuerzas vivas
5. Efecto del rozamiento sobre la energía mecánica de un sistema

### **4. El calor y el principio de conservación general de la energía ----- 155**

1. Separación entre mecánica y termología
2. Revisión de la fenomenología del calor y de su interpretación según la teoría del calórico
  - 2.1. ¿Cómo explicar la tendencia espontánea a alcanzar el equilibrio térmico?
  - 2.2. Calor y variación de temperatura. Medida del calor específico
  - 2.3. Determinación de la capacidad calorífica y del calor específico
  - 2.4. Los cambios de fase. Calores latentes
3. ¿Por qué se calientan los cuerpos cuando hay rozamiento? Crisis de la teoría del calórico
4. Superación de la barrera entre mecánica y termología. Interpretación mecánica de los fenómenos térmicos. Principio de Conservación de la Energía
  - 4.1. Trabajos de Joule sobre la producción de calentamiento a partir de la energía mecánica
  - 4.2. Interpretación mecánica del calor
  - 4.3. La invención de la energía interna. Conservación de la energía (mecánica y térmica)
5. ¿Qué ocurre cuando en un sistema hay cambios de otro tipo? Principio General de Conservación de la Energía
6. Conservación de la energía y crisis energética
  - 6.1. Cadenas energéticas y rendimiento
  - 6.2. Rendimiento de un convertidor. Generalización del concepto de potencia
  - 6.3. Fuentes de energía

### **5. Corriente eléctrica continua ----- 187**

1. El problema de la producción de la corriente eléctrica
2. Medida de la corriente eléctrica
3. Factores de que depende la intensidad de corriente. Ley de Ohm
4. Transmisión de las fuerzas eléctricas. Campo eléctrico
5. Caracterización energética del campo eléctrico. Potencial y diferencia de potencial
6. Efectos energéticos de la corriente
  - 6.1. Efecto Joule
  - 6.2. Intensidad de corriente en un circuito con una pila ideal (no se calienta) en el que sólo hay resistencias. Asociación de resistencias (serie y paralelo)

- 6.3. Intensidad de corriente en un circuito con una pila real (tiene resistencia interna). Ley de Ohm generalizada
- 6.4. Potencia consumida por un motor. Fuerza contraelectromotriz y rendimiento
- 6.5. Ley de Ohm generalizada en el caso de un circuito con generador y motor
- 6.6. Diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un circuito (expresión general)

## **6. Teoría atómica y molecular de la materia ----- 221**

- 1. Establecimiento de la estructura atómica de la materia
  - 1.1. Contribución del estudio de los gases al establecimiento de la estructura de la materia
  - 1.2. Contribución de la información química acumulada en la época de Dalton al establecimiento de la estructura atómica de la materia
    - 1.2.1. Variedad de los materiales: mezclas, sustancias, sustancias simples, compuestos
    - 1.2.2. Utilización del modelo corpuscular para explicar la variedad de materiales existentes. Teoría Atómica de Dalton
    - 1.2.3. ¿Cómo explicar las reacciones químicas con la hipótesis atómico-molecular?
    - 1.2.4. Cambios materiales en los procesos químicos. Ley de Conservación de la Masa y Ley de las Proporciones Constantes
- 2. Desarrollo del modelo atómico-molecular de la materia
  - 2.1. Trabajos de Gay-Lussac sobre reacciones químicas entre gases
  - 2.2. Determinación de masas atómicas y moleculares relativas
  - 2.3. Determinación de fórmulas empíricas y moleculares
  - 2.4. Determinación experimental de la fórmula empírica de un compuesto
  - 2.5. El sistema periódico de los elementos

## **7. Reacciones químicas -----255**

- 1. Las dos caras de los cambios químicos
- 2. Modelo elemental de reacción química
- 3. Ajuste elemental de ecuaciones químicas
- 4. ¿Cómo hacer predicciones sobre cantidades de sustancias que intervienen en una reacción química? Introducción y manejo del concepto de mol
  - 4.1. Concentración molar de una disolución.
  - 4.2. Sustancias en fase gaseosa.
- 5. Iniciación a los cálculos estequiométricos

Anexo 7.1. ¿Cómo se comportan las mezclas de gases? Presiones parciales. Ley de Dalton

Anexo 7.2. Propiedades coligativas (disminución de la presión de vapor, aumento del punto de ebullición, disminución del punto de fusión, ósmosis y presión osmótica), aplicaciones.

Anexo 7.3. El problema de la disminución de la capa de ozono

## **8. Termoquímica ----- 301**

- 1. ¿A qué se deben los cambios de energía que se producen en las reacciones químicas?
- 2. La energía se conserva. Primer principio de la termodinámica
- 3. Trabajo de expansión a presión constante
- 4. ¿Cómo determinar el calor de reacción a volumen constante?
- 5. Calor de reacción a presión constante. Concepto de entalpia
- 6. ¿Existe alguna relación entre el calor a volumen constante y el calor a presión constante?
- 7. La variación de entalpia en una reacción
- 8. La entalpia es una función de estado. Ley de Hess
- 9. ¿Cómo determinar las entalpias de reacción a partir de las entalpias de formación?
- 10. Energía de los alimentos y vida saludable
- 11. ¿Se puede relacionar la entalpia de reacción con las energías de los enlaces?
- 12. ¿Cómo evolucionan los sistemas? Cambios espontáneos y no espontáneos
- 13. Entropía: una propiedad que rige la evolución de los sistemas

14. ¿Cómo medir la espontaneidad? Energía libre de Gibbs
15. ¿Cómo podemos interpretar la energía libre de Gibbs?

## **9. Introducción a la química del carbono ----- 353**

1. El origen de la química del carbono
2. Características generales de los compuestos de carbono
  - 2.1. Estructura electrónica del átomo de carbono
  - 2.2. Estabilidad de los compuestos de carbono
  - 2.3. Capacidad de combinación del carbono con otros elementos y consigo mismo
3. Compuestos de carbono e hidrógeno (hidrocarburos)
  - 3.1. Hidrocarburos saturados de cadena abierta
  - 3.2. Hidrocarburos insaturados de cadena abierta
  - 3.3. Hidrocarburos cíclicos
  - 3.4. Fuentes de los hidrocarburos
4. Compuestos del carbono con otros elementos (grupos funcionales)
5. Compuestos distintos con la misma fórmula molecular (isomerías)
6. El petróleo. Aplicaciones materiales y energéticas

## **Anexo 1. Cálculo vectorial ----- 379**

1. Magnitudes escalares y vectoriales
2. Álgebra elemental de vectores
  - 2.1. Obtención gráfica del vector suma de otros dos
  - 2.2. Obtención gráfica del vector diferencia de otros dos
  - 2.3. Producto de un vector por un número. Vectores unitarios.
3. Expresión analítica de un vector en componentes cartesianas
4. Operaciones con vectores expresados analíticamente
5. Expresión de un vector en componentes intrínsecas
6. Representación de los vectores en el espacio tridimensional
7. Productos de vectores
  - 7.1. Producto escalar de dos vectores
  - 7.2. Momento de una fuerza: Producto vectorial

## **Anexo 2. Formulación y nomenclatura en química inorgánica ----- 401**

Sales binarias. Combinaciones binarias con hidrógeno. Óxidos. Hidróxidos. Oxoácidos. Oxosales.

## **Anexo 3. Formulación y nomenclatura en química orgánica ----- 433**

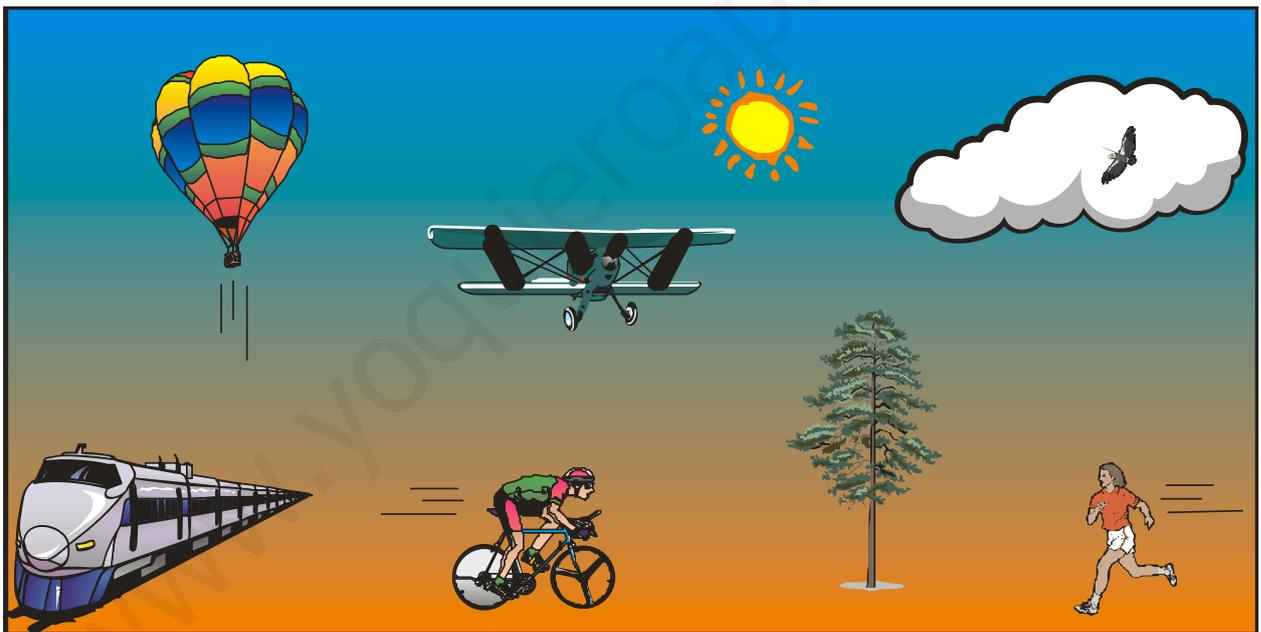
Hidrocarburos. Alcoholes. Éteres. Aldehídos. Cetonas. Ácidos carboxílicos. Ésteres. Aminas. Nitrilos. Amidas. Nitroderivados. Derivados halogenados.

# 1. EL MOVIMIENTO DE LOS CUERPOS (CINEMÁTICA)

## INTRODUCCION

La importancia que tiene el estudio del movimiento de los cuerpos viene reflejada no sólo por el hecho de que los orígenes de la Física pueden situarse en las investigaciones que algunos científicos como Galileo y Newton realizaron en este campo en el siglo XVII, sino también porque asociada a dicho estudio se encuentra una verdadera revolución científica que supuso un profundo cambio en la concepción del Universo que se tenía hasta entonces, mostrando que los movimientos de los cuerpos, sean terrestres (proyectiles, etc.) o celestes (planetas, etc.), se rigen por las mismas leyes, contribuyendo así decisivamente a superar la enorme barrera que existía entre la Tierra y el Cielo (se pensaba que eran lugares totalmente diferentes, hechos de materia distinta y cada uno con sus propias leyes).

Por otra parte, también asociado al estudio del movimiento de los cuerpos y a otros trabajos de Galileo, se encuentra el desarrollo de unos procedimientos, que se pueden considerar como el inicio de lo que hoy en día se conoce como Metodología Científica.



*A.1. Enumerad distintas situaciones concretas en las que tenga interés estudiar el movimiento de algún cuerpo.*

Son muchas las situaciones a que, a título de ejemplo, podemos referirnos:

- ✓ Prácticas deportivas como, una carrera de atletismo, tiro con arco, paracaidismo, fútbol, etc.
- ✓ Medios de transporte (movimiento de trenes, aviones y vehículos en general).
- ✓ Puesta en órbita de satélites, envío de sondas espaciales a otros planetas, etc.
- ✓ Astronomía (movimiento de astros como, planetas, satélites, cometas, estrellas, etc.).
- ✓ Fenómenos meteorológicos (evolución de los huracanes, predicciones del tiempo, etc.).

## 1. Cinemática

*A.2. Considerad las situaciones expuestas anteriormente y pensad algunas preguntas de interés, relacionadas con las mismas, que podríamos plantearnos en este tema.*

Si pensamos un poco más en las situaciones anteriores o en otras parecidas, podemos plantearnos algunas preguntas como, por ejemplo:

- ¿Qué diferencias existen entre el movimiento de los cuerpos “terrestres” (como un proyectil lanzado en el aire) y el de los cuerpos “celestes” (como la Luna alrededor de la Tierra)?
- ¿Es posible describir el movimiento de cualquier cuerpo mediante las mismas magnitudes independientemente de la naturaleza de dicho cuerpo, de que se trate de un globo lleno de gas o una piedra, un vehículo, un astro, etc.?
- ¿Cómo expresar la posición de un móvil en un instante dado? ¿Lo que se ha desplazado al moverse? ¿lo rápidamente que se ha variado su posición? ¿Lo deprisa que se está moviendo en un instante dado? ¿Lo rápidamente que es capaz de detenerse? etc.
- ¿Cómo podemos predecir dónde estará y con qué rapidez se moverá un cuerpo en un instante dado de su movimiento?
- ¿Por qué los planetas o la Luna, se mueven continuamente describiendo trayectorias más o menos circulares alrededor del Sol y la Tierra respectivamente?

Para poder contestar a preguntas como las anteriores, es necesario que primero intentemos establecer toda una serie de **magnitudes** (observables, medibles) que nos ayuden a conocer el movimiento de cualquier cuerpo, tales como la posición en un instante dado, el cambio de posición experimentado en un cierto intervalo de tiempo, lo “rápido” que se ha producido el movimiento, etc. A dichas magnitudes las denominaremos como **magnitudes características del movimiento**. Esto constituirá el primer apartado del tema. Posteriormente trataremos de establecer la forma en que evolucionan las magnitudes características de un movimiento a lo largo del tiempo, funciones a las que llamaremos **“ecuaciones del movimiento”**. Mediante dichas ecuaciones podremos saber donde está un cuerpo y con qué rapidez se mueve, en cualquier instante (en algunos casos sencillos). Finalmente, comprobaremos la utilidad de las magnitudes y de las relaciones introducidas, estudiando algunos movimientos reales como son la **caída libre de los cuerpos**, el  **tiro horizontal**, el **tiro oblicuo** y el **movimiento circular uniforme**.

Los contenidos anteriores los vamos a estructurar en dos grandes bloques según se trate de objetos que se mueven siguiendo una **trayectoria previamente conocida** (por ejemplo una bicicleta que circula por una carretera determinada) o por una **trayectoria que no se conozca de antemano** (por ejemplo el movimiento de un jugador en un estadio).

Naturalmente, no podremos contestar a todas las preguntas planteadas. Algunas de ellas, como el movimiento de un péndulo o el movimiento de planetas y satélites, se estudiarán en el próximo curso. Sin embargo, a lo largo de este tema y del siguiente, sí que nos detendremos en analizar algunas de las similitudes y diferencias entre el movimiento de objetos “terrestres” y “celestes”, ya que este problema tuvo una gran importancia histórica en el desarrollo de una idea unitaria para toda la materia y en la construcción de un cuerpo de conocimientos científico (Física clásica) en el que se aplican las mismas leyes para todo tipo de objetos, desde un proyectil lanzado horizontalmente al movimiento de la Luna alrededor de la Tierra.

## 1. ¿CÓMO PODEMOS SABER SI UN OBJETO ESTÁ REALMENTE QUIETO O SE MUEVE? (Carácter relativo del movimiento. Necesidad de un sistema de referencia)

Algunas personas cuando piensan en un objeto en movimiento, creen que se mueve con una única velocidad. *¿Es eso correcto?* Para, avanzar en la respuesta a esta pregunta, podemos estudiar algunas situaciones concretas como las que se proponen a continuación:

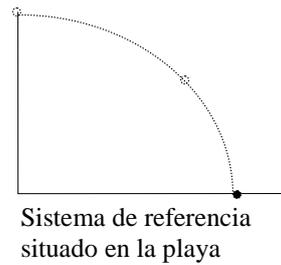
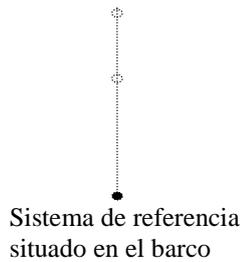


La respuesta a la pregunta anterior no puede ser una sola ya que, como es lógico, dependerá del lugar en el que nos situemos para medir dicha velocidad (sistema de referencia). Si tomamos el sistema de referencia en la propia clase, es evidente que la pizarra, respecto a las paredes y el suelo de clase no se mueve, está en reposo. Sin embargo, si tomamos como sistema de referencia el Sol, está claro que la pizarra, por encontrarse en la Tierra, se traslada solidariamente con ella alrededor del Sol recorriendo aproximadamente 30 km cada segundo. Podríamos pensar que aunque la pizarra no esté en realidad en reposo, el Sol sí que lo está, pero ello no es así ya que éste también se mueve respecto del centro de nuestra galaxia girando a su alrededor a gran velocidad. A su vez, las galaxias se están moviendo unas respecto de otras ... De hecho a lo largo de la historia de la ciencia se han realizado varios intentos de encontrar un sistema de referencia que esté en reposo absoluto, pero lo cierto es que todos esos intentos han resultado un fracaso y que ni siquiera el propio espacio se puede considerar como tal sistema. Para profundizar más, podemos plantearnos el análisis de otro caso:

**A.3.** *Desde lo alto del mástil de un barco, que para simplificar supondremos se mueve en línea recta con velocidad constante sobre la superficie de un mar tranquilo, se deja caer una piedra. Suponiendo despreciable el rozamiento con el aire, se pide: Dibujad la trayectoria que seguirá la piedra según un observador situado en un punto de la cubierta del barco y según otro observador que se encuentra en un punto de la playa.*

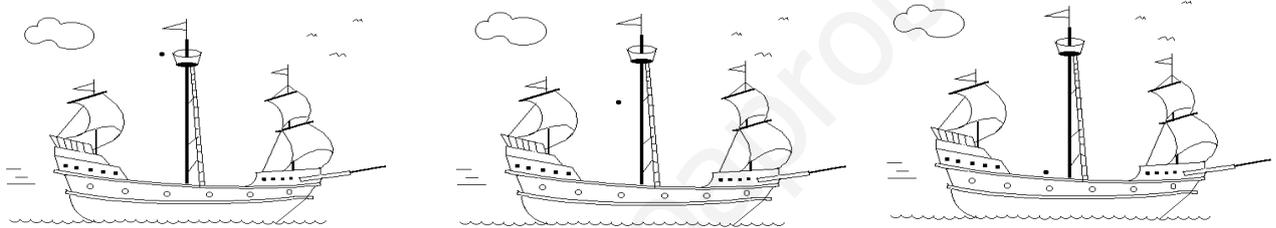
Si tomamos un sistema de referencia centrado en el propio barco, es evidente que la piedra inicialmente (hasta el momento de soltarla) no se mueve, es decir, su velocidad respecto del barco es nula. Por lo tanto un observador situado en ese sistema de referencia verá que la piedra cae verticalmente cada vez más aprisa debido a la acción de la gravedad, hasta llegar a la base del mástil, exactamente igual que si el barco se encontrase en reposo frente a la costa. Sin embargo, si cambiamos de sistema de referencia y nos situamos en la playa, hemos de tener en cuenta que la piedra, respecto ese nuevo sistema de referencia se mueve solidariamente con el barco, es decir, lleva su misma velocidad. Por tanto, en el momento que se suelte además de caer debido a la gravedad, también se moverá horizontalmente con el barco (la velocidad que lleva no “desaparece” al soltarla). Por tanto, una persona que observa desde la playa verá que la piedra describe una trayectoria curva y a la velocidad con que cae verticalmente le sumaría la velocidad con que se traslada horizontalmente, de forma que la piedra a la vez que cae se traslada respecto a ella.

## 1. Cinemática



El propio Galileo, hace ya más de 300 años se ocupó de este problema. Vale la pena una lectura atenta del texto siguiente en el que se reproducen algunas de sus reflexiones:

"Si es cierto que el ímpetu (*velocidad*) con que se mueve la embarcación queda indeleblemente impreso en la piedra cuando comienza a caer desde el mástil y si además este movimiento no afecta al movimiento natural de la piedra hacia abajo, debería de producirse un efecto realmente asombroso. Supongamos que la embarcación se encuentra en reposo (*respecto de la playa*) y dejamos caer la piedra desde lo alto del mástil hasta la cubierta, comprobando que tarda dos pulsaciones. Si ahora la embarcación comienza a navegar y dejamos caer la piedra desde el mismo lugar, ésta invertirá el mismo tiempo, pero en ese tiempo la embarcación habrá podido avanzar digamos veinte yardas.



Así pues el movimiento de la piedra (*respecto de la playa*) será según una línea transversal, esto es, una línea curva en un plano vertical, considerablemente más larga que la primera, que era según la vertical desde lo alto del mástil a la cubierta".

En resumen: Siempre que vayamos a estudiar el movimiento de cualquier objeto, es preciso indicar respecto de qué sistema de referencia estamos estudiando ese movimiento, ya que magnitudes como la posición del objeto o la velocidad y también la forma de la trayectoria descrita, van a depender de qué sistema de referencia se escoja. Así, en el ejemplo utilizado, la velocidad de la piedra en cualquier instante de su movimiento será diferente para un pasajero del barco que para un observador situado en la playa. Naturalmente, se pueden definir distintos sistemas de referencia. La utilización de uno u otro vendrá determinada según las características del movimiento que se estudie, tal y como veremos más adelante.

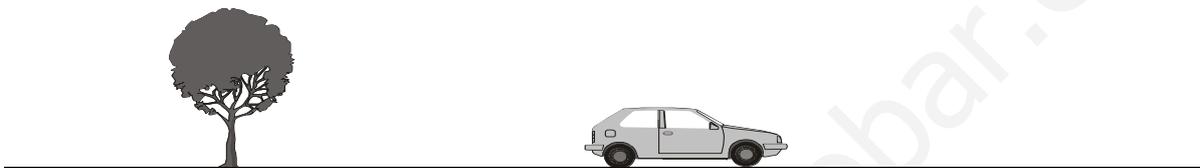
Uno de los aspectos más importantes del trabajo científico es la medición, la realización de observaciones cuantitativas traducibles a resultados numéricos. En el caso del movimiento, la búsqueda de respuesta a determinadas preguntas exige la construcción de una serie de magnitudes que nos sirvan para describir con precisión el movimiento de cualquier objeto. Eso ya nos impone unas condiciones de partida, como la de no tener en cuenta para nada el tipo de objeto que se mueve. Para ello, introduciremos en nuestro estudio el concepto de **punto material** según el cual asimilaremos el movimiento de cualquier cuerpo, sea una piedra, un vehículo, un astro, etc., al de un punto en el que supondremos concentrada toda su masa. Se trata de una simplificación que ignora, por ejemplo, que los vehículos tienen ruedas que además de trasladarse giran en torno a un eje, que pueden volcar, etc., y que afectará, sin duda, al campo de validez de los resultados que obtengamos, pero también es la forma en que los científicos comienzan el estudio de un problema complejo sobre el que van a investigar.

Una de las preguntas previas a la que es necesario contestar es cómo podemos describir de manera precisa el movimiento de un cuerpo. Para contestarla, vamos a centrarnos en primer lugar en el movimiento de cuerpos que siguen una trayectoria fija previamente conocida.

## 2. CONSTRUCCIÓN DE MAGNITUDES ÚTILES PARA DESCRIBIR EL MOVIMIENTO A LO LARGO DE UNA TRAYECTORIA FIJA CONOCIDA DE ANTEMANO

### 2.1 ¿Cómo podemos expresar dónde se encuentra un cuerpo en un instante dado? Posición sobre la trayectoria

**A.4.** *Proponed una forma sencilla de dar la posición de un objeto que puede considerarse puntual, cuando se mueve siguiendo una trayectoria previamente conocida. Considerar a modo de ejemplo el movimiento de un vehículo a lo largo de una carretera determinada.*



Una reflexión atenta a la situación propuesta, permite que nos demos cuenta de que al ser la trayectoria previamente conocida (se supone que el coche no se va a salir de la carretera) basta con elegir arbitrariamente un punto cualquiera de la misma como referencia u **origen** y expresar mediante una cantidad (positiva o negativa) la **posición sobre la trayectoria**.

En general, la trayectoria no tiene por qué ser recta. Lo habitual es representarla mediante una línea con curvas, calibrada en trozos iguales (que representan metros). Una vez señalado el punto escogido como origen “O” y para poder diferenciar si el móvil está situado a un lado u otro del origen, se toman arbitrariamente valores positivos a un lado y negativos al otro. Conviene aclarar que el origen de la trayectoria no tiene por qué ser el punto de donde “salió” el móvil. La posición sobre la trayectoria en un instante dado se denomina también **espacio** y la designaremos mediante el símbolo “ $e$ ”. Su valor absoluto siempre coincide con la distancia (medida a lo largo de la trayectoria) a la que se encuentra el cuerpo del origen. Cuando consideramos un cierto intervalo de tiempo, a lo que marca el reloj en el instante inicial se le suele designar como “ $t_0$ ” y a la posición en ese instante por “ $e_0$ ”. El término “espacio” utilizado para dar la posición sobre la trayectoria no debe confundirse en ningún caso con el espacio de tres dimensiones ni con el espacio donde se hallan los astros, con los que no tiene nada que ver.

**A.5.** *La figura adjunta representa una trayectoria por la que se mueve un objeto. Cada una de las divisiones de la misma equivale a una longitud de 1 m. Expresad la posición del móvil cuando pase por los puntos A, B y C.*



Si escogemos como posiciones crecientes positivas hacia la derecha del origen O, es fácil darse cuenta que  $e_A = 3$  m,  $e_B = 10$  m y  $e_C = -2$  m. A la vista de los resultados anteriores podemos plantearnos *si la posición ( $e$ ) coincide o no con la distancia recorrida ( $d$ ) por el móvil*. La respuesta sería que no coincide, ya que, en primer lugar, el valor de “ $e$ ”, sólo nos informa del punto de la trayectoria sobre el que se encuentra el móvil en un instante dado. No nos dice nada acerca

## 1. Cinemática

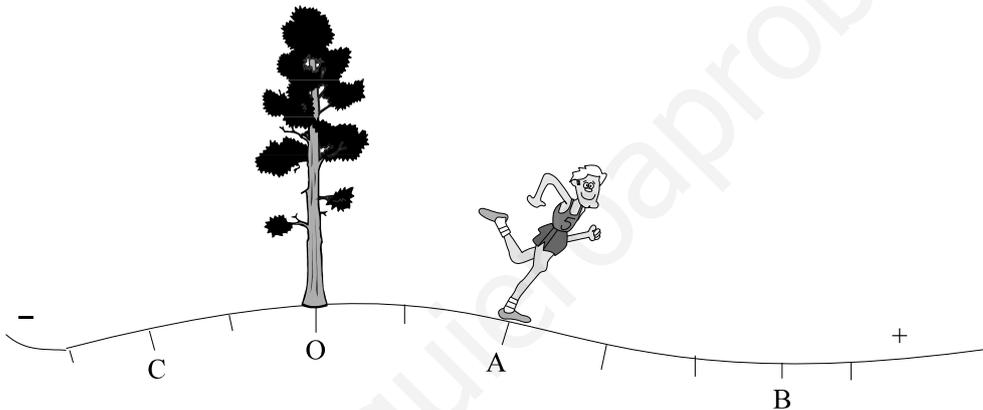
de dónde partió y, ni siquiera, si se ha movido alguna vez o siempre ha estado ahí. Además “e” puede venir dada por un número negativo, mientras que una distancia recorrida nunca puede ser inferior a 0 m.

### 2.2 ¿Cómo hallar el cambio de posición experimentado por un objeto en movimiento? (Concepto de desplazamiento sobre la trayectoria)

Ya sabemos expresar la posición “e” de un objeto. Ahora hemos de construir una magnitud que nos permita determinar los cambios de posición experimentados por un móvil que se mueve sobre una trayectoria conocida.

**A.6.** *Proponed una expresión válida para calcular el cambio de posición o desplazamiento sobre la trayectoria realizado por un móvil. Practicad con la nueva magnitud introducida calculando su valor cuando el corredor de la figura siguiente se mueva:*

- Desde la posición A a la B
- Desde la B a la A,
- Desde la A a la A pasando antes por la B
- Desde la A a la C pasando antes por la B



Si analizamos la figura anterior y suponemos cada división de 1 m de longitud, podemos ver que las posiciones marcadas por las letras A, B y C corresponden respectivamente a  $e_A = 2$  m,  $e_B = 5$  m y  $e_C = -2$  m. De modo que cuando el corredor vaya desde A hasta B el desplazamiento sobre la trayectoria vendrá dado por  $\Delta e = e_B - e_A = 5 - 2 = 3$  m. Análogamente cuando se desplace desde B hasta A será  $\Delta e = e_A - e_B = 2 - 5 = -3$  m. Cuando la posición inicial y final coincidan (como ocurre cuando sale de A llega hasta B y regresa de nuevo al punto A, es evidente que  $\Delta e = e_A - e_A = 2 - 2 = 0$ . Finalmente, cuando saliendo de A llegue a B y retroceda hasta C, la posición inicial será A y la final C con lo que  $\Delta e = e_C - e_A = -2 - 2 = -4$  m.

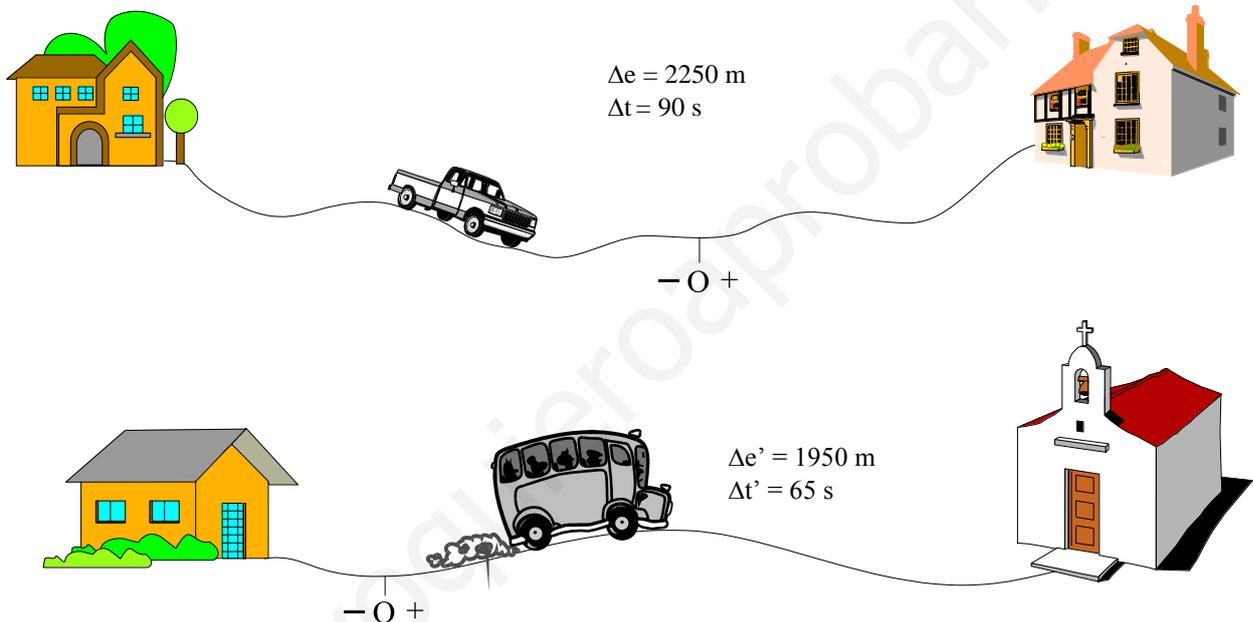
**A.7.** *¿Cuánto valdrá la distancia recorrida en cada uno de los cuatro casos anteriores?*

En el primero se mueve en un solo sentido (positivo) y la distancia recorrida son 3 m, es decir, su valor coincide con el cambio de posición. Sin embargo entre B y A la distancia recorrida es también 3 m mientras que el cambio de posición es -3 m. Cuando la posición inicial y final es la misma (pasando por B) la distancia recorrida es de 6 m (3 m a la ida y otros 3 m a la vuelta) pero el cambio de posición es 0. Finalmente cuando se estudia el trayecto desde A hasta C pasando por B, podemos ver que la distancia recorrida habrá sido de 10 m, mientras que el desplazamiento es de -4 m. Así pues, sólo cuando un móvil se desplace sobre una trayectoria determinada en el sen-

tido escogido como positivo (sin retroceso) podemos afirmar que los valores del cambio de posición experimentados y la distancia recorrida coinciden.

### 2.3 ¿Cómo podemos cuantificar lo aprisa que se ha realizado un determinado cambio de posición? Rapidez media y rapidez instantánea

Cuando estudiamos el movimiento de varios objetos, no sólo puede interesarnos conocer el desplazamiento experimentado por cada uno, sino también quién lo ha hecho más rápido. Por eso vamos a definir una nueva magnitud que nos indique lo rápidamente que se ha desplazado un móvil (que ha cambiado de posición). Nos centraremos en primer lugar en el caso de que la trayectoria sea conocida y podamos tomar fácilmente medidas de la posición del móvil. A título de ejemplo podemos pensar en vehículos que se trasladan de un lugar a otro por una carretera, tal y como se indica en la figura:



**A.8.** *Inventad una magnitud que nos sirva para averiguar cuál de los dos vehículos se ha desplazado con mayor rapidez.*

Parece lógico pensar que una magnitud que nos informe de lo deprisa que un cuerpo se desplaza de un punto a otro de la trayectoria, dependa tanto del cambio de posición realizado como del tiempo empleado. Concretamente cabe esperar que, para un mismo cambio de posición, la rapidez sea tanto mayor cuanto menor tiempo se tarde en realizarlo. Por ejemplo: si por una carretera dada un coche experimenta un cambio de posición de 12 km en 10 minutos y otro hace lo mismo en sólo 5 minutos, diremos que el segundo se ha desplazado doble rápido que el primero. Análogamente cabe esperar que, para un mismo intervalo de tiempo, la rapidez sea tanto mayor cuanto mayor sea también el cambio de posición realizado. Por ejemplo: si en un mismo intervalo de tiempo de 10 minutos, un coche realiza un cambio de posición de 2 km y otro de 8 km, decimos que el segundo ha ido tres veces más rápido que el primero.

## 1. Cinemática

Así pues, cuanto mayor sea el desplazamiento espacial  $\Delta e$  en relación con el tiempo  $\Delta t$  en el que ha tenido lugar, mayor habrá sido la **rapidez**. Ello conduce a proponer la expresión  $\Delta e/\Delta t$ . Si la aplicamos al ejemplo propuesto, llegamos a la conclusión de que el autobús se ha desplazado con una rapidez de 30 m/s, mayor, por tanto, que la del todo terreno (25 m/s). Una cuestión importante es el significado físico de la magnitud introducida.

**A.9.** *¿Que significa 30 m/s? ¿Quiere decir que el móvil ha avanzado siempre 30 m, en cada segundo de su movimiento?*

Evidentemente que no. Puede ser, por ejemplo, que al comienzo se moviera a más de 30 m/s y luego a menos, o que se haya parado un momento, etc. Lo que nos proporciona la expresión anterior es tan solo el valor medio de la rapidez. Dicho valor indica que **si hubiese ido** siempre a 30 m/s habría tardado justo el mismo tiempo que ha empleado en realidad moviéndose con una rapidez variable (unas veces mayor y otras menor que 30 m/s), es decir: 65 s. Por todo ello, definiremos operativamente a la **rapidez media** como:

$$v_m = \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

**A.10.** *Un estudiante va directamente de su casa al instituto por un camino de 2'5 km en 35 minutos. Un ciclista va por una carretera de un pueblo a otro, distantes 51'3 km, en 1'5 h. Un corredor de los 100 m lisos tiene su marca en 9'8 s. Calculad la rapidez media (en m/s) de cada uno.*

Rdo: 1'2 m/s, 9'5 m/s, y 10'2 m/s (estudiante, ciclista y corredor, respectivamente).

**A.11.** *¿Qué quiere decir que la rapidez de un móvil es de -5 m/s?*

Una respuesta aceptable sería que, de mantener constante dicha rapidez, la posición sobre la trayectoria cambiaría disminuyendo 5 m cada segundo. En efecto, si “v” es negativa, de acuerdo con su definición indicará que “ $\Delta e$ ” es negativo (ya que el intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre dos posiciones sucesivas ha de ser siempre una cantidad positiva) es decir, que “e” está disminuyendo.

El valor medio de la rapidez nos proporciona poca información sobre el movimiento de un cuerpo. Si quisiéramos conocer de verdad un movimiento sería mucho mejor conocer la rapidez en cada instante o **rapidez instantánea** (es la que, por ejemplo, indica en cada instante el velocímetro de un vehículo). *¿Cómo podríamos obtenerla?* Una posibilidad sería calcular el valor medio de la rapidez pero en un intervalo de tiempo extraordinariamente pequeño (infinitamente pequeño). Se dice así que la rapidez instantánea es “a lo que tiende” la rapidez media cuando el intervalo de tiempo considerado tiende a 0. Matemáticamente se escribe como:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} v_m \quad \text{o lo que es equivalente: } v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

En cursos posteriores aprenderemos a realizar este tipo de cálculos. Naturalmente, si un objeto se mueve siempre con la misma rapidez, el valor de ésta en cualquier instante, coincidirá con la rapidez media.

Parece evidente que cuando consideramos el movimiento de cualquier cuerpo, no sólo es importante conocer qué rapidez máxima puede desarrollar, sino también en cuanto tiempo es capaz de parar o, en general, alcanzar una rapidez dada (aumentando o disminuyendo la que lleva en un cierto instante). En muchas situaciones se puede comprobar la importancia que tiene lo aprisa que un móvil puede cambiar la rapidez a la que se mueve. A modo de ejemplo, podemos pensar en los adelantamientos por carretera, el despegue o aterrizaje de aviones, frenazos de emergencia, etc.

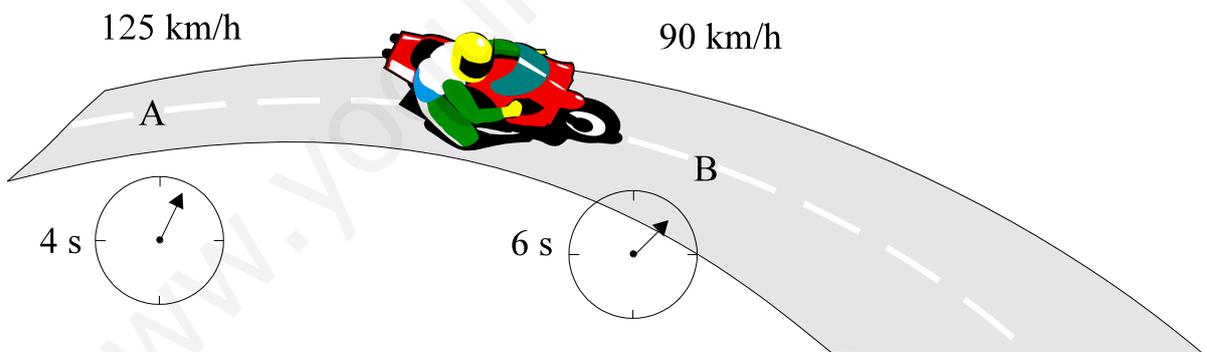
## 2.4 ¿Cómo podemos cuantificar lo aprisa que cambia la rapidez con que se mueve un cuerpo? Concepto de aceleración sobre la trayectoria

Cuando la rapidez de un móvil cambia mucho en muy poco tiempo decimos que el valor medio de la **aceleración sobre la trayectoria** experimentada por dicho móvil ha sido muy grande. De acuerdo con ello, y siguiendo un razonamiento análogo al que se realizó ya para introducir el concepto de rapidez media, no es difícil comprender que la expresión para calcular el valor medio de la aceleración sobre la trayectoria (también llamada aceleración tangencial), sea:

$$a_{tm} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

En este caso, como el numerador se mide en m/s y el denominador en segundos, la unidad en el sistema internacional para la aceleración será:  $\text{m/s}^2$ . Los siguientes ejercicios nos ayudarán a comprender mejor este nuevo concepto.

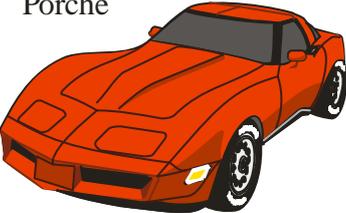
**A.12.** Una moto se mueve por la carretera de la figura. El piloto observa el velocímetro cuando pasa por los puntos A y B en los instantes que marcan los relojes. Calculad el valor medio de la aceleración sobre la trayectoria en  $\text{m/s}^2$  y razonad el significado físico del signo obtenido.



De acuerdo con el enunciado del ejercicio propuesto, la moto se mueve por una trayectoria prefijada en el sentido escogido como positivo y de forma que su rapidez (positiva) va disminuyendo. El cálculo del valor medio de la aceleración sobre la trayectoria conduce al valor de  $a_{tm} = -4,86 \text{ m/s}^2$ . Se trata, naturalmente de un valor medio que puede interpretarse diciendo que si la moto hubiera frenado siempre con la misma aceleración su rapidez habría ido disminuyendo regularmente a razón de  $4,86 \text{ m/s}$  cada segundo.

**A.13.** En la tabla siguiente se dan los cambios de rapidez que han experimentado tres modelos de coches, así como el tiempo empleado por cada uno. Analizad dichos resultados y ordenad los modelos según la aceleración media sobre la trayectoria desarrollada. Finalmente, comentad qué importancia puede tener el hecho de que un vehículo pueda desarrollar más o menos reprise.

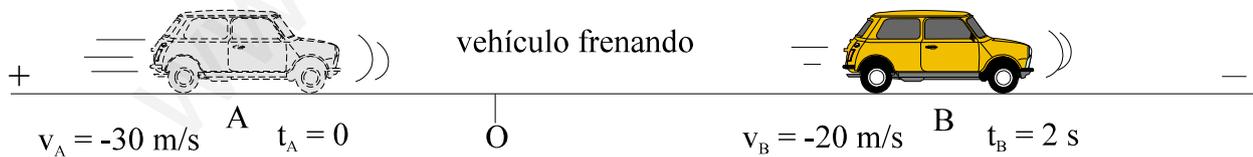
# 1. Cinemática

MODELO			
$\Delta v$ (km/h)	0 - 120	60 - 100	80 - 120
$\Delta t$ (s)	45	38	64

La resolución de la actividad anterior conduce a ordenar de menor a mayor aceleración media sobre la trayectoria al “Pulsar”, seguido del “Mini” y finalmente el “Porsche”, que desarrollan  $1'74 \text{ m/s}^2$ ,  $2'92 \text{ m/s}^2$  y  $7'41 \text{ m/s}^2$ , respectivamente. La capacidad que tenga un vehículo para conseguir grandes cambios en la rapidez con que se desplaza en el menor tiempo posible, bien sea aumentándola o bien sea disminuyéndola, es algo muy importante, sobre todo en situaciones de riesgo como, por ejemplo, los adelantamientos; aunque también hay que tener en cuenta que un exceso de confianza por parte del conductor a este respecto, puede provocar los accidentes que, en principio, se trata de evitar y que una conducción en la que se realicen grandes aceleraciones con frecuencia, supone un sensible aumento del gasto de combustible y, consecuentemente de la contaminación por  $\text{CO}_2$  (aumento del efecto invernadero), junto con otros gases y humos tóxicos.

**A.14.** Se suele pensar que siempre que un móvil frena, la aceleración sobre la trayectoria ha de ser negativa. Sin embargo el signo de dicha magnitud depende en realidad del signo que tenga la variación de la rapidez. Proponed un ejemplo en el que un vehículo frene (se desplace cada vez más despacio) y, sin embargo, el valor medio de la aceleración sobre la trayectoria sea positivo.

Basta con escoger el origen de espacios y el criterio de signos de tal forma que el móvil se desplace cada vez más despacio pero hacia valores decrecientes de la posición “e”. Ello implica una rapidez negativa pero cuyo valor absoluto va disminuyendo, con lo que la variación de dicha rapidez saldrá un número positivo y, consecuentemente, el valor medio de la aceleración sobre la trayectoria también lo será. En la figura siguiente se propone un ejemplo concreto en el que se da esta situación:



Si calculamos el valor medio de la aceleración sobre la trayectoria entre A y B, podremos comprobar que resulta un número positivo ( $5 \text{ m/s}^2$ ) a pesar de que el vehículo está frenando.

Para conocer mejor el movimiento, nos interesará conocer cómo cambia la rapidez en cada instante. Para ello hay que trabajar con el valor instantáneo de la aceleración sobre la trayectoria, que, siguiendo un razonamiento análogo al que realizamos con la rapidez instantánea, se puede definir como:

$$a_i = \lim a_{tm} \text{ cuando } \Delta t \rightarrow 0 \text{ o lo que es equivalente: } a_i = \lim \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ cuando } \Delta t \rightarrow 0$$

Naturalmente, si un objeto se mueve siempre con la misma aceleración sobre la trayectoria, el valor en un instante cualquiera coincidirá con el valor medio. Por otra parte, si la rapidez no cambia (permanece constante), por muy alto que pueda ser su valor, la aceleración sobre la trayectoria será nula, independientemente de hacia dónde se mueva o de la forma que tenga la trayectoria (rectilínea, circular o con curvas).

### 3. ¿CÓMO PODEMOS PREDECIR DÓNDE ESTARÁ Y LO RÁPIDAMENTE QUE SE MOVERÁ UN CUERPO EN UN CIERTO INSTANTE? Ecuaciones de la posición sobre la trayectoria y de la rapidez en función del tiempo

En general, un movimiento quedará perfectamente determinado cuando conozcamos todas sus magnitudes características. Los movimientos de trayectoria conocida pueden estudiarse más fácilmente con las magnitudes posición, rapidez y aceleración sobre la trayectoria, que acabamos de introducir.

Para un determinado movimiento, las magnitudes anteriores presentarán ciertas características que nos permitirán identificarlo. En efecto, atendiendo a dichas magnitudes, podemos clasificar los movimientos en tres tipos: Cuando la aceleración tangencial sea nula, la rapidez no cambiará, permanecerá constante, y diremos que se trata de un **movimiento uniforme** (M.U.). Cuando la aceleración tangencial no es nula, puede suceder que sea constante (la rapidez cambia de forma regular, es decir, lo mismo en cada unidad de tiempo), en cuyo caso se denomina **movimiento uniformemente acelerado** (M.U.A.), o que sea variable, en cuyo caso se denomina **movimiento variado**.

En este curso, para el caso de cuerpos que sigan una trayectoria previamente conocida, nos limitaremos a estudiar los dos primeros tipos de movimiento (uniforme y uniformemente acelerado). De cualquier forma, estamos interesados en obtener las ecuaciones que nos permitan averiguar la posición que ocupa y la rapidez que lleva un móvil en cada instante de su movimiento (ecuaciones del movimiento). Para ello será necesario conocer cómo dependen estas magnitudes del tiempo, en cada tipo de movimiento.

*A.15. Obtened una expresión general para la posición “e” en función del tiempo, suponiendo conocida la rapidez media  $v_m$ . Ídem para la rapidez suponiendo conocida la aceleración media sobre la trayectoria  $a_{tm}$*

Si conocemos la rapidez media, como:  $v_m = \frac{\Delta e}{\Delta t}$ , podemos despejar el desplazamiento sobre la trayectoria con lo que:  $\Delta e = v_m \cdot \Delta t$ , y desarrollando cada incremento:  $e - e_0 = v_m \cdot (t - t_0)$ .

Finalmente, despejando nos queda que la posición del cuerpo en el instante  $t$  vendrá dada por:

$$e = e_0 + v_m (t - t_0)$$

Por otra parte como la aceleración media sobre la trayectoria es:  $a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , siguiendo un procedimiento análogo al anterior podemos obtener fácilmente que la rapidez en un instante  $t$  cualquiera vendrá dada por la expresión:

$$v = v_0 + a_{tm} \cdot (t - t_0)$$

## 1. Cinemática

Ambas ecuaciones tienen una validez general, es decir, sirven para el estudio de cualquier movimiento a lo largo de una trayectoria fija y determinada ya que van expresadas en función de valores medios. No obstante, ya hemos comentado que los valores medios no nos informan de manera precisa sobre el movimiento, de modo que lo que vamos a hacer es utilizar las expresiones anteriores para deducir a partir de ellas las ecuaciones particulares de cada tipo de movimiento en función de valores instantáneos, como vamos a ver a continuación.

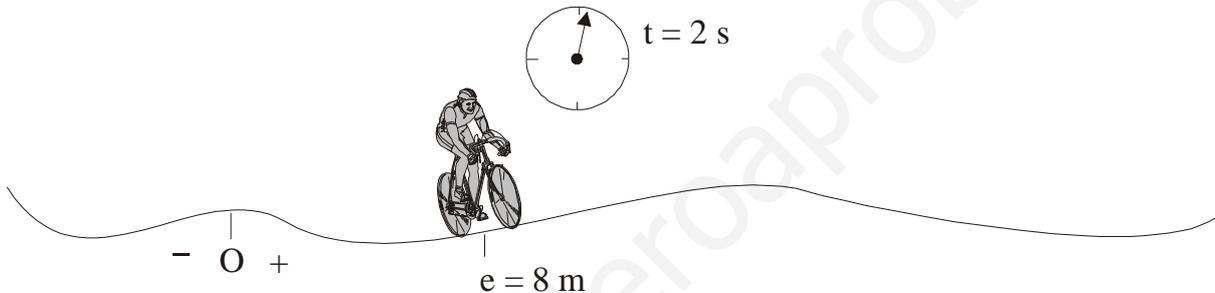
### 3.1 Cuerpos que se mueven sin aceleración sobre la trayectoria (movimiento uniforme)

**A.16.** Concretad las expresiones generales anteriores para el caso de un movimiento uniforme.

Al ser la aceleración tangencial nula, las magnitudes que determinan este movimiento tendrán las siguientes características:

$$a_t = 0 \rightarrow v = \text{cte} \rightarrow v_m = v \rightarrow e = e_0 + v(t - t_0)$$

**A.17.** Un ciclista va siempre a 3 m/s siguiendo la trayectoria que se muestra en la figura adjunta. Sabiendo que en el instante  $t = 2$  s, se encuentra en la posición  $e = 8$  m, se pide:



a) Dónde se encontrará 5 segundos después. b) Construid e interpretad las gráficas  $e = e(t)$  y  $v = v(t)$ . c) Señalad en un esquema por medio de cruces sobre la trayectoria las posiciones sucesivas del ciclista a intervalos de un segundo.

Dado que se trata de un movimiento uniforme (la rapidez es constante), la ecuación a utilizar será  $e = e_0 + v \cdot (t - t_0)$ . Sustituyendo en ella los datos que disponemos queda:

$$e = 8 + 3(t - 2)$$

Ésta última ecuación nos permite obtener la posición del ciclista en cualquier instante “ $t$ ” del movimiento. Como queremos saber dónde estará en el instante  $t = 7$  s, bastará sustituir  $t$  por dicho número y obtener finalmente  $e = 23$  m. Otra cuestión sería el cálculo de la distancia recorrida en un cierto intervalo de tiempo, por ejemplo desde los 2 s hasta los 7 s. Como el ciclista no retrocede y se mueve en el sentido positivo, el valor de dicha distancia coincidirá con el del cambio de posición sobre la trayectoria, es decir:  $\Delta e = 23 - 8 = 15$  m.

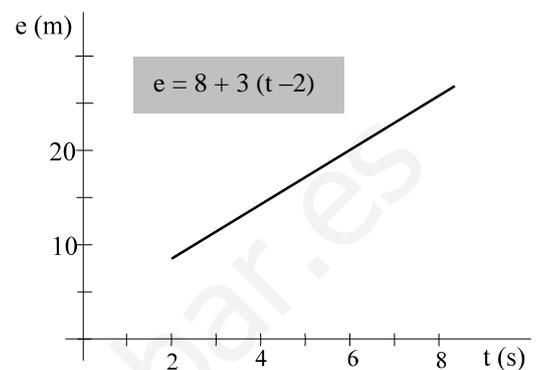
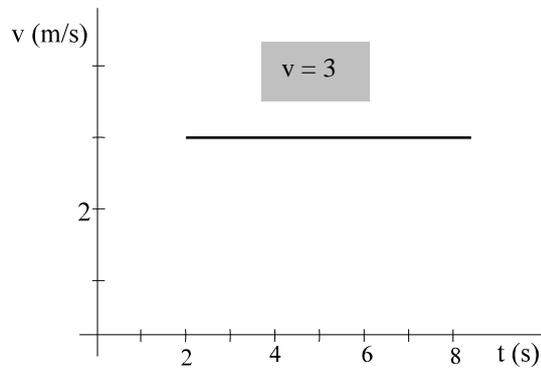
En cuanto a la construcción de las gráficas que se demanda en el enunciado, conviene tener en cuenta en primer lugar que, al tener la rapidez siempre el mismo valor, la gráfica de la rapidez en función del tiempo será una línea recta paralela al eje de tiempos. En cuanto a la posición, como ésta cambia linealmente con el tiempo, es decir, siempre al mismo “ritmo” (en este caso 3 m cada segundo que pasa), al representar los distintos valores de “ $e$ ” frente a los de “ $t$ ” se obtendrá una línea recta tanto más inclinada (pendiente) cuanto mayor sea la rapidez. Para comprobar todo ello

es necesario que primero obtengamos las tablas de valores correspondientes a partir de las ecuaciones concretas del movimiento, lo que conduce a:

v (m/s)	3	3	3	3	3	3	3
t (s)	2	3	4	5	6	7	8

e (m)	8	11	14	17	20	23	26
t (s)	2	3	4	5	6	7	8

Si representamos ahora los valores anteriores obtenemos las gráficas siguientes:



Es importante darse cuenta de que lo que sale en las gráficas anteriores **no** representa nunca la trayectoria por la que se ha desplazado el móvil. Esta, como se observa en el enunciado, no es rectilínea. La posición del ciclista a intervalos de tiempo de 1 s se puede indicar colocando sobre dicha trayectoria una serie de marcas cada 3 m de trayecto.



En el caso de que la trayectoria seguida en un movimiento uniforme sea una línea recta, el movimiento se denomina rectilíneo y uniforme (MRU). Un vehículo moviéndose en una carretera recta siempre con la misma rapidez poseería este tipo de movimiento. Análogamente, en el caso particular de un cuerpo que se mueva siempre con la misma rapidez pero describiendo una circunferencia, el movimiento se denomina circular y uniforme (MCU).

**A.18.** Un coche que se desplaza por una autopista con rapidez constante pasa a las 9:00 h por el punto kilométrico 50 y a las 9:20 h por el 80. Se pide:

- Después de obtener las ecuaciones  $v-t$  y  $e-t$ , representad las gráficas correspondientes
- ¿Cuál será la posición del coche al transcurrir justo 45 minutos desde que pasó por el km 50?
- ¿A qué hora llegará a la salida 4 de la autopista, la cual se encuentra en el km 275?
- Construid un esquema de la trayectoria con las posiciones sucesivas del coche cada 30 min.

Rdo. b)  $e = 117,5$  km; c) 11'5 h

### 3.2 Cuerpos que se mueven con aceleración sobre la trayectoria constante (movimiento uniformemente acelerado)

**A.19.** Concretad las expresiones generales  $v = v_0 + a_m \cdot (t - t_0)$  y  $e = e_0 + v_m \cdot (t - t_0)$  para el caso de un movimiento uniformemente acelerado (aceleración sobre la trayectoria constante).

Al ser la aceleración tangencial constante se cumplirá que en cualquier instante:

$$a_t = \text{cte} \rightarrow a_m = a_t \rightarrow v = v_0 + a_t \cdot (t - t_0)$$

## 1. Cinemática

En cuanto a la determinación de la posición en cualquier instante  $t$ , hemos de tener en cuenta que la rapidez va cambiando continuamente, pero que al ser el movimiento uniformemente acelerado, el ritmo con que va cambiando la rapidez es siempre el mismo. Esto permite obtener su valor medio entre  $t_0$  y  $t$  como:

$$v_m = \frac{v_0 + v}{2}.$$

Por tanto, la expresión  $e = e_0 + v_m(t-t_0)$ , quedará en este caso como:  $e = e_0 + \frac{v_0 + v}{2}(t - t_0)$ .

Sustituyendo ahora  $v$  por su expresión (obtenida anteriormente) y simplificando obtenemos finalmente que la posición en cualquier instante " $t$ " vendrá dada para este tipo de movimiento por la expresión:

$$e = e_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a_t(t - t_0)^2$$

**A.20.** Un coche inicialmente en reposo, comienza a moverse con una aceleración sobre la trayectoria de  $3 \text{ m/s}^2$ . Suponiendo que la mantenga constante durante 5 segundos, se pide:

- Con qué rapidez se moverá y dónde se encontrará al cabo de esos 5 segundos.
- Construid e interpretad las gráficas  $v = v(t)$  y  $e = e(t)$ .
- Construid un posible esquema y señalad por medio de cruces sobre la trayectoria, las posiciones sucesivas del coche a intervalos de un segundo.

De acuerdo con el enunciado del problema, un vehículo inicialmente en reposo, va aumentando su rapidez regularmente a razón de  $3 \text{ m/s}$  cada segundo, durante un intervalo de tiempo de 5 s. Eso hace que cada vez vaya más deprisa y que, por tanto, el cambio de posición que experimente cada segundo, durante el intervalo de tiempo considerado, sea cada vez más grande.

Consideraremos que en el instante inicial  $t_0 = 0$ , el móvil se encuentra en la posición dada por  $e_0 = 0$  y en reposo ( $v_0 = 0$ ). Arbitrariamente escogeremos como sentido positivo el del movimiento. De acuerdo, con lo anterior, un posible esquema sería el siguiente:



Al tratarse de un movimiento uniformemente acelerado ( $a_t = 3 \text{ m/s}^2$ ), sustituyendo los datos en las ecuaciones correspondientes, obtenemos:

- $v = 3t$
- $e = 3t^2/2$

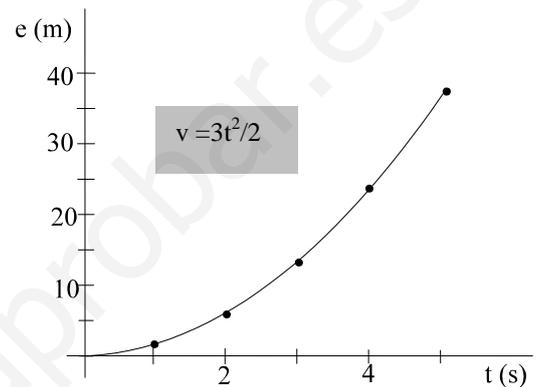
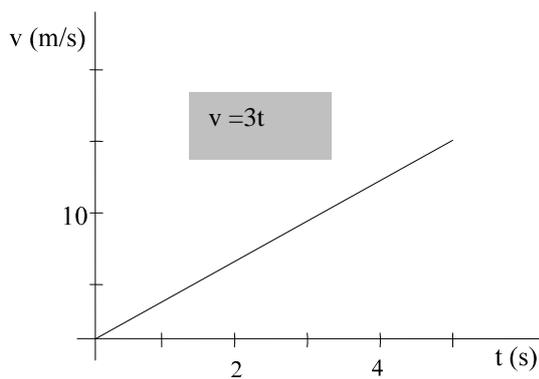
Las ecuaciones anteriores nos permiten conocer con qué rapidez se moverá y dónde se encontrará el coche en cualquier instante comprendido entre los 5 s que dura este tipo de movimiento, sin más que sustituir el valor concreto de  $t$  en ellas. Así, para  $t = 5$  s, encontramos fácilmente que la rapidez será de  $15 \text{ m/s}$  y la posición  $37,5 \text{ m}$ .

Sustituyendo valores de  $t$  en las ecuaciones anteriores obtenemos las siguientes tablas:

v(m/s)	0	3	6	9	12	15
t (s)	0	1	2	3	4	5

e(m)	0	1'5	6	13'5	24	37'5
t (s)	0	1	2	3	4	5

Las tablas concuerdan con la idea expresada de movimiento uniformemente acelerado. En efecto el hecho de que la aceleración tangencial sea constante implica que la rapidez va cambiando siempre al mismo ritmo (en este caso de 3m/s cada s), mientras que los cambios de posición, dado que el coche se mueve cada vez más rápido, son cada vez mayores. Por ejemplo, durante el primer segundo la posición del coche cambia sólo en 1'5 m mientras que en el último segundo cambia 13'5 m. En la figura siguiente se han representado gráficamente las dos tablas de valores.



Podemos ver que la primera gráfica sale una línea recta, mientras que en la segunda se obtiene una parábola, lo cual es coherente con las ecuaciones matemáticas que relacionan la rapidez y la posición con el tiempo, así como con la idea física que tenemos de movimiento uniformemente acelerado. La posición del coche sobre la trayectoria, se puede indicar colocando cruces representativas de la posición del móvil cada segundo. Sin embargo ahora como el vehículo se mueve cada vez más deprisa, dichas posiciones estarán cada vez más distanciadas entre sí.



**A.21.** Un tren de alta velocidad circula a 90 km/h cuando acelera de forma constante hasta que transcurridos 15 segundos alcanza los 306 km/h. Tomando como origen de espacios y tiempos el punto y el instante en que comenzó a acelerar, se pide:

- ¿Dónde se encontrará en el instante  $t = 5$  s?
  - Construye e interpreta las gráficas  $v-t$  y  $e-t$
  - Sobre un esquema de la trayectoria marca las posiciones sucesivas del tren a intervalos de 3 s
  - Compara el desplazamiento en el primer segundo con el desplazamiento en el último segundo.
- Rdo. a) 175 m; d) 27 m y 83 m respectivamente

**A.22.** Construid un cuadro o resumen donde se recojan las características particulares, ecuaciones y ejemplos de representaciones gráficas ( $e-t$  y  $v-t$ ) de los dos tipos de movimiento estudiados.

## 1. Cinemática

Como ya hemos señalado la utilización de magnitudes como la posición sobre la trayectoria o la rapidez, son muy útiles en el estudio de movimientos que se realicen a lo largo de una trayectoria que ya se conoce y que no cambia con las características del movimiento. Esto ocurre, por ejemplo, con el transporte por carretera, trenes, y también en trayectos rectos o circulares, es decir, en todos aquellos casos en los que se pueda obtener la posición simplemente midiendo la distancia desde el origen hasta el punto en el que se encuentre el móvil siguiendo la trayectoria. En todos esos casos, con sólo un número podemos saber dónde está el móvil ya que éste sólo puede ir por una única trayectoria y, de alguna manera, podemos medir sobre ella. Sin embargo, existen también otros movimientos cuya trayectoria no se conoce previamente, no es independiente de las características del movimiento. Este es el caso, por ejemplo, de un tiro horizontal, en el que la trayectoria descrita por el proyectil será distinta dependiendo de la rapidez inicial con que se lance y donde no podemos realizar medidas a lo largo de la trayectoria para saber dónde está el móvil porque, en principio, no conocemos dicha trayectoria.

### 4. CONSTRUCCIÓN DE MAGNITUDES ÚTILES PARA DESCRIBIR EL MOVIMIENTO AUNQUE LA TRAYECTORIA NO SE CONOZCA DE ANTEMANO

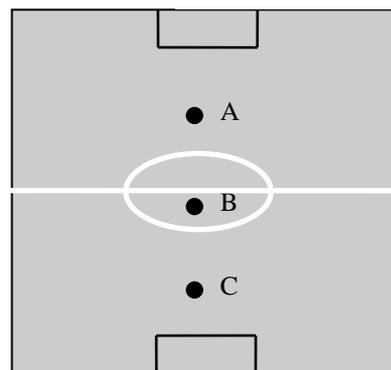
Si buscamos explicaciones comunes al movimiento de todos los cuerpos, sin tener en cuenta su naturaleza, hemos de buscar un método de hacerlo que pueda aplicarse se conozca o no previamente la trayectoria. Esto exige que, para comenzar, la posición del móvil en un instante dado se pueda indicar sin necesidad de medir a lo largo de ninguna trayectoria. Vamos pues a contestar a las mismas preguntas que antes pero ahora partiendo de este modo de dar la posición.

#### 4.1 Vector de posición y vector desplazamiento

*A.23. Proponed formas sencillas de dar la posición de un objeto que puede considerarse puntual cuando la trayectoria que sigue no se conoce de antemano. Considerad para ello el caso de un jugador de fútbol durante un partido.*



Podríamos pensar en dar la distancia más corta a que se encuentra de uno cualquiera de los lados del campo. Sin embargo, eso no sería suficiente ya que podrían haber varios jugadores situados en distintos puntos pero a la misma distancia de ese lado, tal y como se observa en la figura de la derecha en donde los tres puntos (representativos de tres jugadores A, B y C) se encuentran a la misma distancia (por ejemplo 20 m) del lado izquierdo del rectángulo (que representa el terreno de juego). *¿Qué hacer para solucionarlo?*

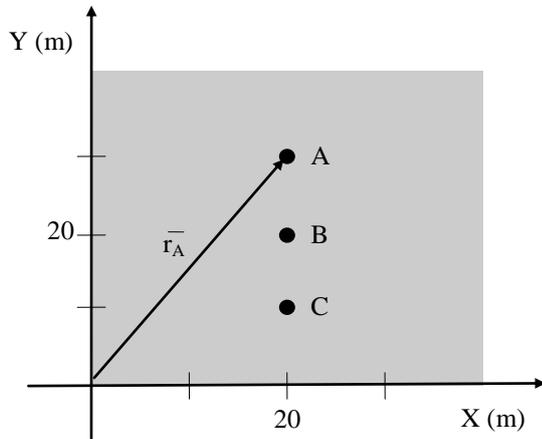


Para evitar el inconveniente señalado, podemos añadir la distancia a que está cada jugador del lado inferior del campo (por ejemplo, 30 m, 20 m y 10 m, respectivamente) a la distancia anterior, de forma que la posición de cada uno vendría dada no por un sólo número sino por dos. En general, cuando un móvil se desplaza sobre un plano sin seguir una trayectoria previamente conocida, para expresar su posición en un instante dado se suele tomar como sistema de referencia unos ejes de *coordenadas cartesianas* y se traza una flecha (*vector*) desde el origen de coordena-

das al punto en que se encuentre el móvil. A ese vector se le llama vector de posición y se simboliza por  $\vec{r}$ . Dicho vector tiene dos componentes escalares  $r_x$  y  $r_y$ , y se expresa siempre como:

$$\vec{r} = (r_x, r_y).$$

Podemos introducir este sistema de referencia en el ejemplo anterior haciendo coincidir el eje X con el lado inferior y el Y con el lado de la izquierda:



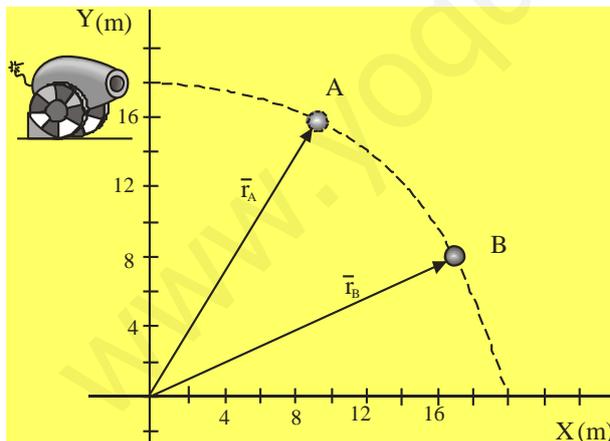
En el sistema coordenadas cartesianas definido, la posición de cada jugador en el instante representado vendrá dada por el vector de posición correspondiente:

$$\vec{r}_A = (20,30)m; \quad \vec{r}_B = (20,20)m \text{ y } \vec{r}_C = (20,10)m$$

De los cuales únicamente hemos representado  $\vec{r}_A$  para no complicar excesivamente la figura.

Además de conocer dónde se encuentra un objeto nos interesará poder expresar su cambio de posición cuando se desplace de un punto a otro. En el ejemplo que se da a continuación se plantea este problema.

**A.24.** *Proponed una magnitud que permita determinar el cambio de posición experimentado por un móvil que sigue una trayectoria no conocida de antemano. Considerad para ello, a título de ejemplo, el paso por los puntos A y B, del proyectil de la figura siguiente:*



El cambio experimentado en la posición se podrá determinar restando a la posición final  $\vec{r}_B$ , la posición inicial  $\vec{r}_A$ . Sin embargo ahora el procedimiento no es tan sencillo ya que se trata de dos magnitudes vectoriales. De hecho, mediante la resta anterior obtenemos el vector desplazamiento entre A y B de modo que:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$$

Ahora bien: ¿Cómo se restan vectores? ¿Cómo se dibuja el vector resta de otros dos? Saber restar supone también saber sumar. Además, en Física se presentan muchas situaciones en las que es necesario manejar magnitudes vectoriales. **Todo ello aconseja que, si no se ha hecho ya, nos detengamos ahora el tiempo necesario para familiarizarnos con las magnitudes vectoriales y el cálculo vectorial mediante las actividades que se proponen en el [anexo 1](#) incluido al final del libro.**

## 1. Cinemática

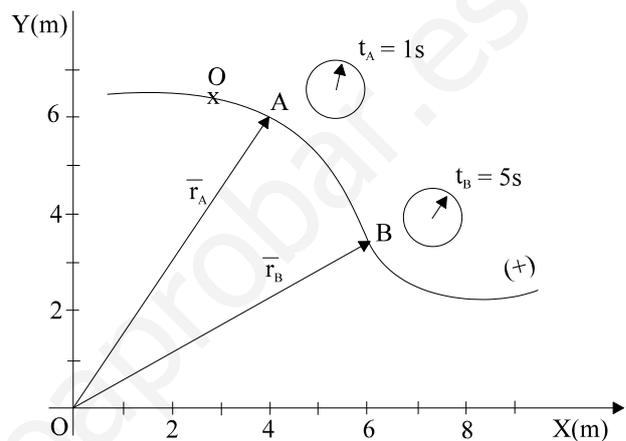
Sabiendo sumar y restar vectores gráfica y analíticamente, resulta sencillo determinar para el ejemplo propuesto el cambio de posición experimentado por el proyectil cuando pasa del punto A al B es decir, el vector desplazamiento:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A = (17, 8) - (9, 16) = (8, -8) \text{ m} . \quad |\Delta \vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} = \sqrt{64 + 64} = 11'3 \text{ m} .$$

El vector vendrá representado por una flecha orientada con origen en A y extremo en B  
A continuación y a modo de síntesis se propone el siguiente ejercicio:

**A.25.** Una partícula se mueve sobre la trayectoria de la figura adjunta pasando por los puntos A y B en los instantes que marcan los relojes.

- Expresad los vectores de posición en los instantes de la figura.
- Vector desplazamiento y su módulo en el intervalo de tiempo representado.
- Si el espacio del punto A es 1 m y el del punto B es 5 m, determinad el desplazamiento espacial en el intervalo considerado.
- Si la partícula se desplaza en el mismo sentido, hallad la distancia recorrida en dicho intervalo
- ¿En qué casos coincidirían el valor absoluto del desplazamiento espacial con el módulo del vector desplazamiento?



La resolución de los dos primeros apartados tan sólo exige manejar correctamente los conceptos de vector de posición y vector desplazamiento. La simple observación de la figura es suficiente para poder escribir que:

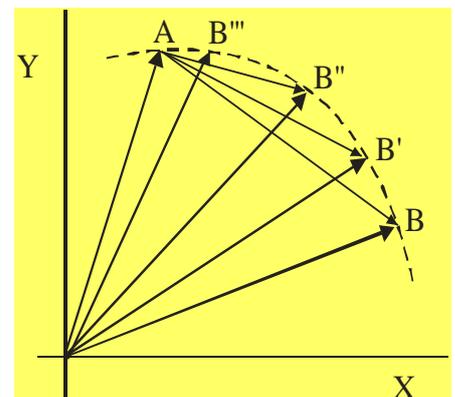
$\vec{r}_A = (4, 6) \text{ m}$  y  $\vec{r}_B = (6, 3) \text{ m}$  y restando obtenemos:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A = (6, 3) - (4, 6) = (2, -3) \text{ m} \text{ y el módulo: } |\Delta \vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} = \sqrt{4 + 9} = 3'6 \text{ m}$$

En cuanto al desplazamiento espacial o cambio en la posición sobre la trayectoria, éste será:  $\Delta e = e_B - e_A = 4\text{m}$ . El valor obtenido coincide en este caso con el de la distancia recorrida (no hay retroceso). Sin embargo es mayor que el módulo del vector desplazamiento, debido a que la trayectoria es curva. Si la trayectoria fuera rectilínea el valor absoluto de  $\Delta e$  y el módulo del vector desplazamiento coincidirían.

No obstante, en general, sea cual sea la forma de la trayectoria, cuanto más próximo a **A** se halle el punto **B**, más parecidos serán los valores de  $\Delta e$  y  $|\Delta \vec{r}|$ . De hecho, si **B** estuviera infinitamente próximo a **A**, ambos valores coincidirían. Este efecto se puede apreciar visualmente en la figura adjunta en la que hemos ido aproximando sucesivamente el punto **B** (que pasa a ser **B'**, **B''**, **B'''** etc.) al **A**.

También puede observarse que el vector desplazamiento infinitesimal con origen en el punto **A**, sería tangente a la trayectoria en el punto **A** y en el sentido del movimiento.



## 4.2 Vector velocidad y vector aceleración

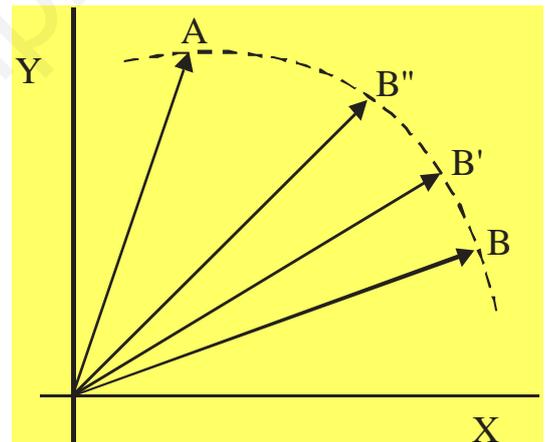
A la magnitud que mide lo aprisa que ha cambiado el vector de posición en un intervalo de tiempo dado, se la llama velocidad media. Siguiendo un razonamiento similar al empleado con la rapidez media, es fácil comprender que la velocidad media se expresará como:

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

La velocidad media, sin embargo, es una magnitud vectorial y como tal tiene un módulo, y una dirección y sentido determinados. Éstos últimos coincidirán **siempre** con los del vector desplazamiento  $\Delta \vec{r}$ , ya que (como se justifica en el anexo sobre cálculo vectorial) al dividir un vector por un número positivo (en este caso  $\Delta t$ ) siempre se obtiene otro vector en la misma dirección y sentido que el primero.

Como ya hemos señalado, los valores medios nos proporcionan muy poca información sobre el movimiento de un cuerpo. Si quisiéramos conocer de verdad un movimiento sería mucho mejor disponer de los valores de magnitudes como la posición o la velocidad, en cada instante. En este caso nos interesa conocer el módulo de la velocidad, su dirección y su sentido, en un instante determinado.

La figura representa dos posiciones A (anterior) y B (posterior) de un objeto que se mueve hacia la derecha sobre la trayectoria dibujada. Para poder deducir la dirección y el sentido del vector velocidad en el preciso instante en que el móvil pasó por el punto A, se han representado posiciones posteriores del móvil cada vez más próximas a dicho punto (B', B'', B''').



**A.26.** Dibujad en cada caso un vector que pueda representar el vector velocidad media correspondiente al tramo AB, AB' y AB''. Luego razonad cual debería ser la dirección y sentido de la velocidad instantánea en A y dibujad un vector que la represente.

La realización de la actividad anterior, permite darnos cuenta de que la velocidad instantánea es una magnitud vectorial cuyo módulo coincidirá **siempre** con el valor absoluto de la rapidez instantánea, ya que, como hemos visto anteriormente, conforme el intervalo de tiempo considerado es más pequeño, el valor de  $|\Delta \vec{r}|$  es más parecido al valor absoluto de  $\Delta e$ , por lo que “en el límite”, es decir, cuando  $\Delta t$  tienda a 0 (sea tan pequeño como se quiera), ambos valores ( $|\vec{v}|$  y “v” en valor absoluto) serán iguales. En cuanto a la dirección y el sentido de la velocidad instantánea, habrá quedado claro que será un vector tangente a la trayectoria en el punto considerado y en el sentido del movimiento ya que conforme vamos acortando el intervalo de tiempo, la dirección del vector desplazamiento se va acercando cada vez más a la dirección de la tangente y el vector velocidad (como ya hemos visto) siempre tiene la misma dirección y sentido que el vector desplazamiento.

La forma matemática de expresar esto es escribiendo que  $\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

## 1. Cinemática

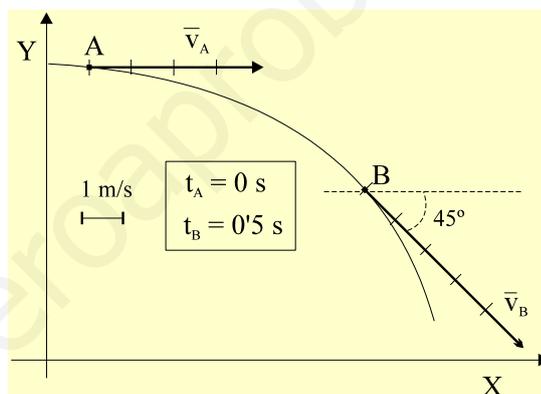
De ahora en adelante, cuando nos refiramos a la velocidad, se entenderá que estamos hablando de la velocidad instantánea, que tiene un **módulo** (coincidente **siempre** con el valor absoluto de la rapidez instantánea), una **dirección** (la recta que contiene al vector) y un **sentido**, de manera que basta que cambie alguna de estas características para que el vector velocidad cambie. El hecho de que habitualmente muchas personas identifiquen la rapidez con la velocidad, se debe a que ignoran el carácter vectorial de ésta última. Por otra parte, dada la coincidencia existente en todo momento entre los valores de la rapidez (absolutos) y del módulo de la velocidad, los posibles cambios en ambas magnitudes se realizarán a la vez.

**A.27.** ¿Es posible circular siempre a la misma **velocidad** por una carretera con curvas?

De acuerdo con el razonamiento anterior es totalmente imposible (a menos que uno se salga de la carretera) ya que si la trayectoria es curvilínea, ello obliga a que el vector velocidad cambie, al menos, en dirección y sentido. Es preciso, pues distinguir entre el lenguaje cotidiano (en el que se identifica velocidad con módulo de la velocidad) y el lenguaje científico (en el que la velocidad no sólo consta de un módulo sino también de una dirección y un sentido).

Además de conocer la velocidad de un móvil nos interesará poder evaluar lo aprisa que dicha velocidad cambia:

**A.28.** Cuando varía la velocidad con que se mueve un cuerpo tal y como se indica en el esquema de la derecha, ¿cómo podemos medir el cambio de velocidad experimentado?, ¿y la intensidad con que se ha producido dicho cambio?



Parece claro que el cambio de velocidad vendrá dado por el vector  $\Delta \vec{v}$  el cual se obtendrá restando al vector  $\vec{v}_B$  el  $\vec{v}_A$ . Por otra parte, cuanto mayor haya sido el  $\Delta \vec{v}$  y menor el tiempo  $\Delta t$  empleado, más “intenso” habrá resultado, es decir, mayor será la aceleración experimentada (vector aceleración media).

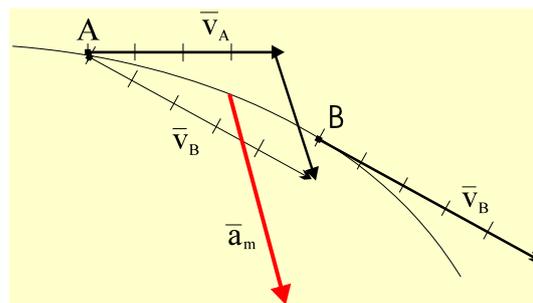
Así pues, el vector aceleración media se expresará como:  $\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$

La aceleración media representa lo rápidamente que ha cambiado el vector velocidad en el transcurso del tiempo  $\Delta t$ . De acuerdo con la expresión introducida, es fácil comprender que dicho vector **siempre** tendrá la misma dirección y sentido que el vector  $\Delta \vec{v}$  (puesto que resulta de dividir dicho vector por un número positivo,  $\Delta t$ ) y que si el vector velocidad no cambia **en nada** durante todo el intervalo de tiempo considerado, el vector aceleración será 0 (por grande que pueda ser la velocidad). Si nos fijamos en el ejemplo propuesto resulta que:

$\vec{v}_A = (4, 0) \text{ m/s}$  y  $\vec{v}_B = (5 \cdot \cos 45^\circ, 5 \cdot \cos 135^\circ) = (3.5, -3.5) \text{ m/s}$  de modo que:

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{(3.5, -3.5) - (4, 0)}{0.5} = \frac{(-0.5, -3.5)}{0.5} = (-1, -7) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

El módulo del vector aceleración media será:  $|\vec{a}_m| = \sqrt{1 + 49} = 7\sqrt{2} \text{ m/s}^2$  y el vector será el representado en la figura derecha. Como puede verse, su dirección y sentido coinciden con los del vector  $\Delta\vec{v}$  y hemos situado su origen en un punto arbitrario de la trayectoria entre las posiciones A y B.



**A.29.** ¿Qué pasaría si el módulo de la velocidad a lo largo del trayecto que va desde A hasta B se hubiera mantenido constante?

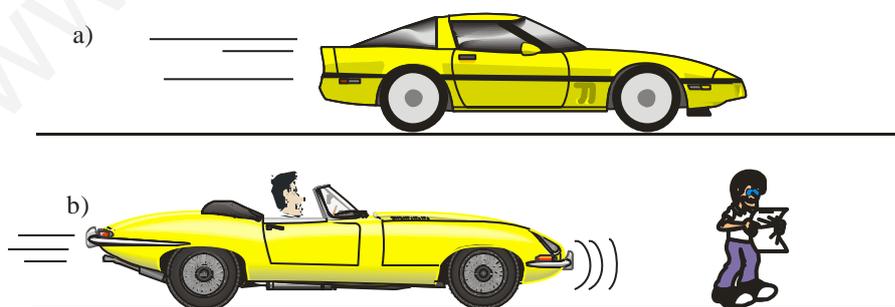
En este caso es fácil comprobar que al cambiar la velocidad en dirección, **sí** que habría vector  $\Delta\vec{v}$  y por tanto **vector aceleración**, pero, como la rapidez (y, por tanto el módulo de la velocidad) son constantes, la **aceleración tangencial** sería 0. Esto nos permite comprender la diferencia conceptual existente entre una y otra magnitud (aunque más adelante veremos que están relacionadas).

Como ya hemos comentado anteriormente, la mejor información de un movimiento se obtiene de los valores instantáneos de las magnitudes. En este caso la aceleración instantánea será una magnitud que nos indicará lo aprisa que está cambiando el vector velocidad en un instante determinado. Para obtenerla habría que calcular el vector aceleración media correspondiente a un intervalo de tiempo infinitesimal, es decir, sería a lo que tiende el vector aceleración media cuando el intervalo de tiempo considerado ( $\Delta t$ ) tiende a 0. Matemáticamente esto puede escribirse como:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \text{ cuando } \Delta t \rightarrow 0.$$

Naturalmente, será un vector cuya dirección y sentido coincidirán con los que tenga el vector  $\Delta\vec{v}$  en el intervalo de tiempo infinitesimal considerado.

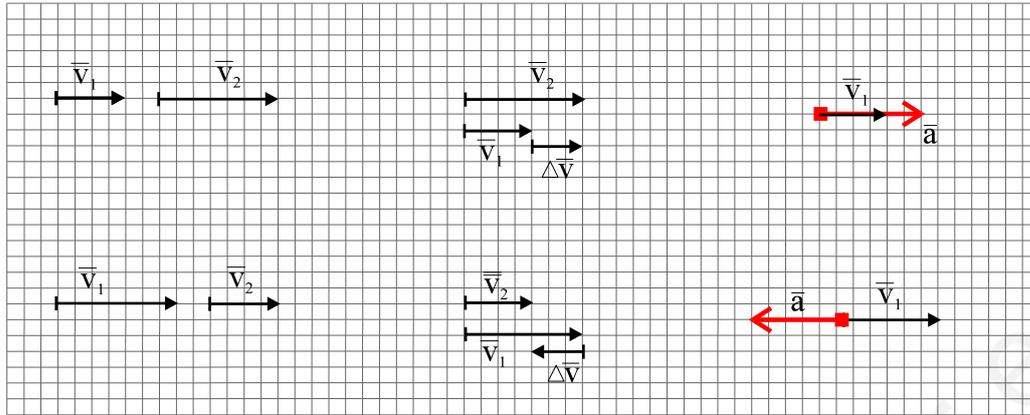
**A.30.** Supongamos un coche que va por una carretera recta aumentando regularmente su velocidad. a) Dibujad un esquema de la situación y justificad hacia donde iría el vector aceleración en un instante dado. b) Ídem para el caso de que el coche frene.



En ambos casos la trayectoria es rectilínea y el móvil se desplaza en el mismo sentido, por lo que el vector velocidad no cambia de dirección ni sentido. Sin embargo en el primero el módulo de la velocidad va aumentando, mientras que en el segundo va disminuyendo. Para saber hacia donde

# 1. Cinemática

irá el vector aceleración bastará ver hacia donde va  $\Delta \vec{v}$  que obtendremos al restar  $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$  correspondientes a un intervalo de tiempo infinitamente pequeño (*infinitesimal*). Los resultados de realizar estas operaciones se dan en las figuras siguientes:



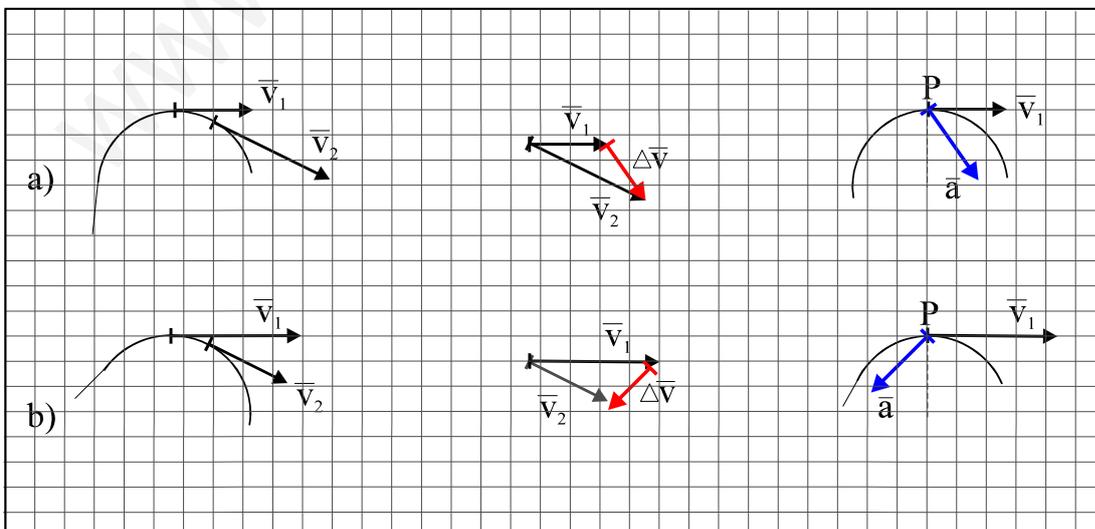
En el esquema anterior, la mitad superior corresponde al caso del coche cuando, sin modificar la dirección, se aumenta el módulo del vector velocidad. Por el contrario, la mitad inferior corresponde a una disminución del módulo del vector velocidad cuando, al ver a la persona que está distraída leyendo, frena para no atropellarla, pero sin desviarse.

En el ejemplo considerado, el vehículo modifica sólo el módulo de la velocidad. Sin embargo existen otras situaciones en las que puede cambiar también la dirección de la velocidad. ¿Cómo es el vector aceleración en esos casos? A continuación se abordan algunas de estas situaciones.

**A.31.** Un motorista entra en una curva circular. Dibujad un esquema y situar en él un vector representativo de la aceleración en un instante dado en los siguientes casos:

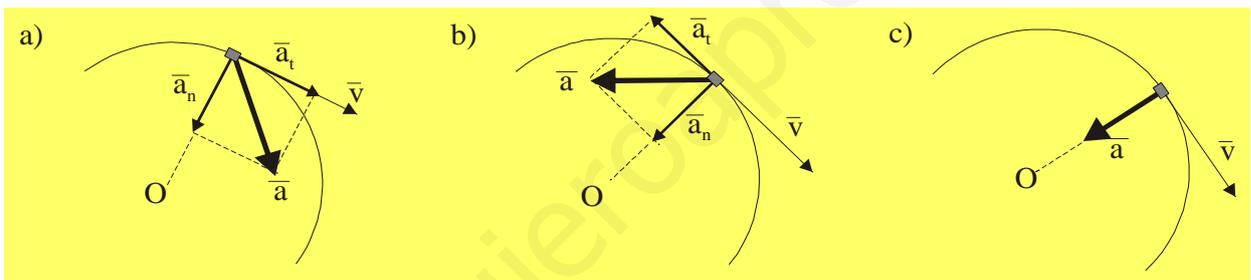
- Entra aumentando su velocidad
- Entra y frena disminuyendo su velocidad
- Da la curva sin salirse pero siempre con la misma rapidez

En los tres casos se trata de una trayectoria curva en la que la velocidad va cambiando de dirección y sentido conforme se va desplazando el móvil. Por tanto, al cambiar la velocidad, en los tres casos existirá vector aceleración. La diferencia está en lo que le ocurre al módulo del vector velocidad, que determinará el sentido del vector  $\vec{a}$ , tal y como se observa en el siguiente esquema:



Como podemos ver en el primer caso al ir aumentando el módulo, el vector velocidad  $\vec{v}_2$  sería mayor que el  $\vec{v}_1$ . En un intervalo de tiempo infinitesimal (tan pequeño como queramos) el vector  $\Delta\vec{v}$  correspondiente será el representado en la primera figura, es decir, desviado hacia la derecha y lo mismo ocurriría con el vector aceleración. Análogamente, se puede razonar en el segundo caso en el que, al disminuir la velocidad, el vector aceleración en el punto P, forma un ángulo mayor de  $90^\circ$  con el vector velocidad. Cabe preguntarse pues qué sucede en un tercer caso (que no hemos representado), en el que la trayectoria sea circular y el módulo de la velocidad no cambie. Para comprender lo que ocurre podemos plantearnos primero qué pasaría con la dirección del vector  $\Delta\vec{v}$  (siempre suponiendo un  $\Delta t$  que tiende a 0), y por tanto con la del vector  $\vec{a}$ , en cualquiera de los dos casos anteriores si el módulo del vector  $\vec{v}_2$  se pareciera cada vez más al del vector  $\vec{v}_1$ . No es difícil darse cuenta que en este supuesto el ángulo entre  $\vec{v}_1$  y  $\vec{a}$  se aproximaría cada vez más a  $90^\circ$ , de modo que en el caso de que el módulo de la velocidad sea constante y la trayectoria circular, podemos concluir que el vector aceleración será perpendicular al vector velocidad en cualquier instante.

Otra forma de razonar lo que sucede en cada una de las tres situaciones anteriormente descritas es descomponer el vector aceleración en dos: uno tangente a la trayectoria (vector aceleración tangencial) y otro perpendicular a la trayectoria (y siempre dirigido hacia el centro de curvatura) o vector aceleración normal, tal y como se representa en el esquema siguiente:



El vector  $\vec{a}_t$  nos indica el cambio de la velocidad en módulo mientras que el vector  $\vec{a}_n$  nos muestra el cambio de la velocidad en dirección. En el tercer caso (movimiento circular uniforme) como el módulo permanece constante, la aceleración tangencial es 0 y toda la aceleración es normal (perpendicular a la velocidad), con lo que se cumplirá que:  $\vec{a} = \vec{a}_n$

Podemos concluir pues que:

- ✓ Si el vector velocidad **no cambia en nada** (ni en módulo ni en dirección o sentido), no existe vector aceleración.
- ✓ Si la velocidad **sólo cambia en módulo** (el cuerpo se mueve en línea recta), el vector aceleración tiene la misma dirección que el vector velocidad. Además tendrán el mismo sentido si el módulo de la velocidad va aumentando y contrario si el módulo de la velocidad va disminuyendo.
- ✓ Si **el módulo de la velocidad no cambia pero sí su dirección**, el vector aceleración es perpendicular a la velocidad y dirigido hacia el centro de curvatura.
- ✓ Finalmente, si la velocidad **cambia en módulo y dirección**, el vector aceleración tiene una dirección tal que puede ser descompuesto en otros dos, uno según la misma dirección que la velocidad y el otro perpendicular a la velocidad.

Podemos unificar las conclusiones anteriores si escribimos el vector aceleración como la suma:

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$$

## 1. Cinemática

A dichos vectores se les conoce como vectores componentes intrínsecos del vector aceleración. Conviene darse cuenta de que cuando la trayectoria de un movimiento se conozca de antemano y utilicemos magnitudes escalares para estudiarlo, la aceleración sobre la trayectoria coincidirá básicamente con lo que aquí se ha denominado aceleración tangencial (de ahí que hayamos utilizado la misma notación " $a_t$ " para ambas).

*A.32. Elaborad una tabla del tamaño conveniente en la que se recojan todas las magnitudes introducidas hasta aquí para poder describir un movimiento (desde la posición hasta la aceleración) incluyendo al menos: el símbolo utilizado, la unidad internacional en que se mide, su significado físico, su definición operativa (si la tiene), posibles relaciones de interés con otras magnitudes. Haced dos grandes grupos distinguiendo entre las magnitudes escalares y vectoriales.*

Las magnitudes vectoriales introducidas, nos permiten estudiar el movimiento de cualquier cuerpo independientemente de la trayectoria que éste siga. No obstante, dada su mayor sencillez, en todos aquellos problemas en los que el cuerpo se mueva a lo largo de una trayectoria que se conoce de antemano, se preferirá utilizar el tratamiento escalar por su mayor comodidad.

## 5. UTILIDAD DEL CUERPO DE CONOCIMIENTOS CONSTRUIDO

Para terminar el tema, vamos a poner a prueba la utilidad y potencia de los conocimientos construidos estudiando algunos movimientos reales especialmente importantes.

### 5.1 El movimiento de caída libre

*A.33. Recordad lo estudiado en cursos anteriores sobre el movimiento de caída libre de los cuerpos, esto es, en condiciones tales que el rozamiento con el aire pueda considerarse despreciable, comentando de qué tipo de movimiento se trata y escribiendo las ecuaciones correspondientes.*

Cuando un cuerpo se mueve libremente en dirección vertical (sube o baja sometido sólo a la acción de la gravedad), podemos comprobar experimentalmente que siempre que se encuentre a alturas no muy grandes, el movimiento es uniformemente acelerado y que el valor de la aceleración sobre la trayectoria ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) es común para todos los cuerpos sea cual sea su masa. De acuerdo con ello, siempre que el rozamiento con el aire sea o se pueda considerar despreciable, todos los cuerpos que, por ejemplo, se dejen caer desde la misma altura llegarán al suelo en el mismo tiempo.

Galileo realizó ya en el siglo XVII una serie de experiencias para estudiar el movimiento de caída libre de los cuerpos de las que se deducía este resultado. En la actualidad dicho resultado se halla bien establecido y se ha verificado reiteradamente por los científicos en experiencias realizadas en condiciones cuidadosamente controladas, con medidas muy precisas. No obstante, en la época de Galileo se trataba de un resultado sorprendente, que era no sólo contrario a las observaciones cotidianas (no vemos que un papel y una piedra dejados caer desde la misma altura lleguen al suelo en el mismo tiempo), sino también a creencias muy arraigadas sobre cómo era el Mundo.



Al tratarse de una trayectoria rectilínea es posible aplicar un tratamiento escalar para describir el movimiento, lo cual exige escoger un punto de la trayectoria como origen (para medir la posición sobre la misma) y un sentido como positivo. La aceleración de la gravedad se simboliza mediante la letra “g”, con lo que las ecuaciones de este tipo de movimiento serán:

$$(1) v = v_0 + g(t-t_0)$$

$$(2) e = e_0 + v_0(t-t_0) + gt^2/2$$

**A.34.** En una experiencia destinada a determinar el valor de la aceleración de la gravedad del lugar, se procedió a dejar caer un balón de básquet y dejarlo rebotar contra el suelo. Utilizando un sensor de posición y rapidez, se obtuvieron los siguientes datos para el primer rebote:

$t$ (s)	0	0'0248	0'0495	0'0742	0'099	0'1238	0'1486	0'1734	0'1983	0'2231
$e$ (m)	1'598	1'498	1'406	1'322	1'241	1'168	1'099	1'037	0'981	0'929

$t$ (s)	0'0124	0'0371	0'0619	0'0866	0'1114	0'1362	0'1610	0'1858	0'2107	0'2355
$v$ (m/s)	-4'04	-3'71	-3'42	-3'24	-2'98	-2'75	-2'51	-2'26	-2'10	-1'78

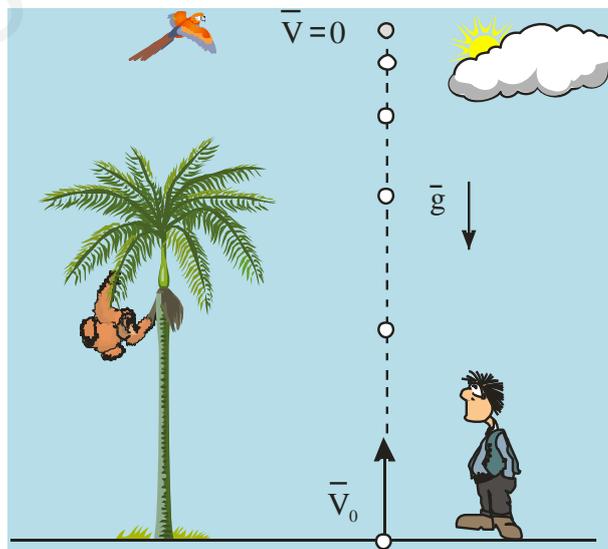
a) Representad las gráficas  $v-t$  y  $e-t$

b) ¿Qué conclusiones se pueden extraer al analizar ambas gráficas?

c) Determinad a partir de la gráfica  $v-t$  el valor de la aceleración de la gravedad

**A.35.** Se lanza un cuerpo hacia arriba con una rapidez de 50 m/s . ¿Qué altura alcanzará?

Al lanzar el cuerpo hacia arriba desde el suelo éste sale con una rapidez inicial  $v_0$  pero debido a que se encuentra sometido a la aceleración gravitatoria, sube cada vez más lentamente hasta que llega un momento en que se detiene y comienza a descender cada vez más aprisa. Tanto en la subida como en la bajada supondremos despreciable el rozamiento con el aire por lo que la aceleración del movimiento será la gravitatoria. Se trata de un movimiento en “caída libre”. En principio podemos suponer que el objeto ha sido lanzado verticalmente y que el valor de la altura máxima dependerá de la rapidez inicial “ $v_0$ ” y del valor “g” de la aceleración de la gravedad. (sabemos que la masa no influirá).



Estas ideas se pueden resumir mediante la ecuación:  $h_{\max} = h(v_0, g)$

Podemos tratar de profundizar un poco más haciendo alguna hipótesis respecto a cómo van a influir cada una de esas variables en la altura máxima alcanzada (siempre suponiendo que las demás permanecen constantes). Así, por ejemplo, cabe pensar que, a igualdad de los restantes factores: Cuanto mayor sea  $v_0$  (se lance hacia arriba con mayor rapidez) más alto llegará. Cuanto menor sea la gravedad la aceleración del objeto también será menor y su rapidez irá disminuyendo más lentamente, por lo que la altura máxima aumentará (esto ocurriría, por ejemplo, si el lanzamiento se realizará en la Luna en lugar de hacerlo sobre la superficie terrestre).

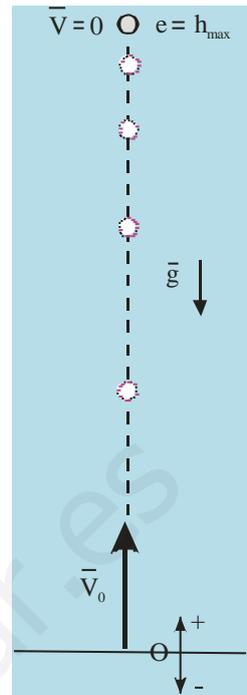
## 1. Cinemática

Como la trayectoria es conocida (línea recta perpendicular al suelo), podemos aplicar un tratamiento escalar para resolver el problema. Para ello escogemos arbitrariamente un punto de la trayectoria como origen de espacios (por ejemplo el punto del suelo desde donde se lanza) y un sentido como positivo (por ejemplo hacia arriba), tal y como se indica en la figura adjunta. Así mismo consideraremos como origen de tiempos el preciso instante en que se lanza ( $t_0 = 0$ ).

Para resolver el problema conviene ahora identificar qué tipo de movimiento es y escribir las ecuaciones generales del mismo:

La aceleración tangencial es constante y según el esquema anterior será negativa e igual a la aceleración de la gravedad. Se trata, pues, de un movimiento uniformemente acelerado (MUA), cuyas ecuaciones son:

$$\begin{aligned} v &= v_0 + a_t (t-t_0) && \text{para la rapidez } v \text{ en cualquier instante } t. \\ e &= e_0 + v_0 (t-t_0) + a_t (t-t_0)^2/2 && \text{para la posición } e \text{ en cualquier instante } t. \end{aligned}$$



Si conocemos la rapidez y la posición en algún instante del movimiento podremos concretar las ecuaciones generales anteriores a nuestro caso. Teniendo en cuenta las condiciones imperantes en el problema los datos serían:

Un objeto que en el instante  $t_0 = 0$  se lanza desde el suelo ( $e_0 = 0$ ) verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial  $v_0$  (positiva) de 50 m/s y que se mueve con una aceleración sobre la trayectoria constante y negativa ( $-g$ ), tanto al subir como al bajar.

De acuerdo con lo anterior, las ecuaciones de la rapidez  $v$  y de la posición  $e$  en cualquier instante (ecuaciones del movimiento) vendrán dadas en este problema por:

$$\begin{aligned} (1) \quad v &= v_0 - gt \\ (2) \quad e &= v_0 t - gt^2/2 \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores hemos optado por colocar el signo correspondiente (de acuerdo con el criterio arbitrario especificado al comienzo) antes de sustituir ningún valor numérico (podríamos también no haberlo hecho y poner los signos al final cuando se sustituyan los valores numéricos). Es importante tener en cuenta que los signos sólo se ponen a los datos (nunca a las incógnitas) y una sola vez (a las letras o a los números). La altura máxima coincidirá en este caso con el valor de la posición  $e$  durante la subida en el preciso instante en que el objeto se para (momentáneamente) para volver a caer. Ese instante puede calcularse haciendo  $v = 0$  en la ecuación (1) y despejando  $t$ , con lo que:  $0 = v_0 - gt \rightarrow t = v_0/g$

Sustituyendo ahora en la ecuación (2) queda que:  $e = v_0 \cdot \left(\frac{v_0}{g}\right) - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{v_0}{g}\right)^2$  y simplificando

obtenemos la altura máxima: 
$$e = \frac{v_0^2}{2g}$$

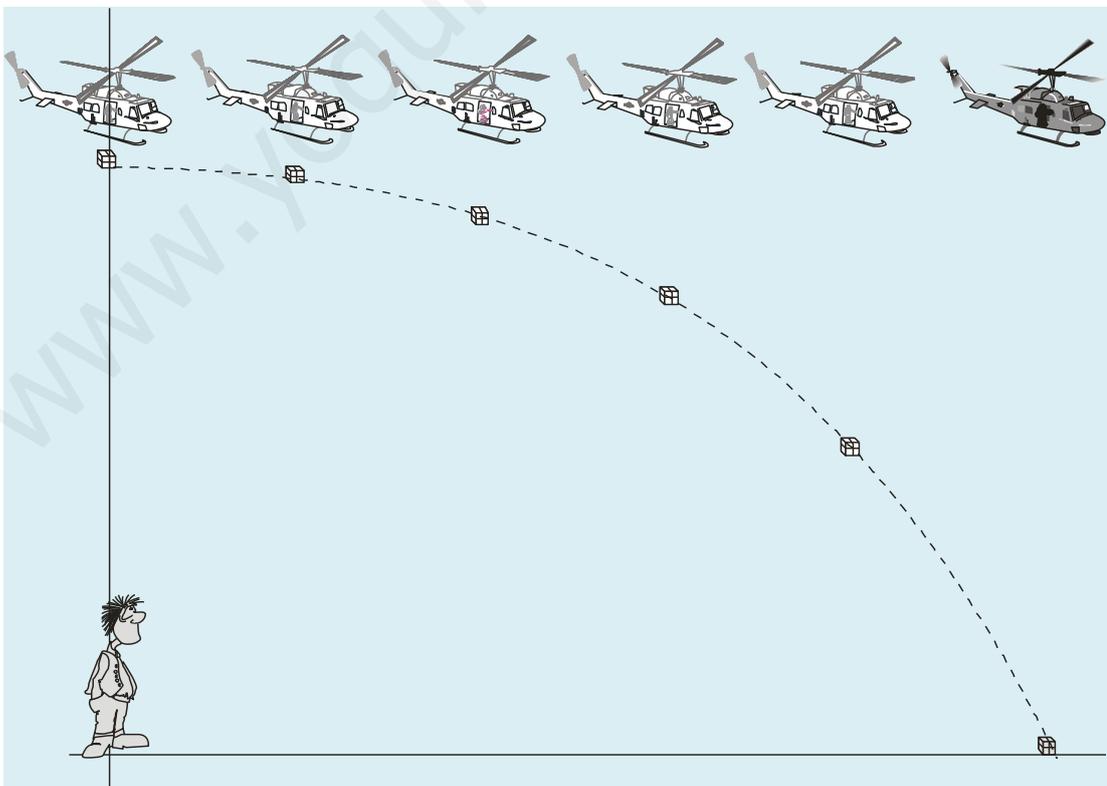
Sustituyendo los valores numéricos (haremos  $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ ), nos queda que:  $e = \frac{50^2}{2 \cdot 10} = 125 \text{ m}$

El resultado literal obtenido es dimensionalmente homogéneo (una longitud en ambos lados). además cuanto mayor es la rapidez con que se lanza el objeto mayor altura máxima alcanzará, pero ahora, es posible darse cuenta de una forma más precisa cómo influye esa variable. En efecto, aunque a primera vista pudiera pensarse que si se lanza un objeto con doble rapidez inicial que otro, alcanzaría el doble de altura. El resultado anterior puede ayudarnos a comprender que ello no es así ya que, al estar la rapidez inicial elevada al cuadrado, la altura sería cuatro veces mayor. Por otra parte, se puede ver también que si no hubiese aceleración gravitatoria, la velocidad no cambiaría y el cuerpo subiría indefinidamente. Finalmente, conviene tener en cuenta que en el problema hemos supuesto que “g” es constante. Sin embargo esto es una aproximación que no funciona cuando se manejan alturas muy grandes como, por ejemplo, en el lanzamiento de satélites, como se verá en cursos posteriores.

Una cuestión que podemos plantearnos ahora es cómo estudiar el movimiento de caída libre cuando éste no se realiza según una trayectoria rectilínea tal y como ocurre cuando desde una cierta altura se dispara horizontalmente un proyectil (tiro horizontal).

## 5.2. El tiro horizontal

En el estudio anterior analizamos el movimiento de caída de “graves” considerando únicamente una trayectoria vertical. sin embargo, existen otros movimientos más complejos, como por ejemplo el de proyectiles, cuya naturaleza podemos investigar. el propio Galileo en el siglo XVII se planteó el estudio de este tipo de movimientos, llegando a obtener algunos resultados de carácter general. El tema presentaba un indudable interés práctico debido fundamentalmente a la importancia creciente de la artillería en aquella época. En la actualidad, los conocimientos sobre este tipo de movimientos, siguen utilizándose en el lanzamiento de proyectiles, puesta en órbita de satélites, suministro de víveres desde aviones, etc.



## 1. Cinemática

Para hacer el problema del tiro horizontal más abordable, no tendremos en cuenta la fricción con el aire y supondremos que tanto el alcance máximo como la altura de lanzamiento son lo suficientemente pequeños como para despreciar la curvatura terrestre y considerar la aceleración de la gravedad como un vector constante (módulo, dirección y sentido), durante todo el trayecto.

**A.36.** *Proponed algún ejemplo de movimiento que pueda considerarse como "tiro horizontal".*

Existen numerosos ejemplos de tiro horizontal en la vida diaria, como el de un chorro de agua que sale horizontalmente por una manguera, la caída de una bola que rueda por la superficie de una mesa, un disparo de cañón desde lo alto de una torre, el movimiento de un objeto que se deja caer desde un avión en pleno vuelo (que también sería visto como un tiro horizontal por las personas situadas en tierra), etc.

**A.37.** *Proceded a realizar un tiro horizontal lanzando un objeto pequeño y emitir hipótesis acerca del tipo de movimiento implicado con el fin de explicar la trayectoria descrita.*

Al realizar la experiencia vemos que el objeto lanzado avanza al mismo tiempo que cae. Este hecho lo interpretó Galileo como la superposición de dos movimientos, uno horizontal debido a la velocidad inicial con que se lanzó y otro vertical debido al peso del cuerpo. (Si no hubiese gravedad el objeto seguiría moviéndose en línea recta según la horizontal).

**A.38.** *¿Qué cabe esperar que ocurra con la velocidad del objeto según la horizontal?, ¿irá disminuyendo conforme el objeto avance o se mantendrá constante?*

Galileo contestó a la pregunta anterior afirmando que la velocidad según la horizontal no se vería afectada (recordemos que estamos suponiendo el rozamiento con el aire despreciable). Para él intervenían dos movimientos simples uno según la horizontal (el movimiento rectilíneo y uniforme que tendría el proyectil si no pesara) y el otro según la vertical (el movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado que tendría el proyectil si se hubiera dejado caer desde lo alto de la torre) y ambos se superponían sin interferirse el uno al otro. Con ello no hizo sino analizar un problema complejo con el fin de hacer posible su estudio.

**A.39.** *Si la hipótesis anterior fuese correcta ¿qué pasaría con el tiempo empleado por el proyectil en llegar al suelo cuando se lanza horizontalmente y cuando en lugar de ello se deja caer desde el mismo punto? ¿serían distintos o iguales?*

Si efectivamente el tiro horizontal pudiera considerarse como la superposición de dos movimientos simples (rectilíneo y uniforme de avance y rectilíneo uniformemente acelerado de caída) sin que se interfieran entre ellos, dichos tiempos tendrían que coincidir, independientemente de la velocidad con que se hubiera lanzado horizontalmente el proyectil. En palabras de Galileo:

"... Si desde lo alto de una torre disparásemos con un cañón horizontalmente contra un blanco, según fuera la carga de pólvora, el proyectil caería a tierra unas veces a mil yardas, otras a cuatro mil, otras a diez mil, etc., pero siempre invertiría el mismo tiempo en llegar al suelo, que coincidiría con el que tardaría en caer la bala desde la boca de la pieza hasta el suelo si, falta de impulso, lo hiciese según la vertical. Parece pues cosa admirable que en el mismo intervalo de tiempo invertido en la caída perpendicular a tierra desde una altura, digamos, de 100 yardas, balas iguales disparadas violentamente serían capaces de recorrer cuatrocientas, mil y aun diez mil yardas".

**A.40.** *Proponed algún diseño experimental fácil de realizar con el que se pueda comprobar la igualdad de tiempos mencionada.*

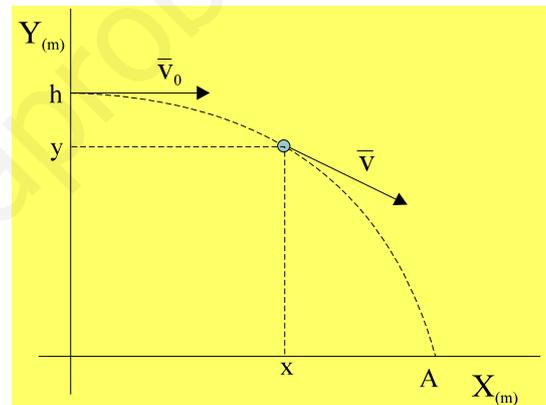
Una posibilidad sería efectuar un tiro horizontal con un proyectil lanzado desde una cierta altura. A continuación dejarlo caer desde el mismo punto según la vertical y comparar los tiempos de caída obtenidos para comprobar si son iguales. No obstante este diseño, a no ser que se disponga de material adecuado, no es posible debido a que los brevísimos tiempos de caída impiden tomar medidas con la suficiente precisión, por lo que en ese caso necesitamos deducir a partir de esa supuesta igualdad de tiempos alguna consecuencia que podamos medir mejor:

Si el tiempo que tarda en llegar al suelo un proyectil lanzado horizontalmente, es el mismo que tardaría dejado caer verticalmente desde la misma altura, se pueden escribir las ecuaciones  $x = x(t)$  para el movimiento horizontal e  $y = y(t)$  para el vertical, eliminar el tiempo entre ambas y obtener así la ecuación del movimiento  $y = y(x)$ . Mediante dicha ecuación podemos relacionar, por tanto, la altura “h” desde donde se hace el lanzamiento con el alcance “A” correspondiente (distancia entre el punto de impacto contra el suelo y la base de la “torre”) y comprobar si los datos experimentales se ajustan o no a ella.

**A.41.** Haced operativa la hipótesis de Galileo, escribiendo  $x=x(t)$  e  $y=y(t)$  para los supuestos movimientos de un tiro horizontal y a continuación obtened la ecuación de la trayectoria  $y = y(x)$  por eliminación del tiempo entre ambas.

Aplicando la ecuación del movimiento uniforme para el desplazamiento según el eje X en el que  $x_0 = 0$ ,  $t_0 = 0$ ,  $a_t = 0$  y  $v = v_0$ , obtenemos que:  $\mathbf{x = v_0 \cdot t}$  (1)

Para el movimiento según la vertical tendríamos que  $y_0 = h$ ,  $t_0 = 0$ ,  $a_t = -g$ , y  $v_0 = 0$ , con lo que la posición en cualquier instante vendría dada por:  $\mathbf{y = h - gt^2/2}$  (2)



Despejando el tiempo “t” en la ecuación (1) y sustituyendo en la (2) obtenemos  $y = h - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2}$

En el instante en que el proyectil choque contra el suelo ocurre que  $y = 0$  y que  $x = A$  (alcance), de modo que haciendo  $y = 0$  y  $x = A$  en la expresión anterior, obtenemos:

$$h = \frac{g \cdot A^2}{2 \cdot v_0^2} \text{ y finalmente: } h = k \cdot A^2 \text{ en donde } k \text{ será una constante de valor } k = \frac{g}{2 \cdot v_0^2}$$

**A.42.** Diseñad, un experimento sencillo mediante el que se pueda contrastar si la relación entre la altura h de un tiro horizontal y el alcance A se ajusta o no a la ecuación  $h = k \cdot A^2$

Podemos pensar en el lanzamiento horizontal de una pequeña esfera metálica (con el fin de poder ignorar el efecto del rozamiento con el aire) desde diferentes alturas h, manteniendo constante la  $v_0$  y midiendo en cada caso el alcance A, correspondiente.

## 1. Cinemática

Podríamos realizar, por ejemplo, 5 lanzamientos desde 5 alturas distintas y tomar los datos necesarios para construir una tabla como la adjunta. Una vez que dispongamos de ellos, de ser cierta la hipótesis, la representación gráfica de los valores de la altura  $h$  frente a los de  $A^2$  debería de ajustarse a una línea recta. Sin embargo, antes de comenzar a tomar medidas quedan algunos problemas “técnicos” que conviene tratar de solucionar

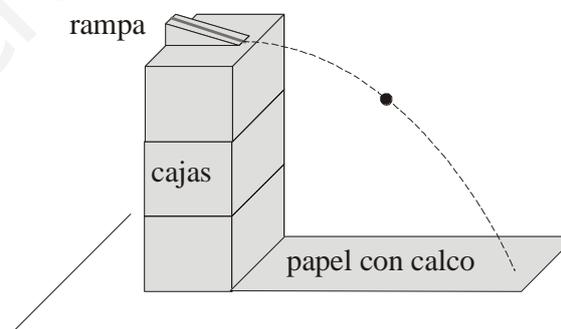
$h$ (m)	$A$ (m)	$A^2$ (m <sup>2</sup> )
$h_1$	$A_1$	$A_1^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$h_n$	$A_n$	$A_n^2$

**A.43.** *Propone formas de resolver los problemas técnicos que se enumeran a continuación:*

- ¿Cómo conseguir la misma velocidad inicial de lanzamiento en cada caso?
- ¿Cómo conseguir alturas variables?
- ¿Cómo medir el alcance para cada altura?

Una forma sencilla de hacer que la velocidad con que se lanza la bolita se mantenga constante consiste en utilizar un pequeño plano inclinado o rampa sobre la que se dispondría la bolita siempre en la misma posición. Dicha rampa hay que colocarla sobre una plataforma horizontal (la de lanzamiento) siempre en el mismo lugar. Para conseguir una altura variable se puede desplazar dicha plataforma bien deslizándola por un soporte vertical de los que existen en los laboratorios, o simplemente utilizar varios objetos como cajas rígidas que se van apilando. Otra opción es hacer que la superficie sobre la que cae el objeto pueda situarse en diferentes alturas. Finalmente, para la medida de los alcances, se puede utilizar un papel de calco sobre un papel blanco o milimetrado que se encuentra en una posición fija respecto al punto de lanzamiento.

Conviene realizar cada lanzamiento al menos tres veces y, en el caso de que las señales de impacto de la bolita sobre el papel se encuentren en puntos distintos, tomar como valor más representativo del alcance el valor medio. En la figura adjunta se propone un posible diseño en el que para obtener distintas alturas se ha recurrido simplemente a disponer unas cajas encima de otras, de forma que basta con variar el número de cajas.



**A.44.** *Proceded a la realización del experimento. A continuación elaborad una memoria del trabajo práctico realizado en la que se detalle qué problema nos hemos planteado, cuáles han sido las hipótesis y sus consecuencias directamente contrastables, el diseño experimental, las tablas de resultados y el análisis de los mismos.*

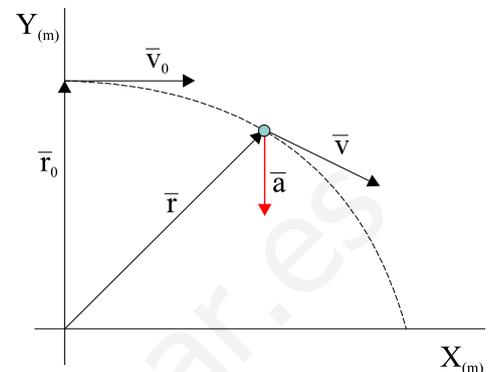
Los resultados obtenidos parecen confirmar la posibilidad de descomponer el movimiento de un objeto que se lanza horizontalmente en otros dos tal y como puso de manifiesto Galileo. Sin embargo, en la actualidad, es posible estudiar el tiro horizontal como el movimiento de un cuerpo en el que la trayectoria no se conoce de antemano (lo que exige la utilización de magnitudes vectoriales).

**A.45.** *Obtened las magnitudes características (aceleración, velocidad y vector de posición) correspondientes al movimiento de un cuerpo lanzado horizontalmente.*

En el instante en que se lanza el cuerpo ( $t_0 = 0$ ) las magnitudes características del movimiento presentan los siguientes valores:  $\vec{a} = (0, -g)$ ;  $\vec{v}_0 = (v_0, 0)$ ;  $\vec{r}_0 = (0, h)$  y en otro instante posterior cualquiera (comprendido entre el lanzamiento y el momento en que el cuerpo choca contra el suelo) serán:

$$\vec{a} = (0, -g); \quad \vec{v} = (v_x, v_y); \quad \vec{r} = (r_x, r_y)$$

Como vemos, el vector aceleración permanece constante. ¿Significa esto que se trata de un MUA? Es fácil ver que al ser la trayectoria curvilínea la tangente y la normal están cambiando constantemente de dirección y como el vector  $\vec{a}$  es siempre el mismo sus componentes tangencial y normal irán cambiando de modo que la aceleración tangencial será variable por lo que **este movimiento no es uniformemente acelerado** sino variado.



**A.46.** ¿Cómo podemos conocer en este caso las magnitudes características del movimiento?

En este caso conocemos el vector  $\vec{a}$  y a partir del mismo tendremos que calcular la velocidad y la posición. Una forma sencilla de hacerlo es trabajar con las componentes cartesianas escalares por separado:

$$a_x = 0; \quad t_0 = 0, \quad v_{x0} = v_0; \quad r_{x0} = 0$$

$$a_y = -g; \quad t_0 = 0; \quad v_{y0} = 0; \quad r_{y0} = 0$$

Si nos fijamos en los datos de la componente X veremos que coinciden con los de un punto que se desplaza a lo largo de  $Ox^+$  con un MU, de modo que aplicando las expresiones ya conocidas para este movimiento obtendremos que:  $v_x = v_0$ ;  $r_x = v_0 \cdot t$

En cuanto a la componente Y, los datos coinciden con los de un punto que se desplaza a lo largo del eje  $Oy^+$  con un MUA y, en consecuencia:  $v_y = -gt$ ;  $r_y = h - gt^2/2$

De acuerdo con lo anterior, las magnitudes características de este movimiento serán:

$$\vec{a} = (0, -g); \quad \vec{v} = (v_0, -gt); \quad \vec{r} = (v_0 t, h - \frac{gt^2}{2})$$

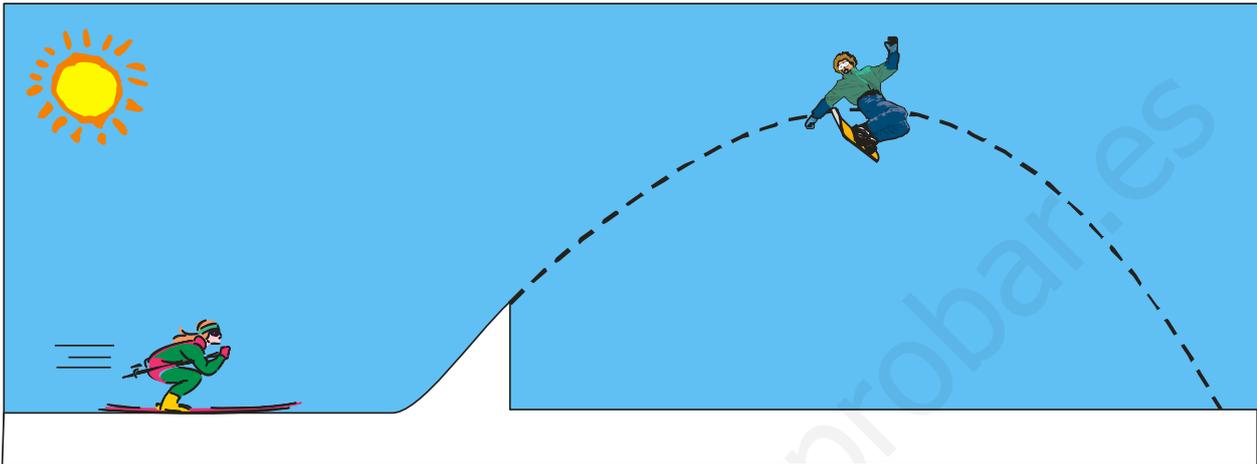
Mediante las dos últimas expresiones es posible calcular la velocidad y la posición del cuerpo lanzado horizontalmente en cualquier instante.

**A.47.** Desde lo alto de una torre de 50 m se lanza horizontalmente un proyectil con una rapidez inicial de 160 m/s. Obtened a qué distancia "A" de la base de la torre impactará contra el suelo (alcance máximo) y la velocidad con la que chocará contra el suelo. Si al mismo tiempo que se lanza ese proyectil, se deja caer (desde el mismo punto) otro de doble masa ¿Cuál de los dos llegará antes al suelo?

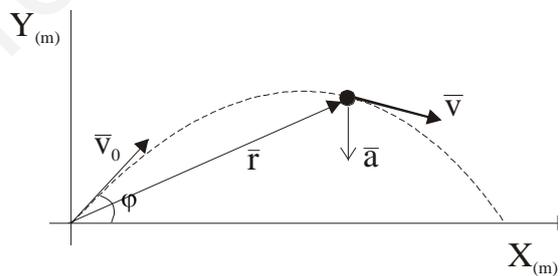
Rdo. A = 506 m,  $\vec{v} = (160, -31'6)$  m/s; Con rozamiento despreciable, ambos tardan  $\sqrt{10}$  s

### 5.3. El tiro oblicuo

Otro movimiento cuya trayectoria no se conoce previamente y que precisa también un tratamiento vectorial, es el lanzamiento de un cuerpo formando un cierto ángulo con la horizontal (tiro oblicuo). Como vamos a ver, para obtener las ecuaciones de este movimiento, el procedimiento será básicamente el mismo que en el tiro horizontal. Actividades deportivas como el lanzamiento de jabalina, el salto de longitud o los saltos en la nieve y otras menos recomendables como el lanzamiento de proyectiles, son situaciones en las que se da este tipo de movimiento.



Esencialmente consiste, como hemos dicho, en el lanzamiento de un cuerpo con una cierta velocidad inicial que forma un cierto ángulo  $\varphi$  con la horizontal. Si tomamos como sistema de referencia los ejes de coordenadas cartesianas que se indican en la figura, las magnitudes características del movimiento en el instante inicial  $t_0 = 0$ , serán las siguientes:



$\vec{a} = (0, -g)$ ;  $\vec{v}_0 = (v_0 \cdot \cos \varphi, v_0 \cdot \sin \varphi)$ ;  $\vec{r}_0 = 0$ , y en otro instante cualquiera  $t$  serán:  
 $\vec{a} = (0, -g)$ ;  $\vec{v} = (v_x, v_y)$ ;  $\vec{r} = (r_x, r_y)$ .

**A.48.** Como vemos, al igual que en el tiro horizontal el vector aceleración permanece constante. Siguiendo un procedimiento similar al allí empleado, determinad las magnitudes características del movimiento a partir de la aceleración y de los valores de la velocidad y el vector de posición en el instante inicial.

$$a_x = 0; \quad t_0 = 0, \quad v_{x0} = v_0 \cdot \cos \varphi; \quad r_{x0} = 0$$

$$a_y = -g; \quad t_0 = 0; \quad v_{y0} = v_0 \cdot \sin \varphi; \quad r_{y0} = 0$$

Si analizamos los datos de la componente  $x$  veremos que corresponden a un movimiento uniforme. Si aplicamos las ecuaciones, ya conocidas, para este movimiento tendremos:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \varphi; \quad r_x = v_0 \cdot t \cos \varphi.$$

En cuanto a la componente y, los datos coinciden con los de un movimiento uniformemente acelerado:  $v_y = v_0 \cdot \sin \varphi - gt$ ;  $r_y = v_0 t \cdot \sin \varphi - \frac{gt^2}{2}$

En resumen: las magnitudes características del tiro oblicuo vendrán dadas por:

$$\vec{a} = (0, -g); \quad \vec{v} = (v_0 \cos \varphi, v_0 \sin \varphi - gt); \quad \vec{r} = (v_0 t \cos \varphi, v_0 t \sin \varphi - \frac{gt^2}{2})$$

Mediante las ecuaciones anteriores es posible resolver muchas cuestiones de interés respecto a este tipo de movimiento. A título de ejemplo proponemos un par de ellas:

**A.49.** *Obtened la expresión del alcance horizontal "A" de un proyectil lanzado oblicuamente con una cierta velocidad inicial  $\vec{v}_0$  que forma un ángulo  $\varphi$  con la horizontal (haced la aproximación de ignorar el rozamiento con el aire). ¿Para que valor de  $\varphi$  el alcance sería el máximo?*

Rdo.  $A = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\varphi}{g}$ . El alcance sería el máximo posible para  $\varphi = 45^\circ$

**A.50.** *Obtened la expresión de la máxima altura que alcanzará el proyectil en un tiro oblicuo en función de su velocidad inicial, el ángulo  $\varphi$  con la horizontal y la aceleración de la gravedad.*

Rdo.  $h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g}$

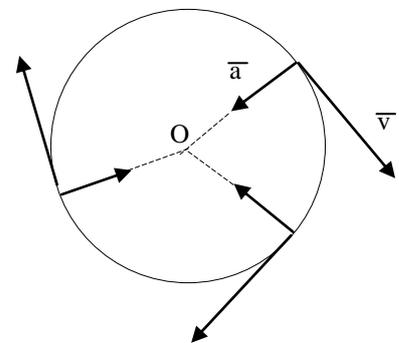
#### 5.4. El movimiento circular y uniforme. Magnitudes angulares

**A.51.** *¿Qué situaciones reales conocéis de movimientos que puedan considerarse como circulares y uniformes?*

El movimiento de un punto cualquiera de las agujas del reloj, el de algunos satélites artificiales que describen órbitas circulares alrededor del centro de la Tierra, el de un punto cualquiera de un tiovivo alrededor de su eje de giro y, con bastante aproximación, el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra o de los planetas alrededor del Sol, son algunos ejemplos de movimientos circulares y uniformes.

**A.52.** *¿Qué tiene de particular este tipo de movimiento?*

Entre otras cosas, se trata de un movimiento que se repite cada vez que el móvil da una vuelta completa. A estos movimientos se les denomina periódicos y al tiempo transcurrido hasta que se repite el movimiento, periodo (que suele representarse por el símbolo "T" y expresarse en segundos). En un movimiento circular y uniforme no hay aceleración tangencial porque la rapidez es constante, pero sí que hay aceleración normal porque el vector velocidad (que siempre es tangente a la trayectoria) está cambiando continua y regularmente de dirección (aunque no cambie su módulo).



Así pues el vector aceleración, en este movimiento, sólo tiene una única componente y es un vector perpendicular a la trayectoria, tal y como se indica en la figura anterior en la que se ha representado la situación del móvil en tres instantes diferentes.

**A.53. ¿Qué magnitudes podemos utilizar para describir el movimiento circular y uniforme?**

Además del periodo T, existe otra magnitud de gran interés denominada frecuencia, cuyo símbolo es "v" (léase nú), aunque también se suele representar con "f". Si el periodo nos indica el tiempo que tarda el móvil en realizar una vuelta (o ciclo) completo, la frecuencia nos informa del número de ciclos realizados en una unidad de tiempo. En unidades internacionales T se mide en "s" y f se mide en ciclos/s o hertzios (Hz). De acuerdo con las definiciones, la relación entre ambas será:

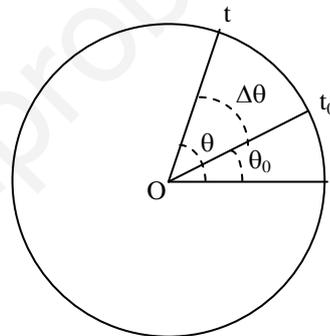
$$f = \frac{1}{T}$$

Periodo y frecuencia, son dos magnitudes inversas.

Al tratarse de un movimiento de trayectoria conocida podremos utilizar las magnitudes escalares ya introducidas anteriormente (posición "e", rapidez "v" y aceleración sobre la trayectoria o tangencial "a<sub>t</sub>"). Además, al ser uniforme se cumplirá que a<sub>t</sub> = 0, v = constante y además que e = e<sub>0</sub> + v(t-t<sub>0</sub>). No obstante conviene tener en cuenta que:

- ✓ En este tipo de movimiento no hay valores de "e" negativos
- ✓ Una misma posición puede corresponder a valores de "e" distintos (que se diferenciarían en un número entero de longitudes de circunferencia)

Por otra parte, dado que la trayectoria es una circunferencia, también podemos estudiar el movimiento utilizando magnitudes angulares. En efecto, el móvil puede ser localizado simplemente dando el ángulo "θ" formado por un radio (que se toma como origen de ángulos) y el radio que señala la posición del móvil en el instante considerado.



En cuanto al cambio de posición éste se podrá medir como el desplazamiento angular que se obtendrá como la diferencia entre la posición angular final y la inicial, Δθ = θ - θ<sub>0</sub>.

Finalmente, será necesario conocer cómo cambia la posición angular con el tiempo. Para ello se define la rapidez angular media como:

$$w_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}$$

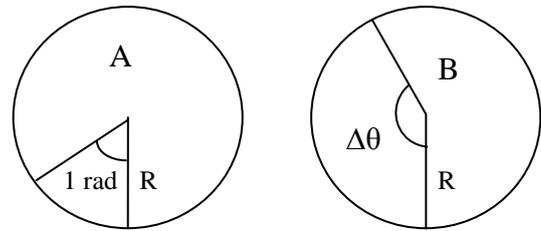
y como el movimiento es uniforme, el valor medio de la rapidez angular "w<sub>m</sub>" coincidirá con el de la rapidez angular "w" en cualquier instante (w<sub>m</sub> = w) con lo que podemos escribir que:

$$w = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}, \text{ o lo que es equivalente: } \Delta\theta = w \cdot \Delta t \quad \text{o también: } \theta = \theta_0 + w(t-t_0)$$

La última expresión permite darse cuenta de que la posición angular es una función lineal del tiempo, de forma análoga a como ocurre cuando se utiliza "e" para dar la posición.

Hemos de tener en cuenta que, aunque, la posición angular o el desplazamiento angular podrían medirse en grados, es más conveniente hacerlo en radianes debido a que, como vamos a ver, de esta forma es muy sencillo relacionar las magnitudes lineales ( e, Δe, v) con las magnitudes angulares (θ, Δθ, w).

**A.54.** Un radian es la unidad internacional que se utiliza para medir la posición angular o el desplazamiento angular y corresponde a un ángulo tal que la longitud del arco que abarca mide lo mismo que el radio (ved figura A). ¿Cómo podríamos averiguar cuántos radianes mide el ángulo  $\Delta\theta$  de la figura B?



Para contestar a la pregunta anterior habrá que ver cuántos radios están contenidos en la longitud de arco correspondiente, lo que puede determinarse mediante la expresión:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta e}{R}$$

en la que tanto el cambio de posición  $\Delta e$  como el radio  $R$  se medirán en metros.

**A.55.** Teniendo en cuenta que la longitud de una circunferencia viene dada por  $2\pi R$ , determinad a cuántos radianes equivalen  $360^\circ$  y a continuación  $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $1^\circ$  y finalmente  $36^\circ$ .  
Rdo.  $2\pi$  rad,  $\pi$  rad,  $\pi/2$  rad,  $(\pi/180)$  rad,  $0,2 \pi$  rad.

**A.56.** En la expresión anterior se halla implícita la relación existente entre el desplazamiento lineal (en m) y el desplazamiento angular (en rad):  $\Delta e = \Delta\theta \cdot R$ . ¿Cómo podríamos obtener la relación existente entre la rapidez lineal y la angular?

Bastará con dividir en ambos lados de ecuación por  $\Delta t$  con lo que:  $\Delta e = \Delta\theta \cdot R \rightarrow \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{\Delta\theta \cdot R}{\Delta t} \rightarrow$

$$v = w \cdot R$$

La rapidez angular "w", se expresa en rad/s, aunque también es habitual darla en función de las revoluciones (vueltas) realizadas por unidad de tiempo: "r.p.m" (revoluciones/minuto) o "r.p.s" (revoluciones/segundo).

Así pues, el movimiento circular y uniforme podemos estudiarlo indistintamente con magnitudes lineales o angulares. En caso de ser necesario podemos pasar de unas a otras sin más que dividir o multiplicar por el valor del radio  $R$  (en metros).

**A.57.** Suponiendo que la Luna gira alrededor de la Tierra con MCU de 384.000 km de radio y sabiendo que emplea 27'3 días en dar una vuelta completa en torno a nosotros, se pide: a) Rapidez angular de la Luna en rad/s y lineal en km/h  
b) Distancia en km que recorre la Luna cada día.



Rdo. a)  $w = 2,7 \cdot 10^{-6}$  rad/s,  $v = 3682,5$  km/h; b)  $d = 88378,9$  km

Finalmente, hemos de considerar cómo obtener el valor de la aceleración. Como ya hemos visto, en un movimiento circular y uniforme, el vector aceleración sólo tiene componente normal an, cuyo valor nos da idea de lo rápidamente que está cambiando la velocidad en dirección.

**A.58.** ¿Con qué magnitudes estará relacionada la aceleración normal? En otras palabras: ¿De qué magnitudes cabe esperar que dependa su valor y cómo influirán?

A título de hipótesis, podemos pensar que el valor de la aceleración normal será tanto mayor cuanto mayor sea la rapidez con que se desplaza el móvil por la circunferencia y menor sea el radio de ésta. En efecto, para una trayectoria circular de un radio determinado, parece claro que cuanto mayor sea la rapidez con que se desplaza el móvil tanto mayor será también la rapidez con que varía la dirección del vector velocidad. Inversamente debería de ocurrir con el radio ya que, para una misma rapidez lineal, la dirección del vector velocidad cambiará tanto más lentamente cuanto mayor sea el valor del radio. La expresión más sencilla, que contemplaría las ideas ante-

## 1. Cinemática

riores sería  $a_n = v/R$ , pero, si nos fijamos dicha expresión no es dimensionalmente homogénea, por lo que no puede ser correcta.

Se puede demostrar que el valor de la componente normal del vector aceleración en un instante dado, para un móvil que se desplaza por una trayectoria curva, viene dado por la expresión:

$$a_n = v^2/r$$

donde "v" es la rapidez y "r" el radio de curvatura, ambos en el instante considerado. Como, vemos en la expresión se contemplan las hipótesis respecto a la influencia de la rapidez y del radio, pero al estar la rapidez elevada al cuadrado, su influencia es mayor que la del radio de modo que a doble rapidez (para un radio dado) la aceleración normal no se duplica sino que se hace cuatro veces mayor. Además la expresión es dimensionalmente homogénea ( $L/T^2$  en ambos lados). Si queremos expresar la aceleración normal en función de la rapidez angular basta sustituir  $v = w \cdot r$  con lo que obtenemos fácilmente que:

$$a_n = w^2 \cdot r$$

Como es lógico, las expresiones anteriores son coherentes con la idea de que en una trayectoria rectilínea, al no existir cambio en la dirección de la velocidad, la aceleración normal debe ser nula. En efecto, cualquier tramo recto de una posible trayectoria puede considerarse matemáticamente como un trozo de una circunferencia de radio infinito con lo que sustituyendo en la primera expresión se tendría:  $a_n = v^2/\infty = 0$ . ¿Qué ocurriría si utilizásemos la segunda expresión? También daría 0 ya que en un tramo recto la rapidez angular sería nula.

Por otra parte, el valor de  $a_n$  siempre será positivo ya que, aunque la rapidez pueda ser negativa, está elevada al cuadrado. Además, si la rapidez es constante (como ocurre en un movimiento circular y uniforme) la aceleración normal también lo será.

A continuación proponemos algunos problemas sobre este tipo de movimiento

**A.59.** *El movimiento de la Tierra alrededor del Sol se realiza aproximadamente describiendo una circunferencia de un radio medio de unos 150 millones de km. Si hacemos la aproximación de considerarlo como circular uniforme, ¿cuál es el valor de la rapidez lineal en km/h con que se mueve la Tierra en su órbita? ¿Cuánto vale su aceleración normal?*

Rdo.  $v = 107588,8 \text{ km/h}$ ;  $a_n = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$

**A.60.** *Dos alumnos A y B montan en un tiovivo que gira a razón de 3 vueltas/min. A se sitúa a 2 m del eje, mientras que B lo hace a 4 m del eje. Determinar la rapidez angular, rapidez lineal ángulo recorrido y distancia recorrida para cada uno de ellos en 40 s.*

Rdo.  $w_A = w_B = \pi/10 \text{ rad/s}$ ;  $v_A = 0,2\pi \text{ m/s}$ ,  $v_B = 0,4\pi \text{ m/s}$ ;  $\Delta\theta_A = \Delta\theta_B = 4\pi \text{ rad}$ ;  $\Delta e_A = 8\pi \text{ m}$ ,  $\Delta e_B = 16\pi \text{ m}$ .

### 5.5. El movimiento armónico simple

El movimiento circular y uniforme que acabamos de estudiar, es un ejemplo de movimiento periódico, en el que el objeto que se mueve de esta forma se encuentra en idéntico estado de movimiento (misma posición, velocidad y aceleración) a intervalos regulares de tiempo (periodo, T).

Hay movimientos periódicos en los que el cuerpo se mueve entre dos posiciones simétricas respecto de una central. Se trata de movimientos "**oscilatorios**". Tanto el movimiento de un objeto que pende de un muelle como el de la bolita de un péndulo, entrarían en esta categoría. En este caso, el periodo T sería el tiempo que el móvil tarda en realizar una oscilación o ciclo completo.

Como ya hemos visto en el movimiento circular y uniforme, otra magnitud de gran interés es la frecuencia "f" o número de ciclos completos que se realizan por unidad de tiempo; se mide en ciclos/s, que recibe el nombre de hertzio (Hz) y es la inversa del periodo (y viceversa).

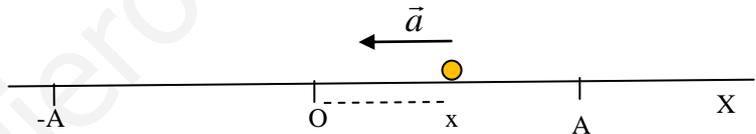
**A.61.** *Un objeto realiza un movimiento periódico de frecuencia 5 Hz ¿Qué significa eso? ¿Cuánto vale el periodo?*

De acuerdo con lo que hemos visto, significará que realiza cinco ciclos completos cada segundo. Por tanto, cada ciclo durará la quinta parte de un segundo, es decir:  $T = 0'2$  s. A este mismo resultado podemos llegar fácilmente mediante la expresión:

$$T = 1/f = 1/5 = 0'2 \text{ s}$$

**A.62.** *Un cuerpo describe una trayectoria circular con  $\omega = 0'5 \pi$  rad/s. Determinad cuánto vale el periodo y la frecuencia de este movimiento. Rdo.  $T=4$ s y  $f = 0'25$  Hz*

Dentro de los movimientos oscilatorios, tiene un gran interés el estudio de aquellos en los que el cuerpo vibra siguiendo una trayectoria rectilínea, oscilando entre dos posiciones extremas ( $x = A$  y  $x = -A$ ) equidistantes de una posición central O (en la que  $x = 0$ ), de tal modo que su aceleración tangencial es en todo momento directamente proporcional al valor de la posición (x) en la que se encuentra y siempre dirigida hacia O. Al tratarse de una trayectoria recta, no habrá aceleración normal y por tanto  $a_t = a$ . La posición del móvil en cualquier instante (x) puede tomar valores positivos o negativos según el móvil se halle a un lado u otro de O y su valor absoluto siempre coincide con la distancia del móvil a O. Un movimiento de estas características se denomina **movimiento armónico simple** (en adelante MAS).



De acuerdo con lo anterior, todo objeto que se mueva siguiendo una trayectoria recta, oscilando entre dos posiciones extremas y con una aceleración dada por:  $a = -C \cdot x$  (donde C es una constante), realiza un movimiento armónico simple (MAS).

**A.63.** *El estudio de los movimientos oscilatorios en general y del movimiento armónico simple en particular, es muy importante en la Física. ¿A qué puede deberse dicha importancia?*

- ✓ En primer lugar las vibraciones afectan a muchos materiales elásticos (o que se puedan considerar como tales). La palanca de saltos de una piscina, las cuerdas de instrumentos musicales, los vehículos cuando circulan en una carretera, algunas construcciones como edificios y puentes, etc., son ejemplos de sistemas que (en determinadas condiciones) pueden entrar en vibración (pensemos en un puente colgante sometido a la acción del viento o en un coche que circula por una carretera con baches).
- ✓ El movimiento vibratorio también se da a escala atómica: en los metales, por ejemplo, sus átomos no están quietos sino que vibran en torno a posiciones centrales o de equilibrio; los relojes de cuarzo se basan en la vibración periódica de los átomos que integran un cristal de cuarzo; el sonido se transmite gracias a la vibración de las partículas que forman el medio por el que se desplazan las ondas sonoras.
- ✓ La emisión de ondas electromagnéticas (como son las de telefonía móvil, radio, televisión, etc.) tiene su origen en la vibración de cargas eléctricas.

## 1. Cinemática

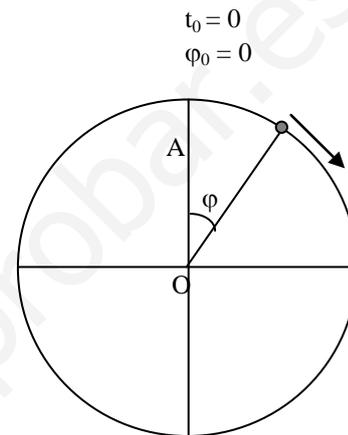
Así pues, el interés del movimiento vibratorio se debe fundamentalmente a su utilidad para describir el movimiento de los materiales elásticos y el de partículas submicroscópicas (como los iones de una red cristalina) así como para explicar el origen y la propagación de ondas mecánicas (como el sonido) y electromagnéticas (como las de radio).

Para deducir la ecuación que nos da la posición de un móvil que realiza un MAS (sin utilizar el cálculo diferencial), trataremos de relacionar este con otro movimiento ya conocido.

**A.64.** *¿De los movimientos ya estudiados cuál es el que, al igual que el MAS, también es periódico, es decir, la posición del objeto se repite continuamente a intervalos regulares de tiempo?*

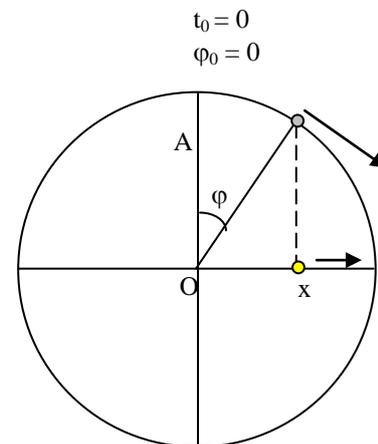
Evidentemente, se trata del movimiento circular y uniforme (MCU). Así que para deducir la ecuación que nos da la posición de un objeto con MAS en cualquier instante, trataremos de relacionar este tipo de movimiento con el MCU.

En la figura de la derecha hay un objeto hipotético que realiza un MCU de radio  $A$  y rapidez angular  $\omega$ . Dicho objeto emplea un tiempo  $T$  en dar una vuelta completa a la circunferencia ( $2\pi$  rad). Como el movimiento es uniforme:  $T = 2\pi/\omega$ . Para simplificar supondremos, de momento, que en el instante inicial  $t_0 = 0$  la posición angular es  $\varphi_0 = 0$  y que el objeto gira en el sentido señalado en la figura.



**A.65.** *Si proyectamos este objeto sobre el diámetro horizontal obtenemos un punto que se mueve sobre dicho diámetro a la vez que el objeto sobre la circunferencia ¿Qué tipo de movimiento sería?*

Es fácil darse cuenta de que mientras el objeto realiza un giro completo de radio  $A$ , el punto proyectado realiza una vibración completa de amplitud  $A$ . Si el objeto gira continuamente con un periodo  $T$ , el punto luminoso vibra continuamente sobre el diámetro con el mismo periodo.



Si tomamos como eje  $X$  la dirección de ese diámetro, situando el origen en el centro de la circunferencia, la posición del punto luminoso vendrá dada por " $x$ " y su valor oscilará periódicamente entre  $+A$  y  $-A$  de forma que realizaría una oscilación completa cada vez que el punto que se mueve sobre la circunferencia diese una vuelta completa. Si obtenemos la aceleración sobre la trayectoria " $a$ " con que se mueve el punto luminoso y resulta ser directamente proporcional y de signo contrario a la elongación  $x$ , concluiremos que dicho punto posee un movimiento armónico simple y las ecuaciones que podamos deducir para la posición y la rapidez de ese punto también corresponderán a las ecuaciones de un MAS.

**A.66.** A partir de la figura anterior obtened la ecuación  $x = x(t)$

Sabemos que  $\text{sen } \varphi = x/A$  de donde  $x = A \text{ sen } \varphi$ . Por otra parte, de acuerdo con las ecuaciones del movimiento circular y uniforme y teniendo en cuenta las condiciones iniciales, podemos escribir que  $\varphi = \omega t$ , de modo que:

$$x = A \text{ sen } (\omega t) \quad (1)$$

Como  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  y  $T = 1/f$ , la ecuación también puede escribirse como:  $x = A \text{ sen } \left( \frac{2\pi}{T} \cdot t \right)$

o bien, teniendo en cuenta que  $f = 1/T$ , como:  $x = A \text{ sen } (2\pi f \cdot t)$

Esta ecuación (en cualquiera de sus tres formas), sirve para conocer la posición ( $x$ ) de un objeto (representado por una masa puntual) que se mueve con MAS, sin más que, conocido el valor de la amplitud ( $A$ ) y del periodo ( $T$ ) o la frecuencia ( $f$ ), del movimiento, sustituir en ella el valor de  $t$  y operar.

A partir de la ecuación para la posición, derivando respecto del tiempo, es posible obtener sucesivamente las ecuaciones que nos dan la rapidez y la aceleración en cualquier instante. Estas ecuaciones resultan ser:

Rapidez:  $v = A\omega \text{ cos } (\omega t)$  (2)

Aceleración:  $a = -A\omega^2 \text{ sen } (\omega t)$  (3)

Observad que si en (3) sustituimos ( $A \text{ sen } \omega t$ ) por  $x$ , obtenemos que:  $a = -\omega^2 \cdot x$

y como  $\omega$  es constante, la aceleración tangencial resulta ser directamente proporcional y de signo contrario a la elongación  $x$ . Esto confirma que el punto luminoso proyectado realiza un MAS. La constante  $\omega$  se denomina **frecuencia angular** (difiere de la frecuencia  $f$  en un factor  $2\pi$  ya que  $\omega = 2\pi/T = 2\pi \cdot f$ ). Dicha constante  $\omega$ , tomará un valor característico para cada MAS dependiendo del valor que tenga el periodo (o la frecuencia) de dicho movimiento.

Una cuestión interesante es la representación gráfica de las ecuaciones anteriores para ver de forma global y rápida cómo van cambiando con el tiempo cada una de las tres magnitudes.

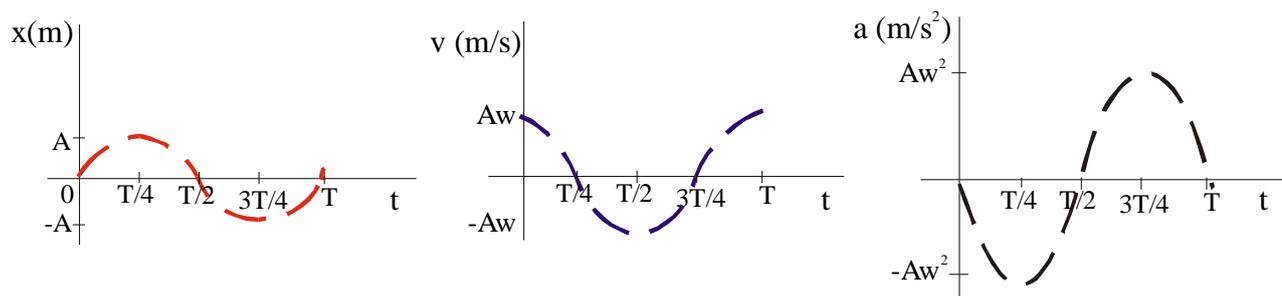
**A.67.** Representad cualitativamente las gráficas de  $x = x(t)$ ;  $v = v(t)$  y  $a = a(t)$  a lo largo de un periodo. (Tomad intervalos de tiempo iguales a un cuarto de periodo desde  $t = 0$  hasta  $t = T$ ).

La resolución de la actividad propuesta nos lleva en primer lugar a utilizar las ecuaciones del MAS anteriormente deducidas, para elaborar una tabla como la siguiente:

Magnitud	0	T/4	T/2	3T/4	T
$x$	0	A	0	-A	0
$v$	$A\omega$	0	$-A\omega$	0	$A\omega$
$a$	0	$-A\omega^2$	0	$A\omega^2$	0

## 1. Cinemática

Utilizando los datos de la tabla, podemos ahora construir las gráficas correspondientes:



Las gráficas anteriores muestran claramente la evolución de cada una de las magnitudes con el tiempo. Podemos ver que en las tres hay una variación periódica de valores, de forma que cada intervalo de tiempo  $T$  el móvil se encuentra en idéntico estado de movimiento (mismos valores de la elongación "x", la rapidez "v" y la aceleración "a", que  $T$  segundos antes).

**A.68.** Un objeto posee un MAS de amplitud 1 m y periodo 2 s. Determinad: a) Ecuación de la posición en cualquier instante. b) Posición que ocupará en los instantes 1/2, 1, 3/2 y 2 (todos ellos en s). c) Gráficas de  $x(t)$ ,  $v(t)$  y  $a(t)$

Si suponemos que en el instante  $t = 0$ , el objeto se halla en  $x = 0$ , las ecuaciones serán:

$x = A \sin \omega t$ , que nos da la posición en cualquier instante.

$v = A\omega \cos \omega t$ , que nos da la rapidez en cualquier instante.

$a = -A\omega^2 \sin \omega t$ , que nos da la aceleración en cualquier instante.

Sabemos que la frecuencia angular  $\omega$  viene dada por  $\omega = 2\pi/T = 2\pi \cdot f$ , siendo  $T$  el periodo y  $f$  la frecuencia del movimiento. Partiendo de las ecuaciones anteriores y sustituyendo los datos que nos dan en el enunciado, obtendremos las ecuaciones que describen el movimiento del cuerpo al que se refiere el problema:

$$x = A \sin \omega t = \sin \pi t; \quad v = A\omega \cos \omega t = \pi \cos \pi t; \quad a = -A\omega^2 \sin \omega t = -\pi^2 \sin \pi t$$

Ahora, simplemente manejando estas últimas ecuaciones es posible contestar a todas las preguntas que se hacen en el enunciado del problema:

**a)** La ecuación del movimiento, es la ecuación que nos da la posición del móvil en cualquier instante  $x = \sin \pi t$  m (si  $t$  en s).

**b)** ¿Cómo hallar la posición del móvil en los instantes que se piden? Bastará sustituir  $t$  por cada uno de los valores correspondientes, con lo que tendremos:

Para  $t = 1/2$  s  $\rightarrow x = \sin \pi/2 = 1$  m (la partícula se encuentra en  $x = A$ )

Para  $t = 1$  s  $\rightarrow x = \sin \pi = 0$  m (la partícula se encuentra en el origen O)

Para  $t = 3/2$  s  $\rightarrow x = \sin 3\pi/2 = -1$  m (la partícula se encuentra en  $x = -A$ ).

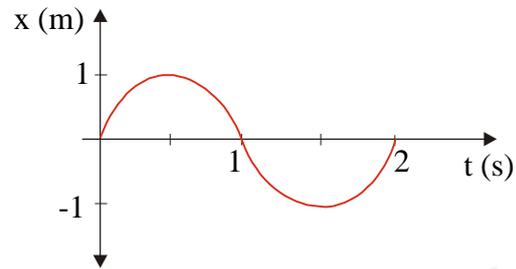
Para  $t = 2$  s  $\rightarrow x = \sin 2\pi = 0$  (la partícula se encuentra en el origen O).

De los resultados anteriores es fácil comprobar que, como cabe esperar, cada periodo de tiempo  $T$ , la posición de la partícula se repite.

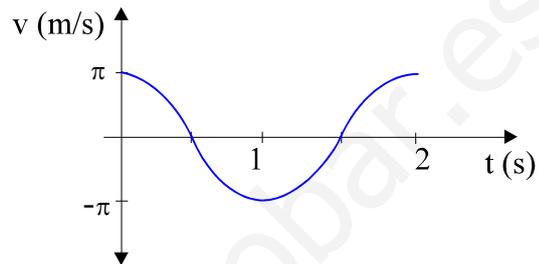
c) Construcción de las gráficas de  $x = x(t)$ ,  $v = v(t)$  y  $a = a(t)$ .

Para construir dichas gráficas hemos de elaborar primero las tablas correspondientes mediante las ecuaciones  $x = x(t)$ ,  $v = v(t)$ ,  $a = a(t)$  y luego representar:

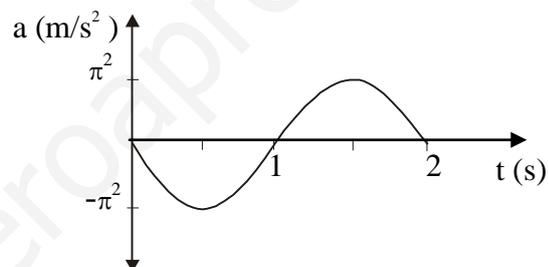
t (s)	0	0'5	1	1'5	2
x (m)	0	1	0	-1	0



t (s)	0	0'5	1	1'5	2
v (m/s)	$\pi$	0	$-\pi$	0	$\pi$



t (s)	0	0'5	1	1'5	2
a (m/s <sup>2</sup> )	0	$-\pi^2$	0	$\pi^2$	0



¿Qué conclusiones se pueden extraer de las gráficas anteriores?

Podemos ver reflejadas en ellas las principales características de un MAS. Así, por ejemplo, en el instante en que  $x$  vale 0, la velocidad es máxima y la aceleración (y por tanto la fuerza) es nula. Sin embargo, cuando la  $x$  alcanza el valor máximo  $A$ , la velocidad es nula y la aceleración (y por tanto la fuerza) son máximas (en valor absoluto). Este tipo de movimiento constituye, pues, un claro ejemplo de cómo un objeto puede moverse con su máxima velocidad y ser nula la fuerza resultante sobre el mismo (o estar momentáneamente en reposo y la fuerza resultante tomar su valor máximo en ese preciso instante).

Las ecuaciones manejadas hasta aquí corresponden a un caso particular de MAS, aquel en que el móvil en el instante  $t=0$  se encuentra en el origen  $O$ . Naturalmente esto no tiene por qué ser siempre así. En cursos posteriores se verá cómo serían las ecuaciones si en el instante  $t = 0$  el móvil no se encontrara en  $O$ .

## RECAPITULACIÓN

En este tema hemos estudiado el movimiento de los cuerpos planteándonos al comienzo algunas preguntas relativas a cómo decir dónde está un móvil en un instante dado o con qué velocidad se mueve respecto de un cierto sistema de referencia. Atendiendo al tipo de trayectoria: **conocida de antemano** o independiente de las características del movimiento (por ejemplo, una carretera por la que circulan vehículos) o bien una **trayectoria que en principio se desconoce** y que va a de-

## 1. Cinemática

pendier de las características del movimiento (por ejemplo el movimiento de una bola de billar), hemos dividido el tema en dos grandes bloques e introducido una serie de magnitudes características para cada tipo de movimiento (escalares y vectoriales). Además hemos aprendido a utilizar las ecuaciones de movimiento en distintos casos (movimiento uniforme, y movimiento uniformemente acelerado) y con ellas a resolver algunas de las preguntas que nos planteábamos al principio. También hemos podido aplicar los conocimientos desarrollados al estudio de diversos movimientos reales (caída de graves, lanzamiento de proyectiles y movimiento circular uniforme).

Otra conclusión importante es que podemos caracterizar el movimiento de cualquier cuerpo utilizando las mismas magnitudes (posición, velocidad, aceleración, etc.), y analizar en que se diferencia un movimiento de otro sin tener en cuenta la naturaleza del cuerpo que se mueve (si es un proyectil, una barca, la Luna, el Sol, etc.).

Por otra parte, a lo largo del tema hemos tenido que superar algunos obstáculos. Algunos de ellos debidos a la existencia de **ideas alternativas**, es decir, ideas “ingenuas” o, aparentemente, de “sentido común”, sobre determinados conceptos científicos y que dificultan el aprendizaje de los mismos. Convendría, para terminar, recordar algunas de las más importantes.

**A.69.** *Construid un esquema en el que queden reflejadas las ideas alternativas que se han cuestionado a lo largo de este tema y compararlas con los conceptos científicos correspondientes.*

En el esquema que se demanda podríamos incluir entre otras:

- ✓ La idea de que los cuerpos se mueven con una velocidad absoluta independientemente del sistema de referencia que se escoja para estudiar su movimiento.
- ✓ La identificación que se hace entre la posición sobre la trayectoria “e” o el cambio de posición “ $\Delta e$ ” con la distancia recorrida.
- ✓ Pensar que siempre que un móvil frena la aceleración sobre la trayectoria tiene que ser necesariamente negativa.
- ✓ Confundir las gráficas  $v = v(t)$  ó  $e = e(t)$  con la trayectoria realmente seguida por el móvil.
- ✓ Identificar la velocidad con la rapidez o el módulo de la velocidad, ignorando su carácter vectorial y que por tanto todo cambio de dirección implica siempre un cambio de velocidad.
- ✓ Pensar que siempre que el vector aceleración sea constante el movimiento ha de ser uniformemente acelerado (con lo cual el tiro horizontal o el oblicuo entrarían dentro de este tipo de movimiento).
- ✓ Pensar que, aunque el rozamiento sea despreciable, la masa de un cuerpo influye en su aceleración cuando se deja caer desde cierta altura o se lanza hacia arriba.
- ✓ Pensar que cuanto mayor sea la velocidad inicial con que se realiza un tiro horizontal mayor tiempo estará en el aire antes de chocar contra el suelo.

También han quedado algunas preguntas sin resolver. No sabemos, por ejemplo, cómo podemos determinar los valores de la rapidez o la velocidad en un instante dado (que se estudiarán en cursos posteriores de física). Hemos hecho un estudio “descriptivo” del movimiento sin preguntarnos acerca de los “motivos” por los que un cuerpo “tiene” tal o cual aceleración. Tampoco hemos analizado cómo podemos conseguir cambiar la velocidad con que se mueve un cuerpo o hacer que tenga el movimiento que nos interese, ni hemos comparado el movimiento de objetos sobre la superficie de la Tierra con el de algunos cuerpos celestes. Estos problemas son los que nos vamos a plantear en el próximo tema.

## Anexo. LA CONSTRUCCIÓN DE VEHÍCULOS CADA VEZ MÁS RÁPIDOS A DEBATE

La rapidez con que las personas podemos realizar cambios en nuestra posición, no es especialmente brillante si la comparamos con la rapidez que pueden desarrollar otros seres vivos. En efecto, parece muy difícil que pueda bajarse de los 9 segundos en una carrera de 100 m lisos. Eso supone una rapidez media del orden de 40 km/h. En este tipo de competiciones conseguir una rapidez máxima de 45 km/h también parece una meta lejana para el ser humano. Sin embargo, sabemos que existen muchos animales, como el perro, la liebre, el caballo, el antílope, etc., que rebasan ampliamente ese valor que parece inalcanzable para nuestra especie. A título de ejemplo, un jaguar en plena carrera supera fácilmente los 100 km/h.

Para compensar la limitación señalada, los seres humanos hemos construido máquinas que nos permiten desplazarnos mucho más rápido de lo que lo podemos hacer por nuestros propios medios. A poco que nos detengamos en revisar la historia, nos daremos cuenta de que el desarrollo de la civilización ha ido paralelo a la construcción de vehículos cada vez más rápidos.

No cabe duda de que la construcción de barcos de remos y a vela, facilitó el transporte de mercancías y personas por una gran parte del mundo de las civilizaciones más antiguas. Posteriormente, ya en el S. XVIII, la invención de la máquina de vapor y del motor de explosión, posibilitaron la construcción de ferrocarriles y de automóviles que a su vez permitieron el movimiento de población y mercancías en grandes cantidades y en tiempos mucho más cortos que los que se podía imaginar. Viajes como la travesía del Océano Atlántico que hasta entonces duraba meses, con el uso de los barcos de vapor se pudo realizar en días. Una atención especial merece el desarrollo de motores para ser empleados en el transporte aéreo. A mediados del siglo XX se adaptó a los aviones comerciales y de pasajeros el motor de propulsión a chorro o a reacción, de forma que hoy en día volar a más de 900 km/h y cruzar el Atlántico en menos de 8 h, se ha convertido en algo rutinario. Están funcionando ya trenes de alta velocidad, capaces de circular a más de 330 km/h. En noviembre de 1997, en Japón, un prototipo de tren por levitación magnética superó los 500 km/h y en octubre de ese mismo año mediante un vehículo terrestre impulsado por cohetes, se superaron en el desierto de Nevada (Estados Unidos) los 1220 km/h. Todos estos ejemplos, muestran que el esfuerzo realizado en conseguir vehículos cada vez más rápidos, que nos permitan mayores desplazamientos en menos tiempo, se ha convertido en una carrera (nunca mejor dicho) que parece no tener límite.

*¿Realmente vale la pena seguir tratando de conseguir vehículos cada vez más rápidos? ¿Qué ventajas tiene? ¿Qué inconvenientes?*

Para centrar la cuestión podemos pensar, por ejemplo, en la industria automovilística. La rapidez máxima que puede alcanzar un coche es algo que se suele citar en la publicidad para inducir a que se compre. Sin embargo, ¿no es un contrasentido limitar la rapidez máxima a 120 km/h y construir vehículos capaces de superar fácilmente los 200 km/h?, ¿no influye eso en el número de accidentes de tráfico mortales? Por otra parte, es sabido que un coche a 90 km/h en igualdad de condiciones consume mucho menos combustible que, por ejemplo a 150 km/h. ¿Cuánto combustible se ahorraría si los cientos de millones de coches particulares existentes en todo el mundo se fabricasen de modo que no pudieran superar los 120 km/h? ¿En cuánto se reduciría la contaminación atmosférica? ¿En cuánto se reduciría el aumento del efecto invernadero? Ciertamente hay ocasiones en las que llegar unos minutos antes puede ser algo esencial (ambulancias, bomberos, policía, etc.), pero para el resto de los casos ¿es tan esencial llegar antes? ¿a quien beneficia? Vale la pena reflexionar detenidamente sobre todo ello.

**1. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE CINEMÁTICA**

1. Tres estudiantes van corriendo en fila recta uno detrás de otro cuando, de pronto, el que va delante lanza hacia arriba una bola. ¿De qué dependerá el que sea recogida por uno u otro?

2. Dad ejemplos para el movimiento de un vehículo que durante un cierto intervalo de tiempo:

a) Haya recorrido una cierta distancia y, sin embargo, el valor medio de la rapidez, en dicho intervalo de tiempo, sea 0.

b) Se desplace cada vez más deprisa y, sin embargo, el valor de la aceleración sobre la trayectoria sea un número negativo.

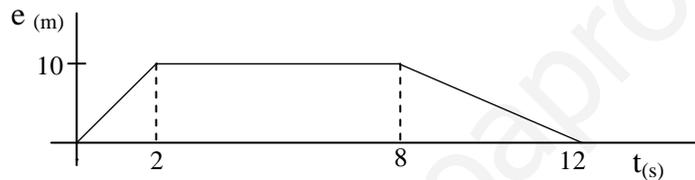
3. Una motocicleta que circula a 72 km/h por una carretera, en un instante dado pasa por delante de una señal que indica gasolinera a 1500 m. Dos segundos más tarde, pasa un coche por esa gasolinera en sentido contrario a la moto y a 108 km/h. Se pide:

a) Después de escribir las ecuaciones del movimiento para ambos móviles, representad en una sola gráfica e-t el movimiento de la moto y el del coche entre  $t = 0$  y  $t = 40$  s.

b) Determinad a qué distancia de la señal se cruzan los dos vehículos.

Rdo. b) Se cruzan a 624 m de la señal

4. Se interpretó la siguiente gráfica, correspondiente, al movimiento de un vehículo diciendo que:



“El movimiento consta de tres partes. En la primera la rapidez va en aumento. En la segunda el movimiento es rectilíneo y uniforme durante 6 segundos. En la tercera el vehículo va frenando hasta que se para en un punto situado a una cierta distancia del punto de partida”.

a) Analizad detalladamente la gráfica corrigiendo los errores presentes en la explicación anterior

b) Construid la gráfica de la rapidez frente al tiempo a partir de los datos suministrados

5. Unos excursionistas se encuentran realizando una travesía de alta montaña cuando observan a lo lejos una tormenta que se dirige hacia ellos. En un momento dado se produce un relámpago y tardan en oír el trueno correspondiente 14 s. Un minuto después el trueno que acompañó a otro relámpago tardó en oírse 8 s. Suponiendo que la tormenta viaje a velocidad constante, ¿de cuánto tiempo disponen para encontrar un refugio antes de que se les venga la tormenta encima? (Considerad que el sonido se desplaza en el aire a 340 m/s). Rdo. 80 s.

6. La estrella más cercana a la Tierra (sin tener en cuenta a nuestro sol) es Alfa de Centauro, que se encuentra aproximadamente a 4,5 años luz de nosotros (un año luz es la distancia que recorre la luz en un año y la luz en el vacío se desplaza a 300.000 km/s). ¿Cuanto tiempo en años tardaría una nave terrestre que viajase a 40.000 km/h en llegar hasta ella? Rdo. 121500 años.

7. Desde un globo que está ascendiendo a 5 m/s se suelta un saco de lastre en el instante en que se encuentra a 100 m de altura. Despreciando el rozamiento con el aire, calculad con qué rapidez chocará el saco contra el suelo y expresad el resultado en km/h. Rdo. 162 km/h (tomando  $g = 10 \text{ m/s}^2$  en valor absoluto).

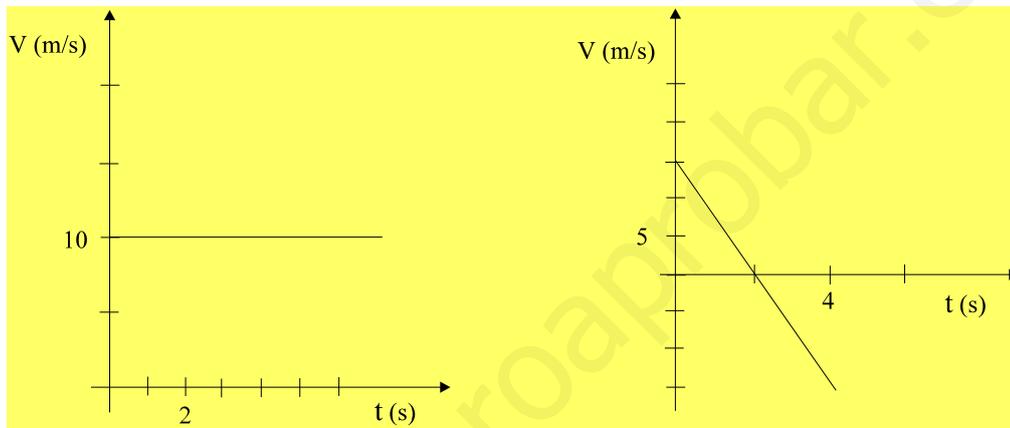
8. Explicad en qué casos particulares se pueden utilizar las siguientes expresiones:

a)  $e = e_0 + at^2/2$  ;    b)  $v = a_t \cdot t$  ;    c)  $v_m = \frac{v_0 + v}{2}$  ;    d)  $e = v \cdot (t-t_0)$

**9.** Un coche que va a 108 km/h frena con una aceleración constante hasta conseguir reducir su rapidez a la mitad en 5 s para luego continuar con esa rapidez durante 5 s más. Tomando como origen de espacios y de tiempos la posición y el instante en que comenzó a frenar, se pide:

- Sin realizar ningún cálculo, dibujad una posible trayectoria señalando en ella la posición del coche mediante cruces a intervalos de 1 s desde  $t = 0$  hasta  $t = 10$  s.
  - Escribid las ecuaciones "v" y de "e" en función del tiempo, mientras frena
  - Escribid las ecuaciones de v y de e en función del tiempo después de la frenada
  - Representad v-t y e-t desde  $t = 0$  hasta  $t = 10$  s
  - Calculad la distancia total recorrida por el coche a los 10 segundos
- Rdo. d) 1875 m

**10.** En las dos gráficas siguientes se representa el movimiento de dos móviles que en el instante inicial  $t=0$ , se encontraban en la posición  $e=0$  m. Interpretad cada uno de los movimientos representados y, a continuación, proceded a construir la gráfica  $e = e(t)$  de cada uno de ellos.



**11.** Un objeto se mueve de forma que su posición sobre la trayectoria viene dada por la expresión:  $e = 25 + 40t - 5t^2$  m. Se pide:

- Extraed toda la información posible sobre el movimiento: tipo de movimiento, valores de la rapidez y del espacio en el instante inicial ( $v_0$  y  $e_0$ ), la aceleración sobre la trayectoria  $a_t$ , el sentido en que se mueve y la ecuación de su rapidez en función del tiempo  $v = v(t)$ .
  - Calculad dónde estará y con qué rapidez se moverá en el instante  $t = 5$  s. ¿Qué distancia total habrá recorrido el móvil en esos 5 segundos?
- Rdo.  $e_5 = 100$  m;  $v_5 = -10$  m/s;  $d = 85$  m

**12.** Una moto va a 100 km/h por la ciudad cuando su conductor frena (con aceleración constante) para no atropellar a una persona que se encontraba a 25 m de distancia, parando en 4 s.

- ¿Consiguió parar a tiempo de evitar el accidente?
- ¿Qué hubiera ocurrido si la moto hubiese ido a la máxima velocidad permitida y hubiera frenado con la misma aceleración? (50 km/h en una vía urbana)

Rdo. a) No, porque recorre algo más de 55 m hasta que consigue pararse. b) No la hubiese atropellado, porque se pararía a los 13'9 m de donde comenzó a frenar y la persona está a 25 m.

**13.** Un cierto tipo de avión necesita alcanzar una velocidad mínima de 288 km/h para comenzar a elevarse. Dicho avión tiene unos motores capaces de proporcionarle una aceleración máxima de  $5 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuál será la longitud mínima que deberá tener la pista? Rdo. 640 m.

**14.** Un coche inicialmente en reposo va aumentando su rapidez con una aceleración de  $4 \text{ m/s}^2$  hasta que alcanza una rapidez de  $86'4 \text{ km/h}$ . Sigue con esa rapidez durante 2 segundos y luego frena consiguiendo parar en 4 s más.

- Calculad la distancia total en metros recorrida por el coche desde que comenzó a moverse.

## 1. Cinemática

- b) Representad en una sola gráfica  $v = v(t)$  para todo el trayecto. Idem para  $e = e(t)$   
c) Dibujad una posible trayectoria señalando en ella la posición del coche cada segundo.  
Rdo. a) Recorre un total de 168 m.

15. Un coche de policía pretende alcanzar a otro vehículo que circula con rapidez de 108 km/h. El vehículo policial arranca desde el reposo con aceleración de  $2 \text{ m/s}^2$  hasta que su rapidez es de 180 km/h y luego prosigue con movimiento uniforme. Calculad:

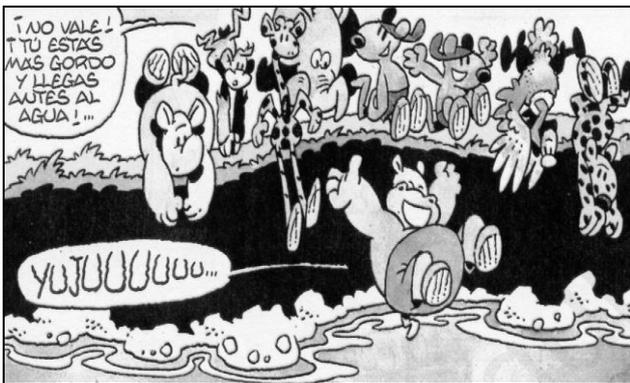
- a) Dónde alcanzará al otro vehículo si se puso en marcha 2 s después de ser rebasado  
b) Representad en un mismo diagrama  $e = e(t)$  el movimiento de los dos vehículos  
Rdo. a) Lo alcanzará a  $1087,5 \text{ m}$  del punto donde estaba inicialmente el coche de policía

16. Proponed ejemplos para el movimiento de un vehículo en el que éste:

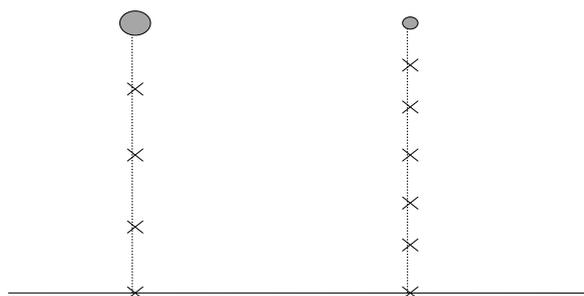
- a) Circule constantemente a 30 km/h y, sin embargo, su velocidad vaya cambiando.  
b) Se desplace de un punto A a otro B con una rapidez constante muy grande y, sin embargo, el módulo de la velocidad media correspondiente tenga un valor muy pequeño.

17. Una persona piensa que cuanto mayor sea la velocidad a la que se esté moviendo un cuerpo, mayor será la aceleración que éste lleva y que si en un instante dado la velocidad es 0 no tiene que haber aceleración en ese instante. Explicad en qué se equivoca.

18. ¿Qué comentarios, desde el punto de vista de la física, os sugiere estas viñetas?



19. Un estudiante al que se le pidió que marcara mediante cruces a intervalos regulares de tiempo la posición de dos masas de 1 kg y de 2 kg cada una que se dejan caer desde la misma altura (considerando rozamiento despreciable), realizó el dibujo adjunto. Explicad qué **dos** errores cometió al hacerlo.



20. Desde la boca de un pozo de 20 m de profundidad, se lanza verticalmente y hacia arriba una piedra con rapidez de 10 m/s. Determinad con qué rapidez chocará contra el fondo.

Rdo. En el instante que se produce el choque la rapidez será de  $22,4 \text{ m/s}$  (en valor absoluto)

21. Desde el suelo se lanza verticalmente hacia arriba un proyectil con una cierta rapidez inicial  $v_0$ , comprobándose que éste tarda 4 s en alcanzar la altura máxima. Se pide:

- a) Valor de dicha altura máxima. b) ¿A qué altura máxima habría llegado y cuánto tiempo habría tardado si se hubiera lanzado con el doble de rapidez inicial?

Rdo. a) Alcanza 80 m de altura máxima. b) Hubiese llegado a 320 m de altura en 8 s

**22.** Desde lo alto de una torre de 62'5 m se deja caer una piedra ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ , rozamiento despreciable). Se pide:

a) Determinad las ecuaciones del movimiento y a partir de ellas construid las gráficas v-t y e-t desde que se deja caer la piedra hasta el instante en que choca contra el suelo.

b) Mediante las dos gráficas anteriores, obtened cuál será la rapidez de la piedra en el momento en que pasa justo por la mitad de la torre. Comprobad la validez del resultado obtenido, utilizando para ello sólo las ecuaciones del movimiento.

Rdo. b) Estará descendiendo con una rapidez de 25 m/s (en valor absoluto).

**23.** Un avión de carga vuela siguiendo el curso de un río. Justo en el momento en que se encuentra sobre la vertical de un puente, pierde uno de los fardos que transporta. Sabiendo que el río en esa zona discurre en línea recta y que el avión volaba a 1000 m de altura con una rapidez de 800 km/h, determinad a qué distancia del puente habría que buscar dicho fardo. (Suponed el rozamiento con el aire despreciable). Rdo. Si la fricción con el aire fuera despreciable, el paquete habría caído a una distancia horizontal de donde se soltó de 3174'6 m.

**24.** Una pelota rueda sobre una mesa horizontal a 1'5 m de altura del suelo, cayendo por el borde de la misma. Si choca con el suelo a una distancia de 1'8 m, medidos horizontalmente desde el borde de la mesa. ¿Cuál es la rapidez con la que salió de la mesa? Rdo. 3'27 m/s.

**25.** Un saltador de longitud inicia el salto con una rapidez de 32 km/h y un ángulo con la horizontal de 38°. Suponiendo el rozamiento con el aire despreciable:

a) Determinad el valor de la marca conseguida.

b) ¿Cómo podría mejorar al máximo su marca si es incapaz de correr más rápido?

Rdo. a) La marca fue de 7'67 m. b) Saltando con un ángulo de 45° conseguiría 7'90 m.

**26.** ¿Con qué velocidad inicial (módulo y dirección) tendrá que lanzar el jugador de básquet de la figura la bola, para que pueda entrar en la canasta y hacer un triple?

La distancia entre la vertical de la bola y vertical de la canasta es de 6'25 m. La bola sale desde 1'6 m de altura y la canasta está a 3 m sobre el suelo.

Rdo.  $v_0 = 12'94 \text{ m/s}$ ,  $\varphi = 24'13^\circ$



**27.** Un ventilador tiene unas aspas de 20 cm de radio de distinto color que giran con una frecuencia constante de 50 Hz en sentido horario. Sabiendo que cuando el cronómetro indica 5 s el aspa de color rojo forma un ángulo de 90° con la vertical (origen de posiciones angulares), se pide:

a) Escribid su ecuación del movimiento para dicha aspa en función de magnitudes angulares. b) ¿Cuántas vueltas habrá dado cuando el cronómetro indique 7 s? ¿Qué distancia habrá recorrido su extremo durante ese intervalo de tiempo?

Rdo. a)  $\theta = 100 \pi \cdot t - 999 \cdot \pi/2$ ; b) 100 vueltas entre  $t_0 = 5 \text{ s}$  y  $t = 7 \text{ s}$ ,  $\Delta e = 125'66 \text{ m}$

**28.** Un disco de radio 2 m gira en torno a un eje perpendicular por su centro, con rapidez constante. Sabiendo que invierte 4 s en dar un giro completo, se pide: a) Rapidez angular, lineal, y aceleración normal de dos puntos A y B situados a 1 m y 2 m del centro respectivamente. b) Ángulo girado y distancia recorrida de A y de B en un tiempo de 6 s.

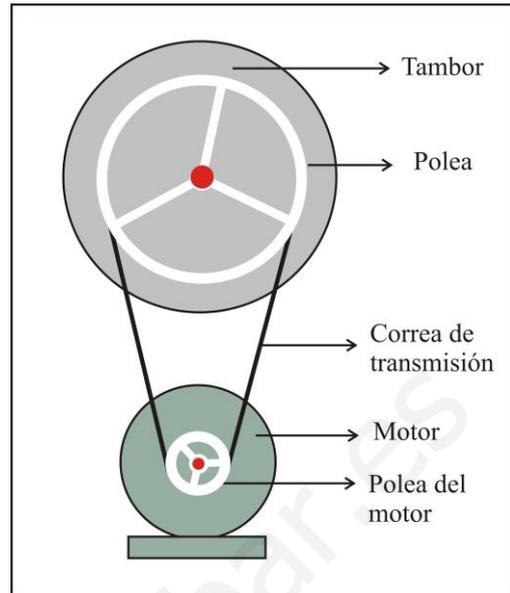
Rdo. a) Misma rapidez angular de  $0'5\pi \text{ rad/s}$ ;  $v_A = 0'5\pi \text{ m/s}$ ,  $v_B = \pi \text{ m/s}$ ;  $a_n = 0'25\pi^2 \text{ m/s}^2$  para A y  $a_n = 0'5\pi^2 \text{ m/s}^2$  para B. b) Ambos puntos giran un ángulo de  $3\pi \text{ rad}$ ; A recorre  $3\pi \text{ m}$ , B recorre  $6\pi \text{ m}$ .

## 1. Cinemática

**29.** Una lavadora tiene un tambor de 40 cm de diámetro que está fijo a una polea de 15 cm de radio. Esta polea gira (haciendo girar a su vez el tambor), gracias a la acción de la correa de transmisión que pasa por ella y por la polea del motor (que tiene 5 cm de radio), tal y como se muestra en el esquema adjunto:

- Calculad con qué rapidez angular debería girar la polea del motor (en rad/s) para conseguir que el centrifugado de la ropa se produzca a 1300 rpm (rapidez angular del tambor).
- Si el proceso de centrifugado dura 4 minutos, calculad los kilómetros recorridos por un calcetín durante dicho proceso (suponed que en todo momento gira pegado a la pared interna del tambor).

Rdo. a)  $\omega = 130 \cdot \pi$  rad/s; b) 6'53 km



**30.** Un cuerpo oscila con MAS cuya amplitud y periodo son  $A = 10$  cm y  $T = 4$  s. En el instante inicial  $t = 0$ , la elongación vale  $x = 0$  cm y la rapidez es positiva. Determina la elongación para  $t = 1$  s.

Rdo.  $x = 0'1$  m

**31.** Una partícula posee un MAS tal que cuando pasa por su posición central lleva una velocidad de 1'8 m/s. La amplitud es de 1 mm. Determinad la frecuencia de vibración y escribid una ecuación que exprese su posición en función del tiempo. (Suponed que en el instante  $t = 0$  se encontraba en la posición central moviéndose con velocidad máxima y en sentido positivo).

Rdo.  $x = 10^{-3} \text{ sen}(1'8 \cdot 10^3 \cdot t)$

**32.** Un cuerpo de 2 g de masa se mueve con un MAS de 3 mm de amplitud. Sabiendo que su aceleración en uno de los puntos extremos del recorrido es de  $500 \text{ m/s}^2$ , y que en el instante inicial se encontraba en O (es decir, para  $t = 0$ ,  $x = 0$ ), se pide:

- Frecuencia del movimiento y ecuaciones de  $x = x(t)$ ,  $v = v(t)$  y  $a = a(t)$ .
- Valor máximo de la rapidez.
- Rapidez con que se moverá cuando  $x = 1'8$  mm

Rdo. a)  $f = 65$  Hz;  $x = 3 \cdot 10^{-3} \text{ sen}(130\pi t)$ ;  $v = 1'23 \text{ cos}(130\pi t)$ ;  $a = -500 \text{ sen}(130\pi t)$ . b)  $v_{\text{máx}} = 1'23$  m/s.  
c)  $v = 0'984$  m/s

**33.** Una partícula que en  $t = 0$  se encontraba en O ( $x = 0$ ), vibra con una frecuencia de 150 Hz y una amplitud de 4 mm (MAS). Determinad:

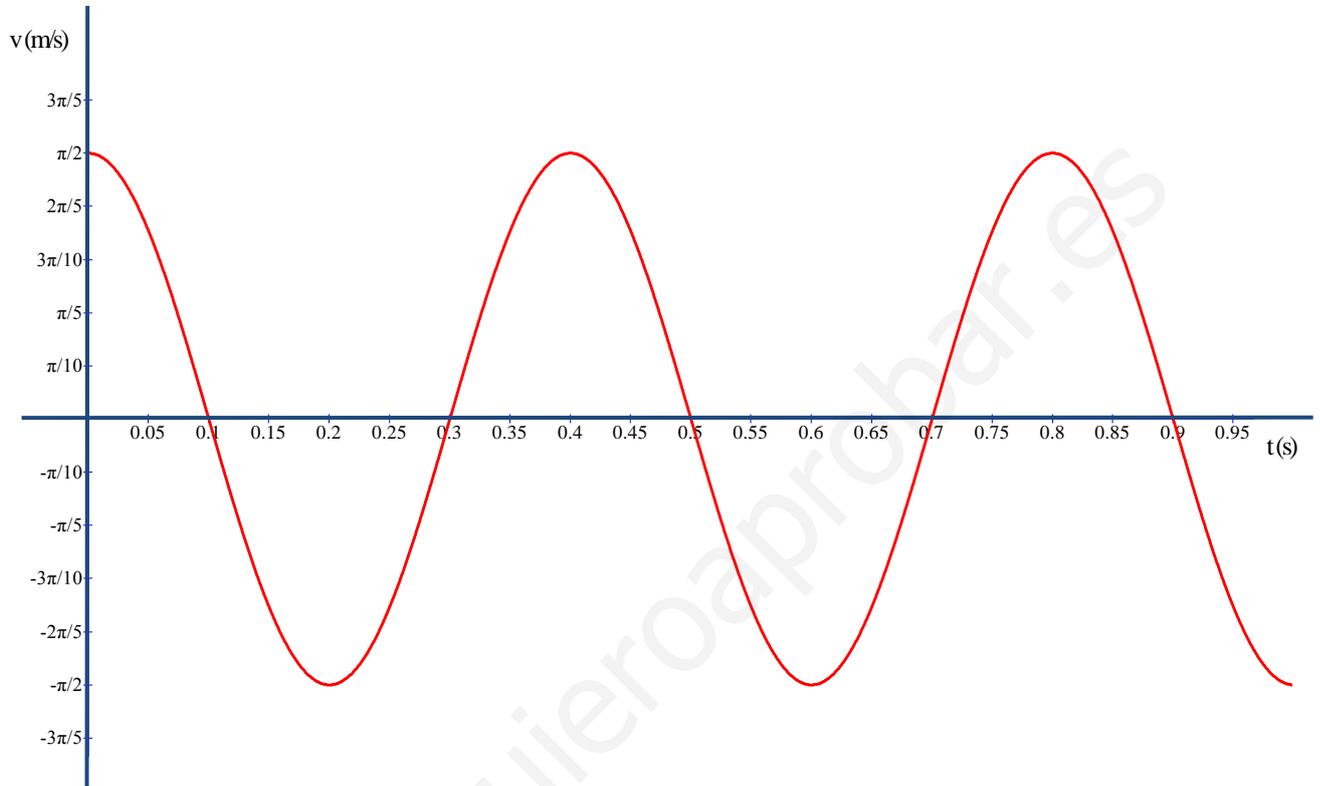
- Obtened la ecuación del movimiento  $x = x(t)$ .
- La rapidez y la aceleración en el punto central de la trayectoria
- La rapidez y la aceleración en uno de los extremos de la trayectoria.

Rdo. a)  $x = 4 \cdot 10^{-3} \text{ sen}(300\pi t)$ ; b)  $v = 1'2 \cdot \pi$  m/s,  $a = 0$ ; c)  $v = 0$ ,  $a = 360 \cdot \pi^2$  m/s<sup>2</sup>

34. Un objeto suspendido de un muelle se mueve verticalmente según la ecuación:  $x = 2 \cdot 10^{-2} \text{sen}(20\pi t)$  (m). Determina la elongación, la rapidez y la aceleración en el instante  $t = 0'02$  s.

Rdo.  $x = 1'9 \cdot 10^{-2}$  m,  $v = 0'388$  m/s,  $a = -75'09$  m/s<sup>2</sup>.

35. En la figura se muestra el gráfico rapidez-tiempo de un móvil que describe un MAS. Determina la función posición-tiempo y aceleración-tiempo y representadlas en un gráfico.



[www.yoquieroaprobar.es](http://www.yoquieroaprobar.es)

## 2. CAUSAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE MOVIMIENTO. DINÁMICA

### INTRODUCCION

Uno de los problemas que nos planteábamos al comienzo del libro consistía en si era posible o no explicar el movimiento de todos los cuerpos sin tener en cuenta la naturaleza del móvil. En efecto, las observaciones cotidianas muestran que, por ejemplo, los movimientos de un papel, una piedra, un globo o la Luna en su giro alrededor de la Tierra, son muy diferentes, pero nosotros estamos intentando encontrar una explicación común a **qué es lo que hace falta para que el movimiento de un cuerpo cualquiera sea de una forma determinada.**



En el tema anterior ya hemos dado un paso importante y necesario para avanzar en la solución a ese problema, introduciendo una serie de magnitudes que nos permiten caracterizar y diferenciar unos movimientos de otros, sin que haga falta considerar la naturaleza del cuerpo que se mueve. Vamos a preguntarnos ahora acerca de la causa que hace que un cuerpo se desplace con un tipo u otro de movimiento, es decir:

- ✓ ¿Qué hace que una bola de acero caiga en línea recta aumentando regularmente la rapidez?
- ✓ ¿Qué es lo que ocasiona que la Luna gire alrededor de la Tierra describiendo trayectorias circulares y con rapidez constante?
- ✓ ¿Por qué existen diferencias entre unos movimientos y otros?
- ✓ ¿Qué es lo que provoca que la velocidad de un móvil cambie de una forma u otra?

## 2. Dinámica

Conviene tener en cuenta que si logramos comprender por qué los movimientos son de una forma u otra, sabremos también cómo conseguir que un cuerpo se mueva tal y como nos interese, es decir: podremos **controlar el movimiento de muchos cuerpos**, lo cual tiene un indudable interés práctico.

*A.1. Cita ejemplos concretos en donde se precise o convenga controlar el movimiento de un cuerpo, de manera que podamos **cambiar** la rapidez con que se desplaza, la trayectoria que sigue, o bien conocer con antelación cómo se va a comportar.*

Podemos pensar en situaciones diversas como, por ejemplo:

- ✓ El tráfico de vehículos, en donde abundan las situaciones en las que es preciso cambiar la velocidad de un móvil (un coche que da una curva sin salirse de la carretera, un avión que toma tierra, un barco atracando en puerto, un vehículo que adelanta a otro o que ha de detenerse, etc.).
- ✓ En muchos deportes se trata de cambiar el movimiento de un objeto para conseguir que se mueva con una cierta rapidez o que describa la trayectoria que nos interese (fútbol, baloncesto, golf, balonmano, tiro olímpico, plancha a vela, etc.). En otros se trata de lograr que un móvil determinado alcance un cierto punto o posición en el menor tiempo posible (carreras en general).
- ✓ En las predicciones meteorológicas es fundamental prever la trayectoria y los posibles cambios de movimiento que pueden experimentar las masas nubosas o fenómenos como los huracanes y tornados que, con cierta frecuencia, se producen en diversas zonas de la Tierra.
- ✓ En el lanzamiento y puesta en órbita de satélites artificiales es necesario realizar numerosos controles y cambios en su velocidad desde el despegue hasta que se colocan en una órbita estable.

La parte de la Mecánica que se ocupa de estudiar las causas por las que un cuerpo realiza un tipo u otro de movimiento se denomina **Dinámica**. En el tema anterior vimos que lo que caracteriza esencialmente al movimiento de un cuerpo es su aceleración, es decir el modo en que cambia su velocidad. Así pues, conocer qué hace que un movimiento sea de un tipo determinado equivale a comprender cómo podemos producirle cierta aceleración (hacer que cambie su velocidad de una forma determinada).

En cursos anteriores ya se estudió que era necesario ejercer una fuerza para que un cuerpo tuviera aceleración. No obstante, la comprensión del concepto científico de fuerza y su relación con el movimiento de los cuerpos requiere mucha reflexión ya que contradice lo que la mayoría de las personas piensan espontáneamente. Por tanto, en este tema volveremos a revisar y profundizar en el concepto de fuerza y ampliaremos su aplicación a problemas más complejos, más cercanos a la realidad, que los tratados en cursos anteriores, analizando fuerzas particulares de especial interés.

### 1. ¿A QUÉ ES DEBIDO QUE UN CUERPO SE MUEVA DE UNA FORMA U OTRA? LA RESPUESTA DE ARISTÓTELES

Los conocimientos científicos son el fruto de un proceso de siglos de duración en el que personas y grupos de personas van elaborando respuestas a preguntas que se plantean. A lo largo de este proceso, dichas respuestas van evolucionando y, en ocasiones, sufren cambios radicales. Este es, precisamente, el caso de la cuestión que estamos tratando: Durante casi 2000 años (desde el siglo V antes de nuestra era hasta el siglo XVII), se dio (y se creyó) una respuesta a el porqué los cuerpos se movían en la forma en que lo hacían, que no coincide con la que vamos a desarrollar durante este curso.

Conviene conocer las características más importantes de la antigua concepción, tanto por la influencia que tuvo en la sociedad europea medieval, como para que podamos apreciar el cambio que supuso la introducción de las nuevas ideas sobre el movimiento, de personas como Galileo, Huygens,

Halley, Hooke, y, especialmente, Newton. Ideas que se desarrollaron en los siglos XVI y XVII y que, aún hoy, son utilizadas para calcular las estructuras de los edificios o hacer llegar un satélite a Marte.

La concepción antigua (o pre-clásica) del movimiento y sus causas era una parte fundamental del pensamiento de Aristóteles, para quien el Universo estaba dividido en dos partes claramente distintas. El mundo “sublunar” o terreno (imperfecto, perecedero y cognoscible con nuestros sentidos humanos) y el mundo “supralunar” o celeste (perfecto, incorruptible y eterno). Los cuerpos “terrestres” estaban hechos de materia distinta a los “celestes” y no obedecían a las mismas leyes.



Toda la materia terrestre, se consideraba como una mezcla de cuatro “elementos”: tierra, agua, aire y fuego. Se creía que cada uno tenía su lugar natural con relación a los demás, en el mundo sublunar. Dos de ellos (la tierra y el agua) eran pesados, es decir, poseían “gravedad” mientras que el aire y el fuego, por el contrario, poseían “ligereza”. Cada uno de ellos tendía a moverse en línea recta hacia su lugar natural, asignándose al fuego el lugar más alto en la atmósfera superior (se consideraba el elemento más noble de los cuatro), debajo estaba el aire, después el agua y al final, en la posición más baja, la tierra. De esta forma el fuego debía elevarse por encima del aire, éste por encima del agua, y la tierra debía caer debajo del aire y del agua, tendiendo a moverse hacia el centro del Universo (que, según se pensaba entonces, coincidía con el centro de la Tierra). Si un objeto en particular se movía por sí mismo hacia arriba o hacia abajo, era por el “deseo” o tendencia del elemento que se encontraba formando parte del mismo en mayor proporción, de alcanzar su “lugar natural”.

Existían una gran cantidad de “evidencias de sentido común”, que apoyaban estas ideas, así por ejemplo, cuando se “añadía” una cantidad de fuego suficiente al agua ordinaria calentándola en una vasija, se observaba cómo la mezcla resultante (vapor), se elevaba y cuando se enfriaba (perdía su fuego) el agua (que volvía a ser el elemento dominante) caía hacia su lugar natural. Por otra parte en la vasija en la que se había hervido el líquido, quedaba un pequeño resto de una sustancia terrosa, lo que se interpretaba diciendo que el agua ordinaria contenía también algo del elemento tierra.

Un objeto en el que predominase el elemento “tierra” debería, según este esquema, caer tanto más aprisa cuanto mayor fuese su peso (ya que a mayor proporción de tierra, más “tendencia” a moverse hacia su lugar natural). Así de dos piedras, abandonadas a la misma altura, la más pesada debía tardar menos tiempo en alcanzar su lugar natural y quedar allí en reposo. En palabras del propio Aristóteles:

“Un peso dado recorre una cierta distancia en un tiempo dado; un peso mayor recorre la misma distancia en un tiempo menor, estando la proporción de los tiempos en proporción inversa a los pesos. Así si un peso es doble que otro, invertirá la mitad de tiempo en caer desde una cierta altura”

Todos los objetos tenderían pues, según estas ideas, al reposo en su lugar natural (movimiento natural), precisándose una acción exterior (**una fuerza**) para sacarlos de dicho estado (movimiento forzado o violento). Se decía, por ejemplo, que si lanzamos una piedra hacia arriba, esta se mueve durante un cierto tiempo con un movimiento violento (alejándose de su lugar natural) y

## 2. Dinámica

cuando éste cesa, aparece el **movimiento natural** y la piedra cae de nuevo hacia el suelo. Surge así la idea del **reposo** como el **estado natural de la materia** (terrestre).

La física de Aristóteles era completamente diferente para la materia celeste, que se comportaba de una manera mucho más simple. En primer lugar, dicha materia estaba formada no por los cuatro elementos ordinarios, sino solamente por un quinto elemento especial llamado la **quintaesencia**, que no tenía peso y que era incorruptible y eterno. El estado natural de dicho elemento no era el reposo sino el movimiento circular y uniforme (que era considerado como el movimiento perfecto y continuo, a diferencia del movimiento rectilíneo natural de la materia terrestre, que siempre tiene un principio y un fin).

La materia de que estaban hechos todos los cuerpos celestes era siempre más noble que la materia del mundo sublunar, aunque aumentaba en perfección conforme nos alejábamos del centro del universo (ocupado por la Tierra), consecuentemente, la Luna (más cercana a nosotros) era el menos perfecto, tal y como podía verse por su apariencia “manchada”.

Aristóteles consideraba a la Tierra inmóvil y ocupando el centro del Universo, explicando el movimiento del Sol, la Luna y los 5 planetas conocidos entonces alrededor de la propia Tierra, suponiendo que cada uno de ellos estaba situado en la superficie de esferas transparentes de distinto diámetro, unas dentro de otras. A su vez, estas siete esferas concéntricas se encontraban dentro de la esfera celeste de las estrellas fijas, girando todas ellas uniformemente alrededor de un eje Norte-Sur que pasaba por el centro de la Tierra y desde el Este hacia el Oeste. Se trataba pues de un Universo “geocéntrico” con una clara división entre Tierra y Cielo y “jerarquizado” según distintos grados de perfección.

Las ideas anteriores se mantuvieron vigentes durante muchos siglos debido, fundamentalmente, al apoyo que recibieron durante la edad media por la Iglesia Católica que las consideraba de acuerdo con las sagradas escrituras. No obstante, esta situación comenzó a cambiar, lenta pero irremediablemente, a partir de la teoría heliocéntrica de Copérnico (1473-1543).

## 2. ¿A QUÉ ES DEBIDO QUE UN CUERPO SE MUEVA DE UNA FORMA U OTRA? LA RESPUESTA DE NEWTON

A comienzos de la edad media, los grandes pensadores árabes y europeos, apenas se atrevían a exponer ninguna idea propia sin apoyarla en alguna referencia a antiguos filósofos griegos, como Aristóteles. Durante los siglos XVI y XVII una serie de científicos como Copérnico, Galileo, Kepler, etc., mostraron que los conocimientos de física de los filósofos griegos (física pre-clásica) no siempre eran acertados. A pesar de ello, la mayoría de los intelectuales europeos siguió sin atreverse a romper del todo con la física pre-clásica porque ésta se había mezclado con la Teología y por tanto, ponerla en cuestión se consideraba equivalente a dudar de la fe católica y, no podemos olvidar, que entonces la Iglesia Católica tenía una gran influencia económica, política y militar.

Isaac Newton fue un científico inglés que nació a mediados del siglo XVII. Se le considera uno de los científicos más grandes de todos los tiempos. Realizó investigaciones en diversos campos haciendo un gran uso de las matemáticas, estableciendo unas bases sólidas sobre las que se edificó una gran parte de la física (física clásica).

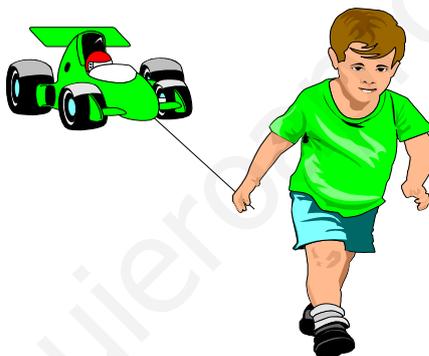


Sus estudios sobre el movimiento son una continuación de los que anteriormente realizaron otros científicos como Galileo y Kepler. Newton se planteó elaborar una explicación de por qué los cuerpos se mueven como lo hacen, que fuera **universal**, es decir, común para todos los cuerpos, terrestres o celestes, sólidos o gases. Puesto que, como veremos, sus trabajos tuvieron éxito, puede decirse que Newton contribuyó decisivamente a superar una gran barrera histórica que atribuía una naturaleza, propiedades y comportamientos distintos a los cuerpos según fueran objetos terrestres, o celestes (como estrellas, planetas, etc.).

### 2.1. ¿Cómo conseguir que un cuerpo se mueva en línea recta y con velocidad constante? Primer principio de la dinámica o principio de la inercia

*A.2. Expresad qué es necesario para que un cuerpo se mueva en línea recta y siempre con la misma velocidad. Proponed algún ejemplo que apoye las ideas expresadas.*

La respuesta más inmediata es que para que un cuerpo se mueva así es preciso empujarle constantemente en el mismo sentido del movimiento, es decir: se necesita que una fuerza resultante esté actuando constantemente sobre él. Los posibles ejemplos que parecen apoyar esta idea son muy numerosos. En efecto, desde niños tenemos experiencias en las que si queremos que un objeto se mueva hemos de hacerle una fuerza y comprobamos cómo en cuanto dicha fuerza deja de actuar, el objeto se para rápidamente.



La idea anterior es coherente con la que existía en la física pre-clásica (los objetos tienden a estar en reposo en su lugar natural y sólo lo abandonan si se les hace una fuerza). Sin embargo, para que una idea sea admitida en la ciencia debe ser puesta a prueba.

*A.3. Analizad cómo podríamos conseguir que al dejar de empujar un cuerpo que se mueve en línea recta sobre una superficie horizontal, se detenga cada vez más lejos o incluso que no se detenga.*

Parece claro que si el objeto fuese, por ejemplo, un bloque de acero pulido, cuando dejásemos de empujarle, permanecería mucho más tiempo moviéndose si se encontrase sobre una superficie de hielo que si estuviera sobre una superficie de cemento. Incluso podemos llegar a imaginar que si en vez de hielo liso (en donde el rozamiento es muy pequeño), se tratara de un material especial que no ejerciera ninguna fricción al bloque, éste continuaría moviéndose indefinidamente en línea recta y con velocidad constante ya que no habría ninguna causa de frenado.

La reflexión que acabamos de hacer, pone en cuestión, la idea de que los cuerpos “tienden” a estar en reposo en su lugar “natural” y sugiere que el movimiento rectilíneo y uniforme es tan natural como el reposo. El bloque del ejemplo se va parando, no porque dejemos de empujarlo, sino porque una fuerza en sentido contrario a su movimiento, la fuerza de rozamiento ejercida por la superficie sobre la que desliza, hace que su velocidad vaya disminuyendo (sin cambiar de dirección). Basta que esa fuerza de rozamiento deje de existir para que el bloque se mueva con velocidad constante.

## 2. Dinámica

Así pues, **la razón de que un cuerpo se desplace con movimiento rectilíneo y uniforme es, precisamente, que no actúe ninguna fuerza resultante sobre el mismo.**

Una reflexión muy semejante a la anterior es la que realizaba el propio Galileo en su libro *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo* (1632), en el que varios personajes (uno de ellos representante del punto de vista de la época) discuten sobre este tema. Vale la pena volverla a leer (ved tema de dinámica libro curso anterior).



Una de las cuestiones presentes en el libro de Galileo era la siguiente:

**A.4.** *¿Qué le sucedería a una esfera perfectamente pulimentada a la que se deja con cuidado sobre una hipotética superficie horizontal y se le da un pequeño empujón lateral?*

Suponed un caso ideal sin ningún rozamiento y dad vuestra propia opinión al respecto.

Una vez discutidas las dos actividades anteriores, es posible ya dudar que los objetos tienden al reposo de modo espontáneo o natural. No obstante, algunas personas piensan que la esfera permanecería moviéndose porque se le “comunicó” una fuerza cuando se le empujó y al no haber rozamiento esa fuerza permanece en la esfera sin “gastarse” manteniéndola en movimiento rectilíneo y uniforme. Sin embargo si esto fuese así tendríamos que admitir que hay dos clases diferentes de fuerzas:

- Unas, como el peso, que al actuar sobre un cuerpo hacen que cambie su velocidad (pensemos en un objeto dejado caer desde cierta altura o en otro lanzado hacia arriba).
- Otras, como la que “se le da a un objeto al lanzarlo” que no cambiarían la velocidad sino que tan solo la “mantendrían”.

Además habría casos que según a quien preguntásemos la respuesta sería diferente. Pensemos, por ejemplo, en un libro sobre la mesa de un vagón de tren que se mueve en línea recta a velocidad constante y sin traqueteos. Si preguntamos a dos personas (una que viaja sentada en el vagón y otra parada fuera del tren), por la fuerza resultante que actúa sobre el libro. El viajero podría decir que, puesto que para él, dicho libro no se mueve, la fuerza sería nula; mientras que el que está fuera podría decir que, como el libro se mueve, debe haber una fuerza que lo mantenga en movimiento.

La manera más simple de evitar esta contradicción es admitir que el reposo y el movimiento rectilíneo y uniforme, son equivalentes, es decir: No hace falta que se ejerza una fuerza resultante para que un cuerpo esté en movimiento rectilíneo y uniforme. De esta forma cuando se lanza un objeto, es cierto que se le ejerce una fuerza, pero ésta no queda “impresa” en él. Su efecto es cambiar la velocidad del objeto durante el lanzamiento de modo que si, tras ser lanzado, no hay fuerza resultante, no hay ninguna razón para que varíe la velocidad con que sale y el objeto seguiría indefinidamente con ella, no porque haya una fuerza empujándole, sino al contrario: **porque no hay ninguna fuerza resultante que modifique dicha velocidad.**

El hecho de que vivamos en un mundo en el que el rozamiento está casi siempre presente, hace que ignoremos su efecto o su presencia y pensemos que se necesita una fuerza resultante para mantener un cuerpo en movimiento, cuando lo correcto sería afirmar, tal y como lo hace el **principio de la inercia**, o primer principio de la dinámica, que:

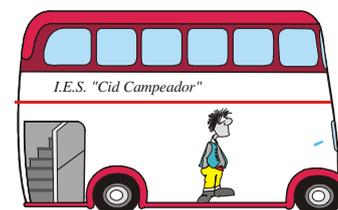
1. Todo cuerpo continúa con la velocidad que lleva (siempre respecto de un cierto sistema de referencia) a menos que sobre él actúe una fuerza resultante distinta de cero, o en otras palabras: Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza o si la resultante de todas las que actúan es nula, su velocidad no puede cambiar y si está en reposo continuará estándolo o si está en movimiento seguirá con velocidad constante, es decir, con movimiento rectilíneo y uniforme.

*A.5. En ocasiones habréis podido comprobar cómo a pesar de empujar un objeto que se encuentra en reposo sobre una superficie horizontal, resulta imposible moverlo. Sin embargo, de acuerdo con el principio de la inercia, toda fuerza resultante ha de producir un cambio de velocidad. ¿Se trata de una excepción a dicho principio?*

Como es lógico, si no hubiese ningún rozamiento entre el objeto y la superficie horizontal en la que se encuentra ni tampoco ningún otro obstáculo, el objeto arrancarían al empujarlo por muy pequeña que fuese la fuerza de empuje y por muy pesado que fuese el objeto. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones reales existe rozamiento, de manera que la única explicación de que continúe en reposo y al empujarlo no deslice sobre la superficie, es que exista una fuerza de rozamiento **igual** y de sentido contrario a la que nosotros hacemos. Al ser nula la fuerza resultante, la velocidad del objeto no puede cambiar por lo que continúa en reposo.

Conviene tener en cuenta que el principio anterior es válido únicamente si el sistema de referencia es **inercial**. Es decir, siempre que se pueda considerar que el sistema de referencia se halla en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme. Trataremos de aclarar esto en el siguiente ejemplo:

*A.6. Una persona se halla en un autobús (sin sujetarse a nada) que se mueve con movimiento rectilíneo y uniforme. De pronto, el conductor percibe un obstáculo y frena bruscamente. Haced un esquema de la situación y considerad si sobre la persona actúa o no alguna fuerza resultante mientras el autobús frena.*



Supongamos que el autobús se está alejando con velocidad constante de un peatón que se encuentra parado sobre la acera. Ese peatón no tendrá inconveniente en admitir que el pasajero también se está alejando de él con la misma velocidad. Para que el autobús frene es necesario que sobre él actúe una fuerza resultante en sentido contrario a su velocidad. Sin embargo, esa fuerza se ejerce sobre el autobús **pero no sobre la persona** que va en su interior (nadie la empuja ni la retiene) de manera que si no hubiera rozamiento con el piso del autobús y el pasajero no se sujetase a nada, como la fuerza resultante sobre él sería nula, seguiría con la misma velocidad que llevaba (respecto del peatón) hasta chocar con la parte delantera del autobús. Decimos que la acera es un sistema de referencia inercial y el peatón un observador inercial, que aprecia las interacciones reales que sufre el pasajero (en este caso ninguna). En cambio, un observador que viajara en el autobús sujeto al asiento, vería que el pasajero, de repente, comienza a moverse con rapidez creciente hacia la parte delantera. Para dicho observador, el pasajero sufre una aceleración por lo que interpretará que se ejerce sobre él una fuerza hacia adelante pero no puede encontrar quién la ejerce. El autobús es un ejemplo de sistema de referencia **no inercial**. En dichos sistemas no se cumple el principio de la inercia porque pueden apreciarse cambios de velocidad (respecto de ese sistema) sin que actúe fuerza alguna. Cualquier sistema que se mueva con una cierta aceleración es un sistema de referencia no inercial.

## 2. Dinámica

Lo que hemos avanzado hasta aquí constituye una respuesta a la pregunta de qué se necesita para que un cuerpo se mueva con velocidad constante y supone también una idea de fuerza como causa del **cambio de velocidad** (y no de la velocidad), en la cual vamos a basarnos para continuar en la búsqueda de una respuesta a qué hace falta para que un movimiento sea como es. De momento, sabemos que para que un cuerpo se desplace con movimiento rectilíneo y uniforme, hace falta lo mismo que para que se encuentre en reposo: **que la fuerza resultante sobre él sea nula**.

### 2.2. ¿Cómo conseguir que un cuerpo se mueva con una cierta aceleración? Segundo principio o ecuación fundamental de la dinámica

Si disponemos ya de una posible explicación sobre lo que hace falta para que un cuerpo se encuentre en reposo o se mueva con velocidad constante (siempre respecto de un cierto sistema de referencia inercial), parece lógico plantearse ahora qué será necesario para que un movimiento no sea rectilíneo y uniforme, es decir, para que la velocidad del cuerpo cambie o, más precisamente, para que esté acelerado. (Recordemos que la aceleración mide lo deprisa que cambia la velocidad).

*A.7. Imaginad un cuerpo que se encuentre inicialmente en reposo o con movimiento rectilíneo y uniforme. ¿Cómo podemos conseguir que deje de tener velocidad constante y se mueva con una cierta aceleración? ¿De qué dependerá que la aceleración sea más o menos grande? ¿Qué dirección y sentido cabe esperar que tenga el vector aceleración?*

De acuerdo con lo visto hasta aquí podemos pensar que cuanto mayor sea la fuerza resultante que se ejerce sobre un cuerpo, mayor tendrá que ser la aceleración con que éste se moverá y que dicha aceleración tendrá la misma dirección y sentido que la fuerza que la produce. También podemos pensar que el valor de la aceleración dependerá de las características del cuerpo, es decir, no dará igual aplicar la misma fuerza resultante a un gran bloque de hierro que a una simple canica. Todo ello puede expresarse mediante la expresión:  $\vec{F}_{res} = k \cdot \vec{a}$  en la que  $k$  es una constante de proporcionalidad cuyo valor dependerá del cuerpo que se trate. También podemos escribir  $|\vec{F}_{res}| = k \cdot |\vec{a}|$  añadiendo que los vectores fuerza resultante y aceleración tienen la misma dirección y sentido.

*A.8. Tratad de dar un significado físico a la constante  $k$  de la definición operativa de fuerza. Considerad para ello qué ocurrirá con cuerpos en los que el valor de  $k$  sea muy grande o bien muy pequeño.*

La expresión anterior puede escribirse como:  $k = \frac{|\vec{F}_{res}|}{|\vec{a}|}$

Analizando el cociente anterior, es fácil darse cuenta de que un objeto que tenga un valor de  $k$  muy alto significará que a pesar de actuar sobre él una fuerza resultante muy grande, la aceleración conseguida es muy pequeña. Por el contrario, los objetos con un valor de la constante  $k$  muy bajo serán aquellos que basta una pequeña fuerza resultante para conseguir una gran aceleración. A dicha constante se le ha designado como **masa inerte**, se simboliza por la letra “ $m$ ” y la unidad para medirla en el sistema internacional (elegida arbitrariamente) es el kg. Esta concepción cualitativa y cuantitativa de fuerza, se expresa generalmente en la forma:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

La ecuación anterior se conoce como: ecuación fundamental de la dinámica y en ella se resume el segundo principio de la dinámica que podemos enunciar del siguiente modo:

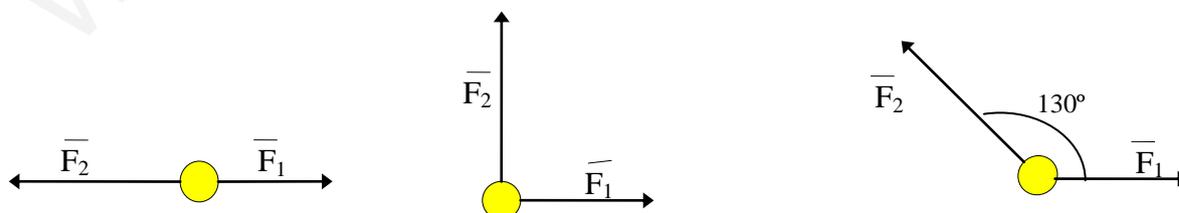
2. Siempre que sobre un objeto (considerado como puntual) actúa una fuerza resultante  $\vec{F}$ , dicha fuerza le produce una aceleración  $\vec{a}$  en la misma dirección y sentido. Ambas magnitudes son directamente proporcionales (a mayor fuerza resultante mayor aceleración se produce) y se hallan relacionadas de la forma  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$  siendo  $m$  la constante de proporcionalidad, denominada masa inerte.

A mediados del siglo XVII, la palabra **inercia** era asociada a una tendencia natural de la materia a retener su posición **en el espacio**, es decir, a resistir al movimiento. Fue al desarrollarse la mecánica clásica cuando apareció la idea de **oposición** a cambiar de velocidad. Esta distinción entre inercia como resistencia a cambiar de posición o como resistencia a cambiar de velocidad, resultó fundamental, pues en la primera está la idea del reposo como el “estado natural” de los cuerpos y la necesidad de buscar un agente causante de la velocidad, mientras que en la segunda el movimiento (rectilíneo y uniforme), no necesita ninguna explicación ya que es un estado “tan natural” como el reposo y lo que hay que buscar es un agente causante de la aceleración.

Sin embargo, en la actualidad, la propiedad de la inercia de los cuerpos materiales, no debe ser interpretada como que los cuerpos oponen resistencia alguna para alcanzar determinada velocidad o tienen más o menos tendencia a seguir con la que llevaban. Precisamente una consecuencia de la ecuación fundamental de la dinámica  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , es que por muy grande que sea la masa de un cuerpo y muy pequeña que sea la fuerza **resultante**, el conseguir cualquier velocidad por elevada que esta pueda ser, es únicamente cuestión de tiempo, sin que, en principio (según la física clásica), haya ningún otro límite a este proceso. Que un cuerpo tenga más inercia que otro, significa, simplemente, que la misma fuerza resultante le va a producir menos aceleración. Esto es equivalente a decir que si queremos que ambos cuerpos experimenten un mismo cambio de velocidad en un intervalo de tiempo dado, sobre el de más inercia será necesario ejercer una fuerza resultante mayor.

Una vez que se elige, por convenio, la unidad de masa (el kilogramo), según la idea de fuerza expresada en el segundo principio, la unidad de fuerza será la fuerza resultante que a un objeto de 1 kg de masa le produzca una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ . Su nombre es Newton y su símbolo “N”. Podemos hacernos una idea intuitiva sobre lo grande o pequeña que es una fuerza, si utilizamos para ello el valor del peso de un cuerpo, ya que un objeto de 1 kg de masa situado al nivel del mar, pesaría aproximadamente 10 N y al aguantar con la mano pequeños objetos como una goma de borrar o una taza de café, de unos 100 g de masa, podríamos estar haciendo una fuerza del orden de 1 N.

**A.9.** Sobre un cuerpo actúan únicamente dos fuerzas. Obtend el vector aceleración en cada una de las tres situaciones representadas ( $|\vec{F}_1| = 3 \text{ N}$ ;  $|\vec{F}_2| = 4 \text{ N}$ ;  $m = 2 \text{ kg}$ ).



Para hallar la aceleración que producen varias fuerzas cuando se ejercen simultáneamente sobre un cuerpo, es necesario hallar la suma o resultante de todas ellas. Puesto que son magnitudes vectoriales, esta suma debe realizarse de un modo distinto a la suma de magnitudes escalares, tal y como se desarrolla en el anexo sobre cálculo vectorial incluido al final del libro. Según lo tratado

## 2. Dinámica

en dicho anexo, para realizar cuantitativamente la suma de las fuerzas será necesario elegir, en primer lugar, un sistema de referencia adecuado. Lo más sencillo será hacerlo de modo que, al menos uno, de los ejes de coordenadas coincida con alguno de los vectores representados. Tomando el eje X de forma que coincida con el vector  $\vec{F}_1$  y situando el cuerpo en el origen, obtenemos los vectores aceleración:  $(-0.5, 0) \text{ m/s}^2$ ;  $(1.5, 2) \text{ m/s}^2$ ;  $(0.2, 1.5) \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

**A.10.** Imaginad un cuerpo con movimiento rectilíneo y uniforme. Sabemos que para lograr que se mueva con cierta aceleración hemos de hacer que sobre él actúe una fuerza resultante. Indicad qué dirección y sentido debería tener dicha fuerza para que el movimiento del cuerpo se transforme en:

- Un movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado en el que vaya aumentando el módulo de  $\vec{v}$
- Un movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado en el que disminuya el módulo de  $\vec{v}$
- Un movimiento circular y uniforme.

La actividad anterior puede servirnos como un resumen de lo que hemos avanzado en el problema que nos planteábamos al comienzo del tema sobre cómo conseguir que el movimiento de un cuerpo fuera de un tipo o de otro. En efecto, para que un cuerpo se desplace con movimiento rectilíneo y uniforme (o esté en reposo), la fuerza resultante sobre él ha de ser nula. Para que un cuerpo realice un movimiento con aceleración, es necesario que sobre él actúe una fuerza resultante. Dicha fuerza está relacionada con la aceleración mediante la expresión  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , según la cual la fuerza resultante es directamente proporcional a la aceleración que produce y ambas magnitudes tienen **siempre** la misma dirección y sentido.

El tipo de movimiento depende del ángulo que formen la fuerza resultante ( $\vec{F}$ ) y la velocidad ( $\vec{v}$ ):

- ✓ Si ambos vectores tuvieran la misma dirección y la fuerza resultante fuese constante, el movimiento sería rectilíneo y uniformemente acelerado, de tal forma que el vector velocidad sólo cambiaría en módulo, el cual iría aumentando en el caso de que  $\vec{F}$  y  $\vec{v}$  formasen un ángulo de  $0^\circ$  (es decir que la fuerza resultante tuviera el mismo sentido que la velocidad) y disminuyendo en caso que dichos vectores formasen entre sí un ángulo de  $180^\circ$  (es decir que la fuerza resultante tuviera sentido opuesto a la velocidad). En ambos casos, al ser la fuerza tangente a la trayectoria, “toda” la fuerza resultante se emplea en modificar el módulo de la velocidad sin que pueda variar su dirección.
- ✓ Si el ángulo formado entre  $\vec{F}$  y  $\vec{v}$  fuera en todo momento  $90^\circ$  y el módulo de dicha fuerza resultante no cambiase, “nada” de dicha fuerza podría empujar ni frenar al cuerpo. Toda ella se emplearía únicamente en modificar la dirección de la velocidad pero no su módulo, con lo que el movimiento resultaría circular y uniforme.
- ✓ En caso de que el ángulo formado entre los vectores  $\vec{F}$  y  $\vec{v}$  no sea ninguno de los anteriores, el movimiento será curvilíneo y los cambios de velocidad afectarán tanto a su módulo como a su dirección.

De acuerdo con lo que hemos visto hasta aquí, para que un cuerpo se acelere, se necesita que sobre él actúe una fuerza resultante. En muchos casos es fácil darse cuenta de quién es el agente causante de dicha fuerza. Es lo que le ocurre, por ejemplo, a una flecha cuando se encuentra a punto de ser lanzada con el arco tenso, al dejar la cuerda en libertad ésta ejerce una fuerza sobre la flecha acelerándola. Sin embargo, existen otras situaciones en las que, en principio, no resulta tan sencillo ver quién es el agente que ejerce la fuerza. Pensemos, por ejemplo, en un corredor cuando arranca o un coche cuando acelera, algunas personas piensan que el corredor o el coche aceleran sin que nadie les

empuje. Pero si aceptásemos que unos cuerpos pueden acelerarse a sí mismos y otros no, estaríamos renunciando a encontrar una explicación común, de por qué los cuerpos se mueven como lo hacen.

### 2.3 ¿Pueden los cuerpos acelerarse a sí mismos? Tercer principio de la dinámica o principio de acción y reacción.

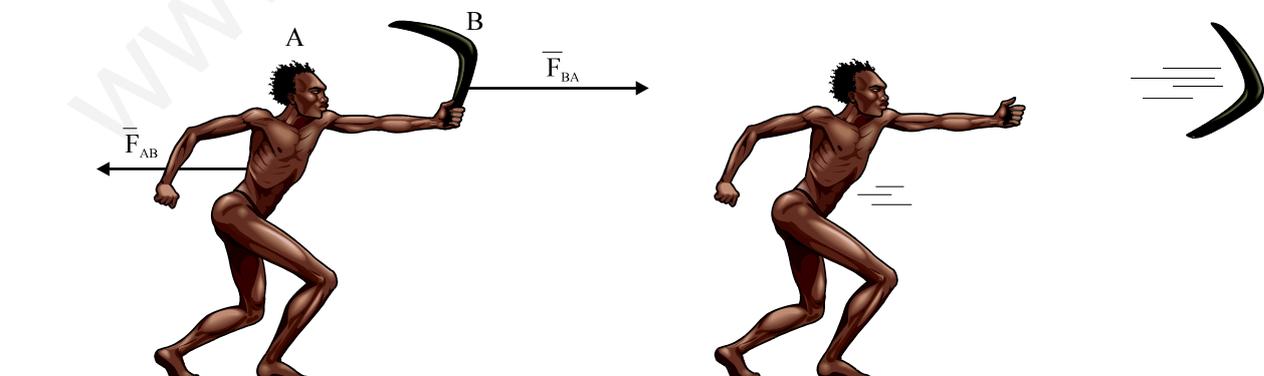
*A.11. Existen algunas situaciones en las que parece que un cuerpo es capaz de acelerarse él mismo, es decir, sin que otro cuerpo le haga ninguna fuerza. Hemos mencionado el caso de un corredor cuando sale en una carrera y de un coche que acelere. Sin embargo, ¿ocurriría lo mismo si no hubiese rozamiento con el suelo?*



Si no hubiera rozamiento sería imposible que el coche pudiera cambiar su velocidad porque no serviría de nada apretar el acelerador: las ruedas patinarían no se “agarrarían” al suelo, como desgraciadamente algunos conductores tienen ocasión de comprobar cuando en una carretera hay placas de hielo. Lo mismo le pasaría al corredor, que no podría tomar la salida porque por mucho que moviese las piernas siempre estaría en el mismo sitio. Podemos pensar, pues, que tanto el coche como el corredor, cuando aceleran están empujando el suelo hacia atrás y que ellos son empujados a su vez por el suelo hacia adelante, lo cual les permite acelerar. De hecho, siempre es necesaria la presencia de dos objetos para que cualquiera de ellos acelere, es decir, para que actúe una fuerza sobre un objeto siempre tiene que interactuar con otro y, cuando esto ocurre, se ejercen fuerzas entre ellos. Así, por ejemplo, cuando un jugador hace una fuerza sobre el balón al golpearlo el balón ejerce simultáneamente otra fuerza sobre el jugador en sentido contrario.

*A.12. Si es cierto que cuando alguien lanza un objeto ejerciéndole una fuerza, el objeto hace otra fuerza sobre el lanzador. ¿Por qué vemos acelerar al objeto y la persona que lo lanzó no acelera?*

Si el lanzador (A) sigue en el mismo sitio sin modificar su velocidad a consecuencia del lanzamiento del objeto (B), no es porque ese objeto no haya hecho una fuerza sobre él sino porque la fuerza **resultante** que actúa sobre la persona es nula. En efecto, no olvidemos que entre el lanzador y el suelo existe rozamiento que se opone al deslizamiento de este. Si no hubiera rozamiento, la fuerza que sobre el lanzador ejerce el objeto ( $\vec{F}_{AB}$ ) no podría anularse con otra y le veríamos retroceder deslizando sobre la superficie, aunque con una velocidad bastante menor que con la que salió el objeto tal y como se pone de manifiesto en la figura siguiente, en la que hemos supuesto que el rozamiento con el suelo es nulo:



Por otra parte, está claro que la masa del boomerang de la figura ( $m_B$ ) es mucho menor que la del lanzador ( $m_A$ ), pero también es evidente que la aceleración que sufre el boomerang al lanzarlo es

## 2. Dinámica

mucho mayor que la que experimenta la persona en sentido contrario. Como la fuerza resultante sobre cualquier cuerpo viene dada por  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$  cabe pensar que ambas fuerzas tengan sentidos contrarios y el mismo módulo ya que la menor aceleración que experimenta la persona podría compensarse con su mayor masa y viceversa, es decir:

$$m_B \cdot |\vec{a}_B| = m_A \cdot |\vec{a}_A|$$

De hecho, todas las experiencias mecánicas que se han realizado midiendo las fuerzas implicadas en la interacción de dos cuerpos confirman la hipótesis anterior. De manera que siempre que dos objetos A y B interactúan podemos escribir que:

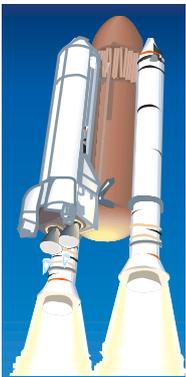
$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \text{ siendo } \vec{F}_{AB} \text{ la fuerza que sobre A ejerce B y } \vec{F}_{BA} \text{ la fuerza que sobre B ejerce A.}$$

Los razonamientos anteriores quedan plasmados en el tercer principio fundamental de la dinámica o principio de acción y reacción, que puede enunciarse como:

**3.** Mientras dura la interacción entre dos objetos, cada uno de ellos ejerce una fuerza sobre el otro. Ambas fuerzas son simultáneas, teniendo el mismo módulo y dirección, pero sentidos opuestos.

**A.13.** ¿Qué fuerza media ejercerá, según el tercer principio de la dinámica, una pelota de 150 g de masa que viaja a 180 km/h sobre una pared a la que golpea perpendicularmente y a consecuencia del choque invierte su velocidad? Suponed que el tiempo que dura la interacción es de 0'08 s.

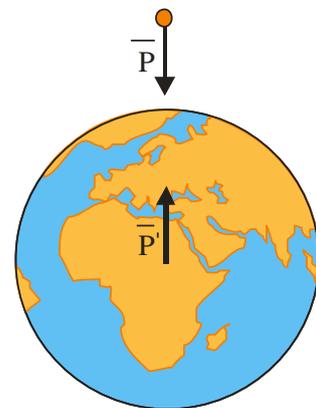
Rdo. 187'5 N



Un ejemplo claro en el que se percibe el principio de acción y reacción es en la propulsión de aviones a reacción o en el lanzamiento de cohetes y satélites. En todos estos casos, mediante unos motores se expulsan hacia atrás los gases resultantes de la combustión, con lo que el vehículo es acelerado en sentido opuesto.

**A.14.** Cuando vemos dos cuerpos en contacto es fácil admitir que se estén ejerciendo fuerzas pero cuando un cuerpo cae tiene aceleración y no vemos que interactúe con otro cuerpo. ¿Es que no se cumple el principio de acción y reacción en este caso?

Admitir que un cuerpo que cae (o que sube) puede acelerarse a sí mismo, supondría admitir que existe una barrera, una diferencia fundamental entre las causas de los movimientos de unos objetos y de otros. Newton superó esta situación formulando una hipótesis revolucionaria en su tiempo: que la Tierra ejerce una fuerza atractiva sobre cualquier cuerpo sin necesidad de contacto y que esta fuerza atractiva era lo que se denominaba como “peso” del cuerpo. Además generalizó a esta situación el principio de acción y reacción afirmando que, cualquier cuerpo atrae a la Tierra con una fuerza igual y de sentido opuesto al peso del cuerpo ( $\vec{P} = -\vec{P}'$ ).



En resumen: podemos concluir que:

- ✓ Ningún objeto puede acelerarse haciéndose una fuerza a sí mismo. Las fuerzas siempre se deben a interacciones entre varios cuerpos.
- ✓ Cuando dos cuerpos interactúan, actúan dos fuerzas. Dichas fuerzas se ejercen de forma simultánea, una sobre cada cuerpo, tienen el mismo módulo, sentidos contrarios, y sólo existen mientras dura la interacción.
- ✓ La Tierra interactúa gravitatoriamente con todos los cuerpos aunque no veamos un contacto directo entre ella y dichos cuerpos.

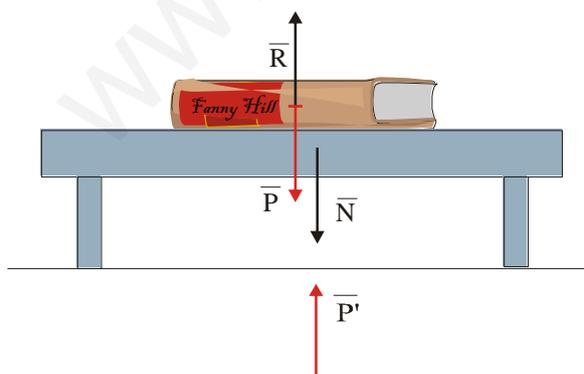
### 3. CAPACIDAD PREDICTIVA DE LOS PRINCIPIOS DE LA DINÁMICA

Para poder escribir las ecuaciones del movimiento de un objeto, es necesario hallar su aceleración y conocer, tal y como hemos visto en cinemática, al menos un valor de su velocidad y posición en un instante dado. Mediante el tercer principio y la ecuación fundamental de la dinámica  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , podemos identificar las interacciones en que participa un objeto y hallar la resultante de todas las fuerzas que se ejerzan sobre él y, por tanto, su aceleración. Análogamente, en ocasiones podemos conocer la masa de un objeto y su aceleración (y, por tanto, la fuerza resultante sobre él) y a partir de ahí hallar las distintas fuerzas que se estén ejerciendo sobre el objeto (cuya suma es la fuerza resultante). En todos los casos es imprescindible identificar las interacciones en las que participa el objeto y dibujar las fuerzas que se deben a dichas interacciones.

**A.15.** Dibujad las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo o parte del sistema en los casos siguientes, identificando los pares acción – reacción.

- a) Un libro en reposo sobre una mesa.
- b) Una persona que sobre una superficie horizontal empuja una carretilla.

En el caso del libro en reposo sobre la mesa, existen dos interacciones distintas a considerar: Una entre el libro y la mesa, en la que la mesa ejerce una fuerza vertical y hacia arriba  $\vec{R}$  sobre el libro y el libro otra igual y de sentido contrario  $\vec{N}$  sobre la mesa. La otra interacción es entre el libro y la Tierra en la que el libro es atraído por la Tierra con una fuerza  $\vec{P}$  y la Tierra por el libro con otra igual y de sentido contrario  $\vec{P}'$ . Una idea frecuente es pensar que la fuerza que hace un objeto sobre la superficie en la que se encuentra es el peso del cuerpo. No obstante si entendemos por peso la fuerza gravitatoria con que un cuerpo es atraído por la Tierra, está claro que se trata de fuerzas diferentes ya que los agentes “causantes” son distintos y los objetos sobre los que actúan también.



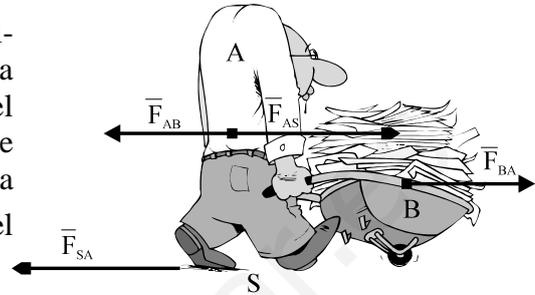
La fuerza  $\vec{N}$  actúa sobre la mesa en la misma línea de acción de  $\vec{P}$  y de  $\vec{R}$  aunque la hemos desplazado para no complicar la figura. Por otra parte la fuerza  $\vec{P}'$  estaría localizada en el centro de la Tierra.

Ciertamente, si un objeto como el libro no pesara no haría tampoco ninguna fuerza en la superficie sobre la que pudiera estar. Además en el caso (habitual) de que el objeto se encuentre en reposo

## 2. Dinámica

so o con movimiento rectilíneo y uniforme, ambas fuerzas toman el mismo valor, debido a que **en esa situación**, al ser  $\vec{F}_{res} = 0$  ha de cumplirse que  $\vec{P} + \vec{R} = 0$  es decir,  $\vec{P} = -\vec{R}$  y como, según el principio de acción y reacción  $\vec{N} = -\vec{R}$ , concluimos que  $\vec{N} = \vec{P}$ . Pero, una cosa es que dos fuerzas sean iguales y otra que se trate de una sola fuerza. Para comprender esto basta pensar qué sucedería si con el dedo presionásemos el libro hacia abajo. En ese caso el peso del libro (fuerza con que es atraído por la Tierra) seguiría siendo el mismo, pero la fuerza que ejercería el libro sobre la mesa (o la mesa sobre él) habría aumentado.

En el segundo ejemplo, las interacciones que se han considerado han sido únicamente (existen otras): entre la persona (A) y la carretilla (B) por un lado y entre la persona y el suelo (S) por otro, solo horizontalmente. Como puede verse en el esquema, la persona al andar empuja el suelo hacia atrás con una fuerza  $\vec{F}_{SA}$ , con lo que será empujada por el suelo hacia delante con otra fuerza  $\vec{F}_{AS}$  del mismo módulo.



Análogamente, la fuerza horizontal  $\vec{F}_{BA}$  con que la persona empuja a la carretilla es igual y de sentido contrario a la fuerza horizontal  $\vec{F}_{AB}$  que sobre la persona hace la carretilla. El hecho de que siendo ambas fuerzas iguales y de sentidos contrarios no se anulen, se debe a que se ejercen sobre cuerpos distintos.

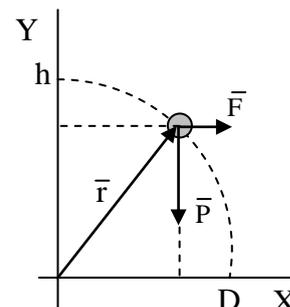
Vamos ahora a plantear situaciones en las que tengamos que hallar la aceleración conociendo las fuerzas que se ejercen sobre un objeto.

**A.16.** *Un cuerpo que pesa 20 N se deja caer desde una torre 45 m de altura. Al mismo tiempo sopla un viento lateral que ejerce sobre él una fuerza constante de 8 N. Determinad a qué distancia de la base de la torre llegará al suelo.*

Se trata de un problema en el que la trayectoria no se conoce de antemano, por lo que para resolverlo vamos a utilizar un tratamiento vectorial. Supondremos que las únicas fuerzas que actúan sobre el cuerpo son su peso y la que le hace el viento lateral (ignorando el efecto de frenado que le hará el aire durante la caída). Si no hubiese viento lateral el objeto caería verticalmente con movimiento uniformemente acelerado pero al ser empujado lateralmente se desplazará también según el sentido del viento por lo que caerá a una cierta distancia “D” de la base de la torre.

Cabe esperar que D aumente cuanto mayor sea la fuerza  $\vec{F}$  que hace el viento sobre el objeto y más alta sea la torre (h). Naturalmente, si no hiciese nada de viento o si h fuese 0, D valdría 0 y si no hubiese gravedad el objeto no pesaría y la distancia D sería infinita (nunca llegaría al suelo).

Para poder resolver el problema necesitamos operativizar lo que buscamos, es decir, expresar “la distancia D desde la base de la torre hasta el punto en que llega al suelo” de forma cuantitativa. Para ello, hemos de disponer de un sistema de referencia como el que se indica en la figura. En dicho sistema hallar D se traduce por “hallar el valor de  $r_x$  en el instante en que el objeto llegue al suelo, esto es, en el instante en que  $r_y$  valga 0”



Una vez operativizado aquello que buscamos, para hallarlo tendremos que obtener la ecuación de movimiento del objeto  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ , hallar en qué instante “t”,  $r_y$  se hace 0 (el objeto llega al suelo) y sustituir dicho valor de t en la expresión de  $r_x$  con lo que obtendremos D.

Para ello tendremos que hallar la expresión del vector aceleración  $\vec{a}$  y a partir de la misma y de las condiciones iniciales:  $\vec{v}_0 = 0$ ,  $\vec{r}_0 = (0, h)$  y  $t_0 = 0$ , obtener  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ .

Según la ecuación fundamental de la dinámica:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{res}}{m}$

En el sistema de coordenadas de la figura:  $\vec{F}_{res} = \vec{F} + \vec{P} = (F, 0) + (0, -P) = (F, -P)$ , de modo que  $\vec{a} = \left( \frac{F}{m}, \frac{-P}{m} \right)$

Trabajando ahora con las componentes según cada eje por separado:

$$a_x = F/m; \quad t_0 = 0; \quad v_{x0} = 0; \quad r_{x0} = 0$$

$$a_y = -P/m; \quad t_0 = 0; \quad v_{y0} = 0; \quad r_{y0} = h$$

Si nos fijamos en los datos de la componente X veremos que coinciden con los de un punto que se desplace con movimiento uniformemente acelerado a lo largo de OX, de modo que aplicando las ecuaciones ya conocidas para este movimiento obtenemos que:  $v_x = F \cdot t/m$ ; y  $r_x = F \cdot t^2/2m$

En cuanto a la componente Y, los datos coinciden con los de un punto que se moviera con movimiento uniformemente acelerado por el eje OY, con lo que:  $v_y = -P \cdot t/m$ ; y  $r_y = h - P \cdot t^2/2m$

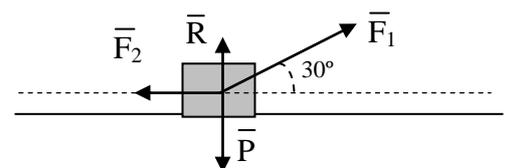
Según lo anterior, la ecuación del movimiento vendrá dada por:  $\vec{r} = \left( \frac{F}{2m} \cdot t^2, h - \frac{P}{2m} \cdot t^2 \right)$

La distancia D coincidirá, como ya hemos señalado, con el valor de  $r_x$  en el instante “t” en que el objeto llegue al suelo. Para averiguar dicho instante basta igualar  $r_y$  a 0 y despejar t, es decir:

$$h - P \cdot t^2/2m = 0 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2hm}{P}} \text{ y sustituyendo en } r_x \text{ obtenemos finalmente: } \boxed{D = \frac{F \cdot h}{P}} = 18 \text{ m.}$$

Si analizamos el resultado literal anterior, podemos comprobar que además de ser dimensionalmente homogéneo (una longitud en ambos lados), en él se contemplan todas nuestras hipótesis de partida en cuanto a la influencia del resto de las magnitudes en el valor de la distancia D.

**A.17.** Un bloque de 450 kg de masa se encuentra en reposo sobre un plano horizontal, cuando comienzan a actuar sobre él las fuerzas  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$  de módulos 7000 N y 4000 N respectivamente, tal y como se indica en la figura. Suponiendo el rozamiento despreciable, se pide:



- Distancia que habrá recorrido al cabo de 5 s de actuar dichas fuerzas.
- Valor de la fuerza normal que el bloque ejerce sobre el suelo.

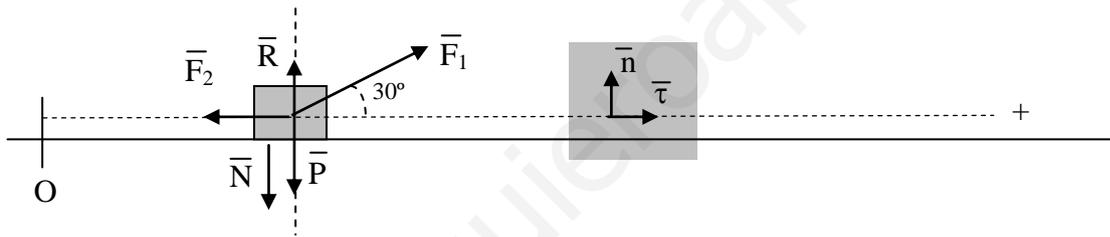
## 2. Dinámica

En este problema tenemos un cuerpo, que está inicialmente en reposo y se le somete a la acción de diversas fuerzas constantes, por lo que irá aumentando su velocidad en la dirección y sentido de la fuerza resultante, según una trayectoria rectilínea.

En aquellos casos en los que, como éste, la trayectoria sea conocida de antemano (**sea o no rectilínea**) es más cómodo trabajar utilizando las componentes intrínsecas de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Para ello conviene seguir los siguientes pasos:

- ✓ Realizar un esquema detallando la trayectoria y todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.
- ✓ Tomar un origen "O" en un punto cualquiera de la trayectoria y escoger (arbitrariamente) un sentido como positivo.
- ✓ Dibujar los vectores unitarios tangencial  $\vec{\tau}$  y normal  $\vec{n}$ . Recordemos que dichos vectores están centrados en el cuerpo (aunque los dibujemos desplazados por claridad visual) y que  $\vec{\tau}$  **siempre** ha de ser tangente a la trayectoria y en sentido positivo, mientras que  $\vec{n}$  **siempre** ha de ser perpendicular a la trayectoria y sentido hacia el centro de la curva (si es recta da igual el sentido en que se dibuje).
- ✓ Descomponer la ecuación fundamental de la dinámica  $\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a}$  en dos ecuaciones escalares según las componentes intrínsecas, es decir:  $F_{res\ t} = m \cdot a_t$  y  $F_{res\ n} = m \cdot a_n$  y trabajar después con dichas ecuaciones.

En el problema que nos ocupa un posible esquema podría ser el siguiente:



Dado que todas las fuerzas que actúan a lo largo de la trayectoria son constantes, el tipo de movimiento del cuerpo será uniformemente acelerado (si la componente tangencial de la fuerza resultante es constante, la aceleración tangencial también lo será). Por tanto, para calcular el desplazamiento que nos piden, bastará hallar primero la aceleración tangencial y a continuación aplicar las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado. En cuanto a la aceleración normal, al tratarse de una trayectoria rectilínea, vale 0.

$$F_{res\ t} = m \cdot a_t \rightarrow F_{1t} + F_{2t} + R_t + P_t = F_1 \cdot \cos \alpha - F_2 = m \cdot a_t \quad (1)$$

$$F_{res\ n} = m \cdot a_n \rightarrow F_{1n} + F_{2n} + R_n + P_n = F_1 \cdot \sin \alpha + R - P = 0 \quad (2)$$

a) Despejando  $a_t$  de la primera ecuación obtenemos que:  $a_t = \frac{F_1 \cdot \cos \alpha - F_2}{m} = 4,6 \text{ m/s}^2$

Sustituyendo en  $\Delta e = \frac{1}{2} a_t \cdot t^2$  obtenemos finalmente  $\Delta e = 57,5 \text{ m}$

b) En cuanto al valor de la fuerza normal  $\vec{N}$  que ejercerá el bloque sobre el suelo, según el principio de acción y reacción, el módulo de dicha fuerza deberá coincidir con el de la fuerza normal  $\vec{R}$  que el suelo hace sobre él, por tanto, de (2):

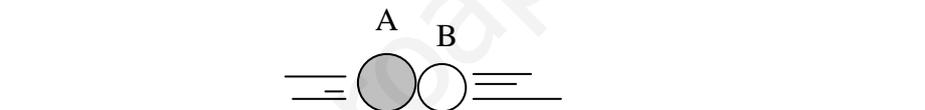
$$R = P - F_1 \cdot \sin \alpha \text{ y sustituyendo: } R = 450 \cdot 9,8 - 7000 \cdot 0,5 = 910 \text{ N} \rightarrow \mathbf{N = 910 \text{ N}}$$

En las situaciones que hemos considerado hasta aquí, hemos supuesto que resulta fácil conocer los valores de las fuerzas o de la aceleración. En realidad así sucede en muchos casos. Por ejemplo, cuando la interacción en la que participa un objeto es larga (podemos medir el tiempo) y de intensidad constante (fuerza constante, podemos medir la aceleración). Sin embargo existen también muchas situaciones en las que esto no ocurre. Pensemos en interacciones que duran muy poco tiempo y en las que no es posible conocer la fuerza en cada instante: choques de vehículos, explosiones, lanzamientos, etc. *¿Cómo proceder en estos casos?* En el apartado siguiente abordaremos esta cuestión introduciendo para ello el concepto de “cantidad de movimiento”.

#### 4. INTERACCIONES SIN ACCESO DIRECTO A LO QUE OCURRE DURANTE LAS MISMAS. PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Como ya hemos señalado, existen situaciones en las que no tenemos un acceso directo a lo que ocurre al objeto **durante** la interacción, pero sabemos que, debido a la interacción, su movimiento no es el mismo **antes** que **después** de la misma. Tiene interés, pues, que intentemos relacionar lo que le ocurre al objeto durante la interacción con el cambio producido en su movimiento a causa de ella.

Así pues, vamos a expresar primero lo que ocurre en la interacción con propiedades del objeto que cambien su valor (y que puedan ser accesibles). Para ello imaginaremos el choque entre dos bolas (tal y como puede ocurrir, por ejemplo, en una mesa de billar) y analizaremos lo que sabemos que le ocurrirá a cada una de ellas:



Mientras dura la interacción, sobre la bola A se ejercerá una fuerza  $\vec{F}_{AB}$  que le producirá una aceleración  $\vec{a}_A$  de modo que:  $\vec{F}_{AB} = m_A \cdot \vec{a}_A$ . Podemos expresar esto poniendo en un miembro magnitudes relacionadas con el proceso de interacción y en el otro magnitudes medibles antes y después de la interacción:

$$\vec{F}_{AB} = m_A \cdot \frac{\Delta \vec{v}_A}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = m_A \cdot \Delta \vec{v}_A \rightarrow \vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = m_A \cdot (\vec{v}'_A - \vec{v}_A) \rightarrow \vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = m_A \cdot \vec{v}'_A - m_A \cdot \vec{v}_A$$

en donde  $\vec{v}_A$  representa la velocidad de la bola “A” inmediatamente antes de la colisión y  $\vec{v}'_A$  la velocidad de esa misma bola inmediatamente después de la colisión.

Conviene que, antes de proseguir, reflexionemos un poco sobre el significado de la última expresión: Relaciona “algo” que se le hace a un objeto (bola A) en una determinada dirección y sentido durante una breve interacción, con “algo” del objeto que cambia (en la misma dirección y sentido). A esa propiedad del objeto  $m \cdot \vec{v}$  se la denomina **cantidad de movimiento** y se la simboliza por  $\vec{p}$  con lo que podemos escribir que para el objeto A:

$$\vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = \vec{p}'_A - \vec{p}_A \rightarrow \vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}_A$$

donde  $\vec{p}'_A$  es la cantidad de movimiento de A inmediatamente después de la interacción y  $\vec{p}_A$  la cantidad de movimiento de A inmediatamente antes de la interacción.

## 2. Dinámica

Por otra parte, el segundo cuerpo (la bola B del ejemplo) también ha sufrido la misma interacción durante el mismo tiempo, por tanto:  $\vec{F}_{BA} = m_B \cdot a_B$  y del mismo modo que antes llegamos a:

$$\vec{F}_{BA} \cdot \Delta t = \vec{p}'_B - \vec{p}_B \rightarrow \vec{F}_{BA} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}_B$$

Podemos ahora relacionar los cambios producidos en los objetos que participan en la misma interacción sin necesidad de conocer detalles sobre lo que ocurre durante la misma:

$$\vec{F}_{AB} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}_A$$

$$\vec{F}_{BA} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}_B$$

Como, de acuerdo con el principio de acción y reacción:  $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ , ocurre que:

$$\Delta \vec{p}_A = -\Delta \vec{p}_B \quad (1)$$

La ecuación (1) nos dice que cuando dos cuerpos interactúan se modifican sus cantidades de movimiento, de manera que el cambio que se produce en uno de ellos es de igual valor y dirección pero de sentido opuesto al cambio que se produce en el otro. Esto significa que si tenemos en cuenta los dos cuerpos que interactúan, se cumplirá que:

$$\Delta \vec{p}_A + \Delta \vec{p}_B = 0 \rightarrow \vec{p}'_A - \vec{p}_A + \vec{p}'_B - \vec{p}_B = 0 \text{ y finalmente: } \boxed{\vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{p}'_A + \vec{p}'_B}$$

Aunque estas ideas las hemos desarrollado para dos objetos que interactúan, como en cualquier interacción se cumple la ecuación (1), aunque elijamos un sistema formado por miles o millones de partículas u objetos podremos afirmar lo mismo:

En un sistema aislado dinámicamente (sobre el cual no se ejercen fuerzas exteriores), aunque es posible que la cantidad de movimiento de alguno de los cuerpos o partes que lo forman cambie debido a su interacción con otras partes del mismo sistema, la cantidad de movimiento total ha de permanecer invariable.

El enunciado anterior constituye el llamado **principio de conservación de la cantidad de movimiento** de un sistema<sup>1</sup> que nos permite, por ejemplo, conocer el movimiento de un cuerpo que interactúa con otro, aunque no tengamos un conocimiento detallado de cómo es la interacción. En general, mediante dicho principio podemos relacionar las cantidades de movimiento de todos los cuerpos antes de la interacción con las cantidades de movimiento de todos esos cuerpos después de la interacción.

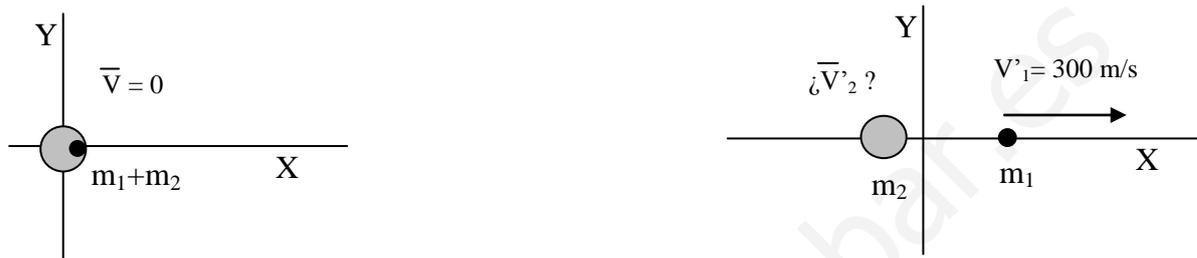
Se trata de uno de los principios más importantes y útiles de la física debido fundamentalmente a su carácter universal ya que no se conoce ninguna excepción al mismo. De hecho, cuando en ocasiones los físicos, al trabajar con partículas subatómicas, han encontrado alguna situación en la que aparentemente este principio parecía no cumplirse, lo que han hecho, antes que rechazarlo, ha

<sup>1</sup> No confundir sistema físico con sistema de referencia. El primero está formado por el cuerpo o conjunto de cuerpos que se considera, mientras que el segundo es el sistema respecto al cual estudiamos el movimiento de un objeto (por ejemplo el sistema de coordenadas cartesianas).

sido tratar de identificar otra partícula no descubierta hasta ese momento cuya participación pudiera ser la causante del problema. De esta forma se han identificado varias partículas como, por ejemplo, sucedió con el neutrón.

**A.18.** Una bala de 200 g sale de la boca de un arma con una rapidez de 300 m/s. Calculad la velocidad con que ésta retrocede (masa del arma descargada 4'8 kg).

Durante el disparo se produce una interacción entre el proyectil de masa  $m_1$  y el arma (de masa  $m_2$ ). Es necesario operativizar lo que buscamos para lo cual habrá que tomar un sistema de referencia adecuado y representar en él los dos objetos antes del disparo y después del disparo.



Lo que queremos es calcular  $\vec{v}'_2$  o velocidad del arma descargada inmediatamente después del disparo, es decir, cuando la velocidad del proyectil es  $\vec{v}'_1$ . Si consideramos el conjunto como un sistema físico de dos partículas (una de las cuales es el proyectil), estas fuerzas serán interiores<sup>2</sup> y, en consecuencia, la cantidad de movimiento total del sistema no se verá afectada por su actuación y será la misma antes del disparo que justo después del mismo, es decir:  $\vec{p} = \vec{p}'$

Podemos pensar que la velocidad con que retrocederá el arma será tanto mayor cuanto más grande sea la velocidad con que sale la bala, mayor sea la masa de la bala y menor la masa del arma.

Cantidad de movimiento del sistema inmediatamente antes del disparo:  $\vec{p} = 0$

Cantidad de movimiento del sistema justo después del disparo:  $\vec{p}' = m_1 \cdot \vec{v}'_1 + m_2 \cdot \vec{v}'_2$

Para obtener  $\vec{v}'_2$ , dado que la cantidad de movimiento total del sistema formado por el arma y la bala se conserva durante el disparo, bastará igualar las expresiones anteriores:

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}'_2 \rightarrow 0 = m_1 \cdot \vec{v}'_1 + m_2 \cdot \vec{v}'_2 \text{ con lo que: } \vec{v}'_2 = \frac{-m_1 \cdot \vec{v}'_1}{m_2}$$

Sustituyendo ahora los valores numéricos nos queda:  $\vec{v}'_2 = \frac{-0'2 \cdot (300, 0)}{4'8} = (-12'5, 0) \text{ m/s}$

El resultado literal obtenido es dimensionalmente homogéneo (L/T en ambos lados de la igualdad). Además podemos comprobar también que contempla algunos casos particulares, como, por ejemplo, que si la masa del proyectil (o la velocidad con que sale) fuese nula, el arma no retroce-

<sup>2</sup> Una fuerza que actúa sobre un cuerpo o parte de un sistema físico se dice que es interior cuando su reacción se ejerce sobre otro cuerpo que también forma parte de dicho sistema.

## 2. Dinámica

dería, que cuanto mayor sea la velocidad con que sale el proyectil, más aumentará la velocidad del arma después del disparo y que cuanto mayor sea la masa del arma (sin el proyectil) menor será su velocidad de retroceso (todo ello a igualdad de los restantes factores).

Por otra parte, hemos de señalar que al tener lugar todo el movimiento en una sola dirección, podríamos simplificar la resolución si manejásemos, ya de entrada, únicamente las componentes escalares de los vectores según el eje considerado, es decir:

$$p_x = p'_x \rightarrow 0 = m_1 \cdot v'_{1x} + m_2 \cdot v'_{2x} \rightarrow 0 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_{2x} \rightarrow v'_{2x} = \frac{-m_1 \cdot v'_1}{m_2} = -12,5 \text{ m/s}$$

**A.19.** *Cuando una granada estalla en el aire se comprueba que la cantidad de movimiento de la misma inmediatamente antes de la explosión e inmediatamente después es prácticamente la misma. Sin embargo, sobre el sistema formado por la granada están actuando constantemente fuerzas exteriores como el peso y el rozamiento con el aire. ¿Cómo es posible que se conserve la cantidad de movimiento total? ¿Se trata de una excepción?*

El principio de conservación de la cantidad de movimiento de un sistema, exige que sobre dicho sistema no actúe ninguna fuerza exterior (o que la suma de todas las que actúen sea 0). En esas condiciones sabemos que, si actúan fuerzas interiores, cambia la cantidad de movimiento de algunas de las partes del sistema, pero que ello se hará de forma que la cantidad de movimiento total del sistema se mantenga siempre constante. En este caso, sí que actúa una fuerza exterior al sistema: la fuerza gravitatoria (peso) con que, tanto la granada, como cada uno de los trozos en que se parte, son atraídos por la Tierra. Esta fuerza es la responsable de que la cantidad de movimiento de la granada no se conserve sino que vaya aumentando conforme va cayendo hacia el suelo.

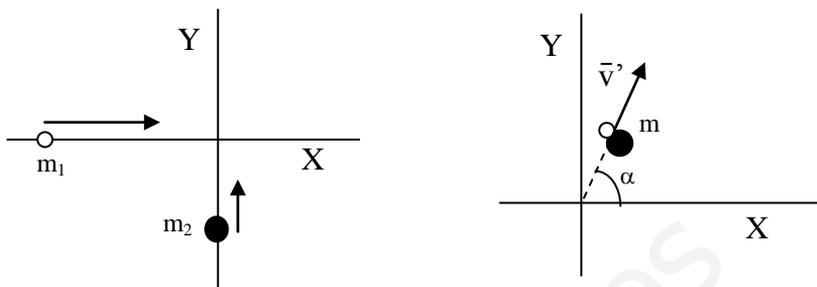
No obstante, si consideramos únicamente el intervalo de tiempo que dura la explosión, podemos ignorar el efecto de la fuerza peso en el sistema ya que ésta es muchísimo menor que las fuerzas interiores (de la explosión) y durante un tiempo tan sumamente corto apenas puede influir en la cantidad de movimiento de cada uno de los fragmentos. Por el contrario las fuerzas interiores, aunque actúen muy poco tiempo sí que cambian sensiblemente la velocidad de cada trozo, ya que son muchísimo más intensas que el peso, pero como se trata de fuerzas internas no influyen en la cantidad de movimiento del sistema. En definitiva pues, podemos considerar que **durante el brevísimo tiempo que dura la explosión**, la cantidad de movimiento del sistema se conserva y por tanto será prácticamente la misma en el inicio que en el instante final de dicha explosión.

**A.20.** *Una carcasa de 450 g de masa se lanza verticalmente hacia arriba y cuando alcanza su altura máxima, estalla rompiéndose en tres trozos. Uno de ellos, de 150 g, sale despedido hacia el este a 40 m/s y otro, de 120 g, sale hacia el norte a 50 m/s. Calculad con qué velocidad (módulo) y en qué dirección salió despedido el trozo restante. Rdo.  $|\vec{v}| = 47,14 \text{ m/s}$  en dirección sur-oeste.*

Como ya hemos comentado antes una de las cosas que hace especialmente útil al principio de conservación de la cantidad de movimiento es su universalidad, es decir, el hecho de que pueda aplicarse al estudio de las transformaciones materiales más diversas.

**A.21.** *Un átomo de hidrógeno moviéndose a 384 m/s choca contra un átomo de yodo que se mueve a 12,8 m/s perpendicularmente respecto al primero. A causa del choque ambos quedan unidos formando una molécula que se mueve en una dirección que forma un ángulo de 76,7° con la dirección inicial del átomo de hidrógeno. Con estos datos, calculad cuántas veces es mayor la masa del átomo de yodo que la del de hidrógeno.*

Se trata de una colisión entre dos partículas que podemos considerar como masas puntuales. De acuerdo con lo que sabemos, la cantidad de movimiento del sistema formado por ambas en el momento del choque será la misma que justo después del mismo. Para resolver el problema escogeremos un sistema de coordenadas adecuado en el que representaremos el choque, aplicaremos el principio de conservación y, a partir de la ecuación resultante, trataremos de obtener la relación entre las masas que se nos pide.



En la figura anterior hemos representado el sistema antes del choque y justo después del mismo, designando por  $m_1$  la masa del hidrógeno,  $m_2$  la masa del átomo de yodo y  $m$  la masa de la molécula resultante. Aplicando el principio de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\vec{p} = \vec{p}' \rightarrow m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m \cdot \vec{v}' \rightarrow m_1 (v_1, 0) + m_2 (0, v_2) = m (v' \cos \alpha, v' \sin \alpha)$$

En la ecuación anterior,  $v_1$ ,  $v_2$  y  $v'$  representan módulos de velocidades. Podemos descomponerla en dos ecuaciones escalares (equivalente a aplicar la conservación de la cantidad de movimiento según cada uno de los ejes):

En el eje X: (1)  $m_1 v_1 = m \cdot v' \cos \alpha$

En el eje Y: (2)  $m_2 v_2 = m \cdot v' \sin \alpha$

Dividiendo ahora la ecuación (2) por la (1), obtenemos:  $\frac{m_2 \cdot v_2}{m_1 \cdot v_1} = \operatorname{tg} \alpha$  y de aquí obtenemos:

$$m_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot m_1 \text{ y sustituyendo los valores numéricos resulta: } m_2 = 126'9 \cdot m_1$$

De acuerdo con el resultado la masa del átomo de yodo es 126'9 veces la del de hidrógeno.

El principio de conservación de la cantidad de movimiento puede ser también utilizado para explicar muchas otras situaciones de interés. Entre ellas podemos referirnos, por ejemplo, al método por el cual un nadador inicialmente en reposo flotando en el agua puede avanzar. En efecto: éste empuja el agua hacia atrás con los movimientos de pies y manos con lo que trillones de moléculas de agua adquieren cantidad de movimiento hacia atrás. Consecuentemente, para que la cantidad de movimiento del sistema formado por el agua y el nadador se conserve, éste último ha de moverse en sentido contrario a las moléculas de agua.

## 5. FIN DE UNA BARRERA HISTÓRICA: TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

En la época de Newton (finales del siglo XVII) la Teoría Heliocéntrica de Copérnico (la Tierra y el resto de los planetas son los que giran en torno al Sol) se enseñaba ya en algunas universidades, Galileo con su telescopio había descubierto montañas y valles en la Luna y también que el

## 2. Dinámica

planeta Júpiter tenía lunas orbitando a su alrededor (vosotros mismos podéis ver algunas de ellas si enfocáis a Júpiter con unos prismáticos de mediano aumento). Todo ello ya había hecho tambalearse el antiguo sistema Aristotélico, pero fue sin duda la Teoría de Newton de la **Gravitación Universal** la que supuso una síntesis entre dos mundos hasta entonces distintos.

Newton, Halley, Hooke y otros abordaron el problema de los movimientos de los cuerpos celestes partiendo de los principios de la dinámica que acabamos de estudiar. Con la nueva concepción de fuerza, el problema quedaba formulado en términos muy distintos de los aristotélicos. Efectivamente, según la idea cualitativa de fuerza, expresada en el primer principio de la dinámica, «si sobre un cuerpo no actúa fuerza alguna se encontrará en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme», esto equivale a afirmar que **cualquier cuerpo** que no tenga un movimiento rectilíneo y uniforme estará sometido a una fuerza resultante. Así, pues: si La Luna describe, aproximadamente, un movimiento circular uniforme alrededor de La Tierra, es lógico, según Newton, plantearse: **¿qué fuerza debe estar actuando sobre ella para que describa dicha trayectoria?**

*A.22. Indica la dirección y sentido de la fuerza que debe actuar sobre La Luna para que describa órbitas circulares con velocidad constante alrededor de La Tierra. Ídem para un cuerpo que se deja caer desde una cierta altura sobre el suelo.*

Para que la Luna describa un movimiento circular y uniforme alrededor de la Tierra ha de existir una fuerza resultante sobre ella que obligue a la velocidad que lleva a cambiar continuamente de dirección sin que varíe su módulo. Para ello, dicha fuerza resultante debe ser perpendicular en todo momento a la velocidad y dirigida hacia el centro de la circunferencia descrita (fuerza centrípeta). Análogamente ocurre con un objeto que se deja caer desde una cierta altura. Siempre que el rozamiento con el aire se pueda considerar despreciable, dicho objeto cae cada vez más deprisa. Su velocidad cambia continuamente de forma lineal de modo que su módulo va aumentando uniformemente permaneciendo constante su dirección y sentido, por lo que debe haber una fuerza hacia abajo responsable de tal cambio en la velocidad, que llamamos fuerza peso.

*A.23. ¿Cuál es la naturaleza de las fuerzas anteriores? ¿A qué se debe cada una?*

Como acabamos de ver, los cuerpos no pueden acelerarse a sí mismos, deben interactuar con otro para que ejerza una fuerza sobre ellos. ¿Con quién interactúa la Luna o un cuerpo que cae libremente? La respuesta que dio Newton a esta cuestión (parte de la cual ya habíamos avanzado) fue que existe una interacción entre todos los cuerpos del Universo:

**Todos** los cuerpos del universo se atraen unos a otros con una fuerza gravitatoria como la que existe entre una piedra que cae y la Tierra. Por tanto, la fuerza centrípeta que actúa sobre la Luna no es otra cosa que la atracción gravitatoria por parte de la Tierra. Análogamente, las fuerzas centrípetas que actúan sobre los planetas se deben a una atracción gravitatoria por parte del Sol.

A esta propiedad de la materia que hace que los cuerpos se atraigan se le denomina “gravitación”. Para cuantificar esta propiedad en los distintos cuerpos se ha establecido una magnitud denominada **masa gravitatoria**. En cursos superiores se justificará por qué el valor numérico de dicha masa coincide con el de la masa inerte, de modo que en la práctica se habla simplemente de “masa”, aunque en realidad se trata de magnitudes diferentes que miden propiedades distintas (la gravitación y la inercia).

*A.24. Enuncia hipótesis acerca de qué factores dependerá la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos.*

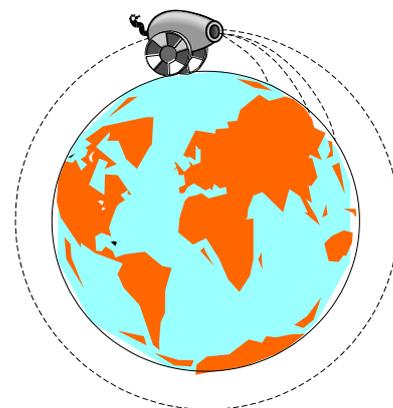
Parece lógico pensar que cuanto mayores sean las masas y menor la distancia que las separa, más grande deberá de ser la fuerza de atracción gravitatoria existente entre ambas. Newton obtuvo que el módulo de dicha fuerza viene dado por la expresión:

$$|\vec{F}| = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

En la ecuación anterior  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$  y recibe el nombre de constante de gravitación universal (su valor es siempre el mismo independientemente del medio en el que se hallen los dos cuerpos de masas  $m_1$  y  $m_2$ ) y  $r$  es la distancia que separa a los dos cuerpos (considerados como masas puntuales). Dado el pequeño valor de  $G$ , se comprende que la fuerza gravitatoria con que se atraen dos cuerpos sea en muchos casos imperceptible a no ser que, al menos uno de ellos, tenga una gran masa (como ocurre, por ejemplo, con una piedra y la propia Tierra).

La enorme importancia de la ley de Newton de la Gravitación Universal, radica en que dicha ley establece la misma naturaleza o tipo de fuerza tanto en la Tierra (peso de un objeto) como en el Cielo (atracción entre la Luna y la Tierra o entre el Sol y los planetas), poniendo fin así a una barrera histórica que durante cientos de años había separado el mundo terrestre del celeste. De acuerdo con la ley de Newton de la gravitación, la fuerza que actúa sobre un objeto que se deja caer desde un avión (sin considerar el rozamiento con el aire) es de la misma naturaleza que la que mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra y a los planetas girando alrededor del Sol. El propio Newton, explicaba así el hecho de que un planeta pudiera mantenerse en su órbita:

«El que un planeta pueda ser retenido en su órbita es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada, a causa del peso se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea... viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a este camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Y cuanto mayor sea la velocidad con la que se proyecta, más lejos va antes de caer a tierra. Podemos suponer por tanto que la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de (muchas) millas antes de llegar al suelo, hasta que finalmente, excediendo de los límites de la Tierra, pasará totalmente sin tocarla».



Esta analogía entre el movimiento de un proyectil y el de un cuerpo celeste como la Luna, representa el paso que hasta entonces nadie, ni siquiera el propio Galileo, había dado: no hay ninguna diferencia esencial entre el movimiento de ambos. La diferencia viene determinada únicamente por la velocidad horizontal de cada uno y por el rozamiento del proyectil con el aire.

## 6. INTRODUCCIÓN AL CAMPO GRAVITATORIO TERRESTRE

**A.25.** *¿Cómo se explica la interacción gravitatoria entre dos cuerpos que se encuentran separados, sin tocarse?, es decir: ¿Cómo se “comunican” ambos cuerpos?*

A lo largo de la historia se han elaborado distintas explicaciones a este problema. Unas veces se imaginaba la existencia de una sustancia especial (llamada éter) que debía llenar todo el espacio de

## 2. Dinámica

forma similar a como la atmósfera rodea a la Tierra y que, de algún modo, transmitía las fuerzas entre los cuerpos que se hallaban separados entre sí pero inmersos en ese medio etéreo. También se manejó la idea de “acción a distancia” lo que equivalía a admitir la existencia de dos tipos de fuerzas: las que se ejercen por contacto directo entre dos cuerpos y las que se ejercen a distancia, sin necesidad de ningún medio material intermedio entre los cuerpos.

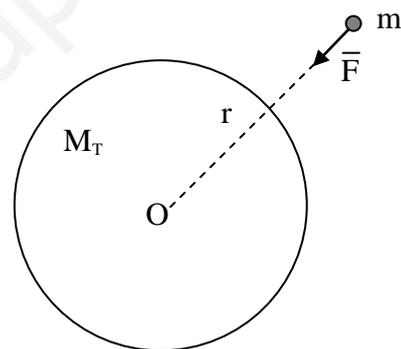
En la actualidad el problema de cuál es el mecanismo de la interacción gravitatoria forma parte de la Teoría de Campos (que engloba también a otras interacciones, como las fuerzas entre cuerpos cargados eléctricamente). De acuerdo con dicha teoría, el espacio que rodea a un cuerpo como, por ejemplo, un planeta, o un objeto cargado eléctricamente, no se concibe como un simple receptáculo vacío sino como algo material que actúa como sede de la interacción. Se habla así de campo gravitatorio o de campo eléctrico. En una primera aproximación a la idea de campo gravitatorio, se puede describir éste diciendo que la presencia de una masa genera una perturbación a su alrededor tanto más intensa cuanto más próximos nos encontramos de dicha masa, de forma que cualquier pequeña masa que se coloque en esa zona se verá afectada por dicha perturbación, es decir, se verá sometida a una fuerza.

Para facilitar el estudio del campo gravitatorio se introduce una magnitud llamada **intensidad del campo gravitatorio**  $\vec{g}$  en un punto, cuyo valor nos indica la fuerza que actuaría sobre una masa de 1 kg si la colocásemos en dicho punto. De acuerdo con ello, si en un punto cualquiera de un campo gravitatorio disponemos una masa “m”, ésta se verá sometida a una fuerza dada por:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

En el caso del campo gravitatorio terrestre, al situar un objeto de masa m a una cierta distancia r del centro del planeta (de masa  $M_T$ ), se verá sometido a una fuerza  $\vec{F}$  dirigida hacia el centro de la Tierra, por lo que podremos expresar la intensidad del campo gravitatorio terrestre como:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$



es decir, un vector de la misma dirección y sentido que  $\vec{F}$  (hacia el centro de la Tierra).

El módulo de la intensidad del campo gravitatorio será:  $g = \frac{F}{m}$  y como, según la ley de Newton de

la gravitación universal  $F = G \frac{M_T \cdot m}{r^2}$ , sustituyendo obtenemos que:  $g = \frac{G \cdot M_T}{r^2}$

La unidad de medida de la intensidad del campo será N/kg y, como podemos ver fácilmente, irá disminuyendo a medida que aumente la distancia r (nos alejemos del centro de la Tierra). El mayor valor posible se da en la superficie de la Tierra, donde se representa como  $g_0$  y viene dada por:

$$g_0 = \frac{G \cdot M_T}{R_T^2}$$

**A.26.** ¿Qué relación existirá entre la intensidad del campo gravitatorio terrestre  $g$  a una altura  $h$  sobre la superficie de la Tierra y la intensidad de dicho campo en la propia superficie terrestre?

Dado que  $r = R_T + h$  podemos expresar la intensidad a una altura  $h$  como:  $g = \frac{G \cdot M_T}{(R_T + h)^2}$

Por otra parte,  $G \cdot M_T = g_0 \cdot R_T^2$  de modo que sustituyendo:  $g = g_0 \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2}$

La expresión anterior nos muestra que para valores de la altura  $h$  mucho más pequeños que el valor medio del radio terrestre (unos 6400 km), podemos considerar que  $g$  vale prácticamente lo mismo que  $g_0 = 9.8 \text{ N/kg}$ .

**A.27.** Cuando se abandona un cuerpo como, por ejemplo, una piedra, a una cierta altura sobre el suelo, comprobamos que cae y cuando nos preguntan la razón, a menudo decimos que se debe al peso, pero... ¿qué es el peso?, ¿de qué depende?, ¿cómo se mide?

Al dejar un cuerpo a una cierta altura sobre el suelo, se halla dentro del campo gravitatorio terrestre por lo que, si despreciamos el rozamiento, la única fuerza que actuará sobre él (en el sistema formado por el cuerpo y la Tierra) será la gravitatoria terrestre, que le provocará una aceleración dirigida hacia el centro de la Tierra. A esa fuerza la llamaremos peso  $\vec{P}$  del cuerpo, y su módulo será:

$$P = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{(R_T + h)^2} \rightarrow P = m \cdot g \quad \text{donde } g \text{ es la intensidad del campo gravitatorio a esa altura } h.$$

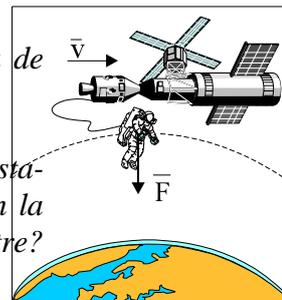
Para evitar la incomodidad que supone utilizar los valores de  $G$  y  $M_T$  se suele modificar esta ecuación sustituyendo la intensidad  $g$  por la expresión que la relaciona con  $g_0$ , con lo que obtenemos finalmente:

$$P = m g_0 \cdot \left( \frac{R_T}{R_T + h} \right)^2$$

De acuerdo con la expresión anterior, a medida que nos alejemos del centro de la Tierra, el peso de cualquier cuerpo o fuerza gravitatoria con que es atraído por el planeta disminuirá (tendiendo a 0 cuando la distancia tienda a infinito). Dicha expresión también nos muestra que siempre que nos encontremos a alturas mucho más pequeñas que el valor medio del radio de la Tierra el peso  $P$  de un cuerpo será prácticamente igual que lo que pesa en el suelo ( $P_0 = m \cdot g_0$ ).

**A.28.** Una estación espacial se encuentra a una altura aproximada de 400 km sobre el suelo, girando en torno a la Tierra con MCU. Se pide:

- Peso de un astronauta de 90 kg situado dentro de dicha estación.
- ¿A qué distancia de la superficie de la Tierra debería situarse una estación orbital para que un astronauta fuese atraído por la Tierra con la mitad de fuerza con que es atraído cuando está sobre el suelo terrestre? ( $R_T = 6400 \text{ km}$ ;  $g_0 = 9.8 \text{ N/kg}$ )



Rdo: a) 781.3 N (lo que pesaría en la superficie de la Tierra una persona de unos 80 kg de masa). b)  $h = 2651 \text{ km}$ .

## 2. Dinámica

La actividad anterior permite darse cuenta que un astronauta en órbita **sí** pesa, puesto que es atraído por la Tierra. Si de repente desapareciese la fuerza gravitatoria tanto el astronauta como la estación espacial seguirían con movimiento rectilíneo y uniforme con la misma velocidad que llevasen en ese momento. La atracción gravitatoria terrestre se lo impide haciendo que la velocidad cambie continuamente de dirección. El astronauta flota dentro de la estación y siente sensación de ingravidez porque ambos están sometidos a la misma aceleración. Es como si al estar bajando en un ascensor, se rompiera el cable. En ese caso también flotaríamos dentro de la cabina del ascensor (caeríamos con la misma aceleración que el ascensor) y no haríamos ninguna fuerza sobre el suelo de la cabina, pero no por ello, dejaríamos de pesar.

**A.29.** En ocasiones a “g” se le denomina como *aceleración gravitatoria*, es decir, se identifican dos magnitudes distintas (*intensidad de campo y aceleración*). ¿A qué se debe?

Cuando un cuerpo se sitúa a una cierta altura, suceden dos cosas:

a) Está sometido a la acción de una fuerza, la fuerza peso. Si esa es la única que actúa, le producirá, de acuerdo con la ecuación fundamental de la dinámica, una aceleración hacia el centro de la Tierra, cuyo módulo vendrá dado por:  $a = P/m_i$  (siendo  $m_i$  la masa inerte del cuerpo en cuestión). A dicha aceleración se le denomina *aceleración gravitatoria terrestre*.

b) El peso se debe a que el cuerpo está sometido a la acción de un campo gravitatorio. El módulo de la intensidad de dicho campo en el punto donde se halla el cuerpo, tendrá un cierto valor “g” de modo que  $g = P/m_g$  (siendo  $m_g$  la masa gravitatoria del cuerpo).

De acuerdo con las consideraciones anteriores podemos escribir que: 
$$a = \frac{P}{m_i} = \frac{m_g \cdot g}{m_i}$$

Como ya hemos comentado, ocurre que los valores numéricos de la masa inerte y la masa gravitatoria coinciden (aunque cada magnitud responde a una propiedad distinta), de modo que también (numéricamente) coincidirán la aceleración gravitatoria y la intensidad del campo gravitatorio, aunque se trate de magnitudes distintas. De acuerdo con ello la aceleración gravitatoria en las proximidades del suelo valdrá  $9,8 \text{ m/s}^2$ , coincidiendo numéricamente con la intensidad del campo gravitatorio terrestre en los mismos puntos ( $9,8 \text{ N/kg}$ ). Esto hace que habitualmente se utilice el mismo símbolo “g” para ambas magnitudes.

Hasta aquí, hemos hecho la aproximación de suponer que la Tierra describe una órbita circular en torno al Sol y que lo mismo hace la Luna en su giro alrededor de la Tierra. Sin embargo, esto no es más que una aproximación, ya que en realidad todos los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol, el cual ocupa uno de los focos de la elipse. Kepler fue el primero en establecer este hecho en sus leyes sobre el movimiento de los planetas, que trataremos a continuación.

## 7. LAS LEYES DE KEPLER

Johannes Kepler (1571-1630) fue un astrónomo alemán partidario de la Teoría Heliocéntrica de Copérnico. Parte de su trabajo se basó en el análisis de gran cantidad de datos astronómicos sobre los movimientos de los planetas. Dichos datos habían sido recopilados por su maestro Tycho Brahe, el cual era un magnífico experimentador y realizó medidas astronómicas sobre la posición de los planetas mucho más precisas que Copérnico. A la muerte de Tycho, Kepler se hizo con sus datos astronómicos y los publicó en un libro llamado “Las tablas Rudolfinas de Tycho”.

Kepler, en el curso de sus investigaciones se encontró con que no podía ajustar los datos que tenía sobre la órbita de Marte al sistema Heliocéntrico. Después de varios intentos de cambios en la

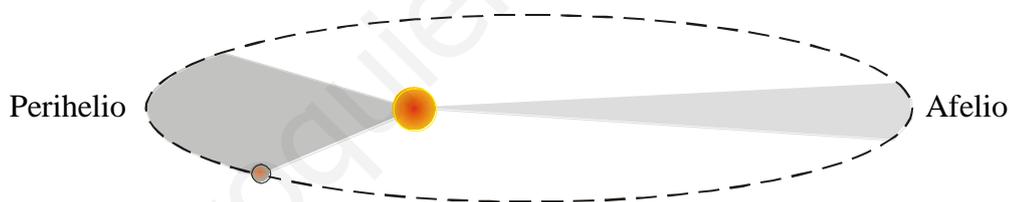
Teoría de Copérnico para hacerla aplicable a las nuevas observaciones, acabó por rechazar la idea de órbita circular de cada planeta alrededor del Sol y sustituirla por la de órbita elíptica con el Sol ocupando uno de los focos de la elipse. De hecho esta idea constituye la denominada primera ley de Kepler según la cual:

**1.** Todos los planetas describen órbitas elípticas planas con el Sol ocupando uno de sus focos.

La ley anterior permitía una representación mucho más sencilla del sistema solar que la de suponer que las órbitas descritas por los planetas eran perfectamente circulares. Kepler estableció también dos leyes más:

**2.** Si imaginamos una línea recta trazada desde el Sol a uno de sus planetas podemos afirmar que el área barrida por dicha línea en un tiempo dado, es la misma, independientemente de la zona de la órbita en la que el planeta se encuentre. O lo que es equivalente: la velocidad areolar de un planeta en torno al Sol, es constante.

Una consecuencia de la ley anterior es que un planeta, por ejemplo la Tierra, se moverá más rápido en el perihelio (punto de la órbita más cercano al Sol) que en el afelio (punto de la órbita más alejado del Sol) porque en el primero, al haber menor distancia al Sol, tendrá que desplazarse una mayor longitud sobre la trayectoria para barrer, en un tiempo dado, la misma área que en el segundo (ved figura de abajo, donde las áreas sombreadas son iguales).



**3.** Si "T" es el tiempo que emplea un planeta cualquiera en dar una vuelta completa en torno al Sol (periodo de revolución) y "r" el radio medio de su órbita, se cumple que el cuadrado del periodo de revolución es directamente proporcional al cubo del radio medio.

Es decir:  $T^2 = C \cdot r^3$  siendo C una constante de proporcionalidad que resulta ser igual para todos los planetas.

De acuerdo con la ley anterior, los planetas más alejados tendrán un periodo de revolución mayor que los planetas más cercanos al Sol.

Las leyes anteriores fueron introducidas por Kepler basándose en los datos experimentales de que disponía. Sin embargo, posteriormente pudieron deducirse de forma teórica.

## 8. DEDUCCIÓN TEÓRICA DE LAS LEYES DE KEPLER

Para poder deducir las leyes de Kepler, es necesario utilizar una nueva magnitud la cual se denomina **cantidad de movimiento angular** (también se conoce como momento cinético o momento angular) y se representa por  $\vec{L}$ . En este curso nos vamos a limitar a definirla. En la física de segundo de bachillerato se realiza una introducción y un tratamiento mucho más detallados.

Supongamos una masa puntual A que se mueve dentro de un marco inercial determinado, con una cantidad de movimiento lineal  $\vec{p}$  respecto de un punto dado O. Se define la cantidad de movimiento angular de A respecto de dicho punto O, como:

$$\vec{L} = \vec{OA} \times \vec{p}$$

Si O es el origen de un sistema de coordenadas cartesianas, podemos expresar  $\vec{OA}$  como el vector de posición  $\vec{r}$  del punto A, en cuyo caso:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

La variación de la cantidad de movimiento angular  $\Delta\vec{L}$  en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  que vamos a suponer sumamente pequeño (infinitesimal), podremos determinarla como:

$$\frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \times \vec{p} + \vec{r} \times \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

En el caso de que el intervalo de tiempo considerado sea infinitamente pequeño (como hemos supuesto) y de que el valor de la masa no varíe, se cumplirá que:

$$\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \vec{v} \quad \text{y que} \quad \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta\vec{v}}{\Delta t} = m \cdot \vec{a} = \vec{F}$$

siendo  $\vec{v}$  la velocidad instantánea de A respecto de O y  $\vec{F}$  la fuerza resultante sobre A.

$$\text{Por tanto: } \frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} = \vec{v} \times \vec{p} + \vec{r} \times \vec{F}$$

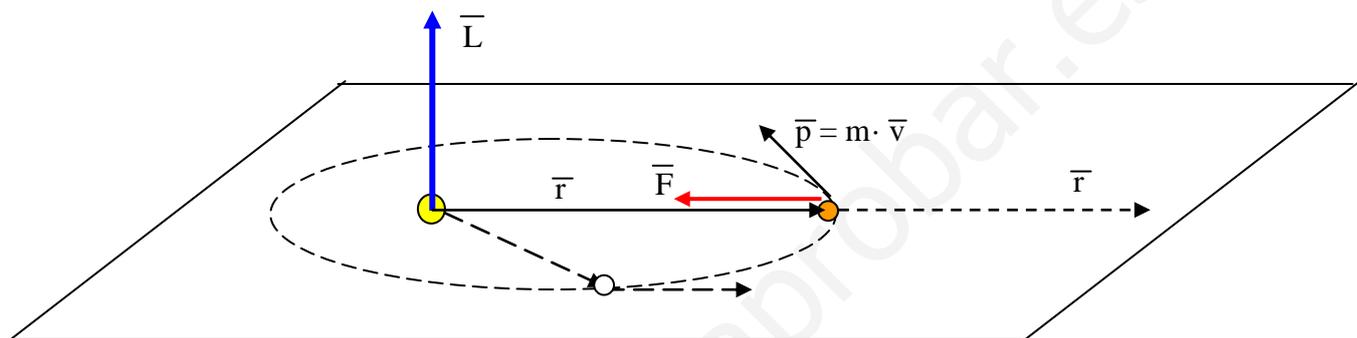
Si tenemos en cuenta que  $\vec{v} \times \vec{p} = \vec{v} \times m \cdot \vec{v} = 0$  y que  $\vec{r} \times \vec{F} = \vec{M}$

obtenemos finalmente que:

$$\boxed{\frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} = \vec{M}} \quad \text{donde } \vec{M} \text{ es el momento de } \vec{F} \text{ respecto de O (ved anexo de vectores).}$$

Hemos visto anteriormente que, según la primera ley de Kepler, los planetas describen órbitas planas y elípticas (de pequeña excentricidad) alrededor del Sol (situado en uno de los focos de la elipse).

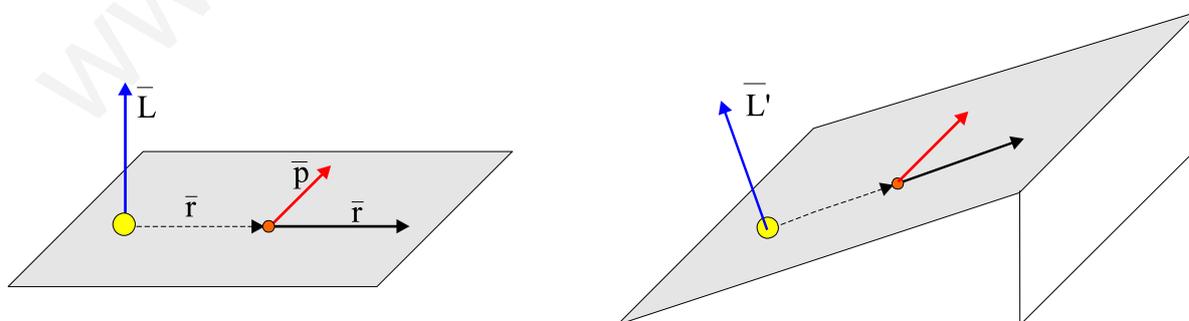
En la figura siguiente se ha representado la trayectoria de un planeta alrededor del Sol. Como puede verse, a lo largo de toda la trayectoria sobre el planeta actúa la fuerza de atracción gravitatoria ejercida por el Sol, que lo mantiene en órbita. Dicha fuerza es central y forma en todo momento un ángulo de  $180^\circ$  con el radio vector  $\vec{r}$  del planeta en cuestión. Con origen en el Sol se ha representado también el vector cantidad de movimiento angular  $\vec{L}$  del planeta respecto del Sol. Dado que las distancias son inmensamente grandes (la Tierra, por ejemplo, se halla a casi 150 millones de km del Sol), podemos considerar que tanto el Sol como los planetas son masas puntuales.



En el caso de cualquier planeta, el momento de la fuerza de atracción gravitatoria respecto del Sol es nulo ya que dicha fuerza es central y en todo instante tiene sentido contrario al vector  $\vec{r}$  de la figura. En efecto:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \rightarrow |\vec{M}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \cdot \text{sen}180^\circ = 0$$

Así pues como el momento  $\vec{M} = 0$ , concluimos que el vector cantidad de movimiento angular del planeta respecto del Sol ha de ser constante. Fijémonos que este hecho supone automáticamente que la órbita ha de ser en un solo plano, ya que si no lo fuese el vector  $\vec{L}$  cambiaría de dirección (y por tanto no sería constante) tal y como se expone en la figura siguiente:



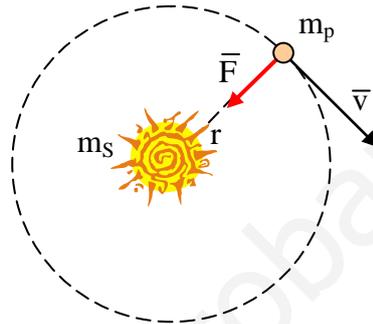
También es posible deducir la segunda ley de Kepler, pero los conocimientos matemáticos implicados en ello aconsejan hacerlo en otros cursos posteriores de física.

## 2. Dinámica

En cuanto a la tercera ley de Kepler, supongamos un planeta cualquiera que gira alrededor del Sol con un movimiento que, al ser la elipse casi circular y la velocidad areolar constante, podemos considerar prácticamente como circular y uniforme. En ese caso, el periodo de revolución  $T$  coincidirá con el tiempo empleado por el planeta en describir una trayectoria circular completa alrededor del Sol cuya longitud será, por tanto,  $2\pi r$ . De acuerdo con la ecuación del movimiento circular y uniforme, dicho tiempo se podrá expresar como:  $T = 2\pi r/v$  siendo  $v$  la rapidez con que gira el planeta.

Como buscamos una relación entre  $T$  y el radio de la órbita  $r$ , hemos de tratar de expresar la rapidez  $v$  en función de dichas magnitudes.

En el sistema formado por ambos astros, sobre el planeta (en movimiento circular y uniforme) actuará una fuerza resultante normal y dirigida constantemente hacia el Sol (situado en el centro de la circunferencia de radio  $r$ ).



La ecuación fundamental de la Dinámica expresada en componentes intrínsecas y aplicada al planeta (de masa  $m_p$ ) vendrá dada por:

$$F_{\text{res } t} = m_p \cdot a_t, \quad 0 = a_t \Rightarrow \text{M.U.}; \quad F_{\text{res } n} = m_p \cdot a_n$$

La fuerza normal que obliga al planeta a describir un movimiento circular y uniforme alrededor del Sol es la atracción gravitatoria. Teniendo esto en cuenta y que la aceleración normal viene dada por la expresión  $a_n = v^2/r$ , obtened la rapidez con que gira el planeta en función del radio de la órbita y finalmente la relación existente entre  $T$  y el radio  $r$ .

La ecuación anterior se transforma en:  $G \cdot \frac{m_s \cdot m_p}{r^2} = m_p \cdot \frac{v^2}{r}$

con lo que la rapidez del planeta en su órbita se podrá expresar como:  $v = \sqrt{\frac{G \cdot m_s}{r}}$

Si ahora sustituimos esta expresión en  $T = 2\pi r/v$  nos queda:

$$T = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{G \cdot m_s}{r}}} \text{ o lo que es equivalente: } T^2 = \frac{4\pi^2}{Gm_s} \cdot r^3 \rightarrow \boxed{T^2 = cte \cdot r^3}$$

La expresión anterior nos dice que el cuadrado del periodo de revolución de un planeta es directamente proporcional al cubo del radio de la órbita y, como ya sabemos, constituye la tercera ley de Kepler. Su deducción utilizando la ley de Newton de la Gravitación Universal, es una prueba más de la validez de ésta última y de que para estudiar el movimiento de los astros se pueden utilizar las mismas leyes que se aplican a los objetos terrestres.

El satélite más interno del planeta Saturno se llama "Mimas" y tiene una órbita prácticamente circular y de 187 000 km de radio alrededor de Saturno de forma que da una vuelta entera cada 23 h. Con estos datos, obtened la masa de Saturno. Rdo.  $5'64 \cdot 10^{26}$  kg

El tercer planeta que gira alrededor del Sol es la Tierra. Podemos simplificar su movimiento suponiendo que describe una órbita prácticamente circular y que da una vuelta completa en un año. Sabiendo que el radio medio de la órbita terrestre es de unos 150 millones de km. Determinad la masa del Sol. Rdo.  $2 \cdot 10^{30}$  kg

Algunas características de nuestro sistema solar									
Características	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón
Distancia media al Sol (millones de km)	57'9	108'2	149'6	227'9	778'3	1427	2871	4497'1	5913'5
Periodo de revolución	88 días	224'7 días	365'3 días	687 días	11'9 años	29'5 años	84'0 años	164'8 años	247'7 años
Velocidad orbital (km/s)	47'9	35	29'8	24'1	13'1	9'6	6'8	5'4	4'7
Masa (Tierra = 1)	0'006	0'8	1	0'1	317'9	95'2	14'6	17'2	0'1
Satélites conocidos	0	0	1	2	14	10	5	2	1

## 9. EL DESCUBRIMIENTO DE NUEVOS PLANETAS

En la segunda mitad del siglo XVIII el astrónomo inglés William Herschel descubrió un nuevo planeta unas 100 veces mayor que la Tierra y a una distancia del Sol aproximadamente doble que la de Saturno. Se trataba del planeta Urano. Años después se comprobó que los datos experimentales obtenidos respecto a la órbita de Urano no se acomodaban con los datos teóricos predichos de acuerdo con la teoría de la gravitación de Newton. Ese comportamiento irregular de Urano hizo pensar a algunos que dicha teoría no era válida o que no se cumplía para grandes distancias. Sin embargo no existía ninguna otra teoría mejor y una teoría científica no cambia por el simple hecho de que falle al intentar explicar algunos datos experimentales.

Otros científicos pensaron que quizás otro planeta más distante, todavía no conocido, podría estar afectando gravitatoriamente a Urano y ser el responsable de que los datos experimentales no se ajustaran a los teóricos basados en la teoría de la gravitación (ya que estos últimos habían sido obtenidos teniendo en cuenta la acción gravitatoria del Sol y de los planetas conocidos hasta entonces). Ello llevó a investigar cuál debería ser la hipotética órbita de ese desconocido planeta responsable de "perturbar" la trayectoria de Urano, para lo cual se utilizaron la teoría de la gravitación (sin modificar) y las posiciones observadas experimentalmente de Urano. De esta forma se pudo encontrar en 1846 al planeta Neptuno.

Lo sucedido con Urano se repitió también con Neptuno y mediante un proceso similar se consiguió ya en 1930, detectar la presencia de Plutón, el último planeta<sup>3</sup> conocido de nuestro sistema solar. El descubrimiento de los planetas más lejanos de nuestro sistema solar fue pues una brillante confirmación de la validez de Ley de Newton de la Gravitación Universal.

<sup>3</sup> Actualmente Plutón, dado su pequeño tamaño, no se considera ya un verdadero planeta.

## 2. Dinámica

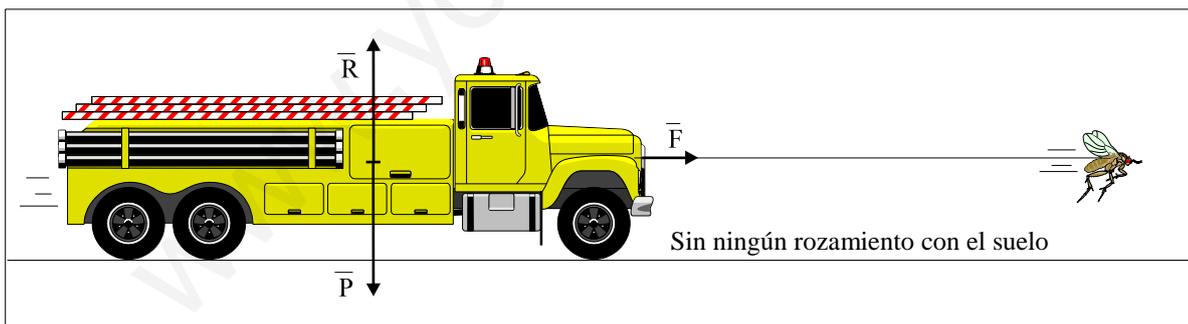
Es razonable pensar que muchas de las estrellas que forman una galaxia tengan planetas a su alrededor, de forma análoga a como sucede con nuestro Sol. De hecho, en el año 2003 ya se habían descubierto más de 100 planetas fuera de nuestro sistema solar, y ese número no ha parado de crecer, de forma que en la actualidad se estima que el número de planetas en nuestra galaxia puede ascender a varias decenas de miles de millones. Sin embargo, nuestra galaxia no es sino una más entre miles de millones de galaxias en el universo observable. Las galaxias forman “enjambres” o conjuntos de varias decenas de galaxias unidas por fuerzas gravitatorias. La fuerza gravitatoria actúa en todo el Universo.

### 10. ESTUDIO PARTICULAR DE OTRAS FUERZAS DE ESPECIAL INTERÉS

#### 10.1. La fuerza de rozamiento por deslizamiento

En ocasiones habréis empujado un objeto (como una mesa) situado sobre una superficie horizontal sin conseguir moverlo. Algunas personas interpretan este hecho diciendo que la fuerza de rozamiento es mayor que la fuerza con que se empuja. Sin embargo, si eso fuera así nos encontraríamos ante una situación absurda ya que el objeto, gracias a la fuerza de rozamiento, debería entonces comenzar a moverse en sentido contrario a la fuerza que nosotros le hacemos (en el mismo sentido que la fuerza resultante que actuaría sobre él). Para explicar que el objeto no cambie de velocidad, según las ideas que hemos desarrollado hasta aquí, la fuerza resultante sobre él ha de ser 0; de esa forma si estaba en reposo continuará estándolo. Así pues, **mientras que el objeto no se mueva**, la fuerza de rozamiento sobre él ha de valer exactamente lo mismo y ser de sentido contrario que la fuerza paralela al suelo con que se le empuje. Si el rozamiento fuese nulo, cualquier pequeña fuerza paralela al suelo lograría provocarle una aceleración y, por tanto, se movería

(cambiaría de velocidad). En la figura adjunta se ha intentado mostrar este hecho al dibujar una mosca arrastrando un camión en una situación ideal. Conviene notar que la fuerza peso no tiene ninguna influencia directa en la velocidad del cuerpo ya que al ser perpendicular no puede empujarle ni frenarle. Por otra parte, dado que no existe aceleración según la vertical, la fuerza peso y la fuerza normal que la superficie ejerce sobre el vehículo se anulan entre sí.

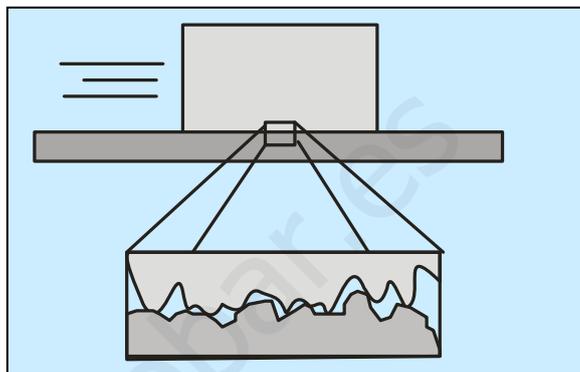


No obstante vivimos en un mundo en el que las fuerzas de rozamiento están presentes en la mayoría de los fenómenos que observamos. *¿Que ocurriría si, de repente, desapareciesen las fuerzas de rozamiento?* Para empezar, no podríamos caminar, los coches parados no podrían comenzar a circular, los vehículos en marcha por una carretera se saldrían en cuanto intentasen tomar cualquier curva y no podrían parar, no habría estrellas fugaces, etc. Vemos, pues que las fuerzas de rozamiento tienen una gran importancia, aunque a veces nos interese mucho disminuirlas, como, por ejemplo, cuando añadimos aceite lubricante a las máquinas (para disminuir el desgaste de

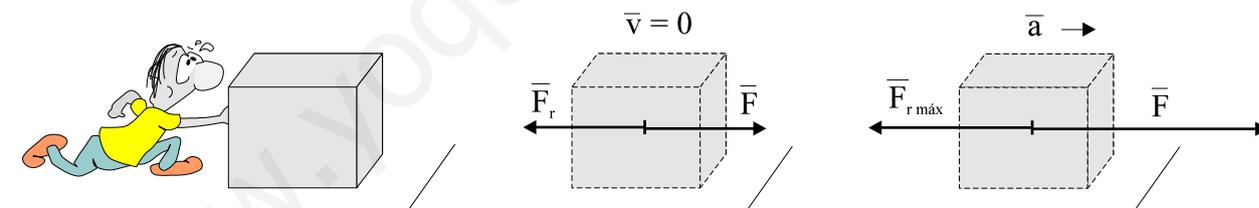
sus piezas y la pérdida de energía por calentamiento), cuando practicamos el esquí o cuando intentamos fabricar coches cada vez más aerodinámicos (para que consuman y contaminen menos).

En principio, para explicar la fuerza de rozamiento entre un bloque y la superficie por la que desliza, tendemos a relacionarla con la rugosidad o imperfecciones más o menos visibles que existen en ambos. Pensamos que esas imperfecciones encajan entre sí como los dientes de una sierra de modo que eso supone un cierto impedimento y hace que el objeto en movimiento vaya frenando hasta pararse. No obstante se trata de una primera aproximación muy elemental.

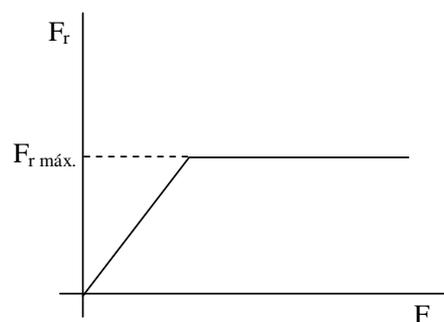
En realidad el estudio de las fuerzas de rozamiento es muy complejo. En efecto, cuando analizamos lo que ocurre a escala atómica encontramos interacciones entre átomos de la superficie del objeto y otros átomos de la superficie sobre la que desliza, con roturas y formaciones de enlaces químicos entre ellos. En lo que sigue, no obstante, haremos un estudio muy simplificado de la fuerza de rozamiento por deslizamiento admitiendo, que dicha fuerza se debe a la existencia de pequeñas irregularidades en ambas superficies.



Supongamos un bloque situado sobre una superficie horizontal al cual se le empuja ejerciendo una fuerza paralela al suelo en un sentido determinado. Si el bloque no se mueve mientras que la fuerza con que le empujamos no tenga un cierto valor, hemos de admitir, de acuerdo con la ecuación fundamental de la dinámica, que actúa otra fuerza debida al rozamiento tal que, en todo momento, deberá ser igual y de sentido contrario a la fuerza aplicada. Este hecho le confiere a la fuerza de rozamiento un carácter especial ya que puede tomar infinitos valores entre 0 y un valor límite o máximo.



Así, podemos ir aumentando la fuerza con que empujamos pero mientras el bloque no comience a deslizar, la fuerza de rozamiento también irá aumentando de manera que ambas fuerzas valgan siempre lo mismo ya que la resultante de las dos es nula. Para que el bloque, que está en reposo, comience a deslizar es necesario ejercerle una fuerza en la dirección del plano, que supere el valor límite o máximo que puede alcanzar la fuerza de rozamiento.



Así pues, siempre que un objeto deslice por una superficie, la fuerza de rozamiento tomará precisamente ese valor máximo y tendrá sentido opuesto al deslizamiento.

## 2. Dinámica

### A.30. ¿De qué dependerá el valor máximo de la fuerza de rozamiento por deslizamiento?

En principio podríamos pensar que tendría que depender de la naturaleza de las superficies puestas en contacto (acero-madera; vidrio-aluminio, etc.), de la fuerza normal ( $\vec{N}$ ) con que interactúan objeto y superficie (cuanto mayor sea la fuerza normal que el objeto ejerce sobre el plano, más se “pegará” a éste), así como del área de contacto entre objeto que desliza y superficie sobre la que lo hace (más rozamiento cuantos más puntos en contacto). Sin embargo, los resultados experimentales muestran que, el valor máximo del módulo de la fuerza de rozamiento por deslizamiento viene dado por la expresión:

$$|\vec{F}_r| = \mu \cdot |\vec{N}| \text{ o lo que es equivalente } |\vec{F}_r| = \mu \cdot |\vec{R}|$$

Observad que en la ecuación anterior hemos escrito módulos. Cuando haya que dibujar la fuerza de rozamiento máxima sobre un objeto deslizando sobre un plano habrá que tener en cuenta que dicha fuerza siempre se opone al deslizamiento del objeto. En dicha ecuación  $\mu$  se denomina coeficiente de rozamiento y su valor depende de la naturaleza de las superficies puestas en contacto.  $|\vec{N}|$  representa el módulo de la fuerza normal que el objeto ejerce sobre el plano y  $|\vec{R}|$  el de la fuerza normal que el plano hace sobre el objeto (ambos siempre iguales según el principio de acción y reacción). Sin embargo en la expresión no aparece el área de contacto entre objeto y plano ¿Cómo puede ser esto?

Una posible explicación es que, en principio, el **área efectiva** de contacto es bastante menor de lo que a primera vista pueda parecer ya que, debido a que las irregularidades microscópicas existentes se montan unas sobre otras, no toda la superficie del bloque está realmente “tocando” a la superficie del plano. En general cuanto mayor es la fuerza normal con que un objeto dado presiona a la unidad de superficie sobre la que desliza, más grande es el área efectiva de contacto y mayor será la fuerza de rozamiento. Sin embargo, si utilizando un mismo objeto (por ejemplo un bloque con caras rectangulares de distinto tamaño), vamos variando el valor de su superficie de deslizamiento resulta que **el área efectiva de contacto siempre es prácticamente la misma**. En efecto: si aumentamos el valor de la superficie de deslizamiento del objeto, disminuirá el valor de la fuerza normal por unidad de área que el objeto ejerce sobre el plano, con lo que se pegará menos a él, mientras que si apoyamos el objeto sobre una cara de menor superficie, como se trata del mismo objeto, la fuerza normal por unidad de área será ahora mayor, con lo que el objeto se pegará más al plano, compensando así la menor superficie “aparente” de contacto. El resultado es que, en ambos casos, la superficie efectiva de contacto es equivalente.

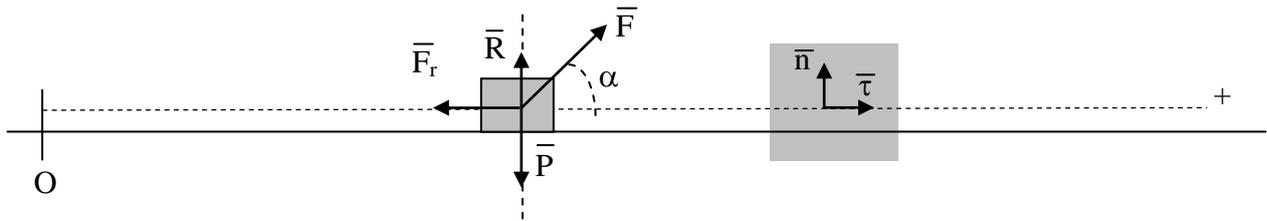
A.31. Sobre un bloque de 15 kg de masa que se encuentra inicialmente en reposo sobre un plano horizontal se ejerce una fuerza  $\vec{F}$  cuyo módulo vale 80 N. Sabiendo que el bloque desliza y que el coeficiente de rozamiento vale  $\mu = 0,3$ , calculad la aceleración en los siguientes casos:

a) Fuerza  $\vec{F}$  paralela al plano.

b) Fuerza  $\vec{F}$  formando un ángulo de  $60^\circ$  con el plano.

c) Volved a considerar la primera situación planteada y razonad cuanto valdría el módulo de la fuerza de rozamiento en el supuesto de que el módulo de  $\vec{F}$  en lugar de 80 N hubiese tomado los siguientes valores: 20 N, 40 N, 800 N.

Como el bloque se halla inicialmente en reposo y al ejercer sobre él una fuerza comienza a deslizar, está claro que la fuerza paralela al plano que tira del bloque ha de ser mayor que el valor máximo de la fuerza de rozamiento y que el bloque se moverá en el mismo sentido que la fuerza resultante. En el esquema siguiente hemos representado el bloque y las fuerzas que actúan sobre él. Como la trayectoria es conocida, trabajaremos con las componentes intrínsecas de dichas fuerzas para obtener el valor de la aceleración sobre la trayectoria con que se mueve el bloque.



Si nos fijamos en la figura, la aceleración dependerá del valor de la fuerza  $\vec{F}$ , del ángulo  $\alpha$  que forme  $\vec{F}$  con la horizontal y del valor máximo de la fuerza de rozamiento  $\vec{F}_r$ . Cabe esperar que dicha aceleración aumente cuando, a igualdad de los restantes factores, aumente  $|\vec{F}|$ , y que sea la máxima posible en el caso de que no haya rozamiento y  $\alpha = 0^\circ$ .

Descomponiendo la  $\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a}$  en sus componentes intrínsecas y teniendo en cuenta que al tratarse de una trayectoria rectilínea la aceleración normal es 0:

$$F_{res\ t} = m \cdot a_t \rightarrow F \cdot \cos \alpha - F_r = m \cdot a_t \rightarrow F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot R = m \cdot a_t \quad (1)$$

$$F_{res\ n} = m \cdot a_n \rightarrow F \cdot \sin \alpha + R - P = 0 \rightarrow F \cdot \sin \alpha + R - mg = 0 \quad (2)$$

De la ecuación (2) obtenemos que:  $R = mg - F \cdot \sin \alpha$ . Si sustituimos ahora en la (1) tenemos:

$$F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (mg - F \cdot \sin \alpha) = m \cdot a_t \quad \text{de donde:} \quad a_t = \frac{F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot (mg - F \cdot \sin \alpha)}{m}$$

La expresión anterior podremos utilizarla para resolver las dos primeras cuestiones que se nos plantean sin más que sustituir dicho ángulo por el valor correspondiente:

a) En efecto, para  $\alpha = 0$ , obtenemos que:  $a_t = \frac{F - \mu \cdot mg}{m} = \frac{80 - 0'3 \cdot 15 \cdot 9'8}{15} = 2'4 \text{ m/s}^2$

b) Mientras que para  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_t = 1'1 \text{ m/s}^2$

Si analizamos el resultado literal anterior, veremos que es dimensionalmente homogéneo ( $L/T^2$  en ambos miembros de la igualdad). También que si aumentase la fuerza que tira del bloque hacia la derecha (siempre a igualdad de los restantes factores), la aceleración tangencial aumentaría. Por otra parte, el valor máximo con que el cuerpo podría acelerar correspondería, en efecto, a una situación en la que  $\mu$  fuera 0 y  $\alpha$  valiese  $0^\circ$ . En ese caso  $a_t$  alcanzaría el valor de  $5'3 \text{ m/s}^2$ .

c) Naturalmente si  $\alpha = 0^\circ$  y la fuerza que tira del cuerpo no supera el valor máximo que puede tener la fuerza de rozamiento (en ese caso  $44'1 \text{ N}$ ), el cuerpo no se mueve hacia atrás sino que la fuerza de rozamiento vale justamente lo mismo que  $|\vec{F}|$  y el cuerpo sigue en reposo. Por tanto, si la fuerza que tira del cuerpo fuese horizontal y valiese 20 N, 40 N y 800 N, el módulo de la fuerza de rozamiento sería de **20 N, 40 N y 44'1 N respectivamente**.

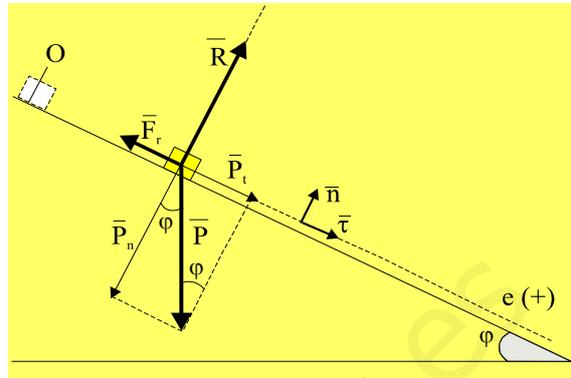
**A.32.** Se quiere determinar el coeficiente de rozamiento entre una caja y un tablón de 4 m de largo, elevando poco a poco un extremo del tablón y observando cuándo comienza a deslizar la caja. Al realizar la experiencia, la caja empieza a deslizar cuando la inclinación del tablón es de  $28^\circ$ . ¿Cuál es el valor del coeficiente de fricción? Si se inclinase el tablón  $60^\circ$  y se dejase la caja en su parte más alta, ¿con que rapidez llegaría al final?

## 2. Dinámica

Veamos, en primer lugar, las fuerzas que actúan sobre la caja. Ésta interactúa con el plano y con la Tierra, por lo que sobre ella se ejercen las siguientes fuerzas: fuerza de rozamiento  $\vec{F}_r$ , fuerza peso  $\vec{P}$ , y la fuerza normal que ejerce el plano  $\vec{R}$ . Sumando las tres, obtendremos la fuerza resultante sobre la caja:  $\vec{F}_{res} = \vec{F}_r + \vec{P} + \vec{R}$

¿Qué le puede suceder a la caja al dejarla en reposo sobre el plano?

- Que permanezca en reposo, en cuyo caso  $\vec{F}_{res} = 0$ .
- Que descienda siguiendo una trayectoria rectilínea a lo largo del plano, en cuyo caso  $\vec{F}_{res}$  tendrá la dirección del plano y sentido descendente.



En caso de que la caja descienda, se trata de un movimiento de trayectoria conocida, por lo que conviene estudiarlo utilizando las componentes intrínsecas de las fuerzas que actúan:

Expresad todas las fuerzas que actúan sobre la caja en componentes intrínsecas tomando como sistema de referencia el indicado en la figura.

$$\vec{P} = (P_t, P_n) = (mg \sin \varphi, -mg \cos \varphi); \quad \vec{R} = (R_t, R_n) = (0, R); \quad \vec{F}_r = (F_{rt}, F_{rn}) = (-F_r, 0)$$

Sumando vectorialmente obtenemos:  $\vec{F}_{res} = (mg \sin \varphi - F_r, R - mg \cos \varphi) = m (a_t, a_n)$

y descomponiendo la ecuación anterior en dos según las componentes escalares:

$$(1) F_{res\ t} = mg \sin \varphi - F_r = m \cdot a_t \qquad (2) F_{res\ n} = R - mg \cos \varphi = m \cdot a_n$$

¿Qué información podemos extraer de las ecuaciones (1) y (2) ?

1º) Al tratarse de una trayectoria rectilínea, la velocidad no cambia de dirección y, por tanto, la componente normal  $a_n$  del vector aceleración, es nula. Introduciendo esta condición en la ecuación (2), nos queda que:  $R - mg \cos \varphi = 0$ , de donde:  $R = mg \cos \varphi$ .

Una consecuencia directa de esto es que la fuerza de rozamiento máxima cuyo valor es  $\mu R$ , se podrá expresar como:  $F_{r\ max} = \mu mg \cos \varphi$

2º) Si analizamos la expresión (1)  $mg \sin \varphi - F_r = m \cdot a_t$  nos damos cuenta que:

- ✓ Si el ángulo  $\varphi$  es tal que el cuerpo no se mueve,  $a_t = 0$ , tendremos  $F_r = mg \sin \varphi$ . En este caso la fuerza de rozamiento  $F_r$  no alcanza su valor máximo  $\mu \cdot R$ , sino que vale lo mismo que la componente tangencial del peso.
- ✓ Si vamos aumentando el ángulo  $\varphi$ ,  $mg \cdot \sin \varphi$  irá aumentando, a la vez que la fuerza de rozamiento, y el cuerpo permanecerá en reposo hasta que para un cierto ángulo  $\varphi_c$  (llamado ángulo crítico) ocurra que  $mg \sin \varphi_c$  valga lo mismo que la fuerza de rozamiento máxima  $\mu R$ . En ese momento  $F_{res\ t}$  seguirá siendo nula y la caja continuará en reposo, pero en una situación tal que bastaría que se le diese un ligero impulso hacia abajo para que descienda con movimiento uniforme. Del enunciado del problema podemos considerar que  $\varphi_c$  es

precisamente  $28^\circ$ , con lo que sustituyendo en la expresión anterior podremos hallar el coeficiente  $\mu$ . En efecto:  $mg \sin \varphi_c = \mu R = \mu \cdot mg \cos \varphi_c \rightarrow \mu = \tan \varphi_c = \tan 28^\circ = 0,53$ .

- ✓ Si el ángulo se hace mayor que  $\varphi_c$  ( $\varphi > \varphi_c$ ) el cuerpo descenderá con movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado con aceleración  $a_t$ . Puesto que hay deslizamiento, la fuerza de rozamiento  $F_r$  tomará su valor máximo  $F_r = \mu \cdot R = \mu \cdot mg \cos \varphi$ , y la expresión anterior (1) quedará como:  $mg \sin \varphi - \mu \cdot mg \cos \varphi = m \cdot a_t$  de donde obtenemos  $a_t = g (\sin \varphi - \mu \cos \varphi)$  expresión que sólo podremos aplicar si  $\varphi > \varphi_c$ .

Mediante la última expresión anterior, obtenemos que, para el caso de  $\varphi = 60^\circ$ ,  $a_t = 5,9 \text{ m/s}^2$ . Al tratarse de un movimiento uniformemente acelerado, teniendo en cuenta las condiciones iniciales ( $e_0=0$ ,  $v_0=0$ ,  $t_0=0$ ), se cumplirá que:  $v = a_t \cdot t$  y que:  $e = a_t \cdot t^2/2$ .

Determinar la rapidez al final del plano inclinado equivale, de acuerdo con el sistema de referencia escogido, a determinar la rapidez de la caja en el momento en que  $e = 4 \text{ m}$ . Despejando “ $t$ ” de la segunda ecuación y sustituyendo en la primera, se tiene que  $v = \sqrt{2 \cdot a_t \cdot e}$  y sustituyendo los valores numéricos, obtenemos finalmente:  $v = 6,9 \text{ m/s}$ .

## 10.2. Tensiones en cuerdas

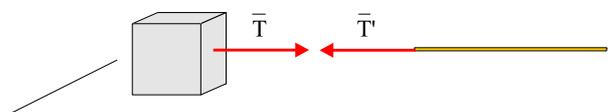
En la vida cotidiana existen casos en los que se ejercen fuerzas mediante cuerdas o cables. A modo de ejemplo, podemos citar los cables de los ascensores, las cuerdas de las poleas usadas por los albañiles, el hilo de un péndulo, las cuerdas de una escalada, de un barco de vela, etc. En la mayoría de casos se ejerce una fuerza sobre uno de los extremos de la cuerda y el otro se sujeta al cuerpo sobre el que queremos actuar. Al tirar del extremo libre vemos que la cuerda se tensa. Una de las situaciones más sencillas que pueden presentarse es la que se ilustra en la figura:



Si queremos calcular los valores de magnitudes como la posición del bloque o con qué rapidez se moverá en un cierto instante, será necesario determinar en primer lugar su aceleración sobre la trayectoria. Para ello es preciso que antes nos detengamos en clarificar una importante cuestión:

**A.33.** *¿Cuál es el papel de la cuerda? o más concretamente: ¿La fuerza que tira del bloque hacia la derecha, es la misma que la fuerza con que se tira del extremo libre de la cuerda?*

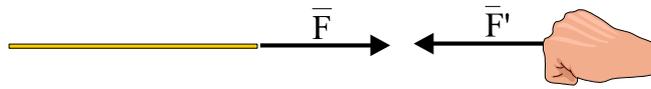
En una primera aproximación es frecuente considerar a la masa de la cuerda despreciable. Siempre que se haga esa simplificación, la cuerda no cambia el valor de la fuerza  $\vec{F}$  que ejerce la mano sobre ella, sino que se limita a transmitirla al bloque. Según el principio de acción y reacción las fuerzas que se ejercen el bloque y la cuerda serán de igual valor opuestas, aplicándose una sobre el bloque ( $\vec{T}$ ) y la otra sobre la cuerda ( $\vec{T}'$ ) tal y como se indica en el esquema siguiente:



Se cumplirá que:  $\vec{T} = -\vec{T}'$  (1)

## 2. Dinámica

Análogamente ocurrirá para la interacción cuerda y mano. Según el principio de acción y reacción la fuerza  $\vec{F}$  que sobre la cuerda ejerce la mano habrá de tener el mismo valor, igual dirección y sentido opuesto que la fuerza  $\vec{F}'$  que sobre la mano ejerce la cuerda:



Se cumplirá que:  $\vec{F} = -\vec{F}'$  (2)

Luego sobre la cuerda (de masa despreciable) se ejercen las fuerzas siguientes:



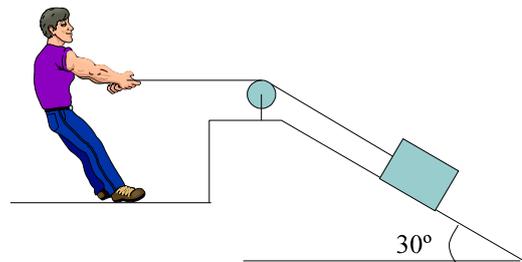
Al ser la masa de la cuerda despreciable y aplicar a la cuerda el segundo principio de la dinámica se cumplirá que la fuerza resultante  $\vec{F}_{res}$  sobre la cuerda valdrá:

$$\vec{F}_{res} = \vec{F} + \vec{T}' = m_c \cdot \vec{a} = 0 \quad \text{y por lo tanto que: } \vec{F} = -\vec{T}' \quad \text{y teniendo en cuenta (1): } \vec{F} = \vec{T}$$

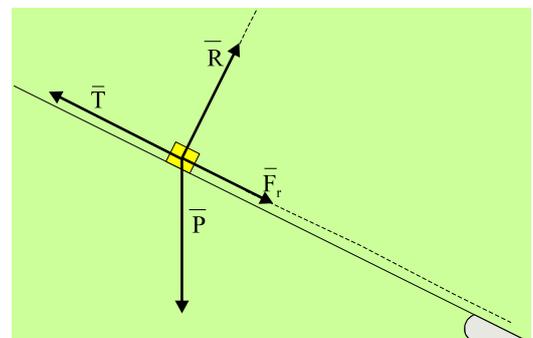
es decir, que la fuerza con que la mano tira de la cuerda es igual que la fuerza que ejerce la cuerda sobre el bloque. La cuerda, pues, cuando podemos considerar su masa despreciable, lo que hace es transmitir la fuerza de un extremo a otro.

Existen también muchas situaciones en las que una cuerda o cable que tira de un cuerpo, pasa por la garganta de una polea. Se trata de un problema más complejo, pero que también se simplifica cuando se supone (en una primera aproximación) que la masa de la polea también es despreciable. En ese caso la polea no presenta ninguna inercia a la rotación y su único efecto es cambiar la dirección de la tensión de la cuerda.

**A.34.** *Determinad la fuerza constante que la persona de la figura ha de ejercer para subir el bloque por la rampa en 5 s. Datos: El bloque se halla inicialmente en reposo en la base de la rampa, su masa es de 50 kg, el coeficiente de rozamiento entre bloque y plano es  $\mu = 0,8$ , y la longitud  $L$  que ha de recorrer es de 7 m. (El dibujo no está a escala).*



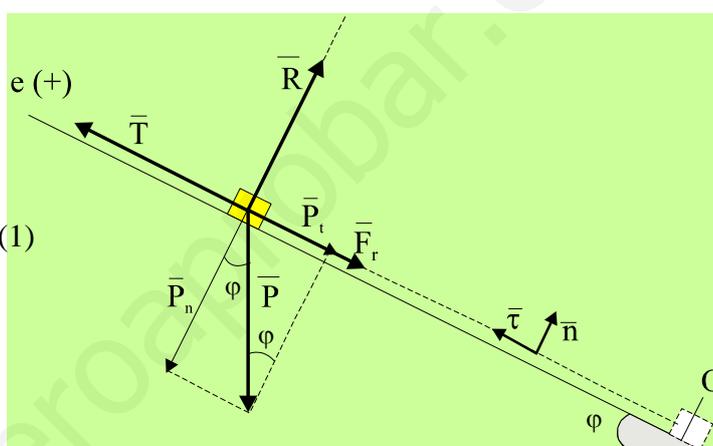
En este problema supondremos que tanto la masa de la cuerda como la de la polea son despreciables. De esta forma, la fuerza  $\vec{F}$  que ejerce la persona sobre la cuerda tiene el mismo valor (módulo) que la fuerza  $\vec{T}$  con que la cuerda tira del bloque hacia arriba por el plano. Las restantes fuerzas que actúan sobre el bloque son, su peso  $\vec{P}$  o fuerza con que la Tierra le atrae y la interacción con el plano. Esta última habitualmente la expresamos descompuesta en dos fuerzas (la fuerza normal  $\vec{R}$  y la fuerza de rozamiento  $\vec{F}_r$ ).



Los casos en que se ejercen fuerzas mediante cuerdas o cables que pasan por una o varias poleas son frecuentes sobre todo en aquellas tareas en las que hay que desplazar objetos pesados como, por ejemplo, en las mudanzas y en la construcción.

En el problema se nos pide la fuerza que debe hacer la persona (o lo que es equivalente la tensión de la cuerda) para conseguir subir el bloque por la rampa en un cierto tiempo. Dado que dicho bloque estaba inicialmente en reposo, ello implica que la tensión de la cuerda supera a las fuerzas que tiran del bloque hacia abajo, es decir, existirá una fuerza resultante paralela al plano y hacia arriba, que hará que el bloque se mueva con una cierta aceleración.

Por otra parte, dado que la trayectoria que sigue el bloque es rectilínea, su aceleración normal será 0. Podemos descomponer las fuerzas que actúan sobre el bloque en sus componentes intrínsecas y, como la trayectoria es conocida de antemano, elegir un origen de espacios y un criterio de signos, expresando finalmente la fuerza resultante sobre el bloque según sus componentes tangencial y normal:



$$F_{\text{res } t} = m \cdot a_t \rightarrow T - mg \cdot \text{sen} \varphi - F_r = m \cdot a_t \quad (1)$$

$$F_{\text{res } n} = m \cdot a_n \rightarrow R - mg \cdot \text{cos} \varphi = 0 \quad (2)$$

Como el bloque está deslizando, la fuerza de rozamiento tomará su valor máximo ( $\mu R$ ). Pero, de acuerdo con la ecuación (2),  $R = mg \text{cos} \varphi$ , con lo que  $F_r = \mu \cdot mg \text{cos} \varphi$ , y sustituyendo en (1):

$$T - mg \text{sen} \varphi - \mu \cdot mg \text{cos} \varphi = m \cdot a_t \quad \text{de donde: } \boxed{T = m \cdot a_t + mg \text{sen} \varphi + \mu \cdot mg \text{cos} \varphi}$$

Como tanto la masa del bloque, como el ángulo de inclinación del plano y la fuerza de rozamiento son constantes, la expresión anterior nos dice que para a cada valor de la aceleración le corresponderá un valor de la tensión (que coincidirá con el de la fuerza ejercida por la persona). Por tanto, la pregunta que se nos hace en el problema, supone calcular el valor de T necesario para que el bloque se mueva con una aceleración tal que, partiendo del reposo, sufra un desplazamiento L (de 7 m) en un tiempo t (de 5 s).

Dado que el movimiento es uniformemente acelerado, teniendo en cuenta las ecuaciones de dicho movimiento y las condiciones del problema (origen de espacios, criterio de signos,  $e_0 = 0$ ,  $t_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ ), podremos escribir:

$$L = a_t \cdot t^2 / 2 \rightarrow a_t = 2L / t^2 \rightarrow T = m \cdot 2L / t^2 + mg \text{sen} \varphi + \mu \cdot mg \text{cos} \varphi \quad \text{y sacando } m \text{ factor común:}$$

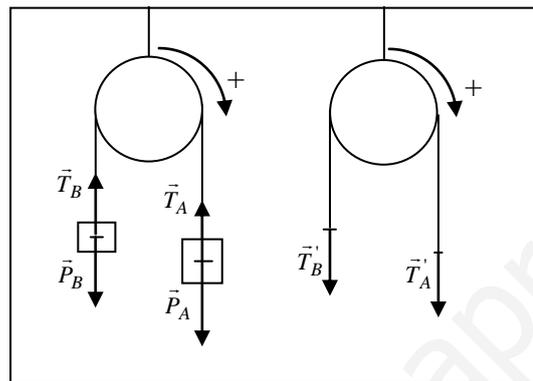
$$\boxed{T = m (2L / t^2 + g \text{sen} \varphi + \mu \cdot g \text{cos} \varphi)} \rightarrow T = 50 (0'56 + 9'8 \cdot \text{sen } 30^\circ + 0'8 \cdot 9'8 \cdot \text{cos } 30^\circ) = 612'5 \text{ N}$$

## 2. Dinámica

**A.35.** Dos masas, de 3 kg y de 1 kg, cuelgan de los extremos de una cuerda inextensible que pasa por la garganta de una polea fija al techo. Suponiendo  $g = 10 \text{ N/kg}$  y despreciando las masas de la cuerda y de la polea, se pide:

- Calculad la aceleración con que se mueve el conjunto y la tensión de la cuerda.
- Si eliminamos la masa de 3 kg y tiramos de la cuerda hacia abajo con una fuerza equivalente al peso de la masa de 3 kg ¿cuánto valdrá entonces la aceleración?

A lo largo de la trayectoria conocida, el movimiento de los dos cuerpos será el mismo (al ser la cuerda inextensible) y, consecuentemente, también será igual su aceleración sobre la trayectoria,  $a_t$ . El siguiente esquema representa las fuerzas que actúan sobre las masas A (de 3kg) y B (de 1 kg), así como sobre la cuerda. Como podemos ver, el peso  $\vec{P}_A$  tira de la masa A en el sentido que, arbitrariamente, hemos escogido como positivo, mientras que el peso  $\vec{P}_B$  lo hace en el contrario.



De acuerdo con el tercer principio de la dinámica, si la cuerda tira del cuerpo A hacia arriba con una fuerza  $\vec{T}_A$ , éste ejercerá sobre la cuerda otra fuerza igual y de sentido contrario  $\vec{T}'_A$ . Análogamente podemos razonar para el cuerpo B el cual tirará de la cuerda con una fuerza  $\vec{T}'_B = -\vec{T}_B$ . (En la figura izquierda se han representado las fuerzas que actúan sobre los cuerpos y en la figura derecha las que actúan sobre la cuerda).

Dado que conocemos la trayectoria de cada cuerpo podemos trabajar escalarmente, expresando la fuerza resultante en componentes intrínsecas, y como además, en este caso, todas las fuerzas tienen la dirección de la trayectoria, sólo habrá componente tangencial.

Hemos de tener en cuenta que si aplicamos la ecuación fundamental de la dinámica a la cuerda tenemos que:  $T'_A - T'_B = m_C \cdot a_t = 0$  ya que según se ha dicho, la masa de la cuerda se considera despreciable. Por tanto  $T'_A = T'_B = T$  y (de acuerdo con el principio de acción y reacción)  $T_A = T_B = T$ , es decir: **siempre que la masa de la cuerda y de la polea se consideren despreciables, la tensión de la cuerda toma el mismo valor T en todos sus puntos.**

Podemos ahora aplicar la ecuación fundamental de la dinámica a los cuerpos A y B con el fin de obtener la aceleración con que se moverá el sistema. Como la aceleración tangencial con que se mueve cualquiera de las masas es la misma y no hay aceleración normal para ninguna de ellas, podemos escribir que:  $a_{tA} = a_{tB} = a$ .

$$\text{Para el cuerpo A: } P_A - T = m_A \cdot a \rightarrow (1) \quad m_A g - T = m_A \cdot a$$

$$\text{Para el cuerpo B: } T - P_B = m_B \cdot a \rightarrow (2) \quad T - m_B g = m_B \cdot a$$

Sumando ambas ecuaciones eliminamos T y nos queda:  $m_A g - m_B g = (m_A + m_B) \cdot a$ , de donde:

$$a = \frac{m_A - m_B}{m_A + m_B} \cdot g \quad \text{y sustituyendo valores: } a = 5 \text{ m/s}^2$$

El resultado literal anterior, es dimensionalmente homogéneo ya que en ambos miembros del signo igual quedan las dimensiones correspondientes a la aceleración ( $LT^{-2}$ ).

Dicho resultado contempla también algunos casos límite evidentes, así por ejemplo *¿cuánto debería de valer la aceleración si la masa de B fuese 0?*; está claro que en ese caso, “A” caería libremente con la aceleración de la gravedad y eso es precisamente lo que obtenemos si en el resultado hacemos  $m_B = 0$ . Otro caso límite evidente es *lo que ocurriría si no hubiese gravedad*; en ese supuesto, la aceleración sería nula aunque las masas fuesen diferentes (tal y como se obtiene haciendo  $g = 0$ ). El resultado también nos muestra que cuanto mayor sea la diferencia entre las masas  $m_A - m_B$ , mayor será el valor de la aceleración  $a$  con que se moverán.

*¿Cómo podemos calcular el valor  $T$  de la tensión de la cuerda?*

Para ello basta con que consideremos cualquiera de las ecuaciones (1) o (2) y despejemos  $T$ . Así, por ejemplo de la expresión (2) obtenemos que:  $T = P_B + m_B \cdot a = m_B (g + a)$  en donde sustituyendo los datos numéricos nos queda:  $T = 1 (10 + 5) = 15 \text{ N}$ .

Otra cuestión que se plantea en el enunciado del problema es qué pasaría si en lugar de colgar un peso de 30 N de uno de los extremos de la cuerda, tiramos de él con la mano haciendo una fuerza de 30 N. *¿Obtendríamos el mismo resultado para la aceleración?*

La respuesta es que no, ya que ahora dicha fuerza únicamente aceleraría a la masa  $m_B$  de 1 kg, mientras que anteriormente lo hacía con una masa de 4 kg.

En efecto, la aceleración valdría ahora:  $a = \frac{F - P_B}{m_B} = \frac{F - m_B \cdot g}{m_B} = 20 \text{ m/s}^2$

Quedan abiertas algunas interrogantes como *¿que pasaría si no considerásemos la masa de la cuerda despreciable? ¿y la de la polea?*, que se estudian en cursos posteriores de física.

### 10.3. Fuerzas elásticas. Ley de Hooke. Dinámica del movimiento armónico simple

Se pretende aquí realizar un estudio experimental sobre el comportamiento de las fuerzas elásticas. Es lógico pues que, en primer lugar, tratemos de clarificar lo que entendemos en el lenguaje científico por cuerpo “elástico”.

**A.36.** *Elaborad una lista con ejemplos de cuerpos que sean rígidos, otros que sean simplemente deformables (pero no elásticos) y por último aquellos que sean elásticos. Explicad los criterios que se utilizan para hacer esta clasificación.*

En principio podemos considerar como materiales elásticos aquellos que tienen la capacidad de recuperar su forma inicial cuando se les comprime o estira y luego se les deja libres. Éste puede ser el caso, por ejemplo, de una rama fina de un árbol, de una goma, de un resorte, etc. Para facilitar el planteamiento del problema a estudiar, es conveniente reflexionar en torno a la importancia que tiene esta propiedad de la materia.

**A.37.** *¿Qué puede ser importante saber sobre la elasticidad? ¿Para qué puede servirnos?*

## 2. Dinámica

Podemos plantearnos, por ejemplo, si los diferentes materiales son más o menos elásticos, de qué depende la elasticidad, cómo podemos modificarla, etc. Existen multitud de casos en los que se aprovecha la elasticidad de determinados materiales. Quizás uno de los primeros fue la construcción de arcos por los seres humanos primitivos. Ese tipo de armas basado, en principio, en la elasticidad que presenta una simple tira de cuero sujeta a los extremos de una rama, supuso un avance tecnológico muy importante al permitir aumentar la efectividad de la caza. En la actualidad, podemos referirnos a los amortiguadores de muchos vehículos, basados en la elasticidad de resortes o bien en la elasticidad del aire, así como a muchos deportes (como el salto con pértiga o el lanzamiento de una persona desde lo alto de un puente sujeta a una goma) y objetos como las camas elásticas, las zapatillas deportivas con cámara de aire, el encordado de una raqueta de tenis, una simple pelota, etc.

Para estudiar las fuerzas elásticas o, dicho de otro modo, la elasticidad de los cuerpos, es conveniente que precisemos el problema, concretando un tipo de material, forma, características, etc., y centremos este trabajo experimental alrededor de un objeto determinado.

**A.38.** *Indicad qué tipo de objetos pueden ser los más idóneos para estudiar las fuerzas elásticas.*

Elegiremos el resorte elástico o muelle como prototipo sencillo de cuerpo elástico, pero las características de las fuerzas elásticas que obtengamos son aplicables a cuerpos elásticos muy variados (desde una columna de aire hasta una bola de caucho o una viga de hierro).

**A.39.** *¿De qué factores dependerá la fuerza necesaria para deformar un resorte elástico?*

Podemos pensar, a título de hipótesis, que cuanto mayor sea la deformación pretendida, mayor deberá ser la fuerza ejercida. En este sentido, la relación más sencilla sería la de una proporcionalidad directa entre ambas magnitudes de modo que a doble fuerza se produjera un doble alargamiento (o compresión). También cabe esperar que dependa de la naturaleza del resorte (por ejemplo, material de que está hecho). Por otra parte, conviene no olvidar que, según el principio de acción y reacción, el resorte ejerce siempre una fuerza igual y de sentido contrario (fuerza elástica) sobre el agente exterior que intenta deformarlo.

**A.40.** *Tratad de suponer qué ocurrirá cuando llevemos nuestro resorte a situaciones límite, tirando del extremo libre del mismo. ¿Cuándo diremos que un cuerpo deja de ser elástico?*

Si tiramos continuamente llega un momento en el que si es una goma, ésta se rompe, y si es un resorte, primero se deforma irreversiblemente y por último se rompe. Sólo consideraremos elástico un cuerpo, mientras recupere su estado inicial al cesar la fuerza deformadora; cuando esto no ocurra, diremos que se ha superado su límite de elasticidad.

Para poder contrastar la hipótesis anterior tenemos que "operativizarla" en función de las magnitudes físicas que intervienen. Así pues, tenemos que encontrar una expresión matemática que responda a la idea cualitativa que hemos aceptado como hipótesis de trabajo.

**A.41.** *Expresad matemáticamente, a título de hipótesis, la relación entre la fuerza aplicada y el alargamiento sufrido por un resorte, de acuerdo con las ideas establecidas.*

En base a los razonamientos anteriores podemos suponer que en el tramo considerado elástico, si es cierta nuestra hipótesis, las variables que intervienen en este estudio deben responder a una ecuación de primer grado del tipo:  $F = k \cdot (x)$

En la ecuación anterior  $F$  representa el valor (módulo) de la fuerza aplicada,  $k$  es una constante de proporcionalidad llamada constante elástica (cuyo valor dependerá de las características del resorte) y  $(x)$  la deformación sufrida por el resorte (en valor absoluto), que en este caso, al tratarse de un alargamiento, coincidirá con la longitud final  $L$  menos la longitud inicial del resorte cuando estaba distendido  $L_0$ .

Si nuestra hipótesis es correcta, cuando sometamos un mismo resorte a distintas fuerzas y midamos los alargamientos correspondientes a cada una, deberá ocurrir que el cociente entre el valor de cada fuerza y el alargamiento que produce sea constante (valor que será la constante elástica del resorte utilizado) o más precisamente:

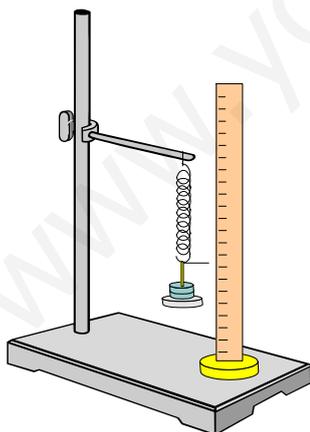
Al representar gráficamente los valores de la fuerza frente a los alargamientos, los puntos obtenidos deberían ajustarse sensiblemente a una línea recta que pasara por el origen de coordenadas (ya que si no se aplica ninguna fuerza no hay alargamiento).

**A.42.** Diseñad un experimento sencillo que permita contrastar la hipótesis emitida. Indicad concretamente la forma de medir las fuerzas y los alargamientos del resorte.

Podemos pensar en utilizar un resorte al que se le cuelguen unas pesas y se mida su alargamiento mediante una regla o cinta métrica. Las pesas nos darán el valor de la fuerza aplicada (que podemos cuantificar simplemente utilizando pesas iguales y tomando la fuerza ejercida por una de ellas como unidad) y el alargamiento lo podemos medir con una regla graduada.

**A.43.** Planificad lo más detalladamente posible los pasos a seguir y preparad una tabla para recoger los resultados de la investigación. A continuación proceded a realizar los experimentos diseñados y finalmente a interpretar los resultados obtenidos.

En la figura adjunta se muestra un posible montaje para proceder a tomar las medidas. Conviene tener en cuenta que las lecturas de la longitud se facilitan si en el extremo inferior del muelle se coloca un alambre que actúe como índice. La regla se puede mantener vertical simplemente utilizando un trozo de plastilina sobre el cual se coloca invertida.



nº de pesas	(x) (cm)
0	0
1	$x_1$
2	$x_2$
3	$x_3$
4	$x_4$
5	$x_5$

Con los datos obtenidos se elabora una tabla como la anterior y finalmente se procede a construir la gráfica correspondiente. Si habéis tomado bien las medidas, podréis comprobar cómo los puntos se ajustan bastante bien a una línea recta (cuya pendiente nos dará el valor de la constante elástica del muelle), lo que apoya la validez de la hipótesis. De hecho mediante otros experimentos científicos esta hipótesis ha sido reiteradamente confirmada y se conoce como: Ley de Hooke.

## 2. Dinámica

De acuerdo con ella, siempre que al extremo de un muelle o material elástico se le ejerce una fuerza para alargarlo o comprimirlo, la deformación que experimenta (alargamiento o compresión) en valor absoluto y el módulo de la fuerza son directamente proporcionales. La constante de proporcionalidad se denomina constante elástica y, en el sistema internacional se mide en N/m. La ley de Hooke es válida siempre que no se supere el límite de elasticidad.

Como consecuencia de la investigación realizada, podríamos plantearnos nuevos problemas, como, por ejemplo: ¿De qué factores dependerá la constante elástica de un resorte? Y avanzar en ellos o dejarlos más o menos abiertos, según el tiempo que se disponga.

**A.44.** *Elaborad un informe que desarrolle todo el trabajo realizado, desde el planteamiento del problema al análisis de los resultados obtenidos, incluyendo todas aquellas incidencias que se consideren oportunas.*

**A.45.** *Un bloque de hierro ha sido lanzado hacia la derecha por una superficie horizontal contra un muelle elástico tal y como se representa en la figura adjunta:*



*Al chocar, el bloque no se para inmediatamente sino que sigue moviéndose hacia la derecha durante un tiempo y mientras esto ocurre empujará al muelle (razonad cuál es la proposición correcta): a) Cada vez con más fuerza. b) Siempre con la misma. c) Cada vez con menos fuerza.*

Cuando el bloque interacciona con el muelle, según el principio de acción y reacción, la fuerza que sobre el muelle hace el bloque ( $\vec{F}_{MB}$ ) ha de ser del mismo módulo pero sentido contrario a la fuerza que sobre el bloque hace el muelle ( $\vec{F}_{BM}$ ), es decir:  $\vec{F}_{MB} = -\vec{F}_{BM}$ , o bien, en módulos:  $|\vec{F}_{MB}| = |\vec{F}_{BM}|$ . Al tratarse de un muelle elástico, el módulo de la fuerza que ejerce el muelle ha de ser directamente proporcional al alargamiento o compresión de éste respecto a su longitud inicial (ley de Hooke), es decir, conforme se vaya aumentando la compresión del muelle ( $x$ ), irá aumentando también  $F_{BM}$  y, en consecuencia, también lo hará la fuerza que sobre el muelle hará el bloque ( $F_{MB}$ ), ya que, como hemos dicho, de acuerdo con el principio de acción y reacción, sus módulos son iguales en todo momento (mientras dura la interacción bloque-muelle),

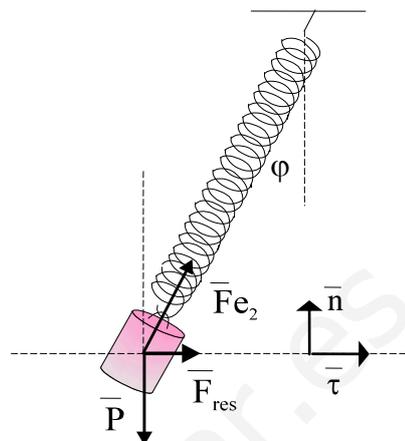
El hecho de que algunas personas escojan como correcta la tercera propuesta suele deberse a que relacionan (erróneamente) la fuerza con la velocidad en lugar de con la aceleración y eso les lleva a pensar que: “como el bloque va cada vez más lento ejerce una fuerza cada vez menor sobre el muelle”. No tienen en cuenta que aunque el bloque vaya cada vez más despacio, el módulo de la aceleración va aumentando (cada vez se va deteniendo más deprisa) y que alcanzará su valor máximo justo en el momento en que el bloque se pare (máxima compresión del muelle) que es cuando la fuerza toma también su valor máximo (a pesar de que en ese preciso instante la velocidad sea nula). Finalmente, pensemos, que si en lugar del bloque fuese nuestra mano la que comprime el resorte, no dudaríamos en afirmar que para seguir comprimiéndolo tendríamos que ejercer cada vez más fuerza aunque nuestra mano avanzase cada vez más despacio.

**A.46.** *De un resorte de 50 cm de longitud, sujeto del techo de un autobús, se suspende un cuerpo de 1 kg que le produce un alargamiento de 10 cm. Si después el autobús arranca con una aceleración de  $4 \text{ m/s}^2$  y en línea recta, determinad el ángulo que formará el resorte con la vertical y su nueva longitud en la posición estable (mientras el autobús mantenga la misma aceleración).*

En este problema necesitamos conocer el ángulo que forma el resorte con la vertical cuando el autobús está acelerando. En esta situación el cuerpo que pende del resorte, para un observador externo no se encuentra en equilibrio sino que se está moviendo con la misma aceleración que el autobús. ¿A qué fuerzas cabe atribuir dicha aceleración?

Las fuerzas que actúan sobre el cuerpo serán el peso  $\vec{P}$  y la fuerza elástica del muelle  $\vec{F}_{e_2}$ , distinta de la existente cuando el autobús estaba en reposo ( $\vec{F}_{e_1}$ ), de manera que la resultante de ambas tendrá la misma dirección y sentido que la aceleración con que se mueve el cuerpo:

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{P} + \vec{F}_{e_2} = m \cdot \vec{a}$$



Expresando ahora las fuerzas en componentes intrínsecas cuando el vehículo está acelerando, según los vectores  $\vec{\tau}$  y  $\vec{n}$  de la primera figura y sustituyendo, nos queda:

$$F_{\text{res } \tau} = m \cdot a_{\tau} \rightarrow F_{e_2} \cdot \text{sen } \varphi = m \cdot a_{\tau}$$

$$F_{\text{res } n} = m \cdot a_n \rightarrow F_{e_2} \cdot \text{cos } \varphi - mg = m \cdot a_n = 0 \quad (\text{suponemos que el autobús se desplaza en línea recta})$$

Despejando  $\text{sen } \varphi$  y  $\text{cos } \varphi$  de las ecuaciones anteriores y dividiendo:  $\text{tg } \varphi = a/g$  y por tanto:

$$\varphi = \text{arctg } a/g = \text{arctg } 4/9'8 = 22'2^\circ$$

Sustituyendo este valor en cualquiera de las ecuaciones anteriores y operando, obtenemos  $F_{e_2} = 10'6 \text{ N}$ . Para saber el alargamiento experimentado por el muelle, aplicamos  $F_{e_2} = K \cdot x_2$  y nos damos cuenta que necesitamos conocer la constante elástica  $k$ . ¿Cómo podríamos conocerla?

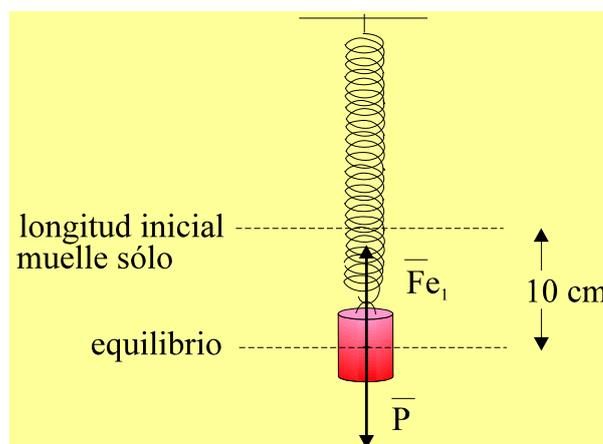
En la situación inicial (de equilibrio) la fuerza elástica que hace el muelle sobre el cuerpo hacia arriba se verá compensada por la fuerza peso que ejerce la Tierra sobre el cuerpo hacia abajo, según se indica en el esquema adjunto:

Se cumple que:  $\vec{F}_{e_1} + \vec{P} = 0$ , y por tanto

que:  $|\vec{F}_{e_1}| = |\vec{P}|$ , es decir:  $k \cdot x_1 = mg$ , de donde podemos obtener el valor de la constante elástica del muelle haciendo:

$$k = mg/x_1 = 98 \text{ N/m.}$$

Con lo que:  $x_2 = F_{e_2}/k = 10'6/98 = 0'108 \text{ m}$



## 2. Dinámica

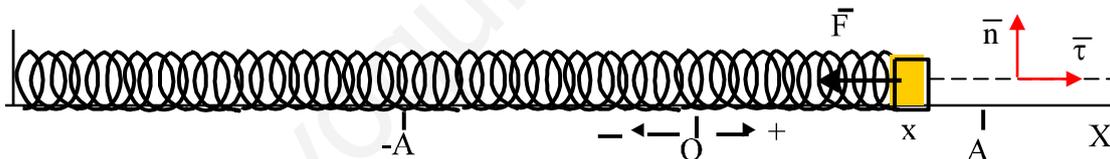
Una característica importante de las fuerzas elásticas es que **todo cuerpo sometido a la acción de una fuerza resultante elástica, realiza un movimiento armónico simple (MAS)**. Para demostrarlo, nos centraremos en un ejemplo sencillo como es el de un cuerpo sujeto firmemente al extremo de un muelle elástico (que tiene el otro extremo fijo en la pared) y tal que ambos se hallan sobre una superficie horizontal.<sup>1</sup>

El muelle horizontal tiene una longitud natural a la cual no ejerce fuerza alguna sobre el objeto unido a uno de sus extremos. Cuando la fuerza resultante que actúa sobre un objeto es nula, decimos que éste se halla en una **posición de equilibrio**. En el ejemplo que estamos tratando dicha posición coincide con la que ocupa la masa sujeta al muelle cuando éste tiene su longitud natural. La designaremos como O.

*A.47. Si a partir de la situación anterior desplazamos el cuerpo de su posición de equilibrio (por ejemplo hacia nuestra derecha) una cierta distancia y soltamos ¿qué es lo que ocurrirá?*

El cuerpo vibrará entre dos posiciones extremas simétricas según una trayectoria rectilínea. Podemos estudiar el movimiento, tomando la posición de equilibrio como origen, espacios positivos a la derecha y negativos a la izquierda de la misma. Designaremos la posición mediante la letra "x" (elongación), medida en m y cuyo valor absoluto coincide siempre con la distancia a que se encuentra el cuerpo del origen O. Las posiciones extremas, las representamos por A y por -A.

Cuando tirando del cuerpo hacia la derecha alargamos el muelle hasta  $x = A$  y soltamos, el cuerpo realiza un movimiento vibratorio oscilando continua y periódicamente entre las posiciones  $x = A$  y  $x = -A$  sometido a la fuerza elástica  $\vec{F}$  del muelle (el peso y la fuerza normal que le hace el plano se anulan entre sí). Sabemos que dicha fuerza será paralela al plano, tangente a la trayectoria y, según la ley de Hooke, directamente proporcional a la deformación del muelle (que en nuestro caso coincidirá con la elongación "x"), actuando siempre como si "intentara" llevar al cuerpo hacia la posición central O.

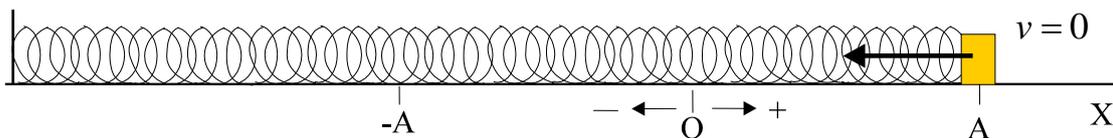


Si llamamos F a la componente escalar tangencial del vector fuerza elástica (al ser la trayectoria rectilínea la componente normal es nula), podemos escribir que:  $F = -k \cdot x$  (ley de Hooke) siendo k la constante elástica del muelle (expresando x con su signo).

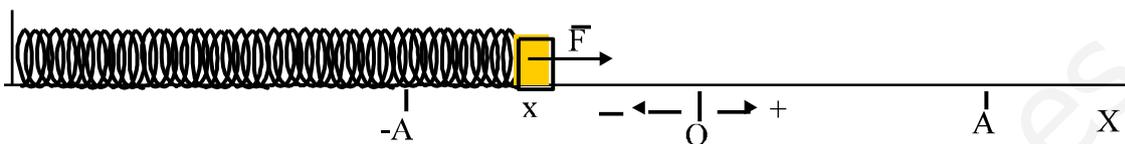
Cuando el cuerpo se encuentra en  $x = A$  su velocidad es momentáneamente 0, pero la fuerza que actúa sobre él es máxima y dirigida hacia la izquierda, de modo que el cuerpo comenzará inmediatamente a moverse hacia O cada vez con mayor velocidad (aunque el muelle le ejercerá cada vez menos fuerza ya que x va disminuyendo). De acuerdo con el criterio de signos escogido, en todo ese trayecto (entre A y O) x es positiva mientras que F será negativa.

$$F = -k \cdot A$$

<sup>1</sup> Para simplificar supondremos que el cuerpo se puede considerar como una masa puntual y que la fricción y la masa del muelle son despreciables, manteniendo estas aproximaciones a lo largo de todo el tema.



En el momento en que el cuerpo alcance la posición central, el muelle tendrá su longitud natural y no ejercerá ninguna fuerza sobre él. Sin embargo, la velocidad que lleva es máxima (y hacia la izquierda) de modo que continuará moviéndose, solo que en cuanto sobrepase O, el muelle empezará a ser comprimido por el cuerpo e inmediatamente se opondrá a ello con una fuerza que irá aumentando de valor (el cuerpo será frenado cada vez con más intensidad).



Así desde O hacia  $-A$  el cuerpo se moverá cada vez más lentamente hasta quedar momentáneamente en reposo justo en  $x = -A$ , punto en el que la fuerza tomará de nuevo su valor máximo y hará que el cuerpo comience a moverse hacia la derecha (cada vez más rápido) empujado por el muelle. En todo ese trayecto (entre  $-A$  y O) la componente tangencial  $F$  es positiva (al ser  $x$  negativa y  $F = -k \cdot x$ ). Si no hubiera ninguna fricción el proceso se repetiría continuamente.

Como hemos visto cuando  $x$  es positiva  $F$  es negativa (el vector  $\vec{F}$  va en el sentido escogido como negativo), mientras que cuando  $x$  es negativa,  $F$  resulta positiva (el vector  $\vec{F}$  va en el sentido escogido como positivo). El hecho de que la componente escalar tangencial del vector fuerza elástica y la elongación tengan signos contrarios se debe a que la fuerza elástica tiende siempre a llevar al objeto hacia la posición de equilibrio, por eso se le llama fuerza "recuperadora".

**A.48.** Obtener la aceleración tangencial o aceleración sobre la trayectoria a que estará sometido continuamente el objeto del ejemplo que estamos estudiando

El valor de la aceleración tangencial se podrá obtener aplicando la ecuación fundamental de la dinámica al objeto que vibra. En el ejemplo considerado la fuerza resultante sobre el cuerpo coincide con la fuerza elástica ejercida por el muelle luego:

$$F = -k \cdot x = m \cdot a_t \quad \text{y despejando} \quad \boxed{a_t = -\frac{k}{m} \cdot x} \quad \text{es decir:} \quad \boxed{a_t = -C \cdot x}$$

Así pues, la aceleración tangencial variable, cambia según el valor de  $x$  siendo en todo momento directamente proporcional a la elongación  $x$  y de signo contrario, pero esta es, precisamente, la definición de MAS.

Fijémonos que el MAS que se produce depende de la "A" que hayamos establecido y de las características mecánicas del sistema (en nuestro caso "k" y "m", que determinan el valor de C y, por tanto, de  $\omega$ , T y f).

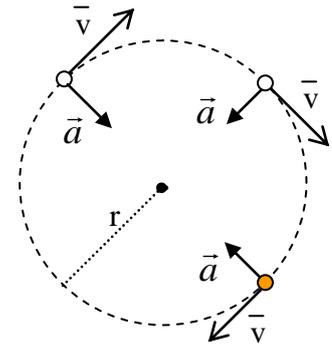
**A.49.** Al estudiar la cinemática del MAS, vimos que  $a_t = -\omega^2 \cdot x$  (siendo  $\omega = 2\pi/T$ ). Utilizad esta expresión junto con la anterior, para deducir a partir de ellas la relación que liga el periodo con que vibra un objeto sujeto a un muelle elástico con la masa de dicho objeto y la constante elástica del muelle. (Considerad que no hay rozamientos).

$$\text{Rdo. } T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}}$$

## 11. DINÁMICA DEL MOVIMIENTO CIRCULAR Y UNIFORME

Sabemos que si un cuerpo describe una trayectoria circular con rapidez constante (movimiento circular y uniforme), su velocidad esta cambiando continuamente de dirección y, por tanto debe existir aceleración. Como  $v = \text{cte}$ , la aceleración sobre la trayectoria será nula ( $a_t = 0$ ), y sólo habrá aceleración normal  $a_n = v^2/r$ .

Así pues, en el movimiento circular y uniforme (MCU) hay aceleración porque la velocidad cambia (de dirección) pero esa aceleración está dirigida siempre hacia el centro de la circunferencia y su módulo ( $v^2/r$ ) es constante porque tanto la rapidez  $v$  como el radio  $r$  lo son.



**A. 50.** ¿A qué puede deberse ese tipo de movimiento? Es decir: ¿Qué es lo que hace falta para que un cuerpo se desplace alrededor de un punto con movimiento circular y uniforme?

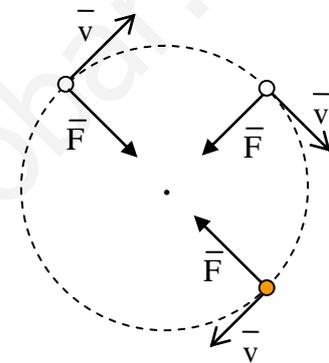
De acuerdo con la ecuación fundamental de la dinámica todo cuerpo acelerado debe estar sometido a la acción de una fuerza resultante, dada por  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , que expresada en componentes intrínsecas conduce a las ecuaciones escalares:

$$F_{\text{res } t} = m \cdot a_t; \quad F_{\text{res } n} = m \cdot a_n$$

Como, en este caso,  $a_t$  vale 0 y  $a_n$  es constante y de valor  $v^2/r$ , podemos escribir que:

$$F_{\text{res } t} = 0; \quad F_{\text{res } n} = mv^2/r$$

Vemos pues que deberá actuar una fuerza resultante, que en todo instante esté dirigida hacia el centro de la trayectoria y cuyo módulo coincidirá con el valor numérico de su única componente (la componente normal  $F_{\text{res } n}$ ), es decir:  $mv^2/r$ . A este tipo de fuerza se les denomina, habitualmente, fuerza **centrípeta**, porque se dirige siempre hacia el centro



**A.51.** ¿Es la fuerza centrípeta un nuevo tipo de interacción?

De ninguna manera se puede considerar como una nueva forma de interacción. El calificativo de centrípeta no da ninguna información respecto a la naturaleza de la fuerza implicada. Así, por ejemplo, puede deberse (como acabamos de ver) a la tensión de un hilo, a la acción de un resorte (fuerza elástica), al rozamiento (como cuando un vehículo toma una curva circular con rapidez constante) o a la acción de la gravedad (como en el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra). El propio Newton era consciente de ello cuando en 1687 escribió:

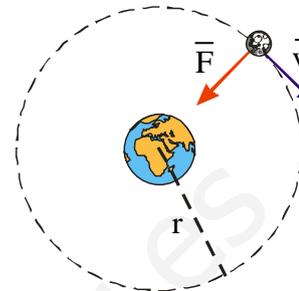
“De este tipo (*centrípeta*) es la fuerza de la gravedad por la cual los planetas son desviados continuamente del movimiento rectilíneo que, de otra manera, seguirían y les hace recorrer órbitas circulares. Una piedra atada a una honda tiende” a escapar ... a la fuerza que se opone a ello y por la cual la honda la retiene la llamo **centrípeta**. Sin una fuerza de este tipo la luna no podría ser mantenida en su órbita...”

Una forma de comprobar la validez de las leyes de Newton es utilizarlas para predecir el valor de alguna magnitud que se conozca experimentalmente. Este es el caso, por ejemplo, del periodo de rotación de la Luna alrededor de la Tierra, que es de 27'3 días y se conoce desde mucho antes que Newton elaborase sus leyes.

**A.52.** La Luna describe aproximadamente un movimiento circular y uniforme alrededor de la Tierra. La distancia media entre los centros de ambos astros es de 384 000 km, el radio medio de la Tierra 6400 km y la intensidad del campo gravitatorio terrestre en la superficie vale  $g_0 = 9.8$  N/kg. Con estos datos obtened el periodo de rotación de la Luna en torno a la Tierra (en días).

Al tratarse de un MCU la ecuación que rige el movimiento será:  $F_n = m \cdot a_n = m \cdot v^2/r$

Es decir, la fuerza necesaria para que la Luna, de masa “m”, se mantenga en su órbita está relacionada con su velocidad “v”. Pero la velocidad está relacionada a su vez con el periodo T, ya que si la Luna describe una circunferencia de radio r respecto del centro de la Tierra, con rapidez constante, tardará en recorrer la longitud de esa circunferencia un tiempo:  $T = 2\pi r/v$

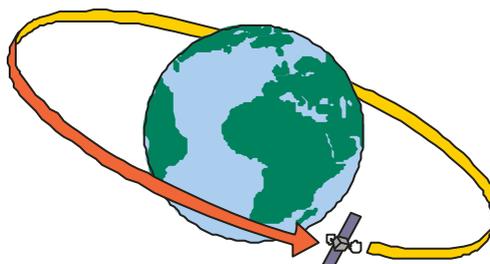
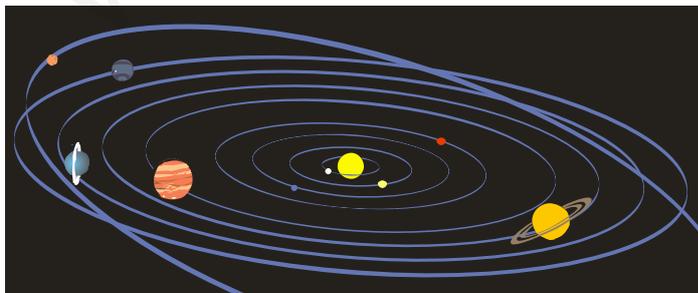


$$\text{Tendremos pues que } F_n = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = m \cdot \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Por otra parte según la gravitación universal de Newton, sabemos que el valor de la fuerza normal  $F_n$  será la fuerza gravitatoria que sobre la Luna ejerce la Tierra:  $F = G \frac{M_T \cdot m}{r^2}$ , donde  $M_T$  es la masa de la Tierra cuyo valor desconocemos, pero sabemos que:  $G \cdot M_T = g_0 \cdot R_T^2$  (magnitudes conocidas en la época de Newton) de modo que sustituyendo obtenemos:

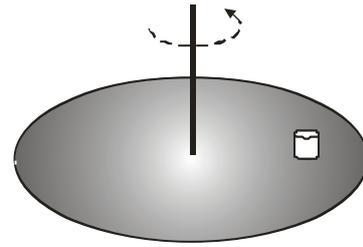
$$\frac{g_0 \cdot R_T^2 \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{4\pi^2 r}{T^2} \text{ de donde: } T = \frac{2\pi}{R_T} \cdot \sqrt{\frac{r^3}{g_0}} \text{ y sustituyendo: } T=2359846.166 \text{ s} = 27.3 \text{ días.}$$

El resultado además de ser dimensionalmente homogéneo, nos informa de que el cuadrado del periodo de revolución de la Luna es directamente proporcional al cubo del radio medio de su órbita. Mediante un procedimiento similar se puede llegar al mismo resultado para el periodo de cualquier planeta en su órbita alrededor del Sol. Análogamente se calculó, por ejemplo, el periodo del cometa Halley, que apareció justo en el momento previsto en 1986 y que volverá a hacerlo en el 2061. Así pues: el cociente entre el cuadrado del periodo de revolución de un planeta en torno al Sol y el cubo del radio medio de su órbita es el mismo para cualquier planeta. Esta es precisamente la tercera de las leyes de Kepler y se aplica igualmente a muchos satélites que con fines comerciales o científicos se sitúan en órbita alrededor de la Tierra.



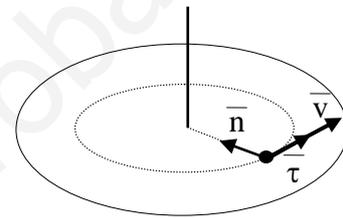
## 2. Dinámica

**A.53.** Sobre una plataforma plana, capaz de girar en torno a un eje perpendicular, se deposita un cuerpo que presenta con la misma un coeficiente de rozamiento de 0'8. Encontrad la máxima distancia a que puede encontrarse el cuerpo del eje de giro, sin ser lanzado hacia el exterior, si hacemos girar la plataforma a razón de una vuelta por segundo.

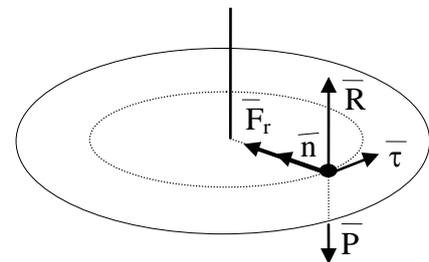


Si resolviéramos de forma experimental este ejercicio, veríamos que existe una distancia máxima al eje tal que para valores superiores a la misma, el cuerpo deslizaría por la superficie desplazándose hacia el exterior, mientras que para valores inferiores, el cuerpo permanece en el lugar en que lo dejemos, describiendo, al igual que cualquier punto del disco, un movimiento circular uniforme. Para que esto último suceda, será necesario que el cuerpo se encuentre sometido a la acción de una fuerza resultante según la dirección del radio y dirigida hacia el centro de la plataforma, es decir, en el mismo sentido que el vector unitario  $\vec{n}$ . ¿Quién le ejerce esa fuerza?

Consideremos el objeto en un punto cualquiera de su trayectoria con un movimiento circular y uniforme alrededor del eje de giro. En dicho punto tendrá una velocidad  $\vec{v}$  tangente a la trayectoria. Si no continúa moviéndose con dicha velocidad en la misma dirección y sentido, es porque ha de haber una fuerza resultante perpendicular a la trayectoria que obligue a cambiar constantemente la dirección del vector velocidad.



Las fuerzas que actúan sobre el objeto cuando está describiendo un movimiento circular uniforme solidariamente a la plataforma, son el peso  $\vec{P}$ , la reacción del plano  $\vec{R}$  y la fuerza de rozamiento con la superficie  $\vec{F}_r$  (si no hubiese rozamiento sería imposible que el objeto pudiera girar estando sobre la plataforma)  $\vec{F}_{res} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}_r$ . Por otra parte, al tratarse de un movimiento circular uniforme, la fuerza resultante deberá de tener la dirección y sentido de  $\vec{n}$ .



Expresando en componentes intrínsecas la ecuación fundamental de la dinámica:

$$\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a} = 0 \cdot \vec{\tau} + m a_n \cdot \vec{n}, \text{ y sustituyendo nos queda: } \vec{F}_{res} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}_r = m a_n \cdot \vec{n}.$$

Si analizamos la última ecuación, nos daremos cuenta de que la única posibilidad de que la fuerza resultante tenga la misma dirección y sentido que  $\vec{n}$ , es que  $\vec{P} + \vec{R} = 0$ , con lo que tendremos:

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_r = m a_n \cdot \vec{n}.$$

Todo sucede, pues, como si la única fuerza actuante fuera la de rozamiento que, además, está dirigida hacia el centro de la circunferencia descrita, de forma que si trabajamos escalarmente con la componente normal:

$$F_{res\ n} = F_r = m \cdot a_n = m \cdot v^2 / r \text{ y como } v = \omega \cdot r \text{ nos queda que } F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

La expresión obtenida nos dice que cuanto mayor sea  $r$  (a igualdad de los restantes factores) mayor será la fuerza de rozamiento necesaria para que el objeto siga girando sobre la plataforma alrededor del eje con movimiento circular y uniforme.

*¿Cómo podríamos calcular el máximo valor de  $r$  posible?*

El mayor radio posible será aquel que corresponda al valor máximo que puede tomar la fuerza de rozamiento entre el cuerpo y la plataforma. Dicho valor máximo viene dado por:

$F_{r \max} = \mu \cdot N = \mu \cdot R = \mu \cdot P = \mu \cdot mg$ . Sustituyendo en  $F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r$  podemos escribir que:

$$\mu \cdot mg = m \cdot \omega^2 \cdot r_{\max} \text{ y despejando: } r_{\max} = \mu \cdot g / \omega^2 = 0,2 \text{ m}$$

Podemos analizar la expresión literal del resultado comprobando que es dimensionalmente homogénea ( $L = L$ ) y que contempla algunos casos evidentes, como por ejemplo, que cuanto mayor sea el coeficiente de rozamiento mayor será el radio máximo y que al aumentar la rapidez angular de la plataforma disminuiría el radio máximo. En este último caso, es posible darse cuenta además de que al estar  $\omega$  elevada al cuadrado, influye más que los restantes factores, de forma que cuando  $\omega$  se duplica el radio máximo no se hace la mitad sino cuatro veces más pequeño.

## RECAPITULACIÓN

Al comienzo del tema nos hemos propuesto encontrar una explicación del porqué el movimiento de un cuerpo se realiza de una forma determinada, que fuera válida para cualquier cuerpo. Para encontrar una respuesta común, hemos tenido que introducir una concepción de fuerza y de su relación con el movimiento que contradice muchas ideas intuitivas.

*Construid un esquema o resumen en el que se recojan las ideas alternativas que se han cuestionado a lo largo de este tema y compararlas con los conceptos científicos correspondientes.*

Entre otras, podemos referirnos a las siguientes:

- ✓ La fuerza como la causa de la velocidad que lleva un cuerpo, lo que lleva a pensar que, por ejemplo: los cuerpos siempre se mueven en la misma dirección y sentido que la fuerza resultante que actúa sobre ellos o que si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza deberá de estar en reposo, o que si la velocidad de un cuerpo en un instante dado es nula la fuerza que actúa sobre dicho cuerpo también debe serlo.
- ✓ Pensar que la fuerza es algo que poseen o que tienen los objetos
- ✓ Pensar que las fuerzas de acción y reacción, por ser iguales y de sentidos contrarios deben anularse entre ellas.
- ✓ Confundir la fuerza peso de un cuerpo con la fuerza que dicho cuerpo hace sobre la superficie en la que se encuentra.
- ✓ Creer que los cuerpos tienden a estar en reposo o que el reposo es el estado “natural” de los cuerpos, diferente que el movimiento rectilíneo y uniforme.
- ✓ Pensar que hay cuerpos que pueden acelerarse a sí mismos y otros que no.
- ✓ Pensar que el movimiento de los astros tiene explicaciones diferentes a los movimientos de los objetos terrestres. Por ejemplo, creer que en el vacío no hay gravedad o que la Luna se mueve en círculos alrededor de la Tierra cambiando ella sola la dirección de su movimiento.

## 2. Dinámica

La superación de las ideas anteriores y otras similares, nos ha llevado a lo largo del tema a establecer que el movimiento rectilíneo y uniforme es un estado de la materia tan natural como el reposo, a que la fuerza no es la causa de la velocidad sino del cambio de velocidad y a admitir la idea de interacción a distancia (fuerza de la gravedad) entre dos cuerpos cualesquiera.

Hemos tenido ocasión también de ver la enorme importancia de la ley de Newton de la Gravitación Universal, como algo que contribuyó decisivamente a superar la barrera que durante años separó el mundo terrestre del celeste.

Finalmente, hemos introducido nuevas magnitudes como la cantidad de movimiento y analizado la conservación de la cantidad de movimiento como un principio de gran importancia por su carácter general. Así mismo hemos aplicado las ideas introducidas al estudio de algunas situaciones y problemas de interés, en los que se plantea la interpretación o el control del movimiento de distintos cuerpos (en presencia de rozamiento, unidos a cuerdas y sujetos a resortes elásticos).

Naturalmente nos han surgido también nuevas preguntas, como por ejemplo: ¿Cómo se produce la interacción a distancia? Es decir, ¿Cuál es el mecanismo físico por el que dos objetos situados a cierta distancia se atraen gravitatoriamente? O ¿Qué ocurre cuando dejamos de considerar a los cuerpos como objetos puntuales o a las cuerdas y las poleas como objetos sin masa?, que serán contestadas en cursos superiores.

Para terminar, os proponemos un cambio de papeles: En lugar de ser examinados vais a ser vosotros quienes tendréis que detectar y evaluar los errores cometidos por algunos dibujantes y periodistas.

*Aplicando los conocimientos de dinámica que habéis aprendido, realizad un análisis crítico de lo que sucede en las viñetas siguientes.*



## 2. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE DINÁMICA

1. Simplicio tiene mucho sentido común, pero a veces dice las cosas sin pensarlas demasiado. Entre otras cosas afirma que:

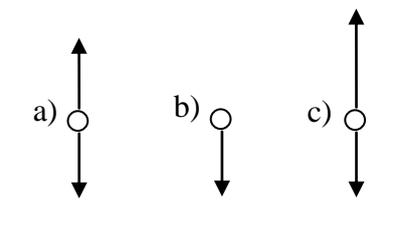
- Cuando se lanza un cuerpo por una superficie horizontal y plana, sobre él actúan dos fuerzas: la que se le dio al lanzarlo y la del rozamiento, de manera que dicho cuerpo se moverá mientras la primera sea mayor que la segunda.
- En un combate de lucha japonesa el vencedor consigue sacar a su contrincante fuera del círculo porque le hace una fuerza mayor que la fuerza con que el otro le empuja a él.
- Cuando se sujeta un muelle del techo y se cuelga un objeto del mismo, la fuerza que hace el objeto sobre el muelle es el peso del objeto.
- La luna gira alrededor de la Tierra y es atraída por ella mediante la fuerza gravitatoria, pero no cae sobre nosotros porque sobre ella actúa también otra fuerza hacia fuera (centrífuga) que equilibra a la fuerza de atracción de forma que la fuerza resultante es nula.
- Si en un instante dado la velocidad de un cuerpo es cero, la fuerza que actuará sobre él en ese mismo instante también tendrá que valer cero.

Utilizad toda la física que sabéis para intentar convencer a Simplicio de que está equivocado en todas y cada una de esas afirmaciones.

2. Suponed que os encontráis en reposo a la orilla de una carretera y podéis ver lo que ocurre dentro de un autobús que circula por ella con movimiento rectilíneo y uniforme. Describid con el mayor detalle posible, qué le ocurrirá a un pasajero situado de pie en el centro del vehículo y sin ninguna sujeción cuando:

- El autobús acelere aumentando el módulo de su velocidad en un tramo recto.
- El autobús tome una curva circular sin variar la rapidez con que se mueve.

3. Se lanza un objeto verticalmente desde el suelo hacia arriba. Considerando nulo el rozamiento con el aire, señalad con una cruz cual de los siguientes esquemas os parece que representa correctamente las fuerzas que actúan sobre el objeto que sube, poco antes de que alcance su máxima altura.



4. Supongamos que toda la atmósfera que rodea a la Tierra desapareciese totalmente, quedando el planeta rodeado por el vacío. En estas condiciones puede afirmarse que el peso de los cuerpos situados en su superficie: (Señalad la respuesta que os parezca correcta).

- Disminuiría
- Se haría cero
- Aumentaría
- No cambiaría

5. Si la fuerza con que la Tierra atrae a una bola de plomo de 200 g es el doble de grande de la fuerza con que atrae a otra bola de plomo de 100 g. ¿Por qué cuando se dejan caer a la vez, las dos desde la misma altura, no se observa que la de doble peso adelante a la otra?

6. Una bola de acero se mueve por una superficie horizontal cuando choca frontalmente contra otra bola de la mitad de masa que ella y que está en reposo. Suponiendo despreciable la fricción y sabiendo que después del choque ambas se mueven en el mismo sentido, haced **tres dibujos** en los que se representen mediante vectores **todas** las fuerzas que actúan sobre cada bola, poco antes del choque, durante el choque y poco después del choque.

## 2. Dinámica

7. Analizad las siguientes proposiciones en las que, al parecer, se contradice el principio de acción y reacción.

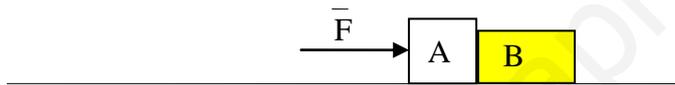
a) Es evidente que la Tierra atrae a los cuerpos pero no se observa que los cuerpos atraigan a la Tierra. Así, por ejemplo, vemos como un cuerpo cae hacia el suelo atraída gravitatoriamente por la Tierra, pero no parece que el suelo se mueva para nada hacia dicho cuerpo.



b) Si el principio de acción y reacción es cierto no se explica, por ejemplo, que un carro pueda avanzar ya que la fuerza con que el caballo estira del carro tendrá que ser igual y de sentido contrario que la fuerza con que el carro estira del caballo, con lo que el caballo no podría moverse.

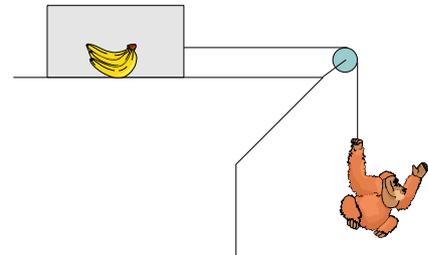


8. En la figura adjunta se muestran dos cuerpos que se encuentran sobre una superficie plana sin rozamiento. Ambos se hallan inicialmente en reposo el uno junto al otro. Se ejerce entonces una fuerza  $\vec{F}$  sobre el objeto A tal y como se muestra en la figura. Explicad a continuación cuál de las siguientes propuestas es correcta:



- a) La fuerza que actuará sobre B será menor que F.
- b) La fuerza que actuará sobre B tendrá el mismo valor que F.
- c) La fuerza que actuará sobre B será mayor que F.

9. Una caja de 40 kg se encuentra en reposo sobre una superficie horizontal y sin rozamiento, tal y como se indica en la figura adjunta, cuando un mono salta y queda colgado del extremo libre de la cuerda. Suponiendo que la masa de la cuerda sea despreciable, explicad cuál de las siguientes proposiciones es correcta:



- a) Para que la caja comience a moverse la masa del mono ha de ser igual a 40 kg.
- b) Para que la caja empiece a moverse la masa del mono ha de superar los 40 kg.
- c) Otra respuesta (especificar en su caso).

10. En un ascensor hay una persona de 80 kg de masa. Determinad el módulo de la fuerza que la persona ejercerá sobre el suelo, cuando el ascensor:

- a) Ascienda cada vez más rápido, con una aceleración de  $2 \text{ m/s}^2$  (expresada en valor absoluto).
- b) Baje cada vez más rápido, con una aceleración de  $2 \text{ m/s}^2$  (expresada en valor absoluto).
- c) Ascienda con rapidez constante de  $3 \text{ m/s}$  (expresada en valor absoluto).
- d) Caiga libremente al romperse el cable.



Rdo. a) 960 N; b) 640 N; c) 800 N; d) 0

**11.** Una patinadora de 60 kg de masa y un patinador de 70 kg que se deslizan en la misma dirección y sentidos contrarios con rapidez de 8 m/s y 10 m/s respectivamente, chocan frontalmente permaneciendo unidos tras la colisión. Suponiendo el rozamiento despreciable, determinad la rapidez con que se desplazarán después del choque. Rdo. 1'69 m/s



**12.** Dos vehículos 1 (de 600 kg de masa) y 2 (de 800 kg de masa) chocan cuando se desplazaban a 20 m/s y 10 m/s respectivamente en direcciones perpendiculares. Sabiendo que tras el choque permanecen unidos, obtened su velocidad (módulo) tras la colisión. Rdo. 10'3 m/s

**13.** Una partícula de 0'2 kg de masa, que se desplaza a 0'4 m/s, choca con otra de 0'3 kg que se encuentra en reposo. Después de la colisión, la primera se mueve a 0'2 m/s en una dirección y sentido que forma un ángulo de  $40^\circ$  con la inicial. Obtened la velocidad de la segunda partícula. Rdo. La segunda partícula sale con una velocidad cuyo módulo vale 0'19 m/s y formando un ángulo de  $27'9^\circ$  con la dirección inicial que llevaba la primera antes del choque.

**14.** Hallad cuántas veces es mayor el peso de una estudiante de 55 kg que la fuerza de atracción gravitatoria existente entre ella y un compañero de 65 kg que se encuentra a 50 cm de distancia.

Datos:  $g_0 = 9'8 \text{ N/kg}$ ;  $G = 6'67 \cdot 10^{-11} \text{ U.I.}$  Rdo. Unas 565 millones de veces mayor.

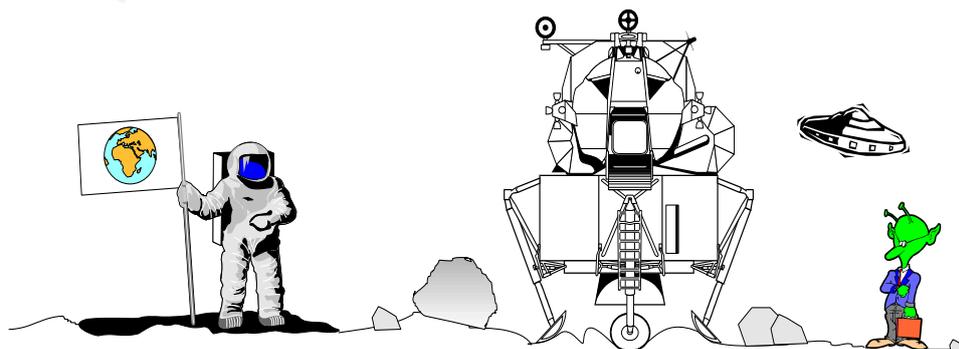


**15.** Admitiendo que  $g_0 \approx 10 \text{ N/kg}$  y el radio terrestre  $R_T = 6400 \text{ km}$ , calculad cuánto pesará una persona de 80 kg en los siguientes puntos:

- Sobre la superficie terrestre al nivel del mar.
- En un avión que vuela a 10 km de altura.
- En una estación espacial a 500 km sobre la superficie terrestre.

¿A qué altura aproximada sobre el suelo deberá de subir si quiere pesar 10 veces menos que en la superficie terrestre? Rdo. a) 800 N; b) 797'5 N; c) 787'7 N. Debería ascender a 13 838'6 km de altura.

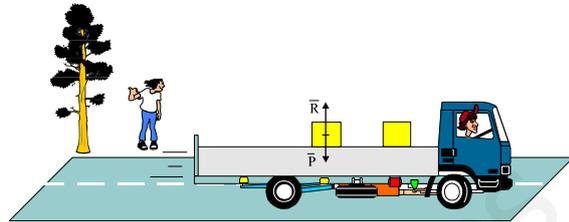
**16.** Calculad el peso de una persona de 100 Kg en la superficie de la Luna sabiendo que la masa de nuestro satélite es 81 veces menor que la de la Tierra, su radio 3'6 veces menor y que la intensidad de la gravedad en la superficie terrestre es de  $9'8 \text{ N/kg}$ . Rdo.  $P_L = 156'8 \text{ N}$



## 2. Dinámica

17. En un almacén hay que instalar una cinta transportadora para llevar cajas (con rapidez constante). Al leer el proyecto comprobáis que en un tramo del recorrido la cinta tiene una pendiente de  $56^{\circ}3'$ . Buscando en la bibliografía el valor del coeficiente de rozamiento correspondiente al material de las cajas y la cinta encontráis que vale  $\mu = 1^{\circ}3'$ . ¿Recomendarías la realización de dicho proyecto? Rdo. No, porque, la componente tangencial de la fuerza peso de cualquier caja de masa  $m$  valdría:  $8^{\circ}3' \cdot m$ , con lo que superaría  $F_{r_{\max}}$  ( $7^{\circ}2' \cdot m$ ) y la caja deslizaría por la pendiente hacia abajo.

18. Un camión va con cajas llenas de huevos. El coeficiente de rozamiento entre ellas y el suelo del camión es  $0^{\circ}3'$ . Suponiendo que el camión se mueve a  $72 \text{ km/h}$ , calculad la distancia mínima en que puede detenerse, frenando de manera uniforme, para que las cajas no deslicen (tomad  $g = 10 \text{ N/kg}$ ). Rdo.  $66^{\circ}7 \text{ m}$



19. Un esquiador inicia el descenso por una pendiente de  $45^{\circ}$  siguiendo la línea de máxima pendiente. Suponiendo que el coeficiente de rozamiento sea  $\mu = 0^{\circ}15$ , determinad qué rapidez (en  $\text{km/h}$ ) llevará a los  $100 \text{ m}$  de recorrido. Rdo.  $v = 123^{\circ}6 \text{ km/h}$ .

20. Si dejamos en libertad un cuerpo de  $4 \text{ kg}$  de masa sobre un plano inclinado de  $30^{\circ}$  y a una altura de  $5 \text{ m}$ , llega a la base del plano con una rapidez de  $8 \text{ m/s}$ . Determinad:

a) El coeficiente de fricción entre cuerpo y plano.

b) El módulo de la fuerza  $\vec{F}$  que debemos hacer, en dirección perpendicular al plano para que llegue a la base con una rapidez de  $2 \text{ m/s}$ .

Rdo. a)  $\mu = 0^{\circ}2$ ; b)  $|\vec{F}| = 60^{\circ}1 \text{ N}$

21. Un cuerpo de  $2 \text{ kg}$  de masa se lanza con una rapidez de  $6 \text{ m/s}$  desde la base de un plano inclinado de  $5 \text{ m}$  de longitud y  $3 \text{ m}$  de altura. Sabiendo que el coeficiente de fricción es  $0^{\circ}6$ , se pide:

a) Altura máxima que alcanzará

b) Razonad si bajará o no.

c) En caso de que baje, calculad con qué rapidez llegaría a la base.

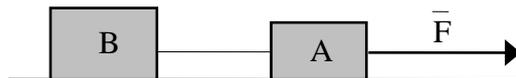
Rdo. a)  $h_{\max} = 1 \text{ m}$ ; b) Sí vuelve a bajar, porque la componente tangencial del peso supera al valor máximo de la fuerza de rozamiento; c)  $v = 2 \text{ m/s}$  (valor absoluto)

22. Una persona de  $80 \text{ kg}$  tiene que bajar al suelo desde un tercer piso situado a  $18 \text{ m}$  de altura, porque hay un incendio, pero sólo dispone de una cuerda que, como máximo puede soportar una fuerza de  $700 \text{ N}$ . Calculad la aceleración mínima con que podrá bajar por la cuerda (sin que se rompa) y con qué rapidez llegaría al suelo. Comparad esa rapidez con la que llevaría en caso de haberse dejado caer libremente. Rdo. La aceleración mínima sería de  $1^{\circ}05 \text{ m/s}^2$ . Con esa aceleración su rapidez al llegar al suelo sería de  $6^{\circ}15 \text{ m/s}$ , mientras que si cayese libremente sería de  $18^{\circ}78 \text{ m/s}$ .

23. Un péndulo de  $200 \text{ g}$  de masa cuelga suspendido del techo de un vehículo. Sabiendo que forma un ángulo de  $20^{\circ}$  con la vertical, determinad la aceleración del vehículo y la tensión del hilo. Rdo. La aceleración es de  $a = 3^{\circ}6 \text{ m/s}^2$  y la tensión del hilo para esa aceleración es de  $T = 2^{\circ}1 \text{ N}$ .

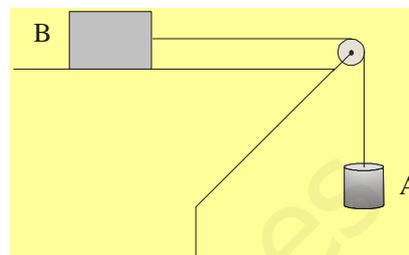
24. Se quiere proyectar un ascensor cuya cabina tiene una masa de  $600 \text{ kg}$ . Como sabéis el ascensor sufre una cierta aceleración cada vez que abandona su estado de reposo hasta que se mueve con velocidad constante. En este caso, la máxima aceleración prevista es de  $0^{\circ}5 \text{ m/s}^2$ . Suponiendo que la carga nunca supere los  $400 \text{ kg}$  ¿podría utilizarse para aguantar la cabina un cable que aguantase una tensión máxima de  $10.000 \text{ N}$ ? Rdo. No, porque la tensión mayor prevista sería  $T = 10.300 \text{ N}$  (superior a la tensión máxima que puede aguantar el cable).

25. Calculad la aceleración del sistema de la figura y la tensión de la cuerda, cuando el valor de  $F$  sea de 400 N. Coeficiente de fricción con el suelo  $\mu = 0,4$ ;  $m_A = 20$  kg,  $m_B = 30$  kg,  $g = 10$  N/kg.



Rdo. El valor de la aceleración es de  $4 \text{ m/s}^2$  y la tensión de la cuerda 240 N.

26. En el sistema de la figura adjunta las masas de los bloques son  $m_A = 2$  kg y  $m_B = 6$  kg. Considerando las masas de la polea y de la cuerda despreciables, se pide:

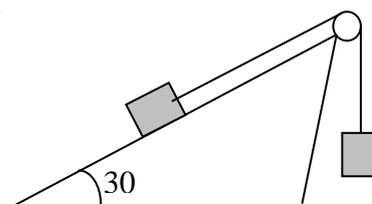


- Aceleración con que se moverá el sistema y tensión de la cuerda, suponiendo rozamiento nulo.
- ¿Que le ocurriría a la fuerza que tira de B si el peso de A se duplicase?

c) La aceleración, suponiendo que entre el bloque B y la superficie la fricción no es despreciable y el coeficiente de rozamiento vale  $\mu = 0,2$ .

Rdo. a) Una aceleración de  $2,45 \text{ m/s}^2$  y una tensión de 14,7 N; b) Aumentaría a 23,5 N (que no es el doble que antes); c) En este caso la aceleración sería de  $0,98 \text{ m/s}^2$ .

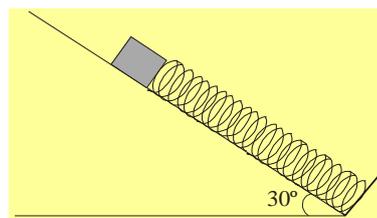
27. Dado el dispositivo esquematizado en la figura adjunta, sabiendo que el coeficiente de fricción es 0,15 y que cada bloque tiene una masa que vale 20 kg, determinad el tiempo necesario para que el sistema se desplace 1m, partiendo de una situación inicial de reposo. Rdo.  $t = 1,04$  s.



28. La máquina de Atwood sirve para determinar la intensidad del campo gravitatorio. Consiste en dos cuerpos que cuelgan de los extremos de una cuerda inextensible que pasa por la garganta de una polea. En una máquina de Atwood las masas de los cuerpos utilizados fueron de 3 kg y de 4 kg, comprobándose que la aceleración con que se movieron fue de  $1,4 \text{ m/s}^2$ . Determinad la intensidad del campo gravitatorio y la tensión de la cuerda. Rdo.  $g = 9,8$  N/kg,  $T = 33,6$  N.

29. Como ya sabéis para poner en órbita un módulo espacial, se puede acoplar éste a un cohete que, durante un primer tramo, se dirige verticalmente hacia arriba. Con objeto de medir la máxima aceleración que se experimenta durante el lanzamiento, un astronauta utiliza un resorte elástico ( $K = 78,4$  N/m) y cuelga del mismo un objeto de 200 g, observando que el mayor alargamiento del resorte durante el ascenso es de 10 cm. ¿Cuál fue la mayor aceleración que experimentó? Rdo. La mayor aceleración alcanzó un valor de  $29,4 \text{ m/s}^2$  (unas 3 veces la de la gravedad).

30. El cuerpo de la figura tiene una masa de 5 kg. Sabiendo que la constante elástica del resorte vale  $K = 400$  N/m, determinad la deformación del muelle en el equilibrio. (Se supone que no hay rozamiento).



Rdo. La deformación del muelle en el equilibrio (fuerza resultante sobre el bloque 0) corresponde a  $0,06125$  m.

## 2. Dinámica

**31.** En una experiencia en el laboratorio con un muelle helicoidal de acero sujeto del techo por uno de sus extremos, se han ido colgando diferentes pesas de su extremo libre (acompañándolas con la mano hasta quedar en reposo), obteniéndose en cada caso el alargamiento del muelle (respecto de su longitud natural inicial sin pesas). Los resultados experimentales se hallan recogidos en la siguiente tabla; completadla y representad el gráfico de la fuerza elástica del muelle (en N) en función de su **alargamiento** (en m), determinando a partir de dicho gráfico el valor de la constante elástica del muelle. (Para simplificar tomad  $g = 10 \text{ N/kg}$ ).

Masa que cuelga (g)	Fuerza elástica (N)	Longitud del muelle (cm)	Alargamiento (m)
0	0	67'20	0
50'00	0'5	70'30	$3'1 \cdot 10^{-3}$
100'00		73'65	
150'00		76'80	
200'00		80'45	
250'00		83'55	
300'00		86'70	
350'00		90'20	
400'00		93'50	
450'00		96'70	

**32.** Un muelle de 1 m de longitud y constante elástica  $k = 10^3 \text{ N/m}$  tiene un extremo fijo y en el otro una masa de 1 Kg, encontrándose ambos sobre un plano horizontal y sin rozamiento. Si se hace girar la masa con rapidez angular constante de 10 rad/s ¿cuál será la deformación que sufrirá el muelle? Rdo. El alargamiento experimentado por el muelle será de 1/9 m.

**33.** Un resorte de masa despreciable se alarga 0'1 m cuando se le aplica una fuerza de 2'5 N. Se fija un extremo en una pared y se sujeta en el otro una masa de 100 g, colocando todo sobre una superficie horizontal. A continuación, se estira de la masa hasta que el muelle se alarga 20 cm respecto de su longitud natural y entonces se la suelta dejándola oscilar libremente. Suponiendo que no haya ningún rozamiento, se pide:

- Justificar el tipo de movimiento que tendría la masa
- Hallad los valores máximos de la rapidez y de la fuerza que ejerce el resorte sobre la masa
- ¿Qué les ocurriría a los valores máximos anteriores si se duplica la masa?

Rdo. b)  $v_{\max} = 3'16 \text{ m/s}$ ,  $F_{\max} = 5 \text{ N}$ . c)  $v_{\max}$  disminuiría, pero  $F_{\max}$  no cambiaría

**33.** Sobre un disco plano capaz de girar en torno a su centro, se coloca un cuerpo de 5 kg de masa, sujetándolo mediante una cuerda de 0'5 m al centro de giro. Sabiendo que el coeficiente de rozamiento entre dicho cuerpo y el disco es de 0'8, determinad a partir de qué rapidez angular de giro del disco se romperá la cuerda si ésta soporta como máximo una tensión de 60 N. Rdo.  $\omega > 6'3 \text{ rad/s}$

**34.** Determinad el radio mínimo que debería tener una curva sin peralte para que un vehículo de 1000 kg pueda tomarla sin derrapar con una rapidez de 90 km/h suponiendo que el coeficiente de rozamiento por deslizamiento de los neumáticos con la carretera sea de 0'64. A continuación, para el mismo vehículo y la misma velocidad, ¿qué ángulo de peralte sería necesario para describir una curva de 100 m de radio si no hubiese rozamiento? Rdo.  $99'6 \text{ m}$ ;  $32'53^\circ$ .

**35.** Un astronauta de 75 kg sale de la estación espacial a efectuar una reparación durante dos horas. Sabiendo que dicha estación se encuentra a 400 km de altura sobre el suelo, que el radio medio de la Tierra es  $R_T = 6400 \text{ km}$  y que la intensidad del campo gravitatorio terrestre en la superficie vale  $g_0 = 9'8 \text{ N/kg}$ , se pide:

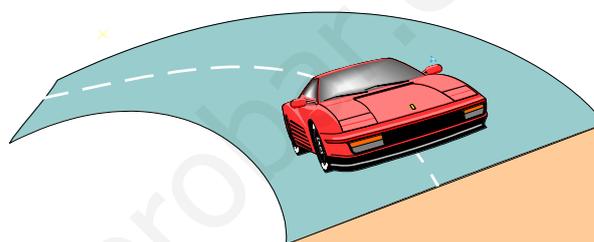
- Número de vueltas alrededor del centro de la Tierra que habrá dado el astronauta en ese tiempo y rapidez (en km/h) a la que lo ha hecho.
- Peso del astronauta a esa altura y explicad por qué no se estrella contra el suelo.

Rdo. a) Habrá dado 1'3 vueltas desplazándose a 27 659'2 km/h; b) Pesará 651'1 N y no se estrella contra el suelo debido a que se está moviendo con una cierta velocidad en dirección tangente a la órbita. Si, de repente, desapareciese la fuerza de la gravedad, seguiría con movimiento rectilíneo y uniforme en la dirección que se estuviera moviendo en ese momento. La fuerza de la gravedad terrestre se lo impide, manteniéndolo "amarrado".

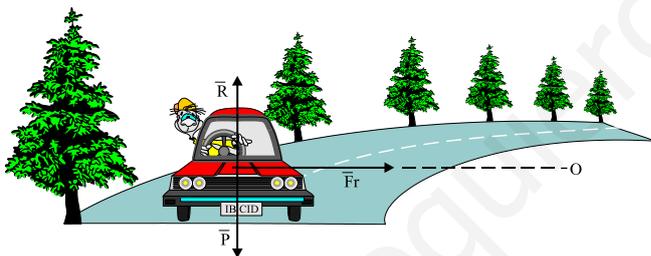
**36.** Calculad el módulo de la cantidad de movimiento angular de la Luna respecto de la Tierra (suponiendo un MCU) y explicad por qué no cambia. Datos: masa de la Luna:  $7'4 \cdot 10^{22}$  kg, distancia desde el centro de la Tierra al de la Luna: 384000 km, rapidez lineal de la Luna respecto de la Tierra: 1 km/s. Rdo.

**37.** La Tierra en su trayectoria alrededor del Sol, pasa por dos puntos especiales: el perihelio, donde se encuentra más próxima al Sol (147 millones de kilómetros), y el afelio o punto más alejado (152 millones de kilómetros) donde su rapidez es de 29'31 km/s. Realizad un esquema representativo y calculad la rapidez lineal de la Tierra en el perihelio.

**38.** Un vehículo de 2000 Kg toma una curva de 20 m de radio y  $30^\circ$  de peralte. Suponiendo que el rozamiento sea despreciable, determinad la única rapidez con que podría tomar la curva (con dicho radio). Razonad lo que sucedería si el vehículo tomase la curva con otra rapidez.

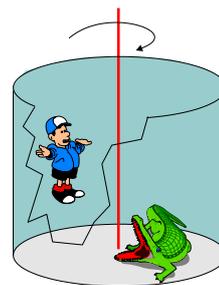


Rdo. La única rapidez posible es de  $10'8$  m/s. Si tomase la curva con una rapidez mayor se saldría hacia fuera de la curva (aumentaría el radio  $r$ ) y viceversa.



**39.** Determinad el ángulo mínimo con que habría que peraltar una curva de 25 m de radio para que un vehículo de 500 Kg pudiese tomarla, sin deslizarse, con rapidez de 72 km/h, sabiendo que el coeficiente de fricción es 0'8. Rdo. El ángulo mínimo es de  $19'3^\circ$

**40.** En algunos parques de atracciones existe un "rotor" o cilindro hueco que se pone en rotación alrededor de un eje vertical que pasa por el centro del mismo. Cuando una persona se sitúa dentro de este aparato pegada a la pared, el cilindro va aumentando su rapidez de giro progresivamente hasta que al llegar a un valor predeterminado el suelo baja y, sin embargo, la persona queda pegada a la pared sin caer.



Suponiendo un rotor que tenga un radio de 2'5 m y que el coeficiente de fricción con la pared del mismo sea 0'4, determinad cual debería de ser la rapidez angular mínima con que debería de girar para que una persona pegada a la pared del mismo permaneciese sin caer. Rdo.  $\omega_{\min} = \sqrt{10}$  rad/s

**41.** Imaginemos un satélite en órbita alrededor de la Tierra, fuera de la atmósfera y con movimiento circular uniforme en torno al centro del planeta. Si consideramos como sistema el formado por dicho satélite y la Tierra, podemos afirmar que las fuerzas interiores que actúan sobre dicho satélite son (señalad la propuesta correcta y explicad vuestra elección): a) La fuerza centrífuga, la gravitatoria y la centrípeta. b) La fuerza centrífuga y la gravitatoria. c) La fuerza gravitatoria. d) Otra respuesta (especificar). ¿Por qué el satélite no se estrella contra la superficie terrestre?

### Anexo. HACIA LA GRAN UNIFICACIÓN

En la antigüedad Aristóteles pensaba que había dos tipos de fuerzas, la "gravidad" o tendencia de la tierra y el agua a hundirse y la "ligereza" o tendencia del aire y el fuego a elevarse. En la actualidad a primera vista podría parecer que existen muchos tipos distintos de fuerzas (gravitatoria, nuclear, eléctrica, magnética, de choque, de fricción, elástica ...). Sin embargo, lo cierto es que en realidad existen unas pocas y que conforme se ha ido desarrollando la física moderna ha sido posible encontrar relaciones entre las distintas fuerzas conocidas. Así ocurrió, por ejemplo, con las fuerzas eléctricas y las magnéticas. A mediados del siglo XIX se descubrió que la electricidad y el magnetismo (inicialmente dominios distintos) estaban íntimamente relacionados y, en consecuencia, se unificaron las fuerzas magnéticas y eléctricas en una sola interacción: la electromagnética. De este modo las fuerzas existentes en la naturaleza se reducían a cuatro tipos:

**Interacción gravitatoria:** Intrínsecamente ligada a la masa. Cualquier pareja de objetos sean tan pequeños como dos átomos o tan grandes como dos estrellas, se atraen gravitatoriamente por el hecho de tener una cierta masa. Así pues, la fuerza con que la Tierra atrae a una manzana tiene la misma naturaleza que la fuerza con que se atraen dos planetas. Nuestro propio peso no es sino la fuerza con que la Tierra nos atrae. La interacción gravitatoria, no obstante, es la más débil de todas y aunque su alcance es infinito (disminuyendo con la distancia), para que se ponga de manifiesto es preciso que al menos una de las masas sea muy grande. Así, por ejemplo, la fuerza gravitatoria con que se atraen dos personas situadas a medio metro de distancia es varios billones de veces inferior a la fuerza con la Tierra atrae a una de ellas. Esta es la razón por la que al trabajar con objetos pequeños no se tienen en cuenta las pequeñísimas fuerzas gravitatorias entre ellos.

**Electromagnética:** Se debe a la existencia de cargas eléctricas, puede ser de atracción (entre objetos cargados con carga neta de distinto signo) o de repulsión (cargas del mismo signo). Es mucho más intensa que la gravitatoria. Esto se puede mostrar fácilmente ya que, por ejemplo, un simple imán es capaz de mantener un clavo pegado a él venciendo la fuerza de atracción gravitatoria de toda la Tierra. Las fuerzas de choque, las elásticas y las fuerzas de fricción en general, son también ejemplos de fuerzas de tipo electromagnético ya que en todos estos casos se ejercen interacciones entre átomos y moléculas variando sus distancias, rompiéndose y formándose nuevos enlaces, etc. Esta fuerza tiene también un alcance infinito, disminuyendo con la distancia.

Además de los dos tipos de interacción anteriores, existe la fuerza **Nuclear fuerte** (que mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo de los átomos) que es la más intensa de todas pero tiene muy corto alcance (solo actúa a distancias inferiores al diámetro de los núcleos atómicos) y la fuerza **Nuclear débil** (responsable, por ejemplo, de que en ciertos casos un neutrón se pueda desintegrar dando lugar a un protón un electrón y otra partícula). Esta última fuerza es unos 1000 millones de veces menos intensa que la nuclear fuerte. Actualmente se admite que la fuerza débil y la electromagnética son manifestaciones de una única interacción llamada **Electrodébil**. Debido a esta unificación, se han producido intentos continuados para poder combinar la interacción electrodébil con la nuclear fuerte (teorías de la gran unificación).

Sabemos que las galaxias se están alejando unas de otras. Volviendo la película hacia atrás cabe pensar que hace unos 13.700 millones de años las dimensiones del Universo eran nulas, cuando tuvo lugar una gran explosión (big-bang). En ese momento la temperatura era de billones de grados. A esas temperaturas tan elevadas, los físicos piensan que sólo existía un tipo de fuerza. Esa unidad fue degenerando a medida que el Universo se enfriaba dando lugar a las distintas fuerzas.

### 3. ENERGÍA, TRABAJO Y CAMBIOS MECÁNICOS



#### INTRODUCCION

Hasta aquí hemos conseguido una explicación unitaria, común, a la existencia de distintos tipos de movimiento de los objetos y hemos obtenido un principio de conservación totalmente general en la naturaleza: la conservación de la cantidad de movimiento. No obstante, **existen preguntas y situaciones de gran interés a las que la Dinámica sola no puede dar respuesta**. Unas están relacionadas con el cambio en el movimiento de los objetos y otras se refieren a cambios que no pueden expresarse en términos de velocidades y aceleraciones.

Imaginemos, por ejemplo, la siguiente situación familiar: dos péndulos exactamente iguales hechos con bolas de acero cuelgan verticalmente de modo que las dos esferas se encuentran juntas. Separamos una de ellas ligeramente de su posición inicial manteniendo el hilo tenso y la soltamos de manera que choque frontalmente con la que estaba en reposo. ¿Qué es lo que observamos? Si realizamos la experiencia comprobaremos que la bola que estaba en movimiento se queda en reposo y la que estaba en reposo empieza a moverse hasta que alcanza prácticamente la misma altura desde la que se había soltado la primera.

Por supuesto, el principio de conservación de la cantidad de movimiento se cumple: la cantidad de movimiento de las dos bolas inmediatamente antes del choque es igual a la cantidad de movimiento de las dos bolas inmediatamente después del choque. Pero también se cumplirá en muchos otros casos, por ejemplo, la bola que se deja caer podría rebotar invirtiendo su velocidad y la

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

que estaba parada podría salir con una velocidad doble o podrían salir las dos hacia la derecha, después del choque, con la mitad de la velocidad que tenía la bola cuando chocó, etc.

Sin embargo, nadie ha visto nunca estos sucesos. **¿Por qué no ocurren? ¿Existe alguna limitación en la magnitud de los cambios de movimiento que pueden ocurrir en la naturaleza?**

La insuficiencia de lo hecho hasta aquí se pone claramente de manifiesto cuando pensamos en cambios que no pueden describirse en términos de fuerzas, velocidades y aceleraciones y que tienen gran interés. Así, preguntas como ¿cuánto se elevará la temperatura del agua al calentarla un cierto tiempo en el fuego?, o ¿cuánto se enfriará el agua de un vaso en el que se encuentra un cubito de hielo?, necesitan la introducción y desarrollo de nuevas ideas. Igualmente lejanos del campo de aplicación de la Mecánica aparecen los cambios relacionados con la Electricidad: ¿qué intensidad de corriente pasará por un circuito con una pila y dos bombillas?, ¿cuánto tardará en gastarse una pila eléctrica que hace funcionar un motor?; con la Química: ¿qué cantidad de una sustancia se obtendrá cuando se detenga una determinada reacción química?, etc.

Sin embargo, pese a que todos esos cambios no pueden ser estudiados con los conceptos desarrollados hasta aquí, encontramos muchas situaciones en que cambios de distinto tipo están relacionados entre sí.

*A.1. ¿Conocéis máquinas o situaciones, en las que aparezcan juntos cambios de movimiento, de temperatura, eléctricos...?*

Todos podemos citar situaciones de este tipo:

- ✓ Con una pila eléctrica, o enchufando un aparato a la red eléctrica, podemos cambiar el movimiento de ciertas piezas (las aspas de un ventilador, la cuchilla de una batidora, el motor de un ascensor...).
- ✓ Podemos cambiar la temperatura del agua contenida en un cazo quemando butano (una reacción química), utilizando un hornillo eléctrico, poniéndolo varias horas al sol o, incluso, frotando fuertemente el cazo con lana de vidrio.
- ✓ Podemos quemar carbón o gasóleo para producir movimiento, como se hacía en las máquinas de tren o barco antiguas.

En resumen: vemos que podemos producir transformaciones o cambios de distinto tipo en objetos, cuya comprensión y control serían de gran interés y que, sin embargo, los conceptos mecánicos que hemos desarrollado no nos sirven para describirlos, relacionarlos, cuantificarlos... Y, además, al igual que ocurría con los péndulos, intuimos que no todas las transformaciones son posibles: con una botella de butano no puede elevarse la temperatura de un gran depósito de agua sin límite, una pila puede mantener encendida una bombilla cierto tiempo pero no más, un muelle comprimido puede lanzar un objeto con cierta velocidad pero no con cualquier velocidad, etc.

Vamos a plantearnos, pues, el estudio de los cambios, de las transformaciones, que pueden experimentar los objetos o que pueden realizar unos objetos sobre otros, para contestar a preguntas como:

- ✓ ¿Qué hace falta para que se produzcan cambios?
- ✓ ¿Por qué no se producen determinados cambios en el movimiento de los objetos?
- ✓ ¿Existe algún límite en las transformaciones que puede experimentar un objeto o conjunto de objetos y en las que puede realizar sobre otros?
- ✓ ¿Hay alguna relación entre cambios de distinto tipo (mecánicos, eléctricos, térmicos...)?

Comenzaremos analizando situaciones en las que un objeto o sistema experimente algún cambio. Como es lógico, trataremos inicialmente cambios sencillos que faciliten la invención y el desarrollo de ideas, pero, al mismo tiempo, dadas las preguntas que nos hemos planteado, buscaremos su extensión a situaciones cada vez más generales.

## 1. PRIMERAS IDEAS SOBRE LOS CAMBIOS Y LA FORMA EN QUE SE PRODUCEN

*A.2. Exponed vuestras ideas y suposiciones sobre qué hace falta para que un objeto o sistema experimente algún cambio.*

A la hora de intentar explicar qué hace falta para producir cambios deseados, las personas, en el lenguaje cotidiano, solemos referirnos a la necesidad de energía, de realizar trabajo, de calentar, de hacer fuerzas, etc. No obstante, aunque estas ideas y estas palabras nos permiten comunicarnos fácilmente en la vida cotidiana, su significado es ambiguo y, si queremos avanzar en la comprensión científica de los cambios, será necesario precisarlas y cuantificarlas. Haremos esto progresivamente, elaborando conceptos que nos permitan responder mejor a las cuestiones planteadas. Como veremos, a medida que nuestras ideas se vayan haciendo «más científicas», se separarán más de las ideas espontáneas.

Hemos dicho que «hace falta energía» para que se produzcan cambios. Comenzaremos por precisar esta idea.

### 1.1. Idea cualitativa de energía

*A.3. Proponed distintos ejemplos de sistemas (objetos o conjuntos de objetos) que, en vuestra opinión, tengan energía y explicad a qué es debido que la tengan.*

Solemos afirmar, por ejemplo, que la gasolina contenida en un depósito, una corriente de agua, una pila eléctrica, un arco tenso, un horno caliente, etc., tienen energía porque **podemos imaginar fácilmente situaciones en las que podrían producir cambios en otros objetos o sistemas**, como, por ejemplo, el movimiento de un vehículo, el movimiento de una noria, el funcionamiento de un ventilador a pilas, el lanzamiento de una flecha, la fabricación de pan, etc.



De acuerdo con lo anterior, decimos que **un objeto o, en general, un sistema, tiene energía cuando posee capacidad para realizar transformaciones.**

Puesto que distintos sistemas pueden realizar cambios en otros debido a distintas causas, solemos hablar de distintas «formas de energía».

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

#### 1.2. Formas de energía

En los medios de comunicación se suele hacer referencia con bastante asiduidad a muchas clases de energía. Ello podría hacer pensar que existe una gran variedad de formas de energía, pero ...  
*¿es eso realmente así?*

**A.4. Haced una lista con los distintos tipos de energía que conozcáis y de objetos o sistemas que tengan dichos tipos de energía, comentando en cada caso a qué es debido que tengan energía.**

Podemos pensar en una gran variedad de formas de energía, por ejemplo, la **hidráulica** (la que posee el agua de un embalse), la **nuclear** (un mineral de uranio o plutonio), la **solar** (la que tiene la radiación que nos llega del Sol), la **química** (el petróleo), la **elástica** (un muelle comprimido), la **eléctrica** (una batería eléctrica), la **eólica** (el viento), la **maremotriz** (olas del mar), la **térmica** (una barra de hierro caliente), la **cinética** (el agua de un río, un ventilador en marcha), etc.

No obstante, una reflexión sobre el porqué de los ejemplos anteriores pone de relieve que **la energía de muchos sistemas es debida a que se encuentran en movimiento respecto de otros** (agua de un río, ventilador en marcha, viento, un vehículo, etc.) **y, hasta que paren, pueden realizar transformaciones.** En estos casos, diremos que tienen **energía cinética.**

En otro gran grupo estarían **sistemas que tienen energía debido a que dentro de ellos existen fuerzas tales que separaciones distintas entre las partes del sistema implican diferente capacidad para realizar cambios (diferente energía).** Analicemos algunos ejemplos al respecto:

- ✓ **El agua de un embalse antes de comenzar a caer.** En este caso, el sistema que tiene energía es el formado por el agua y la Tierra. Este sistema tiene energía porque dentro de él existen fuerzas de atracción gravitatoria que hacen que una distinta separación entre el agua y la Tierra (distinta altura del embalse) genere una distinta capacidad para realizar transformaciones. **Es el conjunto agua/Tierra el que tiene energía.** Si el agua estuviera en una zona donde no hubiera atracción gravitatoria, no tendría energía.
- ✓ **Un muelle perfectamente elástico.** En este caso, cuando se estira o se comprime (cambia la separación entre las partes del muelle) aparecen fuerzas que hacen que distinta separación equivalga a distinta capacidad del muelle para realizar transformaciones.
- ✓ **Dos cuerpos cargados eléctricamente.** Si pensamos, por ejemplo, en dos objetos puntuales con carga eléctrica del mismo signo, ejercerán uno sobre el otro una fuerza eléctrica repulsiva. Las fuerzas eléctricas dependen de la distancia y, por tanto, al variar la separación varía la capacidad para realizar transformaciones. De nuevo **es el sistema formado por ambos cuerpos (cargados) el que tiene energía.** Si hubiera un solo objeto puntual cargado, no podríamos hablar de energía.

Los tres casos que acabamos de analizar se caracterizan porque en cualquiera de ellos el sistema tiene energía «en potencia» o de forma más precisa: **energía potencial.** Además, según el tipo de fuerzas que existan entre las partes del sistema (fuerzas interiores<sup>1</sup>), hablaremos de energía potencial gravitatoria, elástica o eléctrica.

A las fuerzas que son la causa de la energía potencial se las llama «**fuerzas conservativas**», porque gracias a ellas se puede «almacenar o conservar» la energía y utilizarla íntegramente para producir movimiento. No todas las fuerzas son conservativas: la de rozamiento o la que existe entre las partes de un muelle cuando ha perdido su elasticidad son «**fuerzas no conservativas**».

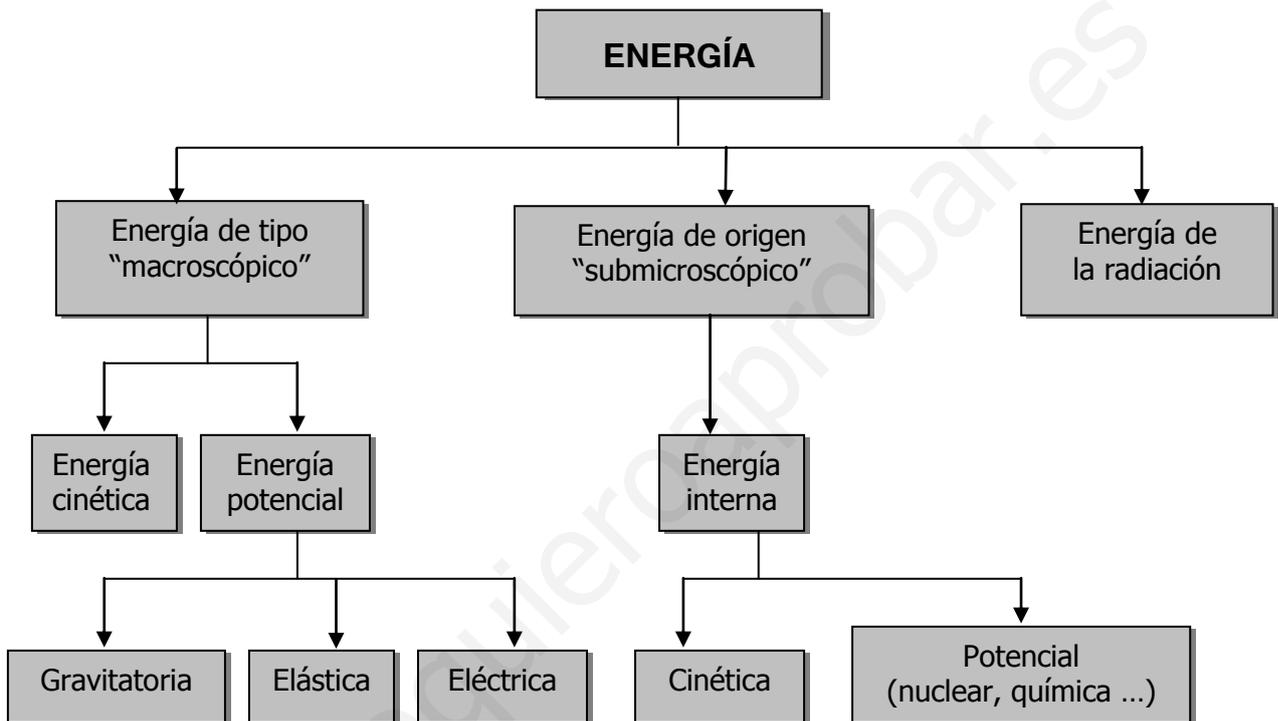
---

<sup>1</sup> Fuerzas interiores a un sistema son las fuerzas que una parte del sistema ejerce sobre otra parte del mismo sistema.

Por último, podemos identificar **sistemas que tienen energía** (como la gasolina y el oxígeno necesario para que se queme; un objeto a una temperatura más alta que la del ambiente; la de un trozo de uranio...) **cuyo origen podemos comprender si pensamos que todos los cuerpos están formados por partículas** (átomos, moléculas, iones...) que se encuentran en movimiento, ejercen fuerzas entre ellas, pueden reaccionar químicamente, etc. A este tipo de energía de origen «sub-microscópico» lo llamaremos globalmente **energía interna**.

La energía de la luz solar o de cualquier otra radiación es difícilmente clasificable en los tipos anteriores, por lo que hablaremos simplemente de **energía de la radiación**.

Podemos resumir estas ideas en el esquema que aparece a continuación (no es exhaustivo):



Conviene resaltar, como hemos visto en los ejemplos concretos, que **la energía de un sistema se debe a las propiedades que tiene ese sistema**: velocidad, separación entre sus partes, temperatura, constante elástica... Como el **estado** de un sistema se caracteriza por el valor que tienen sus propiedades en dicho estado (si cambia el valor de alguna de ellas, el sistema cambia de estado<sup>2</sup>), se suele decir que **la energía es una función (depende) del estado del sistema**, o, abreviando, que es una «**función de estado**».

Un sistema puede tener simultáneamente energías de distinto tipo y, en ese caso, cuando se habla de la energía del sistema nos referimos a la suma de todas las energías de distinto tipo que pueda tener. A la suma de las energías de origen «macroscópico» asociadas a propiedades de tipo mecánico (masa, velocidad, distancia) se le llama **energía mecánica**. **La energía mecánica de un sistema es, pues, la suma de su energía cinética, potencial elástica y potencial gravitatoria**.

Tras esta primera aproximación, cualitativa, al concepto de energía, vamos a analizar ahora las formas de cambiar la energía de un sistema, con la finalidad de hallar cuánto varía cuando realiza

<sup>2</sup> En este contexto, cambio de estado significa que cambia alguna de las propiedades del sistema, pero no que haya un cambio de sólido a líquido, etc.

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

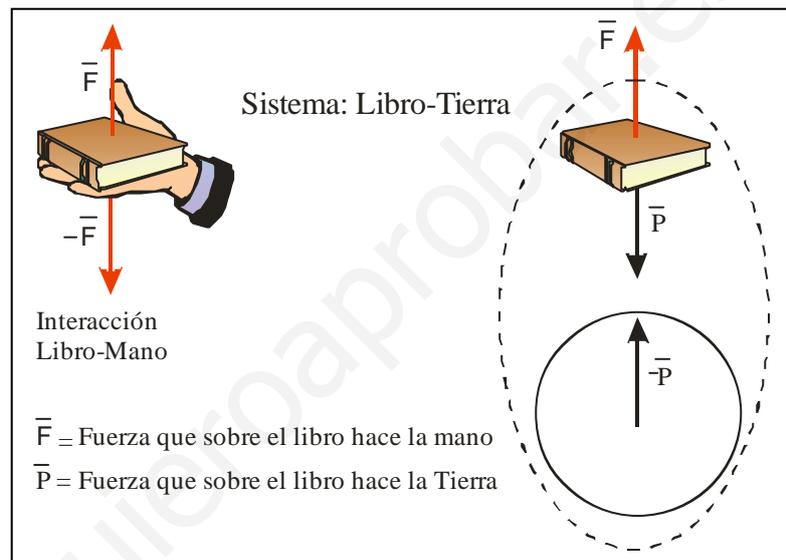
transformaciones sobre otros. Algo que es imprescindible **si queremos responder a la pregunta inicial sobre la existencia de límites en los cambios que pueden suceder en la naturaleza.**

Vamos a plantearnos ahora cómo podemos variar (aumentar o disminuir) la energía de un sistema, **limitándonos, en principio, sólo a los cambios de tipo mecánico**, es decir, sólo a los cambios de energía mecánica.

#### 1.3. Una forma de intercambiar energía: trabajo

*A.5. Partiendo de un sistema que tenga energía potencial gravitatoria (por ejemplo, el sistema libro/ Tierra que se muestra en el dibujo), pensad cómo podríamos hacer que aumentara su energía (pero sólo su energía potencial gravitatoria).*

Sería necesario que otro sistema distinto o exterior (por ejemplo, una persona o una máquina elevadora) ejerciera una fuerza sobre el libro, elevándolo con velocidad constante. Parece claro que, si deseamos variar la energía del sistema formado por el libro y la Tierra, no bastaría con sostenerlo en el aire. Por mucho tiempo que estuviéramos sosteniéndolo en la posición inicial no cambiaría la capacidad de realizar transformaciones del sistema libro-Tierra. Es necesario que lo desplazemos hacia arriba (aumentando su separación del suelo) para que la fuerza que ejercemos sobre él cambie la energía del sistema. Si esta fuerza exterior es igual al peso del libro, podrá elevarlo con velocidad constante y aumentará sólo la energía potencial gravitatoria, pero ¿qué ocurriría si la fuerza fuera mayor que el peso del libro? Como hemos visto en Dinámica, el libro se aceleraría, aumentando su velocidad y, por tanto, aumentaría su energía cinética. En resumen, aumentaría la energía total del sistema, tanto la energía potencial como la energía cinética.



Podríamos repetir la misma cuestión en situaciones distintas:

- ✓ ¿Cómo aumentar la energía mecánica de un cuerpo que está en reposo en el suelo ?
- ✓ ¿Cómo disminuir la energía cinética de un cuerpo que se mueve con velocidad constante por una superficie horizontal sin rozamiento?
- ✓ ¿Cómo variar la energía de un muelle que está sujeto por uno de sus extremos?

En todos estos casos aparece la necesidad de que se ejerza una fuerza externa al sistema (ejercida por algo o alguien que no forma parte del sistema) para que haya variación de energía mecánica. Cuando este proceso ocurre, decimos que se realiza trabajo sobre el sistema. Es decir:

**“Se realiza trabajo sobre un sistema cuando se cambia su energía mediante fuerzas que se ejercen sobre él desde el exterior”.**

También podríamos cambiar la energía de un sistema poniéndolo en contacto con otro objeto cuya temperatura fuera mayor o menor que la del sistema. Esta otra forma de cambiar la energía, llamada **calor**, la trataremos en el tema siguiente, limitándonos en éste a los cambios de tipo mecánico y a la realización de trabajo.

Si queremos cuantificar las variaciones de energía mecánica, relacionar unos cambios con otros, necesitaremos plantearnos cómo calcular o medir el trabajo realizado.

### 1.3.1. Definición operativa de trabajo

A partir de la reflexión sobre el proceso realizado para aumentar la energía de los sistemas anteriores, inventad una magnitud que pueda expresar cuantitativamente si el trabajo realizado es mayor o menor. Pensad, para ello, de qué dependerá que el cambio de energía producido al realizar trabajo sea mayor o menor.

Si pensamos en casos muy simples, como el aumento de energía al elevar el paquete de libros o al estirar un muelle con un extremo fijo, parece lógico pensar que el trabajo realizado por nosotros sobre el paquete o el resorte dependerá del valor de la fuerza, que representaremos como  $|\vec{F}|$  o, simplemente,  $F$ , y de la distancia,  $d$ . Cabe pensar también, que el trabajo realizado será mayor cuanto mayores sean estos dos factores, puesto que el cambio de energía producido sería mayor.

De manera que una primera operativización que coincide con nuestra idea cualitativa de trabajo («se realiza trabajo sobre un sistema cuando se varía su energía mediante fuerzas exteriores») sería:

$$W = F \cdot d$$

**A.6.** *A partir de la definición propuesta para el trabajo, ¿qué cantidad de trabajo podríamos tomar como unidad de trabajo?*

Lo más sencillo es tomar el convenio de que la unidad de trabajo es el trabajo realizado por una fuerza de 1 N que se ejerce sobre un cuerpo a lo largo del desplazamiento de 1 m. La unidad de trabajo recibe el nombre de **joule** (ése es el nombre internacional, aunque habitualmente se utiliza «**julio**»), en honor a James Prescott Joule (1818-1889), quien dio un gran impulso al desarrollo de las ideas que estamos tratando en este tema. De este modo, **siempre que la fuerza se exprese en newtons y la distancia en metros, su producto nos proporcionará la cantidad de trabajo que se ha realizado en julios**. Su símbolo es J.

**A.7.** *Calculad el trabajo realizado por la fuerza que ejercemos sobre el objeto en las siguientes situaciones (dibujad previamente la situación y todas las fuerzas que actúan sobre el objeto):*

- a) *Al levantar con velocidad constante un paquete de 30 kg desde el suelo a 1'5 m de altura.*
- b) *Al arrastrar sobre el suelo el mismo paquete, tirando horizontalmente de él con una fuerza de 100 N a lo largo de una distancia de 5 m.* Rdo. a) 441 J; b) 500 J.

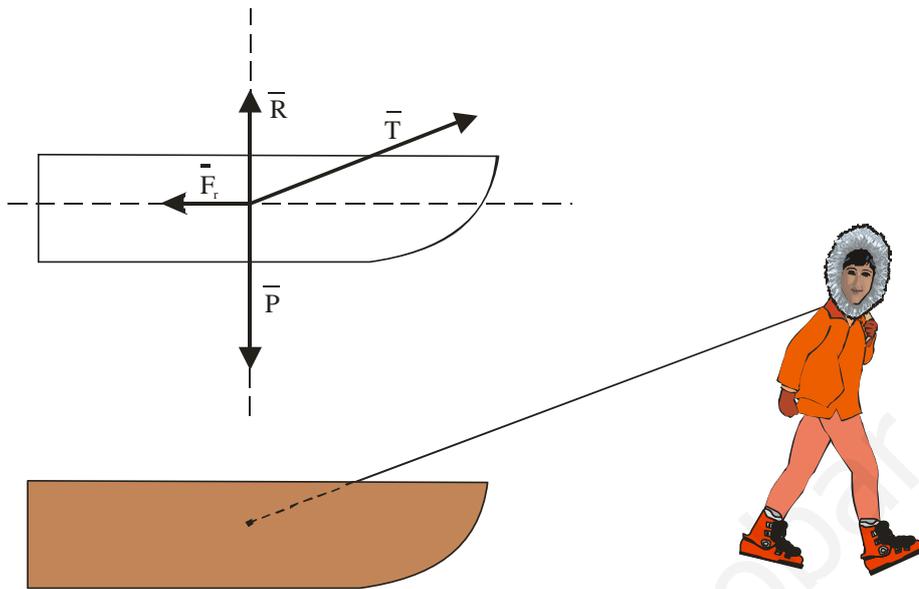
**A.8.** *Con el fin de tener una idea intuitiva del valor de 1 J, realizad trabajos que equivalgan aproximadamente a 1 J, a 10 J y a 100 J.*

### 1.3.2. Profundización en el concepto operativo de trabajo

Aunque para inventar una definición cuantitativa de un concepto es conveniente comenzar por situaciones muy simples, si pensamos, por ejemplo, en una persona que arrastra un trineo tirando

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

con una cuerda, podemos darnos cuenta de que el trabajo realizado por una fuerza no puede expresarse siempre como el producto de su módulo por el desplazamiento si deseamos que corresponda a nuestra concepción cualitativa de trabajo.



Como vemos en la figura, si tomamos como sistema el trineo, las fuerzas  $\vec{T}_1$  y  $\vec{F}_r$  realizan trabajo sobre él (cada una de ellas, por separado, produciría un cambio en la energía del trineo:  $\vec{T}_1$  aumentando su energía cinética, y  $\vec{F}_r$  disminuyéndola). En cambio,  $\vec{R}$  y  $\vec{P}$ , por ser perpendiculares a la trayectoria, no producen, como vimos en cinemática, cambio en la rapidez del trineo; no contribuyen ni a aumentar ni a disminuir su energía: no están realizando trabajo. Sólo produce trabajo la fuerza o « parte de la fuerza » que actúa en la dirección del desplazamiento.

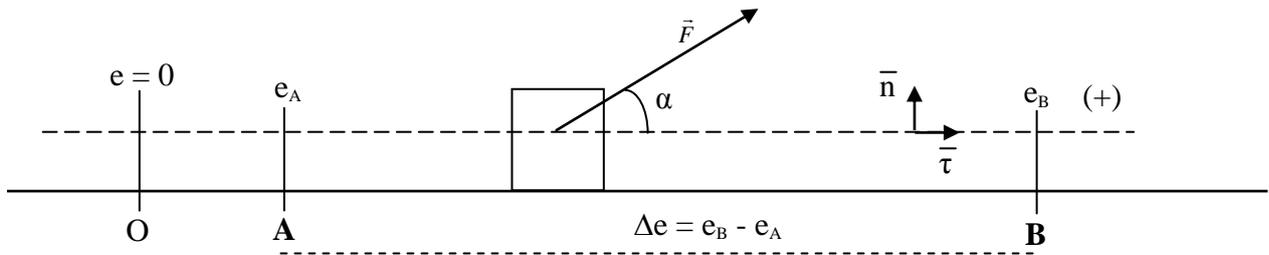
Así pues, una definición operativa que recoja nuestras ideas cualitativas sobre trabajo y su relación con la energía debe tener en cuenta que:

- ✓ Una fuerza sólo realiza trabajo si tiene proyección tangencial sobre la trayectoria.
- ✓ El trabajo de una fuerza es mayor cuanto mayor sea su proyección tangencial.
- ✓ Cuando la proyección tiene el mismo sentido que el desplazamiento, aumenta la energía; el trabajo es positivo. Cuando la proyección tiene sentido opuesto al desplazamiento, disminuye la energía; el trabajo realizado por la fuerza es negativo.

**Cuando la trayectoria es conocida de antemano**, aunque sea curvilínea, podemos elaborar una definición operativa de trabajo que recoja todas estas consideraciones cualitativas utilizando las componentes intrínsecas de la fuerza (como hicimos en Dinámica) y definir el trabajo como:

$$W = F_t \cdot \Delta e$$

donde  $F_t$  es la componente tangencial del vector  $\vec{F}$  (que será positiva o negativa, según corresponda) y  $\Delta e$  es el cambio de posición sobre la trayectoria (con el signo que le corresponda). Naturalmente, la expresión anterior sólo puede aplicarse si  $F_t$  es constante a lo largo de todo el desplazamiento (dejaremos el caso de que no lo sea para estudiarlo en cursos posteriores).



En la figura anterior,  $F_t = F \cdot \cos\alpha$ , siendo  $\alpha$  el ángulo que forma  $\vec{F}$  con el vector unitario  $\vec{\tau}$  por el camino más corto. Recordemos que  $\vec{\tau}$  es un vector unitario tangente a la trayectoria y cuyo sentido siempre es el escogido como positivo para “e” (es decir, el sentido en que e aumenta).

**En general (se conozca o no la trayectoria de antemano)**, el trabajo realizado por una fuerza  $\vec{F}$ , constante, también se puede expresar como:

$$W = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\theta$$

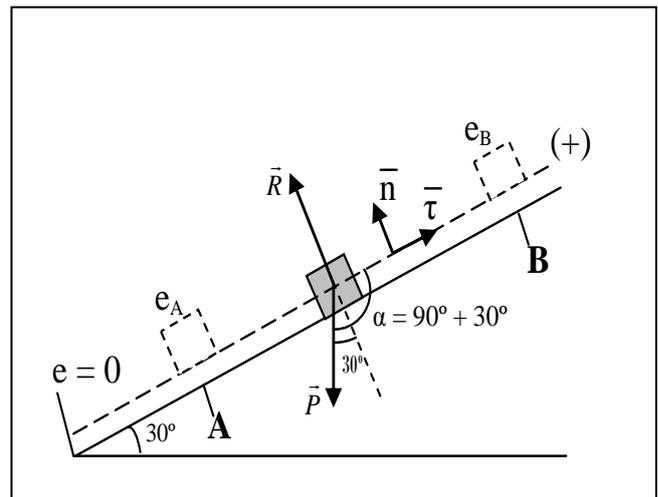
en donde  $\theta$  es el ángulo existente entre el vector  $\vec{F}$  y el vector desplazamiento  $\Delta\vec{r}$ , siempre por el camino más corto entre ellos.

La ecuación anterior también se escribe como:  $W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r}$  (producto escalar del vector fuerza por el vector desplazamiento).

**A.9.** Se lanza un bloque de 2 kg por un plano inclinado de  $30^\circ$ .

- a) Calculad el trabajo realizado por las fuerzas ejercidas sobre el bloque mientras asciende 5 m en línea recta. Considerad el rozamiento despreciable.
- b) Ídem si se hubiera dejado caer desde lo alto del plano.

a) Las fuerzas que se ejercen sobre el bloque son el peso,  $\vec{P}$ , y la reacción del plano,  $\vec{R}$ . Del análisis físico de la situación, **antes de realizar cálculos**, podemos advertir que el trabajo realizado por el peso mientras ocurre la transformación será negativo, porque se opone a ella: hace que la energía del bloque disminuya. Del mismo modo, según nuestra concepción cualitativa,  $\vec{R}$  no realiza trabajo porque es perpendicular al desplazamiento (no aumenta ni disminuye la energía del bloque, aunque sea necesaria para que describa la trayectoria que describe). Vamos a calcular ahora el trabajo de ambas fuerzas mientras el bloque pasa del punto A al B.



Como la trayectoria es conocida, podemos escoger un punto sobre ella como origen de posiciones, y un sentido positivo para el desplazamiento. El vector unitario,  $\vec{\tau}$ , será tangente a la trayectoria y su sentido será el tomado como positivo para la posición. El vector unitario,  $\vec{n}$ , es perpendicular a  $\vec{\tau}$ .

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Como se ve en la figura, con ese convenio,  $\Delta e = e_B - e_A = 5 \text{ m}$ , y el trabajo realizado por  $\vec{R}$  y por  $\vec{P}$  será:

$$W_R = R_t \cdot \Delta e = R \cdot \cos \alpha \cdot \Delta e = R \cdot \cos 90^\circ \cdot 5 = 0, \text{ pues el ángulo, } \alpha, \text{ que forma } \vec{R} \text{ con } \vec{\tau}, \text{ es } 90^\circ.$$

$$W_P = P_t \cdot \Delta e = P \cdot \cos \alpha \cdot \Delta e = mg \cdot \cos (90^\circ + 30^\circ) \cdot 5 = 2 \cdot 9,8 \cdot (-0,5) \cdot 5 = -49 \text{ J}, \text{ pues el ángulo, } \alpha, \text{ que forma } \vec{P} \text{ con } \vec{\tau}, \text{ por el camino más corto, es } 90^\circ + 30^\circ = 120^\circ.$$

Si utilizamos la expresión  $W = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos \theta$  el vector desplazamiento  $\Delta\vec{r}$  será un vector paralelo al plano, con origen en A y extremo en B, con lo que:

$$W_R = |\vec{R}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cos \theta = |\vec{R}| \cdot 5 \cdot \cos 90^\circ = 0$$

$$W_P = |\vec{P}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos \theta = 19,6 \cdot 5 \cdot \cos 120^\circ = -49 \text{ J}$$

Los resultados coinciden, como es lógico, con los obtenidos con la otra expresión de trabajo. Sin embargo conviene darse cuenta de que en este caso se utilizan módulos de vectores por lo que el signo del trabajo depende únicamente del coseno del ángulo existente entre el vector fuerza y el vector desplazamiento.

b) Cuando el cuerpo desciende 5 m, las fuerzas siguen siendo las mismas que antes, pero el desplazamiento es hacia abajo. Sin realizar cálculos, sabemos, por el significado físico de trabajo, que  $\vec{R}$  no realiza trabajo, y que el trabajo realizado ahora por  $\vec{P}$  es positivo, ya que apoya la transformación, aumentando la energía del bloque.

Al tratarse de una trayectoria conocida de antemano, **si mantenemos el mismo convenio que en el dibujo anterior**, ahora  $\Delta e = -5 \text{ m}$  y la componente tangencial del peso sigue siendo la misma que antes, con lo que:

$$W_P = P_t \cdot \Delta e = P \cdot \cos \alpha \cdot \Delta e = mg \cdot \cos (90^\circ + 30^\circ) \cdot (-5) = 2 \cdot 9,8 \cdot (-0,5) \cdot (-5) = 49 \text{ J}$$

Si utilizamos la expresión  $W = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos \theta$  el vector desplazamiento  $\Delta\vec{r}$  será ahora un vector paralelo al plano, con origen en B y extremo en A, con lo que:

$$W_R = |\vec{R}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cos \theta = |\vec{R}| \cdot 5 \cdot \cos 90^\circ = 0$$

$$W_P = |\vec{P}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos \theta = 19,6 \cdot 5 \cdot \cos 60^\circ = 49 \text{ J}$$

Los resultados coinciden, de nuevo, con los obtenidos con la otra expresión de trabajo. En este libro (por coherencia con el tratamiento realizado en cinemática y dinámica) utilizaremos, siempre que sea posible, la expresión  $W = F_t \cdot \Delta e$ . No obstante, **conviene saber manejar las dos y conocer cuál es el campo de validez de cada una.**

#### 1.3.3. Trabajo realizado cuando se ejercen varias fuerzas sobre un sistema

Cuando sobre un sistema actúan varias fuerzas, el **trabajo total** realizado sobre él es la suma de los trabajos de cada una de esas fuerzas.

$$W_{\text{total}} = W_{F_1} + W_{F_2} + \dots + W_{F_n}$$

Llamaremos **trabajo resultante** al trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre un sistema y lo designaremos como  $W_{F_{\text{res}}}$ .

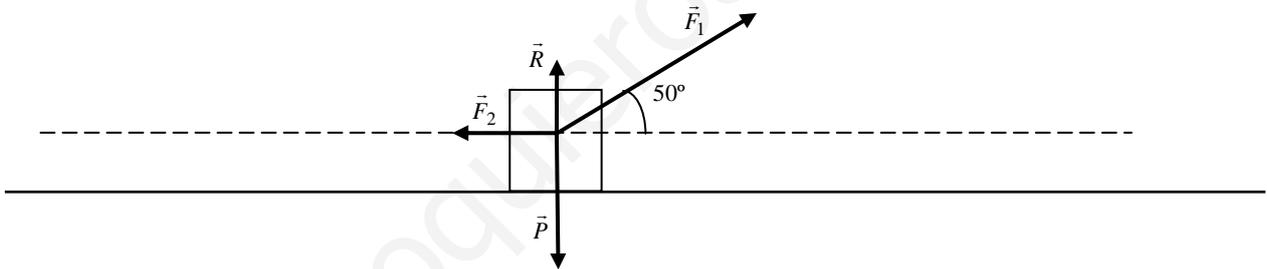
El trabajo total y el trabajo resultante no siempre coinciden. Sólo en el caso particular de que el sistema se pueda considerar como un solo objeto **puntual o perfectamente rígido con movimiento de traslación**, el desplazamiento del punto de aplicación de cada una de las fuerzas será el mismo, y entonces **el trabajo total** realizado sobre dicho sistema **coincidirá con el trabajo que realizaría la resultante de todas las fuerzas en ese desplazamiento**. Es decir:  $W_{\text{total}} = W_{F_{\text{res}}}$ . En las actividades siguientes se proponen dos ejemplos aclaratorios:

**A.10.** Un cuerpo de 5 kg de masa cae desde una altura de 20 m sometido a la acción de la gravedad. Tomando como sistema el conjunto: cuerpo-Tierra y  $g = 10 \text{ N/kg}$ , se pide:

- Trabajo total sobre el sistema.
- Trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre dicho sistema.
- ¿Por qué no son iguales?

Rdo. a)  $W_{\text{total}} = 1000 \text{ J}$ ; b)  $W_{F_{\text{res}}} = 0$  (ya que  $F_{\text{res}}$  sobre el sistema escogido vale 0).

**A.11.** Un bloque de 50 kg se traslada 300 m sobre una superficie tal y como se indica en la figura. Se sabe que  $\vec{F}_1$  forma un ángulo de  $50^\circ$  con la dirección y sentido del desplazamiento mientras que  $\vec{F}_2$  tiene sentido contrario al desplazamiento, siendo  $F_1 = 200 \text{ N}$  y  $F_2 = 90 \text{ N}$ . Calculad:



- El trabajo total sobre el bloque.
- El trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre dicho bloque.
- ¿Por qué son iguales?

Rdo. a)  $W_{\text{total}} = 11.567'3 \text{ J}$ ; b)  $W_{F_{\text{res}}} = 11.567'3 \text{ J}$

Es el momento de reflexionar sobre las diferencias entre el concepto físico de trabajo y los significados que tiene en la vida cotidiana, de manera que se eviten confusiones.

### 1.3.4. Ideas espontáneas sobre trabajo frente al concepto físico de trabajo

**A.12.** Escribid varias frases en las que aparezca el término «trabajo» y analizad si su significado coincide con el significado físico.

**A.13.** Una persona dice que no puede estar bien una definición de trabajo que dé como resultado que alguien que trabaja en un lugar, transportando maletas desde un punto a otro situado a 100 m de distancia, realice un trabajo nulo (o, en todo caso, que sólo trabaja mientras eleva las maletas del suelo o las deja en él, pero no mientras está trasladándolas).

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Efectivamente, a lo largo del curso hemos visto palabras como velocidad, fuerza, etc., cuyo significado cotidiano es distinto de su significado en Física. Lo mismo ocurre con la idea de trabajo. No es posible negar que la persona que transporta maletas se cansa, y que le pagan por hacer ese trabajo. O que una persona que estudia realiza un trabajo intelectual. O que se puede o no «tener un trabajo». La confusión proviene de que no significa lo mismo el término «trabajo» en el contexto cotidiano que en el contexto de la Física.



Desde el punto de vista de la Física, la persona sólo realiza trabajo sobre la maleta cuando la fuerza que ejerce sobre ella produce algún cambio en su energía, y ya hemos visto que eso no sucede cuando la fuerza y el desplazamiento son perpendiculares (cuando la está trasladando de un lugar a otro).



Otra cuestión es lo que le ocurre a la persona: se cansa, su organismo sufre transformaciones y en su interior habrá fuerzas que realizarán trabajo, pero no realiza trabajo sobre la maleta.

Lo mismo ocurre cuando empujamos una pared o algo sin conseguir moverlo. Así, si las personas de la figura no logran mover la estatua, sudarán y se cansarán mucho pero, desde el punto de vista de la física, el trabajo realizado sobre la estatua también será nulo.

#### 1.4. Rapidez con que se realiza un trabajo: concepto de potencia

En ocasiones, más que estar interesados en realizar una determinada cantidad de trabajo nos preocupa la rapidez con que es realizado. Si deseamos comparar dos motores que sirven para elevar un ascensor, no nos interesa sólo la cantidad de trabajo que pueden realizar sobre el ascensor, sino la rapidez con que pueden realizarlo. No es lo mismo, por ejemplo, cargar en dos horas que en dos días un tren con alimentos y medicinas para llevarlos a personas que los necesitan, aunque la transformación producida sobre los paquetes sea la misma. Tiene interés, por tanto, que inventemos una magnitud que nos cuantifique la rapidez con que se realiza un trabajo.

*A.14. Proponed una definición operativa de una magnitud que nos pueda servir para medir la mayor o menor rapidez con la que se ha realizado un determinado trabajo.*

Una magnitud que cumpla con lo que buscamos debe tener en cuenta la cantidad de trabajo realizado y el tiempo empleado en realizarlo, de manera que su valor sea mayor cuanto mayor sea el trabajo realizado y menor el tiempo tardado en hacerlo.

De acuerdo con lo anterior, una magnitud que nos indica lo rápidamente que se realiza trabajo sería:  $W/\Delta t$ . Esta magnitud recibe el nombre de **potencia**, y su símbolo es  $P$ .

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

La expresión anterior nos da el valor medio de la potencia, ya que no sabemos si el trabajo se ha realizado igual de aprisa durante todo el intervalo de tiempo considerado.

Puesto que la unidad de trabajo es el joule (julio) y la unidad de tiempo el segundo, diremos que **cuando se realiza el trabajo de 1 J en el tiempo de 1 s, la potencia con que se ha realizado ese trabajo (se suele usar la expresión “potencia desarrollada”) es la unidad de potencia.**

Esta unidad recibe el nombre de **watt** (en castellano vatio), y su símbolo es **W**. De este modo, si en la definición operativa utilizamos el valor del trabajo en J y el del tiempo en s, obtendremos el valor de la potencia en W. Un múltiplo muy utilizado es el **kilowatt** (en castellano kilovatio) cuyo símbolo es **kW** y que equivale a 1000 W (1 kW = 1000 W).

En el próximo tema, cuando tratemos de sistemas que experimentan cambios no mecánicos, generalizaremos el concepto de potencia y analizaremos, por ejemplo, utensilios que funcionan a partir de la electricidad (una bombilla, un frigorífico...), en los que se suele indicar la potencia que consumen o “potencia consumida”.

*A.15. Una persona está colocando cajas de 3 kg en un estante de 1'5 m de altura sobre el suelo. Si coloca 40 cajas en media hora, ¿con qué potencia media está trabajando? ¿Y si coloca 200 cajas en una jornada de 6 horas? Rdo. 0'98 W; 0'41 W.*



## 2. ¿CUÁNTO CAMBIA LA ENERGÍA DE UN SISTEMA CUANDO SE REALIZA TRABAJO? ¿CUÁNTO CAMBIAN SUS PROPIEDADES?

Saber si existen límites en los cambios que puede experimentar un sistema o en los cambios que un sistema puede producir sobre otros era uno de los problemas que nos planteamos en el comienzo del tema. Podemos utilizar lo hecho hasta aquí para avanzar en esta cuestión. Según nuestras ideas, cuando sobre un sistema se realiza trabajo, su energía cambiará y, como la energía de un sistema depende de las propiedades del mismo (de la separación entre sus partes, temperatura, rapidez, carga eléctrica...), también cambiarán algunas de sus propiedades. Como ya podemos hallar el trabajo realizado sobre un sistema, vamos a plantearnos ahora **cuánto cambia su energía y cuánto cambian sus propiedades cuando se realiza trabajo sobre él.**

### 2.1. Relación entre el trabajo realizado sobre un sistema (trabajo exterior) y su energía

Como hemos hecho hasta aquí, para simplificar el problema nos ocuparemos de procesos en que sólo cambian propiedades mecánicas (posición, velocidad, etc.) y dejaremos fuera, en principio, procesos en que ocurran cambios de temperatura, cambios químicos, absorción o emisión de radiación, etc.

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

**A.16.** *Formulad hipótesis sobre la relación cuantitativa que existirá entre la energía de un sistema y el trabajo que se realiza sobre él.*

Según las ideas cualitativas que hemos desarrollado a lo largo del tema, si desde el exterior se realiza un trabajo sobre el sistema, su energía variará. Dicho trabajo producirá un aumento o disminución de la energía del sistema según sea positivo o negativo. A título de hipótesis, podemos pensar que la variación de energía coincidirá con el valor del trabajo que desde el exterior se realiza sobre el sistema, es decir:

$$W_{ext} = \Delta E$$

La importancia de la hipótesis anterior es enorme para cuantificar los cambios, porque **no es una simple igualdad matemática**. No sólo nos dice que si realizamos un trabajo de 1.000 J sobre un sistema, su energía aumentará en 1.000 J: Lo fundamental de esta hipótesis es que **relaciona cuantitativamente “algo” que se le hace al sistema por el exterior (por otros sistemas), cuyo valor podemos calcular mediante la expresión:  $W_{ext} = F_{ext} \cdot \Delta e$ , con la variación de “algo” que tiene el sistema (la energía) que sólo depende de propiedades del sistema (y no del exterior)**.

Vale la pena darse cuenta de que el trabajo, en física, **no se tiene** sino que se realiza, mientras que la energía sí que se tiene, siendo el trabajo un proceso mediante el cual se puede transferir energía de un sistema a otro.

La relación  $W_{ext} = \Delta E$  nos permite afirmar, por ejemplo, que si un sistema cambia de un estado inicial a un estado final (caracterizados ambos por unos valores distintos de las propiedades del sistema) debido **únicamente** a la realización de trabajo por el exterior, el valor de dicho trabajo es el mismo, independientemente de cómo se haya realizado.

Además, con dicha hipótesis podemos encontrar la expresión que relacione la energía del sistema en un estado con el valor de las propiedades en ese estado (con su masa, su estiramiento, su rapidez...) lo cual es muy importante para estudiar los cambios y sus límites.

**A.17.** *Utilizad la hipótesis sobre la relación entre el trabajo exterior y la energía para, sin hacer cálculos, determinar cuándo se realiza más trabajo sobre el sistema mueble/Tierra:*

a) *Elevando con rapidez constante el mueble desde el suelo a un quinto piso por medio de una cuerda y una polea.*

b) *Subiéndolo con rapidez constante por las escaleras, desde el suelo hasta el quinto piso.*

Puesto que los estados inicial y final del sistema mueble/Tierra son los mismos en los dos casos, el cambio de energía también lo será y, por tanto, el trabajo realizado será el mismo.

## 2.2. Expresión de la energía mecánica de un sistema en función de sus propiedades

Vamos a tratar de hallar una expresión de la energía cinética, potencial gravitatoria y elástica en función de propiedades del sistema por separado. Como la energía mecánica es la suma de esas energías, tendremos también una expresión para la energía mecánica en función de las propiedades del sistema.

### 2.2.1. Energía cinética

Hemos dicho que la energía cinética es la capacidad que tiene un sistema para producir cambios a causa de su movimiento. Con esta idea cualitativa podemos pensar –antes de iniciar el proceso de cálculo que acabamos de describir– de qué factores dependerá que un objeto tenga mayor o menor energía cinética.

**A.18.** *Indicad, a título de hipótesis, de qué factores dependerá la energía cinética de un objeto que se encuentra en movimiento respecto de otros con los cuales puede chocar.*

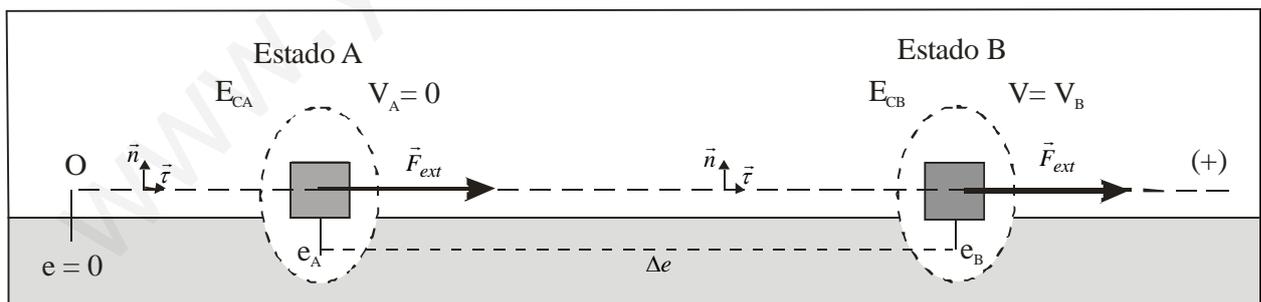


Según nuestra concepción cualitativa, la energía cinética de un sistema dependerá de lo que valga su masa y su velocidad, aumentando con ambas. Vamos a ver en qué medida estas ideas se ven apoyadas mediante la utilización cuantitativa de la relación entre trabajo exterior y energía.

Para hallar la expresión de la energía cinética, haremos lo siguiente:

- 1º. Imaginar un proceso en el cual un sistema varíe únicamente su energía cinética mediante la realización de trabajo por fuerzas exteriores.
- 2º. Intentar expresar el trabajo realizado sobre él en función de propiedades del sistema (según nuestra concepción cualitativa, en función de la masa y la velocidad).
- 3º. Usar  $W_{ext} = \Delta E$  para relacionar la energía cinética ( $E_c$ ) con las propiedades del sistema.

Ése es el caso de un objeto, inicialmente en reposo, que es arrastrado sobre una superficie horizontal (sin rozamiento, para que no exista calentamiento) por medio de una fuerza constante.



Como vemos, debido a la realización de un trabajo (cuyo valor es  $W_{ext} = F_t \cdot \Delta e$ ) el cuerpo pasa de un estado A (en el que tiene una energía  $E_{CA}$ ) a un estado B (en el que tiene una  $E_{CB}$ ). El cambio de energía del sistema,  $\Delta E = E_B - E_A$  (que en este caso coincide con  $\Delta E_{CA}^B$ ), será igual al trabajo que se ha realizado por el exterior mientras el sistema pasa del estado A al estado B. Es decir:

$$W_{ext A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_{CA}^B \rightarrow F_t \cdot \Delta e = E_{CB} - E_{CA}$$

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Vamos a expresar el trabajo realizado (el primer miembro de la igualdad) en función de esas propiedades (la masa y la rapidez) del sistema.

$$\text{Como } F_t = m \cdot a_t \text{ y } a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow F_t = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Por otro lado,  $\Delta e$  es el desplazamiento de un cuerpo con movimiento uniformemente acelerado que ha partido del reposo, es decir:

$$\Delta e = \frac{1}{2} a_t \cdot (\Delta t)^2$$

Así, el  $W_{\text{ext}}$  realizado, expresado en función de las propiedades del sistema, será:

$$W_{\text{ext}A}^B = F_t \cdot \Delta e = \left( m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta t} \right) \cdot (\Delta t)^2 = \frac{1}{2} m (\Delta v)^2 = \frac{1}{2} m v_B^2$$

siendo  $v_B$  la rapidez del cuerpo en el estado B (en el estado A es  $v_A = 0$ ).

$$\text{Por tanto: } E_{cB} - E_{cA} = \frac{1}{2} m v_B^2$$

Y si tomamos como convenio que la  $E_c$  de un objeto es cero cuando está en reposo (siempre respecto de un sistema de referencia espacial determinado), podemos escribir:

$$E_{cB} = \frac{1}{2} m v_B^2$$

**Po tanto, la energía cinética de un objeto en movimiento viene dada por:**

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2$$

**A.19.** *¿Qué significa que la energía cinética de un objeto es de 750 J?*

Podemos interpretarlo de dos formas:

- ✓ Que el cambio de  $E_C$  que experimentaría el objeto si se quedara en reposo, en el mismo sistema de referencia, sería de 750 J (en este caso, disminuiría en 750 J).
- ✓ Que puede realizar sobre el exterior un trabajo de 750 J hasta quedar en reposo, siempre y cuando no se produzcan “pérdidas” de energía por calentamiento o deformaciones del objeto ya que, en ese caso, dicho trabajo sería menor.

**A.20.** *Una persona de 60 kg viaja sentado en un autobús que se desplaza a 72 km/h. Determinad la energía cinética del pasajero:*

a) *Respecto del conductor del autobús.*

b) *Respecto de una persona que espera quieta en la parada a que llegue el autobús.*

La expresión  $E_C = \frac{1}{2} m v^2$  puede hacernos pensar que podemos determinar, de una manera absoluta, la energía cinética de un sistema. La situación planteada en la actividad anterior permite constatar que esto no es así y que mientras que para la persona sentada en la acera la energía cinética sería de 12.000 J, para el conductor sería 0. Vemos, pues, que **el valor de  $E_c$  de un sistema depende del observador** que la determine.

Lo que hemos avanzado nos permite ya realizar predicciones sobre situaciones de interés que hemos abordado en cinemática, pues si podemos calcular el trabajo realizado por las fuerzas que actúan sobre un cuerpo cuando sólo cambia su  $E_C$ , podemos relacionar el desplazamiento con la rapidez del objeto al final del mismo.

**A.21.** Una maceta cae desde una altura de 15 m sobre el suelo. ¿Con qué velocidad llegará al suelo? (Escoged como sistema sólo la maceta y suponed el rozamiento con el aire despreciable). Rdo.  $v = 17'15 \text{ m/s}$ .

**A.22.** Se utiliza un muelle horizontal para lanzar un objeto. ¿Qué trabajo realiza el muelle sobre un objeto de 50 g si lo lanza con una rapidez de 15 m/s? (Elegid como sistema sólo el objeto y suponed que no hay rozamientos). Rdo.  $W_{ext} = 5'625 \text{ J}$ .

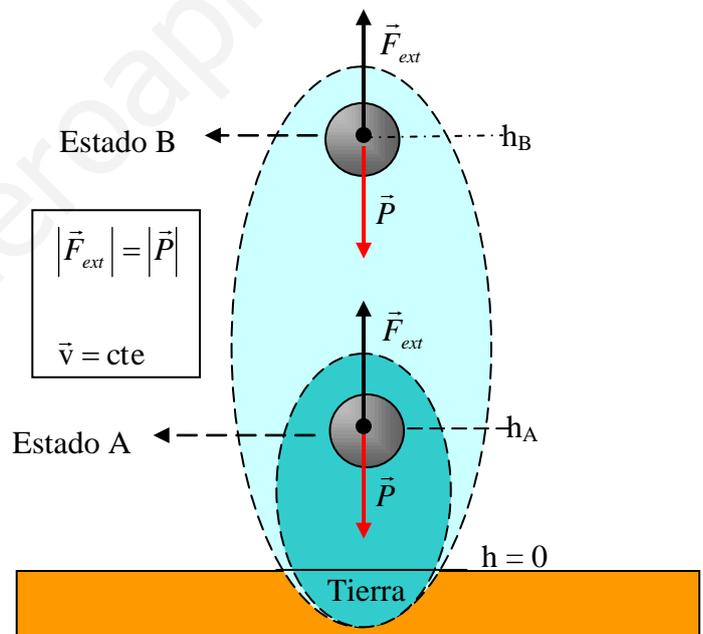
### 2.2.2. Energía potencial gravitatoria

Vamos, ahora, a tratar de encontrar -siguiendo un proceso análogo al anterior- una expresión que permita conocer la energía potencial gravitatoria del sistema formado por un objeto y la Tierra, cuando dicho objeto se encuentra a una pequeña altura sobre el suelo.

**A.23.** Dibujad un sistema formado por un objeto y la Tierra\* y distintos estados del mismo que tengan distinta  $E_P$ . Formulad hipótesis sobre las propiedades de las que dependerá la energía potencial.

Para hallar una expresión cuantitativa de  $E_P$  elegiremos una transformación en la que sólo cambie la energía potencial gravitatoria de un sistema debido a la realización de trabajo por el exterior (por una persona o una máquina...), aplicaremos la relación entre trabajo y cambio de energía, y trataremos de expresar el trabajo en función de propiedades del sistema.

Eso es lo que sucede cuando elevamos un objeto verticalmente **con velocidad constante**, como se indica en la figura adjunta.



Al pasar el sistema del estado A al estado B, sólo varía su energía potencial y, según nuestra hipótesis fundamental, se cumplirá que:

$$(1) W_{ext A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_{p A}^B = E_{p B} - E_{p A}$$

La única fuerza exterior que actúa sobre el sistema es la que se ejerce sobre el objeto, cuyo módulo es igual al del peso,  $mg$ , del objeto (una propiedad del sistema: la fuerza de atracción gravitatoria entre el objeto y la Tierra). El desplazamiento de la fuerza externa coincide con lo que varía la altura sobre el suelo,  $h_B - h_A$ , (es decir, lo que varía la separación entre el objeto y la Tierra, otra propiedad del sistema). Así, el trabajo exterior será:

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

$$(2) W_{ext\ A}^B = F_{ext\ t} \cdot \Delta e = mg \cdot (h_B - h_A) = mgh_B - mgh_A$$

Igualando las expresiones (1) y (2) anteriores:  $E_{p_B} - E_{p_A} = mgh_B - mgh_A$

Para poder asignar una expresión cuantitativa a la  $E_p$  es necesario que tomemos un acuerdo sobre cuál sería su valor en un determinado estado del sistema\*. Todos los cálculos se facilitan mucho si adoptamos el convenio de que, cuando la altura sobre el suelo sea 0, la  $E_p$  valga cero.

Con dicho convenio cuando  $h_A = 0$ , la  $E_{p_A}$  valdrá también 0 y por tanto, podemos asegurar en la última igualdad que si  $h_A = 0$ , entonces:

$$E_{p_B} = mgh_B$$

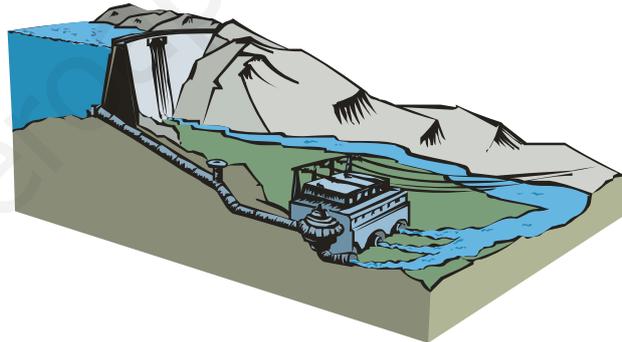
Es decir: la energía potencial gravitatoria del sistema cuerpo-Tierra cuando el cuerpo se encuentre a una altura "h" cualquiera sobre el suelo, será:

$$E_p = mgh$$

Expresión que confirma la validez de las hipótesis hechas en actividades anteriores .

**A.24.** ¿Qué significa que la energía potencial gravitatoria de un embalse es de 10.000 MJ ( $10^{10}$  J)?

¿Y que la potencia que puede desarrollar es de 1 MW?



Al igual que ocurre con la energía cinética, no es posible determinar de una manera absoluta la energía potencial de un sistema, ya que su valor depende del nivel de altura cero que tomemos. En consecuencia, diferentes observadores indicarán, si toman distintos orígenes para medir la altura, diversos valores para la energía potencial de un mismo estado de un sistema. Esto no representa un inconveniente porque lo que nos interesa de las transformaciones es la relación entre el cambio de energía y el trabajo realizado, y esta relación es la misma en cualquier sistema de referencia inercial.

**A.25.** En el interior de un apartamento hay un objeto de 5 kg de masa en el borde de una mesa de 0'75 m de altura. Calculad la variación de energía potencial gravitatoria cuando dicho objeto cae al suelo del apartamento (situado a 30 m sobre la calle).

- Según una persona que se halla dentro de la vivienda
- Según una persona que se encuentra en la calle.

Rdo. a)  $\Delta E_p = -36'75$  J; b)  $\Delta E_p = -36'75$  J

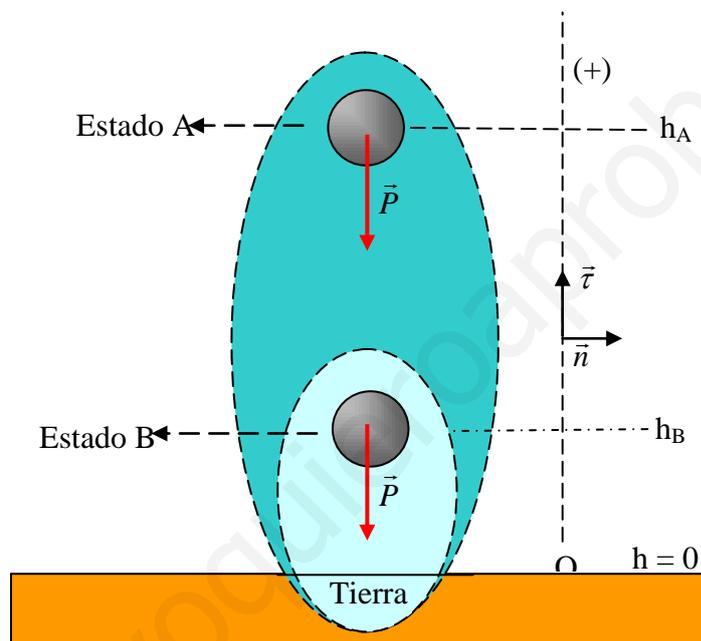
**¿Qué relación existe entre el cambio de energía potencial gravitatoria y el trabajo realizado por la fuerza peso?**

Supongamos el sistema formado por una piedra en reposo a una cierta altura  $h_A$  sobre el suelo. Si dejamos la piedra en libertad, caerá hacia el suelo debido a la acción de la fuerza peso, de modo que la energía potencial gravitatoria del sistema ( $E_p = mgh$ ) se hará cada vez menor conforme vaya disminuyendo la altura. Así, cuando la piedra se encuentre a una altura  $h_B$  sobre el suelo (menor que la  $h_A$  inicial) la energía potencial habrá cambiado de  $E_{pA} = mgh_A$  a  $E_{pB} = mgh_B$ .

**Elaborad un esquema gráfico apropiado en el que se represente la transformación anterior y, a continuación, calculad el trabajo realizado por la fuerza peso en esa transformación (en función del peso  $mg$  de la piedra y de las alturas  $h_A$  y  $h_B$ ).**

En la figura siguiente, es fácil darse cuenta de que el trabajo realizado por la fuerza peso será positivo y vendrá dado por:

$$W_P = F_t \cdot \Delta e = -mg \cdot (h_B - h_A) = -mgh_B + mgh_A = mgh_A - mgh_B \quad (1)$$



Por otra parte sabemos que en esta transformación la variación de energía potencial será:

$$\Delta E_p = mgh_B - mgh_A \quad (2)$$

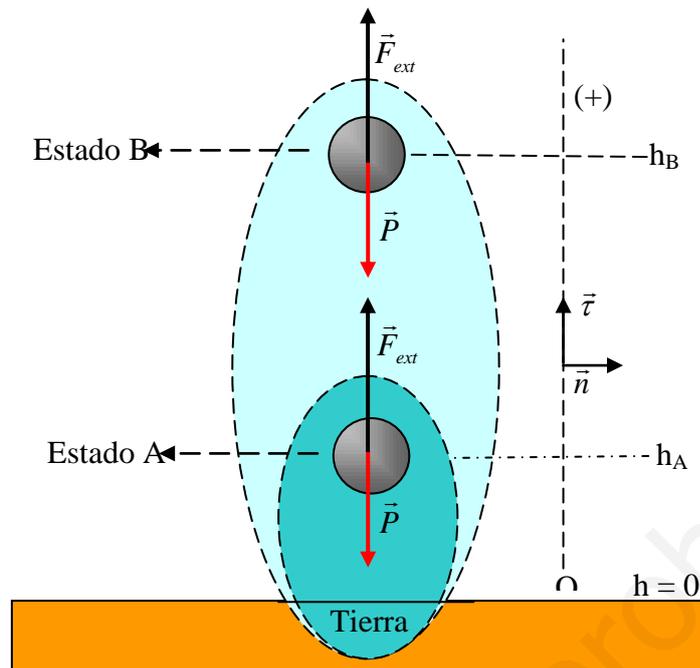
De las ecuaciones (1) y (2) se obtiene que:  $W_{P_{A \rightarrow B}} = -\Delta E_{p_A}^B$

La relación anterior la hemos obtenido considerando el caso de un cuerpo que desde una situación inicial de reposo cae hacia el suelo sometido únicamente a la acción de la fuerza peso. Cabe plantearse si esa relación será la misma o no en otras situaciones.

*Suponed que elevamos verticalmente hacia arriba un cuerpo ejerciendo sobre él una fuerza mayor que su peso desde una altura  $h_A$  hasta otra mayor  $h_B$ . Dibujad un esquema de la situación planteada y a continuación hallad el trabajo que realizará la fuerza peso. Finalmente obtened la relación existente entre dicho trabajo y el cambio de energía potencial gravitatoria experimentado por el sistema cuerpo-Tierra*

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

En este caso la fuerza peso tiene sentido contrario al desplazamiento del cuerpo (por lo que el trabajo que realiza será negativo). En la figura siguiente se presenta un esquema de la situación planteada:



El trabajo que realiza la fuerza peso será:

$$W_P = F_t \cdot \Delta e = -mg \cdot (h_B - h_A) = -mgh_B + mgh_A = mgh_A - mgh_B \quad (1)$$

Como en este caso  $h_A < h_B$ , el  $W_P$  es negativo.

Por otra parte sabemos que en esta transformación la variación de energía potencial será:

$$\Delta E_p = mgh_B - mgh_A \quad (2)$$

Como  $h_B > h_A$ , el  $\Delta E_p$  es positivo

De las ecuaciones (1) y (2) se obtiene que:  $W_{P_{A \rightarrow B}} = -\Delta E_{p_A}^B$

Así pues la relación entre el trabajo realizado por la fuerza peso y el cambio experimentado en la energía potencial gravitatoria es la misma que antes. Este resultado se puede generalizar a cualquier otra situación, sin importar ni el camino seguido para pasar de una configuración A a otra B ni la posible presencia otras fuerzas además del peso. En todos los casos se cumple que:

**El trabajo realizado por el peso y el cambio de energía potencial gravitatoria son siempre cantidades iguales y de signo contrario:** Cuando el trabajo realizado por el peso es positivo, la energía potencial gravitatoria disminuye y viceversa. Así pues:

$$W_{P_{A \rightarrow B}} = -\Delta E_{p_{gA}}^B$$

**A.26.** Se lanza un cuerpo de 2 kg por un plano inclinado. Calculad el trabajo realizado por el peso cuando haya ascendido 0'5 m en vertical. Rdo. -9'8 J.

**A.27.** Una piedra de una tonelada cae rodando por la ladera de una montaña hasta llegar a la base de la misma. Sabiendo que la piedra se encontraba inicialmente a 2400 m de altura sobre la base de la montaña, calculad el cambio de energía potencial y el trabajo realizado por la fuerza peso. Rdo.  $\Delta E_p = -2352 MJ$ ;  $W_{\text{peso}} = 2352 MJ$

### 2.2.3. Energía potencial elástica

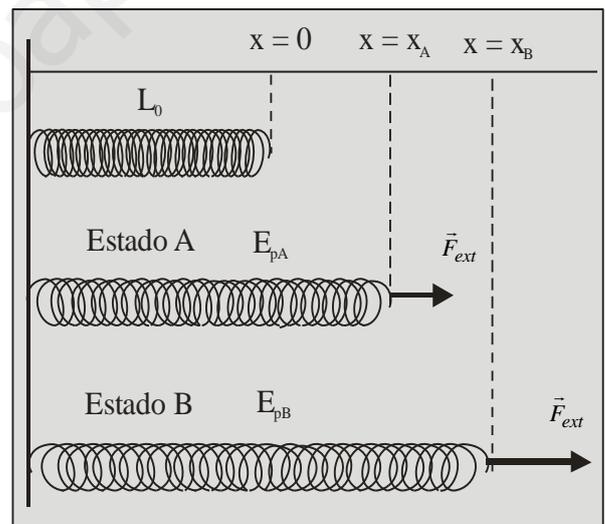
Para hallar una expresión que relacione la energía potencial elástica con las propiedades de un sistema (que pueda tener este tipo de energía), comenzaremos por un análisis cualitativo.

**A.28.** Dibujad un muelle, en distintos estados, de manera que tenga energía potencial elástica diferente en cada uno. Formulad hipótesis sobre de qué dependerá la energía potencial de un muelle.

Es bastante intuitivo creer que cuando el muelle no esté estirado ni comprimido, no tendrá  $E_p$ , y que la  $E_p$  del muelle dependerá de lo que se estire o comprima, es decir, de su elongación ( $x$ ). No será lo mismo que sea de un material u otro, que tenga más o menos espiras..., características que quedan recogidas en su constante elástica,  $k$  (como ya vimos en Dinámica).

Como hemos hecho en los casos anteriores, para hallar la expresión cuantitativa, imaginaremos una situación, como la que se indica en la figura, en la que se realiza  $W_{\text{ext}}$  y varía únicamente la energía potencial elástica del muelle (que se alarga con velocidad constante).

Al pasar del estado A al estado B, el punto de aplicación de la fuerza exterior, (la que ejerce la mano sobre el muelle), se desplaza un valor  $x_B - x_A$  (la fuerza que hace la pared sobre el muelle también es exterior también, pero no realiza trabajo porque su punto de aplicación no se desplaza) y, según nuestra hipótesis fundamental, se cumplirá que:



$$(1) W_{\text{ext}A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_{pA}^B = E_{pB} - E_{pA}$$

No obstante, al tratar de hallar el trabajo aparece una seria dificultad: la fuerza exterior va variando su módulo según se alarga el muelle (en Dinámica vimos que  $|\vec{F}_{\text{ext}}| = kx$ ). Puesto que su valor va cambiando a lo largo del desplazamiento, ¿cuál debemos utilizar para hallar el trabajo?

Podemos realizar una estimación del trabajo: El  $W_{\text{ext}A \rightarrow B}$ , será mayor que  $kx_A \cdot (x_B - x_A)$ , es decir, de lo que valdría si la fuerza fuera siempre igual a lo que vale al principio del desplazamiento, y menor que  $kx_B \cdot (x_B - x_A)$ , es decir, de lo que valdría si la fuerza fuera siempre igual a lo que vale al final del desplazamiento.

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Una buena estimación, en este caso, es hallar la media de esos dos valores:

$$W_{ext A}^B = \frac{kx_A \cdot (x_B - x_A) + kx_B \cdot (x_B - x_A)}{2} = \frac{k(x_B - x_A) \cdot (x_B + x_A)}{2} = \frac{1}{2} \cdot k(x_B^2 - x_A^2)$$

Ya tenemos, por tanto, el trabajo expresado en función de propiedades del sistema:

$$(2) W_{ext A}^B = \frac{1}{2} x_B^2 - \frac{1}{2} kx_A^2$$

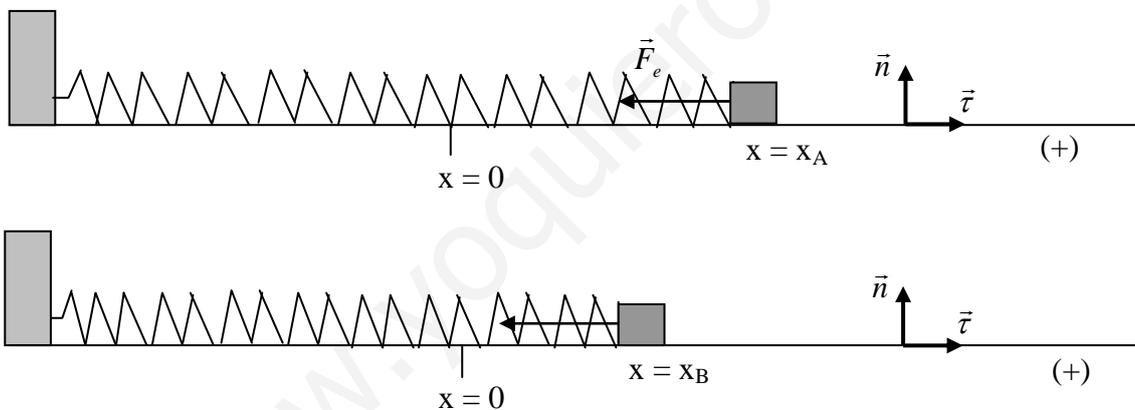
Igualando ahora las dos expresiones (1) y (2) obtenemos:  $Ep_B - Ep_A = \frac{1}{2} x_B^2 - \frac{1}{2} kx_A^2$

Si tomamos por convenio que cuando  $x = 0$  (el muelle no está estirado ni comprimido), su  $E_p$  elástica sea 0, podemos asegurar en la última igualdad que si  $x_A = 0$ ,  $Ep_B = \frac{1}{2} x_B^2$  con lo que, en general, para cualquier valor de  $x$ , se cumplirá que:

$$Ep = \frac{1}{2} kx^2$$

#### ¿Qué relación existe entre el cambio de energía potencial elástica y el trabajo realizado por la fuerza elástica?

Podemos pensar, por ejemplo, en un bloque sujeto al extremo libre de un muelle tal y como se representa en la figura adjunta:



En la situación representada supondremos que no hay rozamiento, que el muelle es totalmente elástico y su masa despreciable<sup>3</sup>. El extremo izquierdo del mismo se halla sujeto a una pared.

Cuando el bloque pasa de la posición inicial dada por  $x_A$  a la posición  $x_B$  la fuerza elástica del muelle realiza un trabajo positivo mientras que el cambio en la energía potencial elástica es negativo. Mediante un procedimiento análogo a como hicimos en el caso de la fuerza gravitatoria es fácil comprobar que los dos valores obtenidos son iguales y de signos contrarios.

Lo mismo sucede si el muelle se alarga (interviniendo o no fuerzas exteriores).

<sup>3</sup> Esta simplificación nos permitirá hablar de la energía potencial elástica del sistema bloque-muelle, mientras que la energía cinética de dicho sistema se deberá únicamente al movimiento del bloque (respecto del sistema de referencia escogido).

Así pues: **El trabajo realizado por la fuerza elástica y el cambio de energía potencial elástica son siempre iguales y de signo contrario:** Cuando el trabajo realizado por la fuerza elástica que ejerce el muelle es positivo, la energía potencial elástica disminuye y viceversa. Así pues:

$$W_{Fe\ A\rightarrow\ B} = -\Delta E_{p\ e\ A}^B$$

**A.29.** Se comprime con velocidad constante un resorte cuya constante elástica es 50.000 N/m. Cuando la compresión sea de 10 cm, determinad: a) El trabajo que hemos realizado al comprimirlo. b) El trabajo de la fuerza elástica. c) La variación de energía potencial elástica del resorte. Rdo. a)  $W_{\text{ext}} = 250\text{ J}$ ; b)  $W_{\text{int}} = -250\text{ J}$ ; c)  $\Delta E_p = 250\text{ J}$ .

Considerando el sistema anterior formado por el cuerpo y por el muelle como un sistema aislado en el que no se produce ningún calentamiento, analizad qué es lo que ocurre con la energía mecánica, la energía cinética y la energía potencial elástica, cuando el cuerpo se halla vibrando en torno a la posición de equilibrio.

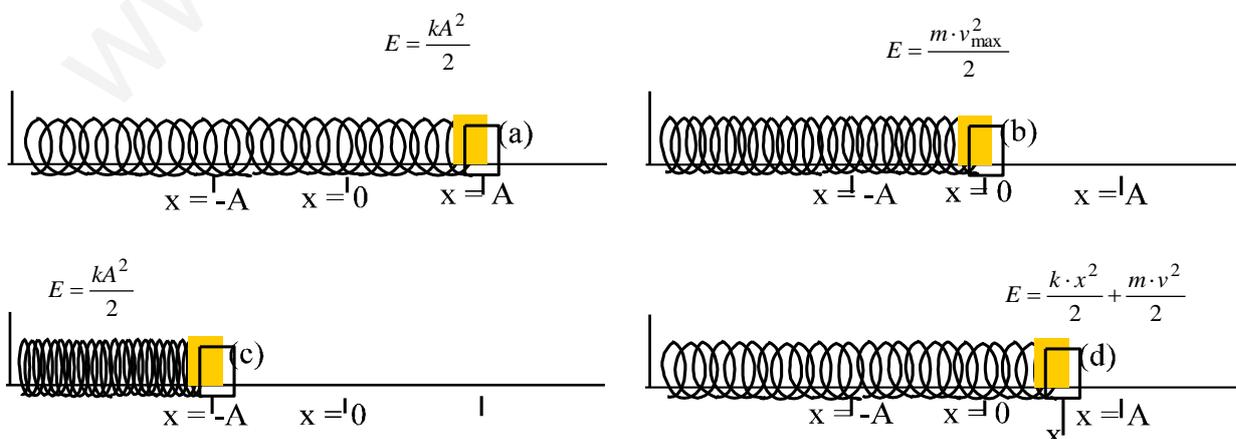
Como sabemos cuando un sistema cambia de estado el trabajo exterior realizado sobre el sistema es igual al cambio de energía experimentado  $W_{\text{ext}} = \Delta E$ . Si el sistema está aislado y, por tanto, no hay trabajo exterior, ocurrirá que  $W_{\text{ext}} = 0$  y por tanto  $\Delta E = 0$ , es decir, la energía del sistema no cambiará, pero eso, no significa que el sistema no pueda evolucionar (con tal de que se cumpla siempre, que E no cambie).

En nuestro caso, si el cuerpo pasa de una posición  $x_1$  a otra posición  $x_2$  se cumplirá que:

$$\Delta E_1^2 = \Delta E_{c_1}^2 + \Delta E_{p_1}^2 = 0 \rightarrow (E_{c_2} - E_{c_1}) + (E_{p_2} - E_{p_1}) = 0 \rightarrow E_{c_2} + E_{p_2} = E_{c_1} + E_{p_1}$$

$$\text{y sustituyendo: } \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2.$$

En la figura siguiente vemos que la energía mecánica del sistema formado por el muelle y el bloque puede encontrarse sólo en forma de energía cinética (b), sólo en forma de energía potencial elástica (a y c) o bien como una suma de ambas (d), pero si el sistema está aislado y no hay calentamiento, la energía mecánica siempre tendrá el mismo valor (E). En general, en cualquier MAS conforme se mueve el objeto que vibra, cambia la energía cinética y cambia la energía potencial, pero si el sistema está aislado y no hay calentamiento, ello ocurre siempre de forma que la energía mecánica (suma de ambas) permanece constante tomando siempre el mismo valor cualquiera que sea la posición del objeto vibrante.



### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Si consideramos, pues, una de las posiciones extremas (en la que el cuerpo está momentáneamente en reposo) toda la energía mecánica es potencial, mientras que si consideramos la posición central O (en la que el cuerpo se mueve a velocidad máxima y  $x = 0$ ), toda la energía es cinética. Así pues, el valor de la energía mecánica en un MAS lo podemos expresar como:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

*Un estudiante de física afirma que una masa de 50 g que oscila con MAS sujeta a un muelle de constante elástica  $k = 300 \text{ N/m}$  con una amplitud de  $A = 0,2 \text{ m}$  en un plano horizontal, no puede en ningún caso moverse a más de  $15,5 \text{ m/s}$ . ¿Estáis de acuerdo con esa limitación? Explicad con el mayor detalle posible vuestra respuesta. Rdo.  $v_{\max} = 15,5 \text{ m/s}$*

Aunque las ecuaciones que se han introducido se han hecho considerando un ejemplo concreto (cuerpo-muelle), también son válidas para cualquier partícula (o masa que se pueda considerar como puntual) que vibre con MAS en un medio elástico, en cuyo caso el medio haría el mismo papel que el muelle (ejercer una fuerza elástica recuperadora sobre la partícula) y el sistema estaría formado por la partícula y el medio (aunque habitualmente sólo nos refiramos a la partícula).

*Una masa puntual de 10 g se encuentra vibrando con MAS en un medio elástico, con una frecuencia de 500 Hz y una amplitud de 2 cm. Obtened su energía mecánica. Rdo.  $E = 19,7 \text{ J}$*

Los resultados que hemos obtenido en cuanto al trabajo realizado por la fuerza peso o la fuerza elástica y la variación de la energía potencial correspondiente, se pueden generalizar también para otras fuerzas y energías potenciales con las que se hallan asociadas como, por ejemplo, la fuerza eléctrica y la energía potencial eléctrica. De esta forma se puede afirmar que:

**La variación de  $E_p$  de un sistema cuando pasa de un estado A a otro B, es siempre igual y de signo contrario al trabajo realizado por la fuerza interior conservativa (es decir, la fuerza a la que se halla asociada esa  $E_p$ ) cambiado de signo.** Así pues:

$$W_{PA \rightarrow B} = -\Delta E_{p_g A}^B; \quad W_{Fe A \rightarrow B} = -\Delta E_{p_e A}^B \quad \text{y en general:} \quad \boxed{W_{\text{intcons} A \rightarrow B} = -\Delta E_{p_A}^B}$$

Cualitativamente esto significa que cuando la energía potencial aumenta, el trabajo de las fuerzas interiores conservativas es negativo (se oponen a la transformación); y cuando la energía potencial disminuye, el trabajo de dichas fuerzas es positivo.

También podemos interpretar cualitativamente esta relación pensando que, **si un sistema en el que existen fuerzas interiores conservativas se deja libre (es decir, en ausencia de fuerzas exteriores) estando las distintas partes del mismo inicialmente en reposo, siempre evolucionará de manera que su energía potencial disminuya** (puesto que el desplazamiento de las partes del sistema se realizará en la misma dirección y sentido que las fuerzas interiores,  $W_{\text{intcons}}$  será positivo, y  $\Delta E_p$  tendrá que ser negativo).

**A.30. Recapitulad lo hecho hasta aquí, indicando qué hemos avanzado en el problema que nos habíamos planteado.**

Algunas de las cuestiones planteadas eran si existían límites en los cambios de movimiento que pueden ocurrir en la naturaleza y si había relación entre cambios de propiedades de distinto tipo que pueden experimentar los sistemas.

A partir de nuestras ideas cualitativas sobre qué hace falta para que se produzcan cambios, hemos concretado cuantitativamente los conceptos de trabajo y de energía y, restringiéndonos a cambios en propiedades mecánicas, hemos introducido, a modo de hipótesis, una relación entre el trabajo que se realiza sobre un sistema (el  $W_{\text{ext}}$ ) y la variación de su energía:  $W_{\text{ext}} = \Delta E$ .

Con esta hipótesis, hemos expresado el cambio de energía mecánica que experimenta un sistema cuando pasa de un estado a otro en función del cambio en sus propiedades:

$$W_{\text{ext}} = \Delta E = \Delta E_c + \Delta E_{p_{\text{grav}}} + \Delta E_{p_{\text{elast}}} = \Delta\left(\frac{1}{2}mv^2\right) + \Delta(mgh) + \Delta\left(\frac{1}{2}kx^2\right)$$

Así pues, la relación  $W_{\text{ext}} = \Delta E$  ya supone un límite en los cambios mecánicos que pueden ocurrir en un sistema: el cambio de la energía de un sistema no puede ser mayor ni menor que lo que vale el trabajo exterior. Y, por tanto, sus propiedades pueden cambiar pero sólo de tal manera que se cumpla esa restricción.

### 3. EL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA

Una situación especialmente interesante sucede **cuando no se realiza trabajo exterior\* sobre el sistema**, tal y como sucede cuando elegimos un sistema aislado. En este caso, el sistema podrá cambiar de estado, pero de manera que no cambie su energía mecánica, ya que:

$$\text{Si } W_{\text{ext}} = 0 \text{ y } W_{\text{ext}} = \Delta E \Rightarrow \Delta E = 0$$

Es decir, la energía del sistema no cambiará, se “conservará”. Este principio (recordemos que proviene de una hipótesis, no se demuestra matemáticamente) recibe el nombre de: **Principio de Conservación de la Energía Mecánica**.

Podemos enunciarlo como:

“Un sistema aislado, en el que sólo se producen cambios mecánicos, podrá tener distintos estados, pero la energía mecánica de dicho sistema siempre será la misma”.

**A.31.** Si no se realiza trabajo sobre el sistema, si se trata de un sistema aislado, si no varía su energía, ¿quiere decir que no cambiará nada?

Eso no quiere decir, repetimos, que el sistema tiene que permanecer “estático” sin ninguna modificación, sino que, **puesto que desde el exterior no se realiza ningún trabajo sobre el sistema, los cambios que se puedan producir en él tienen una limitación: la energía mecánica total debe permanecer constante**.

El sistema puede sufrir transformaciones, cambiar el valor de sus propiedades, pero **si un sistema aislado pasa de un estado A a otro B, se cumplirá que  $\Delta E_A^B = 0$  y por tanto, que:**

$$\Delta E_{cA}^B + \Delta E_{p_{\text{grav}A}}^B + \Delta E_{p_{\text{elast}A}}^B = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta\left(\frac{1}{2}mv^2\right) + \Delta(mgh) + \Delta\left(\frac{1}{2}kx^2\right) = 0$$

**O, lo que es equivalente  $E_A = E_B$ , con lo que:**

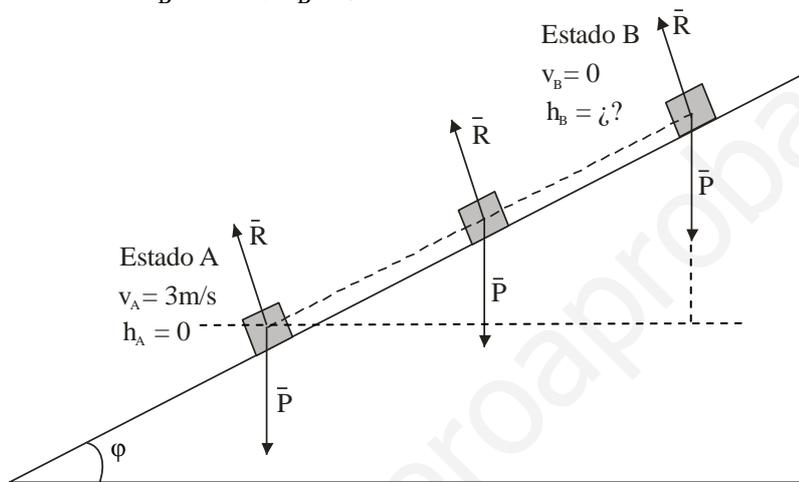
$$E_{cA} + E_{p_{\text{grav}A}} + E_{p_{\text{elast}A}} = E_{cB} + E_{p_{\text{grav}B}} + E_{p_{\text{elast}B}} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A + \frac{1}{2}kx_A^2 = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B + \frac{1}{2}kx_B^2$$

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Es decir, los cambios en unas de sus propiedades estarán relacionados con los cambios en las otras. No podrán cambiar de cualquier manera. Esto abre un campo de aplicación de enorme interés, pues, si los conceptos y relaciones que hemos inventado son ciertos, podremos relacionar el valor de las propiedades en un estado con su valor en otro estado distinto. Esto podemos utilizarlo para calcular el valor de propiedades que no conocemos, como se verá en los ejemplos siguientes.

**A.32.** Se lanza un bloque de 2 kg con una rapidez de 3 m/s por un plano inclinado de 30°. ¿Qué altura máxima alcanzará? (Considerad despreciable el rozamiento).

Cualitativamente, el bloque tiene al inicio una velocidad que irá disminuyendo según sube por el plano inclinado hasta que se detendrá a una cierta altura. Desde un punto de vista energético, un sistema (el cuerpo-Tierra<sup>4</sup>) pasa de un estado, A, a otro estado, B, en el que deseamos conocer el valor de alguna de sus propiedades. En concreto, buscamos la altura que alcanza, es decir, de un modo operativo: el valor de  $h_B$  cuando  $v_B = 0$ .



En principio, parece lógico esperar que la altura que alcance dependa de la rapidez con que se haya lanzado, del ángulo del plano (a mayor inclinación, mayor altura), de la intensidad del campo gravitatorio,  $g$  (en la Luna alcanzaría una altura mayor, en igualdad de las otras condiciones) y de la masa (¿a mayor masa alcanzaría menor altura?).

Podemos relacionar las propiedades del sistema cuerpo-Tierra en el estado B con las propiedades en A, pues en la transformación de  $A \rightarrow B$ , se cumplirá:

$$W_{ext A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_{cA}^B + \Delta E_{pA}^B$$

La única fuerza exterior que se ejerce sobre el sistema cuerpo-Tierra, es  $\vec{R}$ , cuyo trabajo es cero porque es perpendicular al desplazamiento de su punto de aplicación. Por tanto, si tomamos el nivel cero de altura en  $h_A$ , tendremos que:

$$W_{ext A}^B = W_R = 0 \rightarrow \Delta E_A^B = \Delta E_{cA}^B + \Delta E_{pA}^B = 0, \text{ es decir: } (E_{cB} - E_{cA}) + (E_{pB} - E_{pA}) = 0 \rightarrow (0 - \frac{1}{2}mv_A^2) + (mgh_B - 0) = 0$$

$$\text{De donde obtenemos que la altura alcanzada valdría: } h_B = \frac{v_A^2}{2g} = \frac{3^2}{2 \cdot 9.8} = 0.46m$$

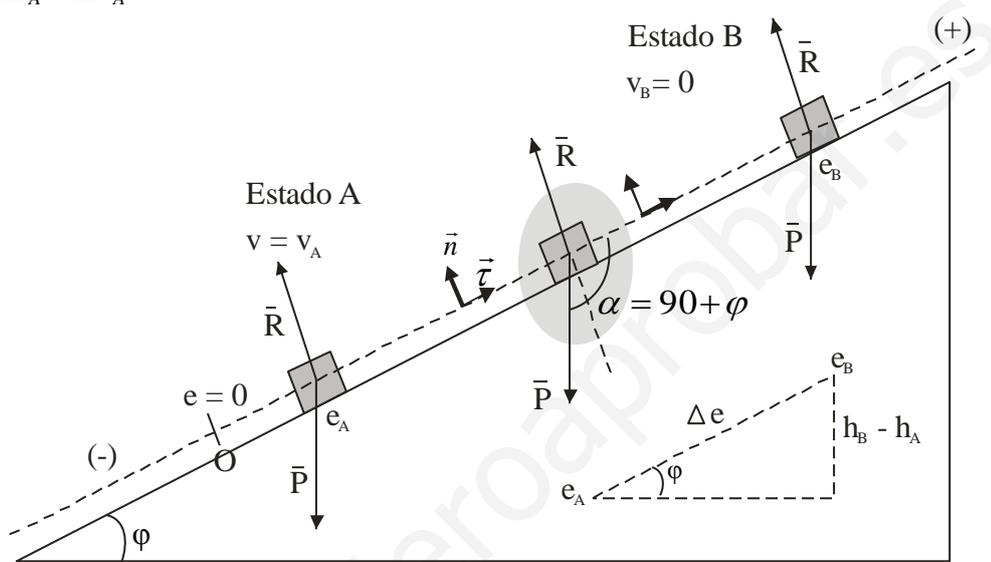
<sup>4</sup> Elegiremos siempre el sistema de forma que su estudio sea el más sencillo posible. Esto se consigue haciendo que las fuerzas conservativas sean interiores a dicho sistema.

Vemos que la altura que alcanza depende de  $v_A$  y  $g$ , como esperábamos, pero que no depende de la inclinación del plano,  $\varphi$ , ni de la masa. Eso significa que el bloque, sin rozamientos y para una misma rapidez inicial, siempre alcanzará la misma altura respecto a la posición de lanzamiento, independientemente del ángulo del plano inclinado y de la masa que tenga dicho bloque.

¿Qué pasa si elegimos como sistema sólo al bloque?

En ese caso, el sistema habrá pasado de tener una rapidez  $v_A$  a estar parado,  $v_B = 0$ . Es decir, sólo ha variado su  $E_C$ . Su  $E_P$  no ha variado, pues no ha variado la separación entre distintas partes del bloque. A lo largo de esta transformación se ha realizado un trabajo exterior, y se cumplirá que:

$$(1) W_{ext A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_C^B$$



En este caso:  $W_{ext A}^B = W_{R A}^B + W_{P A}^B = \Delta E_C^B$

$W_R = 0$  por ser  $\vec{R}$  perpendicular al desplazamiento

$$W_P = P_t \cdot \Delta e = mg \cdot \cos(90 + \varphi) \cdot \Delta e = -mg \cdot \sin \varphi \cdot \Delta e = -mg \cdot (h_B - h_A)$$

Por tanto, si consideramos  $h_A = 0$ , podremos reescribir la ecuación (1) anterior como:

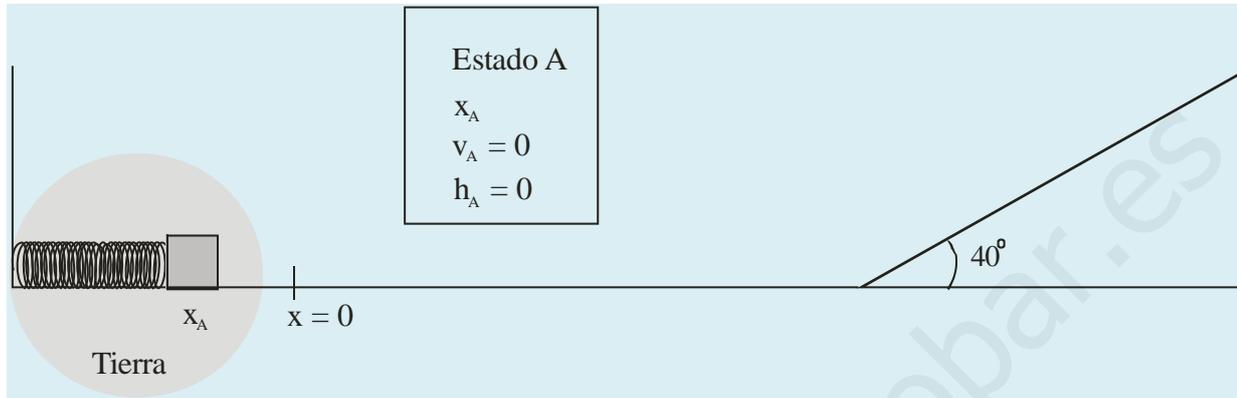
$$-mg \cdot (h_B - 0) = \left(0 - \frac{1}{2} m v_A^2\right) \rightarrow h_B = \frac{v_A^2}{2g} = \frac{3^2}{2 \cdot 9.8} = 0.46m$$

**A.33.** Deseamos lanzar un objeto de 0.5 kg utilizando el resorte de la figura cuya constante elástica vale  $k = 40000 \text{ N/m}$ . Se pide: a) ¿Cuánto hemos de comprimirlo para que el objeto abandone la rampa con una rapidez de 10 m/s? b) ¿Qué altura alcanzará en el aire? c) Con qué rapidez llegará al suelo? (Nota: Considerad que sólo hay cambios mecánicos).



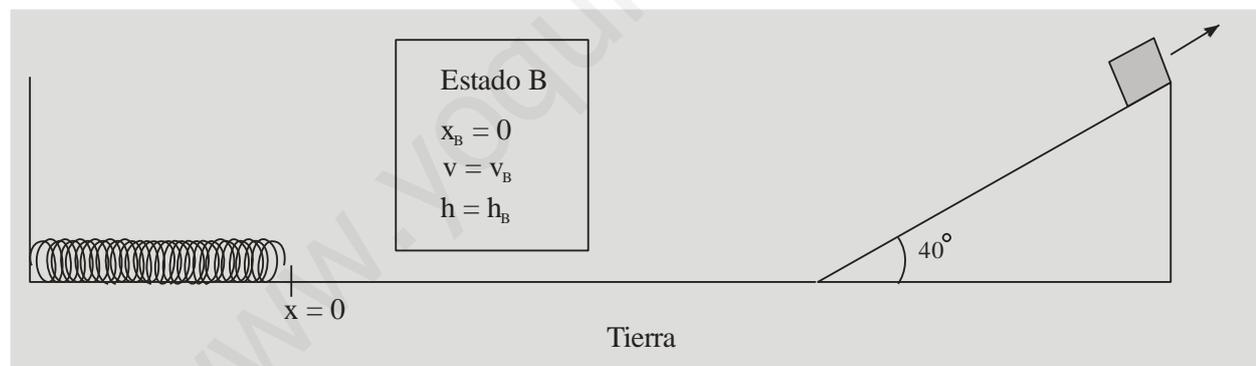
### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Descriptivamente, la situación parece clara: comprimimos el cuerpo contra el muelle hasta que el sistema cuerpo-muelle-Tierra<sup>5</sup> alcanza un estado, A, en el que el resorte está comprimido una longitud  $x_A$ . Al soltarlo, disminuirá la energía potencial elástica del sistema y aumentará la cinética. Recorrerá el tramo horizontal sin rozamiento y ascenderá por la rampa de lanzamiento, aumentando la energía potencial gravitatoria y disminuyendo la energía cinética. Según lo comprimido que estuviera el resorte en el estado A, llegará al final de la rampa, estado B, con mayor o menor rapidez (o, incluso, no llegará). Buscamos, por tanto, cuánto hemos de comprimir el resorte para que el objeto salga de la rampa con una rapidez dada (10 m/s).



Parece intuitivo que la compresión necesaria,  $x_A$ , deberá ser mayor cuanto mayor sea la masa del objeto, el valor de la rapidez con que deseamos que salga y la altura del borde de la rampa. Por otro lado, cuanto mayor sea  $k$  (cuánto más «fuerte» sea el muelle), menos habrá que comprimirlo.

Una vez liberado el resorte, el sistema cuerpo-resorte-Tierra sufre una transformación desde el estado A (en el que deseamos conocer una de sus propiedades) al estado B (en el que conocemos cuál es el valor de las propiedades).



La transformación se realizará de manera que:

$$W_{ext A}^B = \Delta E_A^B = \Delta E_{cA}^B + \Delta E_{p_{gravA}}^B + \Delta E_{p_{elastA}}^B$$

<sup>5</sup> La elección de este sistema hace que las fuerzas conservativas sean interiores a él: no tendremos que calcular su trabajo, y habrá cambios de energía potencial. Si elegimos como sistema el cuerpo solo, todas las fuerzas que actúan sobre él serán exteriores y tendríamos que hallar su trabajo; en este caso, sólo habría variaciones de energía cinética.

La única fuerza exterior que se ejerce sobre el sistema a lo largo de toda la transformación es la reacción del plano,  $\vec{R}$ , cuyo trabajo es cero por ser siempre perpendicular al desplazamiento. Se trata de una transformación de un sistema aislado:

$$\Delta E_A^B = \Delta E_{cA}^B + \Delta E_{p_{gravA}}^B + \Delta E_{p_{elastA}}^B = 0 \rightarrow \Delta \left( \frac{1}{2} mv^2 \right)_A^B + \Delta (mgh)_A^B + \Delta \left( \frac{1}{2} kx^2 \right)_A^B = 0 \quad \text{de donde:}$$

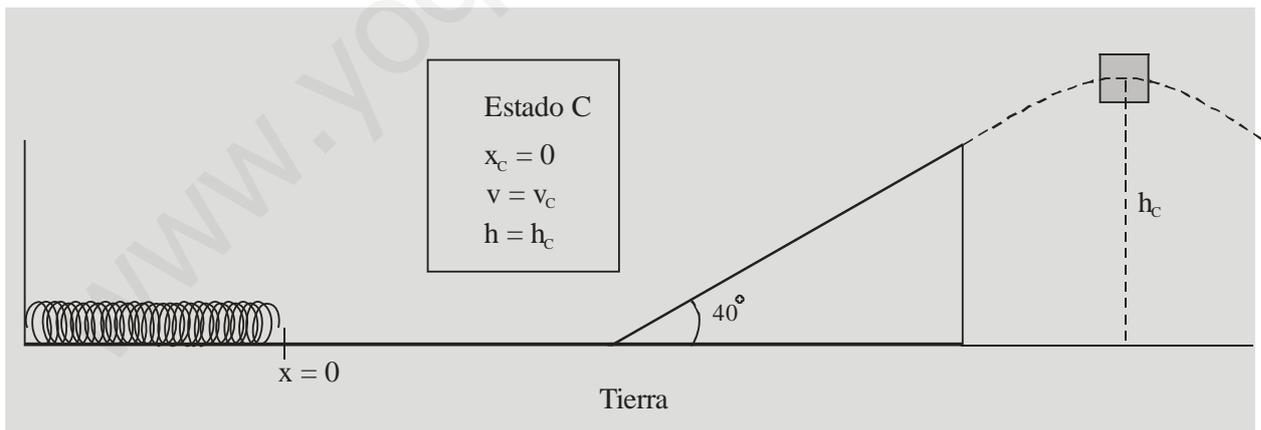
$$\left( \frac{1}{2} mv_B^2 - 0 \right) + (mgh_B) + \left( 0 - \frac{1}{2} kx_A^2 \right) = 0 \rightarrow x_A = \sqrt{\frac{mv_B^2 + 2mgh_B}{k}} \quad \text{y sustituyendo valores: } x_A = 0'037 \text{ m}$$

De acuerdo con el resultado literal obtenido, además de ser dimensionalmente homogéneo (el primero y segundo miembros de la igualdad tienen dimensiones de longitud), la compresión depende de las magnitudes que suponíamos y del modo en que esperábamos. Aparece, no obstante, la intensidad del campo gravitatorio,  $g$ , en la que no habíamos pensado. Su influencia es lógica, ya que, por ejemplo, si la transformación sucediera en la Luna, donde  $g$  es menor, haría falta una compresión menor para conseguir que el objeto saliera con la rapidez deseada.

*¿Qué altura alcanzará en el aire?*

Una vez que ha salido de la rampa de lanzamiento, el objeto describirá un tiro oblicuo alcanzando una cierta altura máxima. Desde el punto de vista energético, durante esa transformación, el sistema cuerpo-muelle-Tierra sigue siendo un sistema aislado: no se ejercen fuerzas exteriores.

Por tanto, el valor de las propiedades del sistema en el estado C (cuando el cuerpo alcanza la altura máxima,  $h_C$ , que es lo que buscamos) estará relacionado con el valor de las propiedades en cualquier otro estado del sistema. Podemos, pues, relacionar el estado A o el B, en el que conocemos cuánto valen las propiedades, con el estado C. Si elegimos el estado B, tendremos:



$$\Delta E_B^C = \Delta E_{cB}^C + \Delta E_{p_{gravB}}^C + \Delta E_{p_{elastB}}^C = 0 \rightarrow \Delta \left( \frac{1}{2} mv^2 \right)_B^C + \Delta (mgh)_B^C + 0 = 0$$

$$\text{Es decir: } \left( \frac{1}{2} mv_c^2 - \frac{1}{2} mv_B^2 \right) + (mgh_C - mgh_B) = 0$$

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Aparece una dificultad: no conocemos ni  $h_C$  ni la rapidez en el punto más alto  $v_C$  (que **no es** 0). No obstante, de Cinemática, sabemos que cuando se alcanza la altura máxima en un tiro oblicuo, la componente “y” del vector velocidad sí es 0 ( $v_{Cy} = 0$ ), mientras la componente “x” del vector velocidad en cualquier punto de la trayectoria es constante y vale  $v_B \cdot \cos\varphi$ , por lo que en la posición más alta se cumplirá que  $v_C = v_{Cx} = v_B \cdot \cos\varphi$ . Por tanto:

$$\left(\frac{1}{2}m(v_B \cdot \cos\varphi)^2 - \frac{1}{2}mv_B^2\right) + (mgh_C - mgh_B) = 0 \rightarrow g \cdot (h_C - h_B) = \frac{1}{2}v_B^2 \cdot (1 - \cos^2\varphi) \rightarrow h_C = \frac{v_B^2 \cdot \sin^2\varphi}{2g} + h_B = 2,7 \text{ m}$$

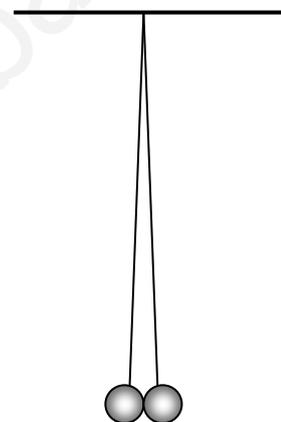
Vale la pena darse cuenta de que si en el resultado literal anterior  $h_B$  valiese 0, se convertiría en la expresión que nos da la altura máxima para el tiro oblicuo ya deducida anteriormente en el tema de cinemática mediante otras consideraciones.

**A.34.** En la figura siguiente se han representado dos péndulos idénticos. Si desplazamos la bolita de la izquierda manteniendo tenso el hilo de forma que se eleve una altura de 20 cm respecto de su nivel inicial y la soltamos, se pide:

- Con qué velocidad impactará contra la otra bola?
- Rapidez de cada bola inmediatamente después del choque.
- ¿A qué altura subirá la bola golpeada?

*Nota:* Suponed bolas puntuales, que sólo se producen cambios mecánicos y que  $g = 10 \text{ N/kg}$ .

Rdo. a)  $v_1=2 \text{ m/s}$ ; b)  $v_1=0, v_2= 2 \text{ m/s}$ ; c)  $h=20 \text{ cm}$



### 4. EL TEOREMA DE LAS FUERZAS VIVAS

En cinemática vimos que toda fuerza resultante actuando sobre un objeto que pueda considerarse como una masa puntual, le produce una aceleración, es decir, un cambio de velocidad.

Por otra parte, ahora sabemos que todo trabajo realizado sobre un sistema supone un cambio de energía en dicho sistema.

Podemos suponer, pues, que el trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre un objeto rígido que pueda considerarse como una masa puntual, produzca un cambio en la energía cinética con que dicho objeto se traslada, de forma que:  $W_{\vec{F}_{res}} = \Delta E_c$ .

Para comprobarlo, imaginemos un bloque indeformable que desliza sobre una superficie horizontal, sometido a la acción de una fuerza resultante constante desde la posición A hasta la posición B, tal y como se indica en la figura adjunta:



De acuerdo con la ecuación fundamental de la dinámica, se cumplirá:

$$F_{rest} = m \cdot a_t = m \cdot \frac{v_B - v_A}{\Delta t}. \quad \text{Además } \Delta e = v_m \cdot \Delta t \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta e}{v_m} \text{ y como } a_t = \text{cte}, v_m = \frac{v_A + v_B}{2} \text{ con lo que:}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta e}{v_m} = \frac{\Delta e}{\frac{v_A + v_B}{2}} = \frac{\Delta e \cdot 2}{v_A + v_B}. \text{ Sustituyendo } \Delta t \text{ en la primera ecuación: } F_{rest} = m \cdot \frac{v_B - v_A}{\Delta e} \cdot \frac{v_A + v_B}{2}$$

Así pues el trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre el bloque, vendrá dado por:

$$F_{rest} \cdot \Delta e = m \cdot \frac{(v_B - v_A) \cdot (v_A + v_B)}{2} \text{ o, lo que es equivalente:}$$

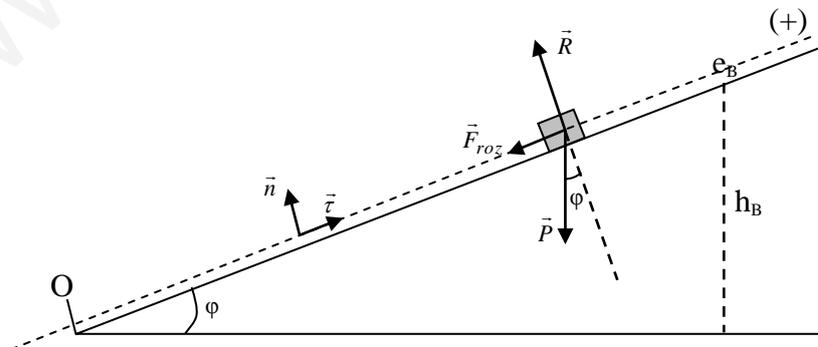
$$F_{rest} \cdot \Delta e = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$$

La ecuación obtenida se conoce con el nombre de **“Teorema de las fuerzas vivas”**.

Siempre que el objeto se pueda considerar como un sólido rígido que sólo se traslada, el primer miembro de la ecuación se puede interpretar como el trabajo realizado por la fuerza resultante que actúa sobre el mismo, y el segundo como el cambio que dicho trabajo produce en la energía cinética con que se traslada. Es decir:  $W_{F_{res}} = \Delta E_c$ .

**A.35.** Desde la base de un plano inclinado ( $\varphi = 30^\circ$ ), se lanza hacia arriba deslizando por la superficie de dicho plano un bloque de 2 kg con una rapidez inicial de 3 m/s. Suponiendo un coeficiente de rozamiento entre el cuerpo y el plano de  $\mu = 0'3$ . Aplicad el teorema de las fuerzas vivas, para calcular la altura máxima a la que ascenderá.

Una vez que el bloque sale con una rapidez  $v_A$ , describe un movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado hasta que se detiene a cierta altura  $h_B$  sobre el suelo. La resultante de todas las fuerzas que se ejercen sobre él viene dada por:  $\vec{F}_{res} = \vec{R} + \vec{P} + \vec{F}_{roz}$ . Dicha fuerza resultante, le produce la aceleración. El cambio de velocidad, desde un valor  $v_A$  hasta  $v_B = 0$ , tiene lugar a lo largo de la distancia que recorre el bloque sobre el plano, que podemos calcular mediante el teorema de las fuerzas vivas. Una vez conocida dicha distancia,  $\Delta e$ , la altura sobre el nivel de lanzamiento será  $h_B = \Delta e \cdot \text{sen } \varphi$ .



Cabe esperar que  $h_B$  aumente si lo hace la rapidez inicial,  $v_A$ , y disminuya si el ángulo  $\varphi$ , el rozamiento  $\mu$ , o la intensidad del campo gravitatorio  $g$ , aumentan. Sin rozamiento (si  $\mu=0$ ), el resultado debería coincidir con el obtenido en la A.32:  $h_B = \frac{v_A^2}{2g}$ , y si tampoco existiera atracción gravita-

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

toria, no se pararía, luego el resultado en este caso debería dar  $h_B = \infty$ . Por último, si el plano fuera horizontal (si  $\varphi = 0$ ), la altura debería ser 0.

Para resolver el problema aplicaremos el teorema de las fuerzas vivas al sistema bloque:

$F_{rest} \cdot \Delta e = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$ . En este caso, las componentes escalares tangenciales de  $\vec{R}$ ,  $\vec{P}$ , y  $\vec{F}_{roz}$  son:

$R_t = 0$ ,  $P_t = -mg \cdot \sin\varphi$ ,  $F_{roz_t} = -\mu R$ ; además  $v_B = 0$ . Así que sustituyendo en la expresión anterior:

$$(-mg \sin\varphi - \mu R) \cdot \Delta e = -\frac{1}{2} m v_A^2$$

Podemos hallar el valor de  $R$ , pues sabemos que la suma de las componentes intrínsecas normales debe ser cero, ya que no hay componente normal de la aceleración:  $R - mg \cdot \cos\varphi = 0$ , de donde:  $R = mg \cdot \cos\varphi$ , con lo que:

$$(-mg \sin\varphi - \mu \cdot mg \cos\varphi) \cdot \Delta e = -\frac{1}{2} m v_A^2 \rightarrow \Delta e = \frac{v_A^2}{2g \cdot (\sin\varphi + \mu \cos\varphi)}$$

Sustituyendo la expresión anterior en  $h_B = \Delta e \cdot \sin\varphi$  y simplificando (dividiendo arriba y abajo por  $\sin\varphi$ ), obtenemos finalmente:

$$h_B = \frac{v_A^2}{2g \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\tan\varphi}\right)}$$

Si ahora sustituimos los valores numéricos:  $h_B = 0,3 \text{ m}$ .

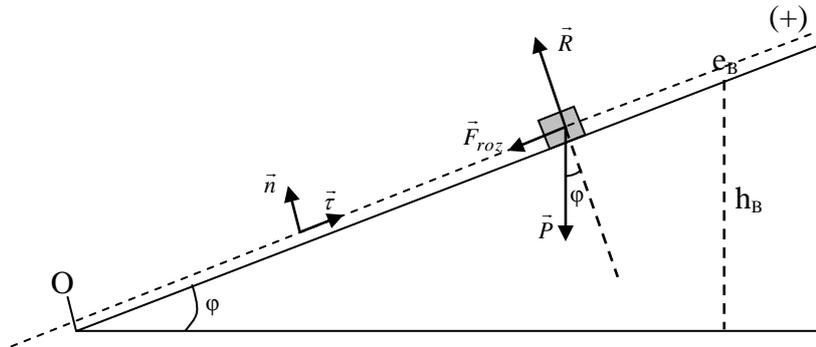
Analizando el resultado literal anterior, vemos que la influencia del ángulo está condicionada a la existencia de rozamiento: si  $\mu=0$ , no influye el ángulo, alcanzando siempre la misma altura, tal como habíamos encontrado en A.32. Si el plano es horizontal ( $\varphi = 0$ ), el denominador vale infinito y  $h_B = 0$ . Si  $\varphi = 90^\circ$  el resultado es el de un tiro vertical. La rapidez y la intensidad del campo gravitatorio influyen tal como esperábamos. En un lugar sin gravedad,  $g = 0$ , el plano no ejercería fuerza alguna sobre el cuerpo y éste no se pararía, es decir:  $h_B = \infty$ .

## 5. EFECTO DE LA FUERZA DE ROZAMIENTO POR DESLIZAMIENTO EN LA ENERGÍA MECÁNICA DE UN SISTEMA

Cuando un objeto se desliza sobre una superficie con la que roza, la fuerza de rozamiento que medimos ( $\mu R$ ) sobre dicho objeto en realidad es la suma de millones de fuerzas debido a la interacción existente entre las partículas de que está compuesto el objeto y las de la superficie. Simplificando, podemos suponer que las irregularidades microscópicas de la superficie encajan con las del objeto, oponiéndose al avance de éste. El efecto energético del trabajo realizado por la fuerza de rozamiento sobre un objeto que se desliza, es siempre disminuir su energía cinética de traslación. Dicha disminución coincide exactamente con el aumento de energía interna del objeto, de la superficie con la que roza y del aire de alrededor.

Así pues, en las situaciones en las que existe rozamiento, la energía mecánica no se conserva, sino que disminuye. No obstante, sí se conserva la energía total del sistema (tomando éste de tal forma que la fuerza de rozamiento sea una fuerza interior a dicho sistema).

**A.36.** Se lanza un bloque de 2 kg con una rapidez de 3 m/s por un plano inclinado  $\varphi = 30^\circ$ , con rozamiento ( $\mu = 0.3$ ). Aplicando la expresión  $W_{\text{ext}} = \Delta E$  (donde  $E$  es la energía mecánica del sistema bloque-Tierra), calculad la altura máxima a la que asciende dicho bloque y la energía mecánica "perdida" (es decir, transformada en energía de tipo microscópico o energía de las partículas que realmente forman el bloque, el plano y el aire).



El sistema formado por el bloque (como un todo) y la Tierra experimenta una transformación, pasando del estado A ( $v = v_A = 3$  m/s,  $e_A = 0$ ,  $h_A = 0$ ) al estado B ( $v_B = 0$ ,  $e = e_B$ ,  $h = h_B$ ). Mientras ocurre dicha transformación, debido al rozamiento, habrá trabajo exterior (la superficie del plano no forma parte del sistema). Si llamamos  $E$  a la energía mecánica del sistema, podemos escribir:

$$W_{\text{ext}} = \Delta E$$

Las fuerzas exteriores son la de rozamiento  $\vec{F}_{\text{roz}}$  y la fuerza normal  $\vec{R}$  que el plano ejerce sobre el bloque. El trabajo realizado por la segunda es 0 puesto que es perpendicular al desplazamiento, mientras que el trabajo realizado por la fuerza de rozamiento será:  $W_{F_{\text{roz}}} = -F_{\text{roz}} \cdot \Delta e$ . Por tanto:

$$W_{\text{ext}} = \Delta E \rightarrow -F_{\text{roz}} \cdot \Delta e = \left( 0 - \frac{1}{2} m v_A^2 \right) + (m g h_B)$$

Y como  $F_{\text{roz}} = \mu R = \mu \cdot m g \cos \varphi$  y  $\Delta e = \frac{h_B}{\sin \varphi}$ , tendremos:

$$-\mu \cdot m g \cos \varphi \cdot \frac{h_B}{\sin \varphi} = -\frac{1}{2} m v_A^2 + m g h_B \rightarrow \frac{v_A^2}{2} = g h_B \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \varphi} \right)$$

Despejando  $h_B$  de la última expresión, obtenemos finalmente:

$$h_B = \frac{v_A^2}{2g \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \varphi} \right)}$$

Que coincide con la obtenida mediante el teorema de las fuerzas vivas en la A.35. Sustituyendo los valores numéricos, volvemos a obtener:  $h_B = 0.3$  m.

En cuanto a la energía mecánica transformada (repartida ahora entre los trillones de partículas que forman el bloque, el plano y el aire próximo), se podrá obtener o bien restando  $E_B - E_A$  o bien calculando el  $W_{\text{ext}}$  realizado sobre el sistema bloque-Tierra.

$$E_B - E_A = m g h_B - \frac{1}{2} m v_A^2 = 2 \cdot 9.8 \cdot 0.3 - 9 = -3.1 \text{ J}$$

$$W_{\text{ext}} = -F_{\text{roz}} \cdot \Delta e = -\mu \cdot m g \cos \varphi \cdot \frac{h_B}{\sin \varphi} = -0.3 \cdot 2 \cdot 9.8 \cdot \cos 30^\circ \cdot \frac{0.24}{\sin 30^\circ} = -3.1 \text{ J}$$

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

Naturalmente, si no hubiese habido rozamiento, la energía mecánica del sistema en la situación B valdría lo mismo que en la A.

#### **RECAPITULACIÓN**

Los conceptos de trabajo y energía han resultado fructíferos para avanzar en el problema que nos habíamos planteado: si existen límites en los cambios mecánicos que pueden experimentar los cuerpos y si se pueden relacionar los valores de las propiedades de un sistema cuando sufre transformaciones. Somos capaces de predecir cómo cambiarán determinadas propiedades de un sistema, cuánto cambiará su altura al variar su velocidad, cuánto será necesario comprimir un resorte para lanzar un cuerpo con una determinada velocidad, etc.

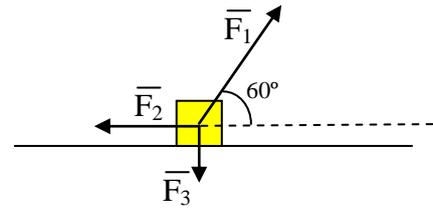
Pero los cambios en la naturaleza no son sólo mecánicos: sabemos que es posible hacer que una máquina se mueva calentando agua en la caldera (máquinas de vapor), que se puede elevar un ascensor utilizando la corriente eléctrica, que el agua de un embalse produce electricidad, etc. En definitiva, hay situaciones en que cambios en propiedades mecánicas producen cambios de propiedades que no son mecánicas (temperatura, cantidad de sustancia, intensidad de corriente eléctrica...) y al revés. Si queremos relacionar los cambios en unas propiedades con los cambios en otras, será necesario ampliar los conceptos introducidos a cambios no mecánicos. Eso es lo que comenzaremos a hacer en el tema siguiente .

**3. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE TRABAJO Y ENERGÍA**

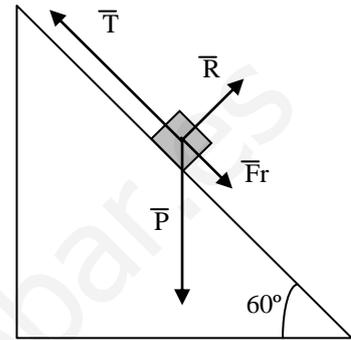
1. Calculad el trabajo resultante realizado sobre el cuerpo cuando éste se desplace 5 m hacia la derecha.

Módulos de las fuerzas:  $F_1 = 40 \text{ N}$ ,  $F_2 = 12 \text{ N}$ ,  $F_3 = 6 \text{ N}$

Rdo.  $W_{\text{res}} = 40 \text{ J}$



2. Mediante una cuerda se está **subiendo** por un plano inclinado  $60^\circ$  un bloque de  $80 \text{ kg}$  de masa, tal y como se indica en la figura adjunta. Los módulos de las fuerzas que actúan son: Tensión de la cuerda  $T = 1000 \text{ N}$ , fuerza de rozamiento  $F_r = 200 \text{ N}$ , fuerza normal que hace la superficie sobre el objeto  $R = 400 \text{ N}$ , fuerza peso  $P = 800 \text{ N}$ . Calcula el trabajo que habrá realizado cada fuerza cuando el objeto se haya desplazado  $10 \text{ m}$  por el plano. Rdo.  $W_T = 10^4 \text{ J}$ ,  $W_{F_r} = -2000 \text{ J}$ ,  $W_P = -6928 \text{ J}$ ,  $W_R = 0$ .



3. Un bloque de  $5 \text{ kg}$  de masa desliza por una pendiente de  $30^\circ$  de inclinación. El módulo de la fuerza de rozamiento que actúa sobre dicho bloque es de  $8 \text{ N}$  y la longitud del plano es de  $10 \text{ m}$ . Haz un esquema del problema dibujando todas las fuerzas que actúan sobre el bloque y calcula el trabajo que realiza cada una de esas fuerzas.

Rdo.  $W_{F_r} = -80 \text{ J}$ ,  $W_R = 0$ ,  $W_P = 245 \text{ J}$

4. Un niño empuja un bloque de  $40 \text{ kg}$  de masa por una superficie horizontal durante un trayecto de  $10 \text{ m}$  haciendo una fuerza paralela al suelo y en el mismo sentido en que se mueve el objeto. Sabiendo que el módulo de la fuerza que hace el niño sobre el bloque es de  $200 \text{ N}$  y que el módulo de la fuerza de rozamiento que hace el suelo sobre el bloque vale  $100 \text{ N}$ , se pide:

- Haz un esquema del problema dibujando todas las fuerzas que actúan sobre el bloque.
- Calcula el trabajo que realiza cada una de esas fuerzas
- Calcula la potencia desarrollada por el niño en kW.

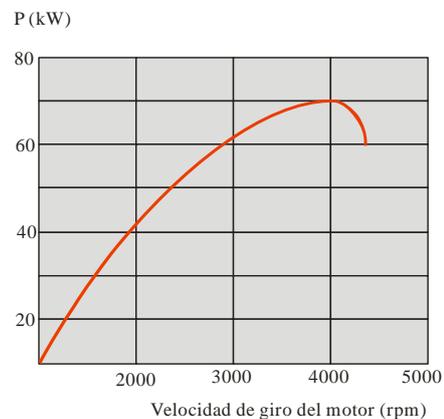
Rdo. b)  $W_F = 2000 \text{ J}$ ,  $W_{F_r} = -1000 \text{ J}$ ,  $W_P = W_R = 0$ ; c)  $P = 707'1 \text{ W}$

5. Una grúa eleva un bloque de  $500 \text{ kg}$  con velocidad constante a  $50 \text{ m}$  de altura en  $25 \text{ s}$ . ¿Cuánto vale la potencia desarrollada por dicha grúa?

Rdo.  $P = 9800 \text{ W}$

6. La gráfica adjunta representa la potencia que desarrolla un motor en función del número de revoluciones por minuto (r.p.m). Hallad la masa del bloque que puede elevar verticalmente con una rapidez de  $2 \text{ m/s}$  cuando desarrolla la máxima potencia.

Rdo.  $3673'5 \text{ kg}$



### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

7. Un coche recorrió con rapidez constante 10 km en 6 minutos circulando a la máxima potencia (72 CV). Sabiendo que  $1 \text{ CV} = 735 \text{ W}$ , calcula el valor de la fuerza ejercida por el motor.

Rdo.  $F = 1905,12 \text{ N}$

8. Tenemos dos objetos del mismo tamaño que pueden moverse sobre una superficie horizontal, con la que consideraremos despreciable el rozamiento. Uno de los objetos es de plástico ligero y el otro es de acero, y sobre los dos ejercemos fuerzas idénticas. Los objetos, inicialmente en reposo, parten de la línea A y se mueven perpendicularmente a ella.



¿Cuál de los objetos tendrá una energía cinética mayor cuando llegue a la línea B?

9. Tirando con una cuerda de un bloque de 2 kg de masa se logra que descienda con velocidad constante por un plano inclinado de  $15^\circ$  sin ningún tipo de rozamiento. Tomando como sistema el bloque-Tierra, calculad:

a) La variación de energía cinética y de energía potencial que se produce cuando el cuerpo desciende 5 m por el plano.

b) El trabajo de las fuerzas exteriores y de las fuerzas interiores en dicha transformación.

c) Repetid a) y b) tomando como sistema el bloque únicamente.

Rdo. a)  $\Delta E_c = 0$ ,  $\Delta E_p = -25,36 \text{ J}$ ; b)  $W_{ext} = -25,36 \text{ J}$ ,  $W_{int} = 25,36 \text{ J}$

10. Del extremo de un hilo de 1 m de longitud cuelga verticalmente una bolita de 50 g de masa. Manteniendo el hilo tenso, la separamos elevándola 1 cm con respecto al nivel inicial que tenía en la posición de equilibrio, y la soltamos. Calculad el trabajo realizado por el peso y por la tensión de la cuerda desde que la soltamos hasta que llega al otro extremo. (Suponed el rozamiento y la masa de la cuerda despreciables).

Rdo.  $W = 0$ , en ambos casos.

11. Se lanza desde el suelo un objeto de 50 g al aire con una rapidez de 20 m/s formando un ángulo de  $30^\circ$  con la horizontal. El objeto alcanza una altura máxima de 5 m y llega al suelo a una distancia de 34,6 m del punto de lanzamiento. Calculad el trabajo realizado por la fuerza peso desde que lanzamos el objeto hasta que llega al suelo (suponed despreciable el rozamiento).

12. Dos proyectiles idénticos se encuentran a la misma altura sobre el suelo (1 m). Uno de ellos se deja caer y simultáneamente el otro sale disparado horizontalmente con una rapidez inicial de 1.000 km/h. Suponiendo despreciable el rozamiento con el aire, se pide:

a) La rapidez con que llegará cada uno al suelo.

b) ¿Cuál de los dos llegaría antes al suelo? Comprobadlo realizando los cálculos pertinentes.

Rdo. a) 4,43 m/s (el que se suelta), 277,82 m/s (el que se lanza); b) ambos tardarían 0,45 s.

13. Mediante una cuerda se ejerce sobre un cuerpo de 5 kg, que se encontraba inicialmente en reposo y en el suelo, una fuerza vertical y hacia arriba. Sabiendo que cuando el cuerpo se encuentra a 25 m de altura se mueve a 20 m/s, determinar el valor F de la fuerza. Rdo. 11,5 N

**14.** Un cable eleva una vagoneta desde la base a la cima de un monte siguiendo una vía rectilínea con una rapidez constante de 3 m/s, tirando de ella con una fuerza de 4.000 N. La vagoneta tarda 5 minutos en alcanzar el punto más alto. Hallad el trabajo realizado por la fuerza peso y por la tensión del cable sobre la vagoneta. Rdo.  $W_p = -3'6 \text{ MJ}$ ,  $W_T = 3'6 \text{ MJ}$ .

**15.** Un cuerpo de 2 kg de masa y otro de 10 kg de masa tienen la misma energía cinética y se mueven en línea recta en la misma dirección y sentido. Si se aplica la misma fuerza de frenado a ambos cuerpos, ¿qué relación habrá entre las distancias que recorren hasta parar?

**16.** A un objeto de 50 kg, que se encuentra en reposo sobre una superficie horizontal, le aplicamos una fuerza constante de 150 N en dirección horizontal. Suponiendo despreciable el rozamiento, calculad su velocidad cuando se haya desplazado 2 m. Rdo. 3'46 m/s

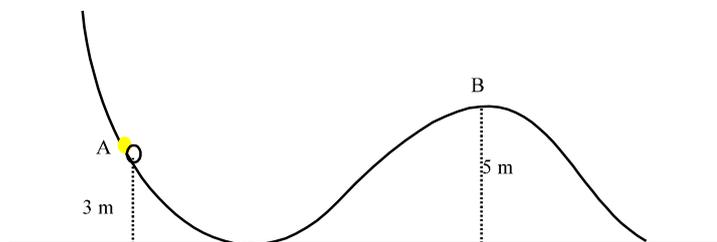
**17.** Un proyectil de 100 g atraviesa una pared de madera de 40 cm de espesor. Sabiendo que la rapidez del proyectil al llegar al muro era de 400 m/s y que al salir es de 150 m/s, determinad el valor de la fuerza, supuesta constante, que ejerce la madera sobre el proyectil mientras éste atraviesa la pared. Rdo.  $|\vec{F}| = 17187'5 \text{ N}$

**18.** Una bala de 50 g atraviesa un muro de 40 cm de espesor. Sabiendo que la velocidad con que entró fue de 300 m/s, calculad la velocidad de salida si el muro opone una resistencia constante de 1000 N. Hallad también el incremento de energía cinética producido. ¿Dónde está la  $E_c$  que pierde la bala? Rdo.  $v = 272 \text{ m/s}$ ;  $\Delta E_c = -400 \text{ J}$ .

**19.** Deseamos elevar verticalmente un mueble efectuando el menor trabajo posible, y podemos hacerlo: a) Subiéndolo a mano directamente. b) Mediante una polea. c) Utilizando un gato hidráulico como el que se usa para elevar los coches. ¿Por qué dicho trabajo vale lo mismo en los tres casos?

**20.** Desde la base de un plano inclinado  $\alpha = 45^\circ$ , se lanza hacia arriba por la superficie del plano una masa de 5 kg con una rapidez inicial de 20 m/s. Suponiendo que no haya rozamiento, se pide:  
a) Valor de la energía potencial en el instante en que alcance la máxima altura.  
b) Altura máxima alcanzada.  
c) Trabajo realizado por la fuerza peso en el trayecto total de ida y vuelta.  
d) Energía cinética con que vuelve al punto de partida.  
Rdo. a)  $E_p = 1000 \text{ J}$ ; b)  $h_{\max} = 20'4 \text{ m}$ ; c)  $W_p = 0$ ; d)  $E_c = 1000 \text{ J}$

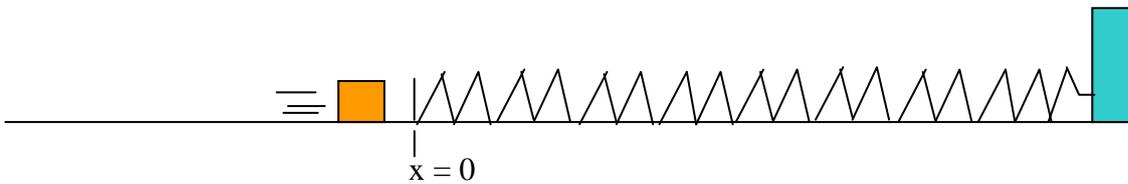
**21.** Dado el sistema de la figura adjunta:



Calculad con qué velocidad tendremos que lanzar la esferita, para que pueda sobrepasar el punto B. (Se supone que no hay rozamiento y que  $g = 10 \text{ N/kg}$ ). Rdo.  $v = \sqrt{40} \text{ m/s}$ .

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

22. Se lanza un bloque de 1 kg de masa contra el extremo libre de un muelle elástico que descansa sobre una superficie horizontal y sin rozamiento tal y como se muestra en la figura adjunta.



A consecuencia del impacto, el muelle se comprime hasta un máximo de 15 cm. Sabiendo que la constante elástica del muelle vale  $K = 400 \text{ N/m}$ , se pide:

- Trabajo realizado por la fuerza elástica del muelle
- Cambio de la energía potencial elástica del sistema bloque-muelle
- ¿Qué velocidad llevaba el bloque en el momento del impacto?

Rdo. a)  $W_{Fe} = -4'5 \text{ J}$ ; b)  $\Delta E_{pe} = 4'5 \text{ J}$ ; c)

23. Colgamos del techo un resorte de masa despreciable, 1 m de longitud y constante elástica 80 N/m. Si sujetamos en su extremo libre un cuerpo de 2 kg y lo dejamos en libertad, descenderá alargándose el resorte. Cuando haya descendido 10 cm, calculad:

- $\Delta E_p$  elástica,  $\Delta E_p$  gravitatoria y  $\Delta E_c$  del sistema resorte-cuerpo-Tierra, así como su  $\Delta E$ .
- El trabajo que habrán realizado tanto la fuerza peso como la elástica en este desplazamiento.

Rdo. a)  $\Delta E_p$  elástica =  $0'4 \text{ J}$ ,  $\Delta E_p$  gravitatoria =  $-2 \text{ J}$ ;  $\Delta E_c = 1'6 \text{ J}$ ; b)  $W_p = 2 \text{ J}$ ,  $W_{Fe} = -0'4 \text{ J}$ .

24. Un camión de 30 toneladas y un automóvil de 1.000 kg viajan con igual velocidad por una carretera recta y horizontal. Suponiendo que el coeficiente de rozamiento entre el suelo y los neumáticos es de 0'3, comparad las distancias que recorrerán hasta quedar parados si frenan bloqueando el giro de las ruedas cuando viajan a 60 km/h y a 120 km/h. Rdo. a) Ambos emplean la misma distancia: 47'2 m para 60 km/h y 188'9 m para 120 km/h. Nótese que la segunda no es el doble que la primera sino cuatro veces mayor.

25. Mediante una cuerda se tira de un bloque de 4 kg de masa el cual se mueve con velocidad constante a lo largo de una distancia de 5 m por un plano horizontal, haciendo una fuerza  $F$  constante de 8 N que forma un ángulo de  $30^\circ$  con la horizontal. Tomando  $g = 10 \text{ N/kg}$ , calculad:

- Trabajo que realiza cada una de las fuerzas que actúan sobre el bloque.
- Trabajo realizado por la fuerza resultante sobre el bloque.
- Valor del coeficiente de rozamiento.
- Si  $F$  valiese 80 N y el bloque partiese del reposo ¿Cual sería la rapidez del bloque después de haber recorrido los 5 m? (Resolved éste apartado por cinemática-dinámica y por trabajo-energía).

Rdo. a)  $W_R = W_p = 0$ ,  $W_F = 34'6 \text{ J}$ ,  $W_{Fr} = -34'6 \text{ J}$ ; b)  $W_{Fres} = 0$ ; c)  $\mu = 0'09$ ; d)  $v = 13'2 \text{ m/s}$

26. Una esquiadora se encuentra inicialmente en reposo en lo más alto de una pista de  $30^\circ$  de inclinación. Si se dejase deslizar directamente en línea recta con los esquís paralelos, siguiendo la línea de máxima pendiente, calculad su velocidad en km/h después de haber recorrido una distancia de 200 m. (Suponed que el coeficiente de rozamiento entre esquís y nieve vale 0'1 e ignorad el rozamiento con el aire). Rdo.  $v = 146'4 \text{ km/h}$



**27.** Un bloque de 20 kg se encuentra en reposo en el punto más alto de un plano inclinado de 10 m de altura y 20 m de longitud. Se deja deslizar y se observa que cuando llega al final lleva una rapidez de 8 m/s. Se pide:

- a) ¿Cuánto vale la energía cinética perdida a causa del rozamiento?
- b) ¿En dónde se encuentra dicha energía?
- c) ¿Cuánto vale el coeficiente de rozamiento?

Rdo. a)  $\Delta E_c = -1320 \text{ J}$ ; c)  $\mu = 0.4$

**28.** Un bloque de 6 kg de masa se encuentra en reposo en la parte inferior de un plano inclinado  $\phi = 30^\circ$ . Se le aplica una fuerza tangencial hacia arriba  $F = 60 \text{ N}$ .

- a) Rapidez con que se movería después de recorrer 10 m sobre el plano si no hubiese rozamiento.
- b) Resolved de nuevo la pregunta anterior pero sabiendo que en realidad existe rozamiento y que el coeficiente de rozamiento entre el bloque y el plano vale  $\mu = 0.1$ .

Rdo. a)  $v = 10.1 \text{ m/s}$ ; b)  $v = 9.2 \text{ m/s}$

**29.** Desde la base de un plano inclinado  $\phi = 45^\circ$ , se lanza hacia arriba por el plano una masa de 5 kg con una rapidez inicial de 20 m/s. Suponiendo un coeficiente de rozamiento  $\mu = 0.2$ , se pide:

- a) Máxima altura alcanzada sobre la base del plano y razonar después si volverá a bajar o no.
- b) En caso afirmativo a la pregunta anterior, calculad el trabajo realizado por la fuerza peso en el trayecto de ida y en el de vuelta. Ídem con el trabajo realizado por la fuerza de rozamiento.
- c) Variación de energía cinética en el proceso completo.

Rdo. a)  $h_{\max} = 17 \text{ m}$ ; b)  $W_{P(\text{ida})} = -833 \text{ J}$ ,  $W_{P(\text{vuelta})} = 833 \text{ J}$ ,  $W_{F_{\text{roz}}(\text{ida})} = -166.6 \text{ J}$ ,  $W_{F_{\text{roz}}(\text{vuelta})} = -166.6 \text{ J}$ ; c)  $\Delta E_c = -333.2 \text{ J}$

**30.** Un paracaidista ( $m = 100 \text{ kg}$ ) se deja caer desde la cima de una montaña de 1000 m de altura y llega al suelo con una velocidad de 5 m/s. ¿Cuanta energía se ha perdido a causa del rozamiento?



Rdo. 978.75 J

**31.** Por un plano horizontal se lanza una masa de 2 kg con una velocidad inicial de 20 m/s. Suponiendo que el coeficiente de rozamiento entre el plano y la masa sea  $\mu = 0.2$ , se pide:

- a) Por trabajo y energía, calculad qué distancia recorrerá hasta pararse.
- b) ¿Qué fuerza exterior y perpendicular al plano habría que hacer sobre dicha masa para conseguir que se parase en la mitad de distancia que antes?

Rdo. a) 102.04 m; b)  $F = P = 19.6 \text{ N}$

**32.** Un bloque de 2 kg de masa se halla sobre un plano horizontal sujeto al extremo de un muelle elástico de  $K = 400 \text{ N/m}$ . Estiramos del objeto hacia la derecha hasta que el muelle se alarga 50 cm. Si a continuación soltamos, se pide:

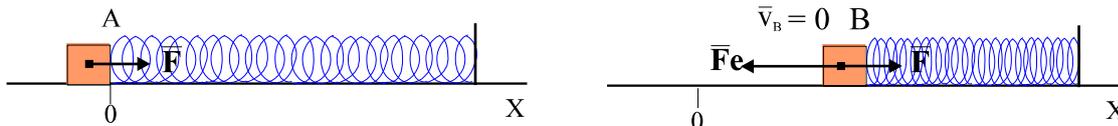


- a) Velocidad del bloque cuando vuelva a pasar por su posición inicial de equilibrio
- b) Ídem, suponiendo que exista rozamiento entre el bloque y el plano dado por  $\mu = 0.3$

Rdo. a)  $v = 7.07 \text{ m/s}$ ; b)  $v = 6.86 \text{ m/s}$

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

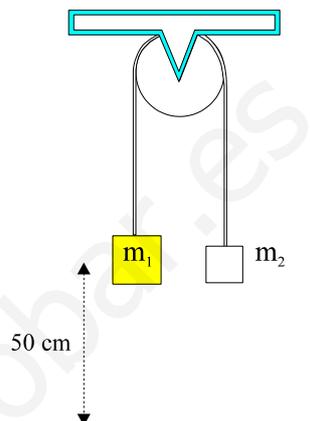
**33.** Disponemos de un bloque de 10 kg unido a un resorte, de masa despreciable y cuya constante elástica vale 40 N/m, según se aprecia en la figura. Calculad la máxima compresión que sufrirá el resorte al aplicar la fuerza constante  $F$  de 5 N.



Rdo. 0'25 m

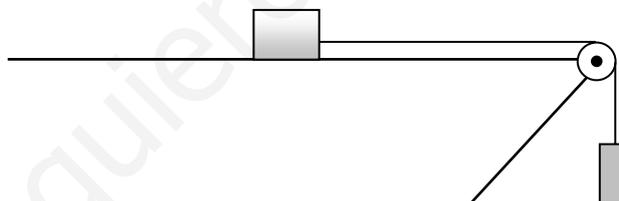
**34.** En el sistema de la figura adjunta  $m_1 = 5$  kg y  $m_2 = 2$  kg. Ambas masas se encuentran inicialmente en reposo a una altura de 50 cm del suelo. Se pide:

Por consideraciones de trabajo y energía, calculad la velocidad con que  $m_1$  impactará contra el suelo, al dejar el sistema en libertad. (Suponed la masa de la polea despreciable y que no hay rozamientos).



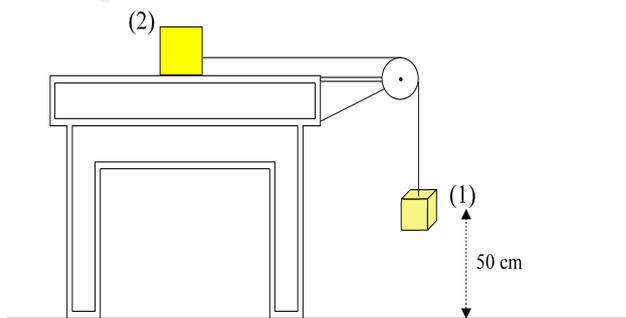
Rdo.  $|\vec{v}_1| = 2'05$  m/s

**35.** El bloque que está sobre la mesa de la figura tiene una masa  $m_1 = 10$  kg mientras que la masa del bloque que cuelga es  $m_2 = 2$  kg.



Determinad la rapidez con que se desplazarán cuando se les deje en libertad y hayan recorrido 4 m. (Datos:  $\mu = 0'1$ , y la masa de la polea se considera despreciable). Rdo.  $v = 2'56$  m/s

**36.** En el sistema de la figura adjunta, el coeficiente de rozamiento entre la masa (2) y la superficie viene dado por  $\mu = 0'2$  siendo  $m_1 = 2$  kg y  $m_2 = 5$  kg. Se pide:

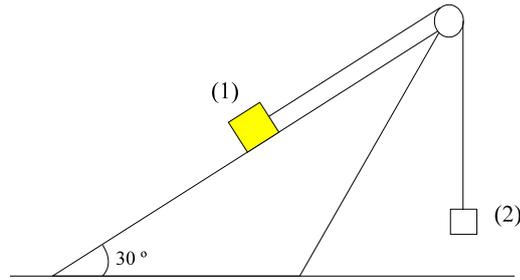


a) Por consideraciones de trabajo y energía, determinar la rapidez con que  $m_1$  chocará contra el suelo.

b) ¿Con qué rapidez chocaría el cuerpo (1) si su masa se hiciese el doble?

Rdo. a)  $v = 1'18$  m/s; b)  $v = 1'81$  m/s

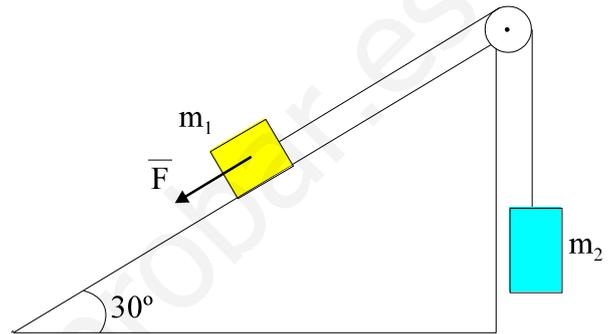
**37.** Dado el sistema de la figura adjunta, donde  $m_2 = 15$  kg,  $m_1 = 15$  kg y  $\mu = 0.2$ , se pide:



Rapidez con que se moverá  $m_2$  cuando se haya desplazado 2 m partiendo del reposo.

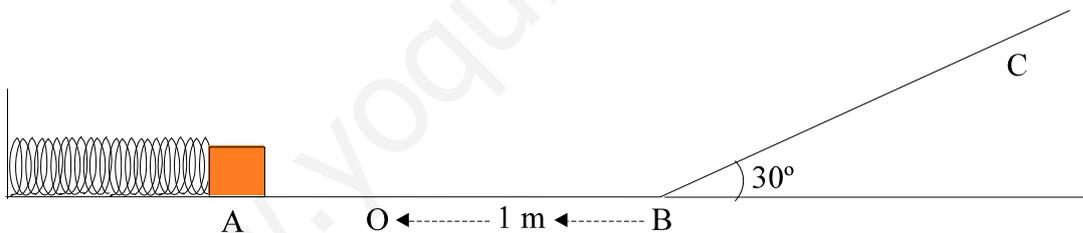
Rdo.  $v = 2.53$  m/s

**38.** En la situación de la figura adjunta los cuerpos de masas  $m_1 = 4$  kg y  $m_2 = 6$  kg se encuentran inicialmente en reposo, cuando comienza a actuar la fuerza exterior  $\vec{F}$  representada (cuyo módulo es de 80 N). Determinad por trabajo y energía la rapidez con que se moverán los cuerpos tras recorrer 3 m, sabiendo que el coeficiente de fricción entre el (1) y el plano es de 0.4.



Rdo.  $v = 4.04$  m/s

**39.** En el sistema de la figura adjunta el resorte de halla comprimido 40 cm respecto a su longitud original y junto al mismo se ha colocado un bloque de 1 kg de masa. La longitud original del resorte (cuando está distendido) es de 1 m, quedando su extremo libre, en el punto O.



Sabiendo que la constante elástica del resorte es  $K = 400$  N/m, calculad la altura máxima  $h_c$  sobre el suelo horizontal que alcanzará el bloque

- En ausencia de rozamiento
- Suponiendo que el coeficiente de rozamiento vale  $\mu = 0.2$  en todo el trayecto.

Rdo. a)  $h_c = 3.27$  m; b)  $h_c = 2.22$  m

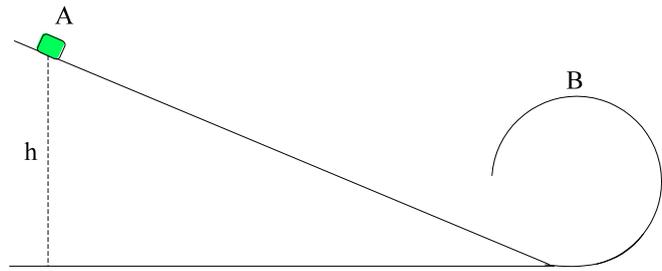
**40.** Sobre un resorte de masa despreciable, dispuesto verticalmente, se deja caer un cuerpo de 2.5 kg. Determinad la constante elástica del resorte sabiendo que sufre una compresión máxima de 15 cm al soltar el cuerpo desde una altura de 90 cm sobre el extremo superior del resorte.

Rdo.  $K = 2.333$  N/m.

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

41. Un cuerpo de masa  $m$  se desliza sobre un plano inclinado terminado en una circunferencia de radio  $r$ . Admitiendo nulos los rozamientos, se pide:

¿Desde qué altura mínima debemos soltar el cuerpo para que pase el rizo sin caerse?



Rdo.  $h_A = 2,5 \cdot r$

42. Disponemos de un péndulo constituido por un hilo, de masa despreciable y una bola de 1 kg. Sabiendo que el hilo tiene una longitud de 20 cm y que soporta como máximo una tensión de 15 N, determinad el mínimo valor de la altura a la que hemos de elevar la bola para que, al dejar libre el péndulo, se rompa el hilo.

Rdo.  $h = 5,3 \text{ cm}$

43. Un muelle de constante elástica 600 N/m tiene una longitud de 15 cm y se halla sobre una superficie horizontal y con un extremo fijado a una pared. Colocamos sujeto al otro extremo un bloque de 80 g (considerado como una masa puntual), empujamos hasta que el muelle tenga una longitud de 10 cm y, a continuación, soltamos el cuerpo. Determinad: a) rapidez con que se moverá el objeto al pasar por la posición de equilibrio. b) rapidez del objeto cuando la longitud del muelle sea de 18 cm. c) periodo de oscilación. d) energía mecánica del sistema formado por el objeto y el muelle. Suponed que no existe fricción y que la masa del muelle es despreciable.

Rdo. a)  $v = v_{\max} = 4,33 \text{ m/s}$ . b)  $v = 3,46 \text{ m/s}$ . c)  $T = 0,073 \text{ s}$ . d)  $E = 0,75 \text{ J}$

#### Anexo. ¿CÓMO FUNCIONA EL COJÍN DE AIRE DE LOS COCHES?

El airbag es un tipo de globo empaquetado en una pequeña caja instalada en diversos puntos de un vehículo, como en el centro del volante. En este caso, cuando se produce una colisión, la bolsa se infla y forma un cojín de gas entre el pecho y cabeza del conductor y el volante. El inflado debe ser muy rápido. El gas es nitrógeno, y se producen unos 27 litros por la descomposición explosiva de un compuesto: **azida de sodio**. Cuando hay una repentina aceleración, de unos  $100 \text{ m/s}^2$ , o más, se conecta un dispositivo eléctrico (en la parte anterior del vehículo) que produce una detonación en la cápsula donde está la azida de sodio. Su combustión explosiva produce el gas y la bolsa queda completamente inflada unos 0,04 segundos después de que la parte delantera del coche golpea un obstáculo. Esto puede parecer extremadamente rápido, y lo es, pero, teniendo en cuenta el tiempo total de duración del choque, veremos que no resulta serlo tanto.

El cojín de nitrógeno sólo tiene una función: repartir la fuerza sobre el pecho y la cabeza de la persona. Y sólo eso aumenta las posibilidades de supervivencia. Pero, además, al diseñar el sistema completo, los fabricantes de automóviles prestan atención, por lo menos, a dos factores adicionales que pueden reducir las lesiones de la persona:

Uno de ellos es **la distancia que recorre la persona mientras se produce la aceleración**, que ha de ser lo mayor posible. Así, cuanto mayor sea la distancia para un determinado cambio de velocidad, menor será la fuerza.

El otro será **evitar los máximos en el valor de la fuerza sobre la persona**, que pueden ser especialmente perjudiciales. Se trata de conseguir que la aceleración de frenado sea lo más uniforme posible.

Una de las formas de conseguir aumentar la distancia hasta que se detiene la persona es el vaciado del cojín. Completamente lleno tiene un espesor de unos 30cm entre el cuerpo y el volante, mientras que después del vaciado, que se produce durante el proceso de aceleración, quedan sólo 8 cm, lo que supone una distancia adicional. Se pueden realizar estimaciones a partir de los valores obtenidos con pruebas hechas con simuladores.

En una colisión a 48 km/h (13'41 m/s) contra una barrera de cemento, el aplastamiento de la parte frontal del vehículo podría ser de unos 0'70 m. Con estos datos se obtiene que la aceleración del coche durante el golpe es de  $128 \text{ m/s}^2$ , siendo, por tanto, 0'10 segundos el tiempo aproximado de duración del choque.



En los primeros 0'04 s en que acaba de inflarse la bolsa de gas, la persona ya ha reducido su distancia al volante desde unos 0'36 m iniciales hasta 0'26 m, ya que el coche ha empezado a aplastarse y la persona todavía continúa su movimiento a la velocidad inicial (13'1 m/s). A partir de este momento, se produce el movimiento de frenado de la persona, durante el cual el cojín va desinflándose, la barra del volante se acorta, y el coche completa su deformación. Todo ello supone para la persona un recorrido de unos 0'65 m, con una aceleración de  $138 \text{ m/s}^2$ , y una fuerza de 5.540 N (mayor que el peso de media tonelada), calculada suponiendo su masa de 40 kg (sólo la parte superior del cuerpo de la persona).

Sabiendo que el tiempo de reacción de un conductor típico se estima en 2/3 de segundo (0'67 s), es fácil calcular, utilizando los conceptos de trabajo y energía desarrollados en este capítulo, las distancias mínimas en las que se consigue parar un automóvil al encontrarse en una situación imprevista:

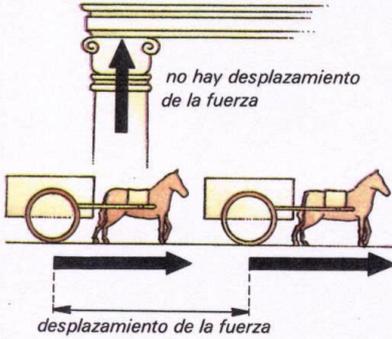
v (km/h)	Distancia de reacción (m)	Distancia de frenado (m)	Distancia total (m)
32	6	6	12
45	9	14	23
64	12	24	36
80	15	38	53
96	18	54	72
112	21	75	96

Las distancias reales aumentan mucho si la carretera está mojada o con grasa y con neumáticos en mal estado (disminuye el coeficiente de rozamiento).

### 3. Energía, trabajo y cambios mecánicos

En el cuadro siguiente se reproduce una página de un libro en la que se trata el concepto de trabajo mecánico y se cometen algunos errores. Utilizad lo que habéis aprendido aquí para detectar dichos errores y argumentar qué es lo que se considera científicamente incorrecto.

#### 13.1 ENERGÍA, TRABAJO Y POTENCIA



#### Desplazamiento de una fuerza.

Podemos clasificar las fuerzas en dos grandes grupos:

- Las fuerzas que se desplazan mientras actúan sobre los cuerpos.
- Las fuerzas que no se desplazan mientras actúan sobre los cuerpos.

La fuerza que ejerce una mula que tira de un carro es un ejemplo de fuerza que se desplaza, mientras que la fuerza que ejerce una columna que soporta una bóveda es un ejemplo de fuerza que no se desplaza.

Se llama desplazamiento de una fuerza la distancia, en línea recta, que hay entre las posiciones inicial y final de su punto de aplicación.



#### El trabajo que realiza una fuerza.

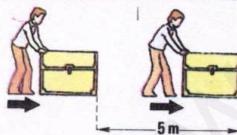
Cuando se aplica una fuerza sobre un cuerpo y dicho cuerpo se desplaza debido a la acción de esta fuerza, se dice que la fuerza ha realizado un trabajo.

Así, por ejemplo, cuando se tira de un carro, se lanza una pelota o se levanta un saco de cemento, se está realizando un trabajo.

Las fuerzas que se desplazan mientras actúan sobre los cuerpos son las fuerzas que originan y mantienen el desplazamiento de dichos cuerpos. Por tanto, las fuerzas que se desplazan son las únicas capaces de realizar un trabajo. Por el contrario, las fuerzas que no se desplazan no realizan un trabajo.

Por ejemplo, un padre que sostiene en hombros a su hijo y está quieto no realiza trabajo, aunque esté haciendo un esfuerzo. Si el padre echa a andar con el hijo a cuestas, entonces sí realiza un trabajo.

#### EJERCICIO RESUELTO



Para desplazar un baúl una distancia de 5 m se le aplica una fuerza constante de 20 N.

¿Cuál será el trabajo realizado por esta fuerza?

La fórmula del trabajo es:

$$W = F \cdot d$$

$$\begin{array}{ccc} \boxed{?} & \boxed{20 \text{ N}} & \boxed{5 \text{ m}} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ W & = & F \cdot d \end{array}$$

Por tanto,  $W = 20 \text{ (N)} \cdot 5 \text{ (m)} = 100 \text{ J}$

El trabajo realizado por esa fuerza será de 100 julios.

#### Cómo se calcula el trabajo que realiza una fuerza.

El trabajo realizado por una fuerza que se aplica sobre un cuerpo depende tanto de la intensidad de la fuerza como del desplazamiento producido por dicha fuerza.

Así, por ejemplo, se hace más trabajo al levantar un saco lleno de piedras que al levantar ese mismo saco lleno de plumas.

Del mismo modo, se hace más trabajo al tirar de un carro durante cien metros que al tirar de ese mismo carro durante diez metros.

El trabajo se mide en unidades llamadas julios (J).

Un julio es el trabajo que realiza una fuerza de un newton para desplazar un objeto una distancia de un metro.

Para calcular el trabajo se aplica la siguiente fórmula:

$$W = F \cdot d$$

En esta fórmula:

- $W$  es el trabajo realizado, medido en julios (J).
- $F$  es la fuerza aplicada, medida en newtons (N).
- $d$  es el desplazamiento efectuado por el cuerpo, medido en metros (m).

## 4. CALOR, ENERGÍA Y CAMBIOS. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

### INTRODUCCIÓN

En el tema anterior hemos encontrado una **restricción a las transformaciones** que pueden ocurrir en un sistema **aislado** en el que **sólo** se producen deformaciones elásticas, cambios de velocidad y/o cambios de altura: únicamente son posibles cambios de estado que no supongan ni aumento ni disminución en la energía mecánica del sistema. En esos sistemas, la energía mecánica ni se crea ni se destruye: siempre permanece constante.



Sin embargo, sabemos que, en general, la energía mecánica puede destruirse y crearse:

- ✓ Cuando hay rozamiento en un sistema aislado, su energía mecánica va disminuyendo y desaparece (por ejemplo, bloque deslizándose sobre una superficie, sistema bloque-superficie).
- ✓ Unas pilas pueden hacer que un motor parado, gire (produciendo así energía cinética).
- ✓ Quemando gasolina puede conseguirse que un autobús alcance una cierta velocidad.

Pero cuando se destruye o se crea energía mecánica siempre se producen cambios en otras propiedades no mecánicas:

- ✓ Cuando un cuerpo que se ha lanzado por una superficie horizontal va deslizándose hasta que se para, el cuerpo y la superficie se calientan.
- ✓ Cuando una batería está funcionando, algunas sustancias cambian en el interior de la misma.
- ✓ La gasolina y el oxígeno del aire disminuyen cuando un vehículo a gasolina se mueve.

Estas conexiones entre propiedades tan distintas que se manifiestan cuando se destruye o se crea energía mecánica, generan preguntas de gran interés:

- ✓ ¿Cómo explicar que la temperatura de los cuerpos aumente cuando desaparece la energía mecánica (por rozamiento o por choques no elásticos) al igual que ocurre cuando se calientan (con fuego, por ejemplo)?

#### 4. Calor, energía y cambios

- ✓ ¿Por qué la disminución de energía mecánica, del “movimiento”, va siempre acompañada del cambio en propiedades no mecánicas (temperatura, cantidad de sustancia, ..)?
- ✓ ¿Existe una relación cuantitativa entre los cambios de las distintas propiedades? (¿cuándo desaparece 1 J de energía mecánica, cuánto aumenta la temperatura de los cuerpos?)
- ✓ ¿Hay límites en los cambios que pueden ocurrir?
- ✓ Si la energía no se destruye ¿qué problema hay en consumir toda la que queramos?

Iniciaremos, en este capítulo, la contestación a estas cuestiones, comenzando por la relación entre la energía mecánica y el aumento de temperatura, porque -como veremos- fue un problema fundamental para avanzar en la respuesta a las restantes. No obstante, **si ya se conoce** la fenomenología del calor (temperatura, calor específico, calores latentes, etc.), es posible pasar directamente al apartado 4.

### 1. LA SEPARACIÓN ENTRE MECÁNICA Y TERMOLOGÍA

Como hemos dicho, el “movimiento”, la energía mecánica, se puede destruir, y cuando esto ocurre se produce un aumento de temperatura. Sin embargo, la ciencia del movimiento (la mecánica) y la del calor se habían desarrollado, hasta principios del siglo XIX, de un modo totalmente independiente. Los científicos que investigaban los fenómenos térmicos, como la variación de temperatura de los cuerpos al calentarlos o enfriarlos, la conducción térmica de los materiales o los cambios de fase<sup>1</sup> (sólido/ líquido, líquido/ gas y viceversa), los explicaban suponiendo la existencia de una sustancia sin peso apreciable, a la que se llamó “**calórico**”, que pasaba de los cuerpos más calientes a los más fríos o que se liberaba en las reacciones químicas. Grandes científicos como Black, Lavoisier o Dalton, a finales del siglo XVIII, habían desarrollado y probado predicciones basadas en el calórico. Los trabajos iniciales del ingeniero francés Carnot, sobre el rendimiento de las máquinas de vapor y los impresionantes desarrollos matemáticos de Fourier y Laplace sobre la conducción térmica, también se basaron en la existencia del calórico.

Los científicos newtonianos, por su parte, no aceptaban la existencia de sustancias sin peso (“todo debía tener masa, y, por tanto, sería atraído por la Tierra”), pero no habían conseguido contrastar su hipótesis de que el calor estaba relacionado con el movimiento de las partículas que formaban los cuerpos. **La Termología y la Mecánica, hasta mediados del siglo XIX, eran, pues, dos campos independientes.**

No obstante, cualquier teoría sobre la naturaleza del calor debía explicar además de los fenómenos puramente térmicos, las situaciones en que movimiento y temperatura aparecían relacionados, como ocurre en el rozamiento o choque entre cuerpos. Fue en los intentos de resolver esta cuestión cuando se inventaron nuevas ideas que superaron la separación entre fenómenos mecánicos y térmicos y permitieron relacionarlos cuantitativamente. Además, como veremos, las ideas que surgieron en este estudio fueron generalizadas para abarcar las relaciones entre cambios de cualquier tipo (y no sólo mecánicos y térmicos), dando lugar a uno de los principios fundamentales de la Ciencia.

Para poder relacionar los cambios mecánicos con los térmicos es necesario, primero, estudiar los fenómenos térmicos. Haremos esto intentando comprender, al mismo tiempo, su interpretación según la teoría del calórico. Posteriormente plantearemos la cuestión del calentamiento por fricción y los trabajos que produjeron una nueva interpretación de calor y temperatura.

---

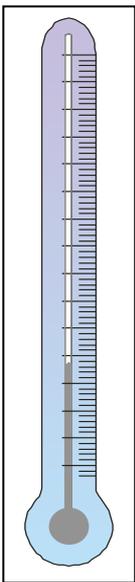
<sup>1</sup> También se suelen llamar cambios de “estado de agregación”.

Aunque sabemos que la teoría del calórico era errónea, la comprensión de por qué se abandonó una teoría aceptada durante decenios por la mayor parte de la comunidad científica, nos hará apreciar algunos aspectos esenciales de la naturaleza de la ciencia y del trabajo científico.

## 2. REVISIÓN DE LA FENOMENOLOGÍA DEL CALOR Y SU INTERPRETACIÓN SEGÚN LA TEORÍA DEL CALÓRICO

Comenzaremos esta revisión recordando cómo la invención del termómetro permitió comparar de un modo objetivo “lo caliente o frío” que se encuentran distintos objetos y clarificar la relación entre calor y temperatura.

*A.1. Explicad en qué se basa el funcionamiento de los termómetros y cómo se utilizan para indicar la temperatura*



Como sabemos, los termómetros utilizan alguna propiedad de los cuerpos que varía cuando se calientan o se enfrían estableciendo una equivalencia entre el valor de dicha propiedad y “lo caliente” que está el cuerpo. Hay termómetros que se basan en el cambio de color de los cuerpos cuando se calientan (se utilizan, por ejemplo, para medir la temperatura dentro de los hornos de fundición) o en el cambio de presión de un gas que se encuentra en un recipiente a volumen constante, etc. Los más comunes, sin embargo, suelen utilizar el cambio de volumen de un líquido como mercurio, alcohol, etc., que se ve claramente al encontrarse en un tubo muy fino.

Cuando un objeto se pone en contacto con un termómetro de mercurio, el volumen del líquido varía hasta quedar estable. Si, a continuación, se pone el termómetro en contacto con otro objeto idéntico al primero pero que, sabemos, está más caliente, la longitud de la columna de mercurio aumentará, hasta llegar un momento en que permanezca estable. De un modo operativo, la temperatura de un cuerpo viene indicada por la dilatación que produce en el mercurio del termómetro. Dos cuerpos que produzcan la misma dilatación estarán a la misma temperatura.

Para medir la temperatura es necesario tomar un convenio sobre su unidad. En el caso de la escala Celsius esto se hace asignando a lo que marca un termómetro sumergido en hielo que se está fundiendo el valor 0, y a lo que marca cuando está en agua hirviendo (en ambos casos a la presión atmosférica de 101.293 Pa, o 1 atmósfera) el valor 100. De este modo se obtienen 100 partes iguales o grados centígrados, que se simbolizan por °C. En la escala internacional, absoluta o Kelvin, la unidad es el grado Kelvin (cuyo símbolo es K), que coincide en magnitud con el grado centígrado, pero cuyo origen (0 K), corresponde aproximadamente a  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*A.2. Expresad la temperatura de fusión del hielo y de ebullición del agua, a presión normal, en la escala Kelvin. Rdo. 273 K y 373 K*

La utilización de termómetros permitió avanzar cuantitativamente en el estudio de los fenómenos caloríficos y en la elaboración de una teoría sobre los mismos. En concreto, permitió comprobar objetivamente que **cuando se ponen en contacto dos cuerpos a distinta temperatura, la del “más caliente” disminuye y la del “más frío” aumenta hasta que ambos alcanzan la misma temperatura (equilibrio térmico).**

## 4. Calor, energía y cambios

### 2.1 ¿Cómo explicar la tendencia espontánea a alcanzar el equilibrio térmico? Hipótesis del calor como una sustancia

A finales del siglo XVIII y principios del XIX (cuando la hipótesis atómico-molecular estaba en sus inicios) este hecho parecía apoyar la idea de que había una sustancia que, aunque invisible y sin peso, pasaba del cuerpo más caliente al más frío, hasta que cesaba de fluir cuando se alcanzaba la misma temperatura en ambos cuerpos. *¿Por qué pasaba de los cuerpos más calientes a los fríos?* Se pensó que las partículas de calórico estaban entre las partículas de la materia ordinaria que forman los cuerpos y que su concentración entre dichas partículas era la temperatura del cuerpo. Si se admitía que las partículas de calórico se ejercían fuerzas repulsivas entre ellas pero que eran atraídas por las partículas de la materia ordinaria, al poner en contacto dos objetos a distinta temperatura (distinta concentración de calórico entre sus partículas ordinarias), el calórico pasaría desde el objeto en que se encontraba en mayor concentración hacia el interior del otro hasta que se igualara su concentración en ambos (igual temperatura).

En definitiva, para que un cuerpo aumentara su temperatura era necesario que entrara en él una cantidad de calórico, lo que aumentaba su concentración, e, inversamente, para que disminuyera su temperatura debía salir de él una cantidad de calórico.

*A.3. Sugierid una explicación basada en la hipótesis del calórico de la dilatación de los cuerpos cuando se calientan y su contracción cuando se enfrían. Ídem de la conducción térmica en una barra metálica y de la existencia de mejores y peores conductores térmicos.*

Al calentar/enfriar un cuerpo, entraban/salían partículas de calórico en él, que como se ejercen fuerzas repulsivas entre ellas harían que las partículas de la materia ordinaria estuvieran más/menos separadas. Al calentar un extremo de un objeto, entraban partículas de calórico que, como se repelían, se repartirían entre las partículas del cuerpo, ocupando el mayor volumen posible. Esto dependía también de que las partículas del cuerpo atrajeran con mayor o menor intensidad a las del calórico: los metales eran buenos conductores porque las atraían con poca intensidad.

*A.4. ¿Podía darse una situación en que pasara calórico desde un cuerpo que tenía menos cantidad de calórico a otro que tenía una cantidad mayor?*

El calórico siempre pasaba de los cuerpos en que se encontraba en una concentración mayor (temperatura mayor) a otros en que su concentración era menor hasta que las concentraciones se igualaban. Un cuerpo muy grande podía tener más calórico, aunque en menor concentración, que otro más pequeño en el que el calórico estaba más concentrado; en este caso el flujo de calórico se produciría desde el cuerpo pequeño hacia el grande.

La hipótesis del calórico podía, además, generar predicciones cuantitativas contrastables experimentalmente. En efecto, según esta hipótesis, el equilibrio térmico que se alcanza cuando se ponen en contacto dos cuerpos a diferentes temperaturas (aislados del exterior), es debido a que la cantidad de calor (o calórico) que sale del más caliente es la que entra en el más frío. Podía, pues, hallarse empíricamente, por separado, la cantidad de calor que cede un cuerpo cuando disminuye su temperatura un cierto valor y la que absorbe para aumentarla, y utilizar este conocimiento para predecir la temperatura de equilibrio. Dicha predicción debería coincidir con la lectura del termómetro. Vamos, por tanto, a tratar de encontrar la cantidad de calor necesaria para que un cuerpo cambie su temperatura en un valor determinado.

## 2.2 Calor y variación de temperatura. Medida del calor. Calor específico

### A.5. ¿De qué dependerá el calor, $Q$ , necesario para aumentar la temperatura de un cuerpo?

Parece razonable admitir que dependerá de la variación de temperatura,  $\Delta t$ , que se desee conseguir y de la masa del cuerpo en cuestión (para aumentar 10 °C, p. ej., la temperatura de 5 kg de agua hará falta 5 veces más calor que para aumentar 10 °C la temperatura de 1 kg de agua). Dependerá también del material de que esté hecho el cuerpo que se calienta o enfría. No será lo mismo calentar agua que hierro o aire. Todas estas suposiciones (que pueden justificarse con la hipótesis del calórico pero que son también razonables según nuestra experiencia cotidiana), quedan recogidas en la siguiente expresión:

$$Q = k \cdot m \cdot \Delta t$$

donde  $k$  tendrá un valor distinto para distintos materiales.

Para contrastar esta hipótesis, es necesario un diseño experimental en el que se controlen las variables. Es decir, hay que dejar fijas cada vez, dos de las tres variables y estudiar la relación entre la cantidad de calor,  $Q$ , y la variable que queda libre (variable independiente). Además de la estructura lógica del diseño experimental, es necesario resolver también los problemas técnicos o prácticos, entre los cuales, el más importante, es el de la medida de la cantidad de calor. En efecto, podemos calentar con un mechero cantidades variables de agua u otros materiales, y medir el cambio de temperatura con el termómetro, pero, ¿cómo medimos el calor que le suministramos?.

### A.6. Sugierid alguna forma de medir el calor que suministramos a un objeto al calentarlo con un mechero o, en caso necesario, alguna magnitud relacionada directamente con la cantidad de calor suministrada.

Por ahora, no podemos medir directamente la cantidad de calor, pero si calentamos el cuerpo utilizando un mechero de gas, por ejemplo, parece lógico pensar que, si la llama es siempre uniforme (si el caudal de gas es siempre el mismo) la cantidad de calor que suministramos al cuerpo será proporcional al tiempo de calentamiento. Si sólo buscamos confirmar las relaciones entre las variables, podemos utilizar el tiempo como medida relativa de la cantidad de calor.

Es necesario realizar el experimento en condiciones que disminuyan al máximo posible las pérdidas de calor y repetirlo varias veces para aumentar la fiabilidad de los datos. Muchos científicos, durante años, se han dedicado a perfeccionar experimentos de este tipo. A nivel escolar, podemos utilizar, para comenzar, un simple vaso de precipitados resistente al calor y un mechero Bunsen o un hornillo de gas.

Al realizar las experiencias propuestas en un laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados:

a) Manteniendo constante la masa y el tipo de material (0'200 kg de agua destilada):

Q (minutos)	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta t$ (°C)	4'5	9'0	14'1	18'6	23'5	27'4	31'7

b) Manteniendo constante el cambio de temperatura (10 °C) y el tipo de material (agua destilada):

Q (s)	52	75	101	128	140
m (kg)	0'100	0'150	0'200	0'250	0'300

#### 4. Calor, energía y cambios

c) Variando únicamente el tipo de material (masas iguales y aumentos de temperaturas iguales; sólo comparación cualitativa): El tiempo de calentamiento es distinto, según se trate de agua o aceite (por ejemplo).

*A.7. Representad gráficamente los resultados de las tablas anteriores y comprobad que  $Q$  es proporcional a la variación de temperatura y a la masa del objeto.*

Así pues, los resultados experimentales confirman que:

**La cantidad de calor<sup>2</sup> que absorbe o desprende<sup>3</sup> un cuerpo es proporcional al cambio de su temperatura y a su masa, y depende del material del que está hecho.**

$$Q = k \cdot m \cdot \Delta t$$

Como  $\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}$ , cuando  $t_f > t_i$ , es decir, cuando se calienta,  $Q$  será positivo, indicando que el cuerpo absorbe calor (que “entra calor”). Cuando el cuerpo se enfría,  $\Delta t$  y, por tanto,  $Q$ , serán negativos, indicando que es calor que se desprende (que “sale calor”).

Podemos utilizar la relación empírica obtenida,  $Q = k \cdot m \cdot \Delta t$ , para dar significado físico a la influencia del material, contenida en  $k$ .

*A.8. ¿Qué información sobre el comportamiento térmico de un material nos aporta el valor de  $k$ ? ¿Qué diferencia habrá entre un material de  $k$  grande y otro de  $k$  pequeña?*

Si en  $Q = k \cdot m \cdot \Delta t$ , tomamos 1 kg de masa y una variación de temperatura de 1 °C, vemos que el valor de  $k$  de un material coincide con el de la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 kg de ese material. En términos de la teoría del calórico, la constante de proporcionalidad  $k$ , representa la cantidad de calórico que debe absorber 1 kg de un material para elevar su temperatura (la “concentración” de calórico) en 1 °C. De ahí proviene el nombre que se le dio: **capacidad calorífica específica o calor específico**. En adelante lo representaremos por  $c$ . La cantidad  $c \cdot m$ , representa, pues, la cantidad de calor necesaria para que un *objeto* de masa  $m$  cambie su temperatura en 1 °C, y se le llama **capacidad calorífica**,  $C$ , del objeto.

*A.9. Experimentalmente se comprueba que el calor específico del agua es nueve veces mayor que el del hierro sólido, ¿qué significa eso?*

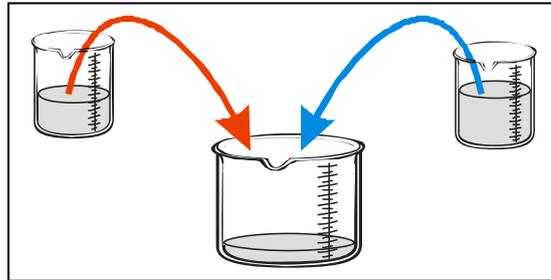
Ese resultado experimental indica que para aumentar en el mismo valor la temperatura de masas iguales de agua y de hierro, hace falta una cantidad de calor nueve veces mayor para el agua que para el hierro. Podemos decir también, según la teoría del calórico, que la cantidad de calor que absorbe 1 kg de agua al aumentar su temperatura en 1 °C es nueve veces mayor que la que absorbe 1 kg de hierro. Lo mismo ocurre cuando se enfría: 1 kg de agua desprende o cede -al cuerpo más frío, a su entorno- cuando se enfría en 1 °C, nueve veces más calor que 1 kg de hierro).

El resultado obtenido permite realizar predicciones cuantitativas sobre el valor de la temperatura de equilibrio de una mezcla de cantidades distintas del mismo material que inicialmente están a temperaturas diferentes.

<sup>2</sup> Cuando no se producen cambios de fase

<sup>3</sup> Aunque aquí no lo hemos probado experimentalmente, la cantidad de calor que absorbe un objeto para pasar de 20 °C a 30 °C, por ejemplo, es la misma que desprende al enfriarse de 30 °C a 20 °C

**A.10.** Si mezclamos una cantidad,  $m_c$ , de agua caliente a una temperatura  $t_c$ , con otra cantidad,  $m_{fr}$ , de agua a una temperatura menor,  $t_{fr}$ , ¿cuál será la temperatura final de la mezcla? Suponed que no hay pérdidas de calor, y que, como afirma la teoría del calórico, el calor que desprende  $m_c$  al enfriarse hasta la temperatura de equilibrio final, es el calor que absorbe  $m_{fr}$  para calentarse hasta dicha temperatura.



Según los resultados experimentales que hemos encontrado, la cantidad de calor que desprende el agua caliente al enfriarse desde  $t_c$  hasta  $t_{eq}$ , es:  $Q = c_{agua} \cdot m_c \cdot \Delta t = c_{agua} \cdot m_c \cdot (t_{eq} - t_c)$ . Esta misma cantidad de calor es la que, al ser absorbida por  $m_{fr}$ , produce un aumento de temperatura desde  $t_{fr}$  hasta  $t_{eq}$ , que según lo encontrado empíricamente debe valer :

$$c_{agua} \cdot m_{fr} \cdot \Delta t = c_{agua} \cdot m_{fr} \cdot (t_{eq} - t_{fr})$$

Así pues, teóricamente, la temperatura de equilibrio no puede ser cualquiera, sino aquella que cumpla que:

Calor desprendido por  $m_c =$  Calor absorbido por  $m_{fr}$  (en valor absoluto<sup>4</sup>)

$$-c_{agua} \cdot m_c \cdot (t_{eq} - t_c) = c_{agua} \cdot m_{fr} \cdot (t_{eq} - t_{fr})$$

de donde se obtiene :

$$t_{eq} = \frac{m_c \cdot t_c + m_{fr} \cdot t_{fr}}{m_c + m_{fr}}$$

**A.11.** Se mezclan 200 g de agua a 70 °C con 100 g de agua a 20 °C. Medid experimentalmente la temperatura de equilibrio y comparad con el valor teórico. ¿A qué pueden ser debidas, si las hay, las diferencias?

Rdo. 53,3 °C, teórico. Las diferencias pueden deberse a que el recipiente también se calienta y no lo hemos tenido en cuenta. Además, parte del calor puede ir al aire. Esto hará necesario diseñar recipientes aislados térmicamente del aire y determinar el calor que puede absorber el recipiente.

Cuando la mezcla se realiza en recipientes adecuados (calorímetros), el resultado experimental coincide bastante bien con el teórico.

<sup>4</sup> Hemos puesto el signo menos delante de la cantidad de calor desprendida por el agua caliente porque estamos igualando el valor absoluto de las cantidades de calor, y  $(t_{eq} - t_c)$  es negativo.

#### 4. Calor, energía y cambios

**A.12.** Si deseamos medir la cantidad de calor, es necesario que definamos una unidad de calor, ¿cómo podemos hacerlo?

Puesto que el calor específico de una sustancia indica la cantidad de calor que le “cabe” a 1 kg de la misma por cada °C de aumento de su temperatura, podemos utilizar la expresión empírica  $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$  para definir una unidad para medir la cantidad de calor, asignando un valor arbitrario al calor específico de alguna sustancia. Por convenio se asigna el valor de 1 al calor específico del agua, y de este modo, la **unidad de calor** será la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura<sup>5</sup> de 1 kg de agua. Su nombre es **kilocaloría** y su símbolo kcal (si se toma 1 gramo de agua, tendríamos la **caloría**, cal, que es la milésima parte de 1 kcal).

**A.13.** ¿Qué cantidad de calor deben absorber 2 kg de agua para pasar de 0 a 100 °C?  
Rdo. 200 kcal.

**A.14.** Si se enfrían 200 litros de agua de 45 a 15 °C, ¿qué cantidad de calor se desprende?  
Rdo. 6000 kcal ó 6000000 cal.

La determinación de calores específicos de distintos materiales puede hacerse por distintos procedimientos. El más inmediato, aunque poco preciso, es comparar el tiempo necesario para elevar –utilizando el mismo mechero con el mismo caudal de gas- en el mismo valor, la temperatura de dos masas iguales de agua y del material considerado. Es fácil probar que la relación de los tiempos es la misma que la de los calores específicos. Otro método, mejor, consiste en mezclar una cantidad de agua de masa y temperatura conocidas con otra cantidad de masa y temperatura (diferente) también conocidas del material cuyo calor específico deseamos hallar. Puesto que podemos medir la temperatura de equilibrio térmico, podemos proceder de manera análoga a como hemos hecho anteriormente, y calcular el calor específico deseado.

No obstante, si se desea una precisión aceptable, es necesario hallar la cantidad de calor que absorbe o desprende el recipiente por cada °C –es decir, su capacidad calorífica- y tenerlo en cuenta en los experimentos. Por ello, proponemos la realización de un trabajo práctico para determinar la capacidad calorífica de un calorímetro. Conviene que se realice el trabajo con el calorímetro que se vaya a usar posteriormente para determinar el calor específico de un material.

### 2.3 Determinación de la capacidad calorífica de un calorímetro y del calor específico de una sustancia

Si ponemos una masa,  $m_f$ , de agua en un calorímetro, al cabo de un buen rato, ambos tendrán la misma temperatura,  $t_{fr}$ . Si echamos una masa,  $m_c$ , de agua más caliente cuya temperatura,  $t_c$ , conocemos, tapamos el calorímetro y agitamos lentamente, la temperatura de equilibrio que se alcanza no depende sólo de las masas y temperaturas del agua, sino también de la cantidad de calor que absorbe el calorímetro. Debemos considerar, pues, que **se trata del contacto térmico de tres cuerpos y no de dos**.

Según nuestra hipótesis sobre cómo se produce el calentamiento, el calor desprendido por el cuerpo más caliente es absorbido por los más fríos hasta alcanzar una temperatura de equilibrio. Por tanto, tendremos:

---

<sup>5</sup> Posteriormente se comprobó que el calor específico de una sustancia depende de la temperatura, y, por tanto, se precisó que el aumento de 1 °C debía ser entre 14'5 °C y 15'5 °C. En experimentos escolares el calor específico del agua líquida y los sólidos puede considerarse prácticamente constante.

Calor desprendido por el agua caliente :  $Q = c_{\text{agua}} \cdot m_c \cdot \Delta t = c_{\text{agua}} \cdot m_c \cdot (t_{\text{eq}} - t_c)$

Calor absorbido por el agua fría :  $Q' = c_{\text{agua}} \cdot m_{fr} \cdot t = c_{\text{agua}} \cdot m_{fr} \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})$

Calor absorbido por el calorímetro:  $Q'' = c_{\text{material calorímetro}} \cdot m_{\text{calorímetro}} \cdot \Delta t = C \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})$

Luego  $t_{\text{eq}}$  no puede ser cualquiera, sino que debe cumplir<sup>6</sup> que:

$$-c_{\text{agua}} \cdot m_c \cdot (t_{\text{eq}} - t_c) = c_{\text{agua}} \cdot m_{fr} \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr}) + C \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})$$

Como el calor específico del agua es 1 kcal/ kg. °C , y podemos medir todas las temperaturas y las masas de agua caliente y fría, la capacidad calorífica del calorímetro será:

$$C = \frac{-m_c \cdot (t_{\text{eq}} - t_c) - m_{fr} \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})}{(t_{\text{eq}} - t_{fr})}$$

**A.15.** Planificad y llevad a cabo la determinación de la capacidad calorífica de un calorímetro.

**A.16.** ¿Qué quiere decir que la capacidad calorífica de un calorímetro es 0'002 kcal/°C? Si inicialmente había agua a una temperatura de 22 °C y al final se alcanza una temperatura de 48 °C, ¿qué cantidad de calor habrá absorbido el calorímetro?

Eso significa que ese calorímetro absorbe (o desprende) una cantidad de calor de 0'002 kcal por cada grado que varía su temperatura. En el experimento descrito la cantidad de calor absorbida por el calorímetro ha sido  $Q = C \cdot \Delta t = 0'002 \cdot 26 = 0'052 \text{ kcal}$ .

### Determinación del calor específico del hierro

Una vez determinada la capacidad calorífica del calorímetro que vamos a usar, podemos utilizarlo para averiguar con bastante precisión el calor específico del hierro.

Si introducimos un trozo de hierro caliente en un calorímetro que contiene cierta cantidad de agua fría, el calor desprendido por el hierro al enfriarse hasta la temperatura de equilibrio térmico, será el calor que absorben el agua y el calorímetro para calentarse hasta la temperatura de equilibrio. Por tanto, la temperatura de equilibrio no puede ser cualquiera, sino que debe cumplir la condición anterior. Es decir:

$$-c_{Fe} \cdot m_{Fe} \cdot (t_{\text{eq}} - t_c) = c_{\text{agua}} \cdot m_{fr} \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr}) + C \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})$$

por tanto, el calor específico del hierro será:  $c_{Fe} = \frac{(c_{\text{agua}} \cdot m_{fr} + C) \cdot (t_{\text{eq}} - t_{fr})}{-m_{Fe} \cdot (t_{\text{eq}} - t_c)}$

El procedimiento, pues, es el mismo que anteriormente: mezclar en el calorímetro una masa de agua,  $m_{fr}$ , a temperatura ambiente,  $t_{fr}$ , con un trozo de hierro de masa  $m_{Fe}$ , a una temperatura

<sup>6</sup>Véase nota al pie nº 4

#### 4. Calor, energía y cambios

más elevada,  $t_c$ , y medir la temperatura de equilibrio,  $t_{eq}$ . Es necesario, no obstante, ser cuidadosos al medir las temperaturas y masas, y pensar cómo pueden eliminarse las posibles pérdidas de calor que se pueden producir en la manipulación del trozo de hierro. Lo mejor es calentar el trozo de hierro al baño maría (así  $t_c$  será la del agua del baño) y después cogerlo con una pinza de madera, secarlo con un paño, y echarlo rápidamente al calorímetro con el agua.

*A.17. Planificad y realizad el trabajo propuesto. Comparad con el valor dado en la tabla.*

Calor específico	kcal/ kg· °C	kJ/ kg· °C <sup>7</sup>	Calor específico	kcal / kg · °C	kJ/ kg· °C
Hierro o acero	0'11	0'45	Latón	0,09	0'37
Aluminio	0'22	0'9	Agua líquida	1	4'18
Plomo	0'031	0'13	Agua sólida (hielo)	0'5	2'09
Vidrio	0'20	0'84	Alcohol etílico (25 °C)	0'58	2'4
Cobre	0'092	0'385	Mercurio (0 – 100 °C)	0'033	0'14

*A.18. ¿Qué quiere decir que el calor específico del Al es 0'22 kcal/kg · °C?*

Que para aumentar la temperatura de un trozo de aluminio en 1°C, hace falta suministrarle una cantidad de calor de 0'22 kcal por cada kilogramo de masa.

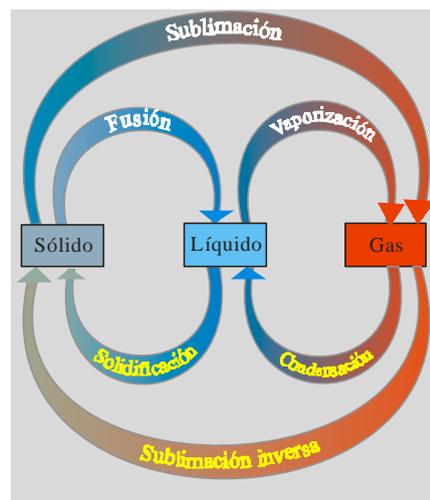
En el caso de los gases, se encuentra experimentalmente que su calor específico es distinto si se calienta el gas en un recipiente cerrado (a volumen constante) que si se calienta en un recipiente en el que puede variar su volumen manteniendo la presión constante (es menor a volumen constante que a presión constante). En concreto, el calor específico a presión constante del aire es 1,4 veces mayor, aproximadamente, que a volumen constante. A presión atmosférica constante, su valor es (entre 0 y 100 °C) 0'24 kcal/ kg. °C. En el caso de sólidos y líquidos, la variación del calor específico con la presión es prácticamente despreciable.

#### 2.4. Los cambios de fase. Calores latentes

*A.19. Revisad los resultados experimentales que se encontraron en cursos anteriores –en caso contrario, obtened la información– sobre el comportamiento térmico de los cuerpos en los cambios de fase, concretamente cuando pasan de sólido a líquido y de líquido a gas o viceversa.*

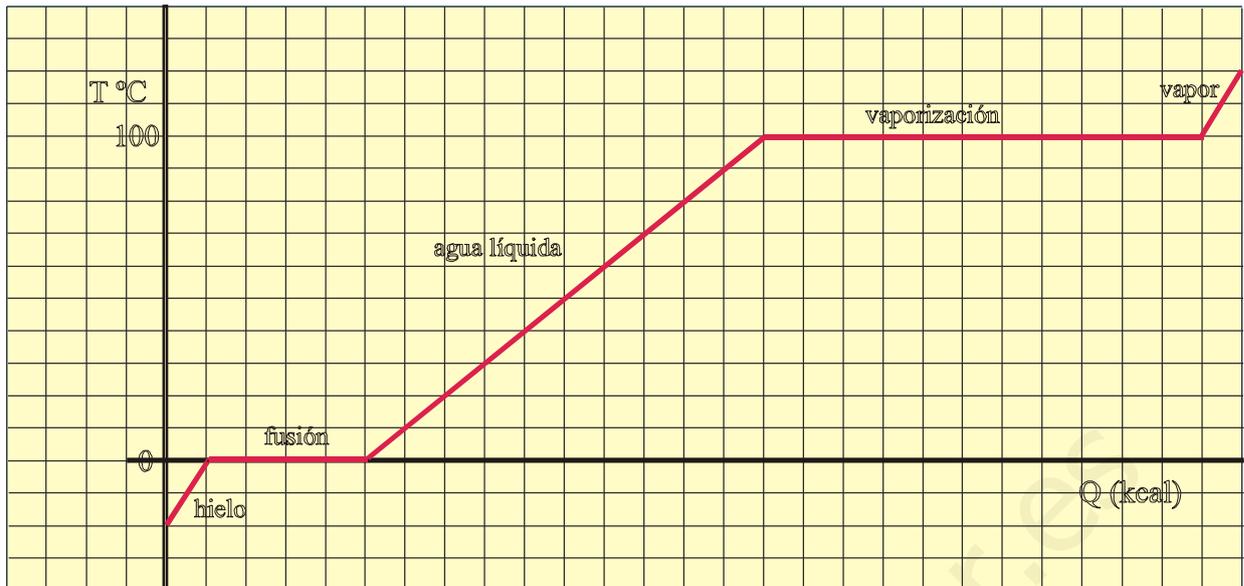
El resultado empírico más llamativo cuando se mide la temperatura en un cambio de fase es que:

Para cada sustancia química, a una presión dada, **el cambio de fase se realiza a temperatura constante**. Mientras que de parte de la sustancia por pasar de una fase a otra, aunque se caliente (se aporte calor) o se enfríe (se extraiga calor), la temperatura de dicha sustancia permanece constante.



En la gráfica siguiente se muestra cualitativamente la variación de la temperatura del agua cuando se calienta desde la fase sólida hasta la fase gaseosa.

<sup>7</sup> Más adelante se utilizarán estas unidades



Para que ocurran la fusión, ebullición y sublimación es necesario suministrar calor al cuerpo. En cambio, para que ocurran la solidificación y la condensación, es necesario que el cuerpo desprenda calor (que le ceda calor a otro cuerpo, a su entorno), para lo que el entorno debe estar más frío.

El calor que absorbe (o desprende) una cantidad de una sustancia para cambiar de fase, a una presión atmosférica determinada, es proporcional a su masa. La constante de proporcionalidad es característica de cada sustancia y se llama **calor latente** del cambio de fase correspondiente. Los representaremos como  $L_{fus}$ ,  $L_{eb}$ ,  $L_{sol}$ .

Experimentalmente se encuentra que:

La cantidad de calor que absorbe una masa,  $m$ , de una sustancia pura, para fundirse, es  $Q_{fus} = L_{fus} \cdot m$

La cantidad de calor que cede una masa,  $m$ , de una sustancia pura, para solidificarse, es  $Q_{sol} = L_{sol} \cdot m$

Si en las expresiones anteriores ponemos  $m = 1$  kg, vemos que **el calor latente es la cantidad de calor que absorbe (o desprende) 1 kg de la sustancia considerada para cambiar de fase.**

Si, como hemos hecho hasta aquí, el calor que entra en un cuerpo (que absorbe) se considera positivo y el que sale (que desprende o cede) como negativo, se cumple que:

$$Q_{fus} = -Q_{sol} ; \quad Q_{eb} = -Q_{cond}$$

#### Temperaturas de fusión y ebullición y calores latentes de algunas sustancias

Sustancia	Tª durante el cambio de fase (°C)		Calor latente (kcal/kg)		Sustancia	Tª durante el cambio de fase (°C)		Calor latente (kcal/kg)	
	Fusión	Ebullición	Fusión	Ebullición		Fusión	Ebullición	Fusión	Ebullición
Aluminio	660	2300	78'9	2205'7	Hierro	1530	3050	69'9	1503'5
Estaño	231'9	2270	14	720'8	Mercurio	-39	356'5	2'75	68'1
Etanol	-114	78'3	25'12	202'4	Naftalina	80'3	218	36'1	75'5
Agua	0	100	80'1	540'9	Plomo	327'4	1750	5'9	210

#### 4. Calor, energía y cambios

**A.20. Hallad:** a) *La cantidad de calor que deben absorber 0'5 l de agua para pasar de líquido a 100 °C a vapor a esa misma temperatura, a presión normal;* b) *Ídem, desprender para pasar de agua a 0°C a hielo a 0 °C.* Rdo. a) 270'45 kcal; b) – 40'05 kcal.

**A.21.** *Un día de invierno, con temperatura por debajo de 0 °C, llueve abundantemente. El agua de los charcos se va enfriando y comienza a congelarse. Analizad el efecto que tendrá este proceso en la temperatura del aire.*

Hará más lento el descenso de temperatura del aire cercano al suelo, pues se congela porque cede calor al aire.

**A.22.** *¿Cómo explicar con la teoría del calórico que entre o salga calor de un cuerpo durante un cambio de fase sin que cambie su temperatura?*

Para explicar tanto los cambios de fase como el desprendimiento de calor en muchas reacciones químicas se asignó al calórico la propiedad de mezclarse físicamente con las partículas de la materia ordinaria y, también, la de combinarse químicamente con ellas. Cuando se mezclaba, quedaba entre las partículas de los cuerpos, y su mayor o menor concentración se ponía en evidencia de un modo “sensible” mediante la temperatura del cuerpo. En cambio, cuando se combinaba químicamente con las partículas del cuerpo, lo transformaba: lo fundía, sublimaba, vaporizaba, ..., y como, en este caso, se trataba de una unión química, no variaba la concentración entre las partículas del cuerpo: no variaba su temperatura. Se incorporaba (en caso de “entrar”) al cuerpo que sufría el cambio de fase, donde permanecía de forma “latente”.

Así, por ejemplo, la fusión de hielo en agua, en la teoría del calor como sustancia, se concebía como una verdadera reacción química:

1 kg de hielo a 0 °C + 80 kcal de calórico → 1 kg de agua a 0 °C

La igualdad de masa del hielo y del agua era debida a que el calórico no tenía masa .

En el cambio de fase inverso, el calor que sale del cuerpo proviene de la ruptura de la combinación química, lo que hace también que no varíe su concentración en el cuerpo (su temperatura).

**A.23. Recapitulad lo avanzado hasta aquí sobre los fenómenos térmicos y su explicación**

Hemos revisado los procesos de calentamiento y enfriamiento de los cuerpos y los cambios de fase. La explicación de lo encontrado experimentalmente puede realizarse suponiendo que el calor es una sustancia invisible, sin peso, cuya cantidad siempre permanece constante pues sólo pasa de unos cuerpos (en los que se puede encontrar de forma latente y/o sensible) a otros. Más aún, a partir de esta hipótesis hemos realizado predicciones cuantitativas (la temperatura de equilibrio térmico cuando se mezclan sustancias a temperaturas diferentes) que hemos podido comprobar empíricamente.

Aunque los científicos newtonianos criticaban la ausencia de masa del calórico, este aspecto no era suficiente para dudar de una teoría que explicaba bien los fenómenos térmicos (al fin y al cabo, podía ser, incluso, que su masa fuera tan pequeña que los instrumentos de la época no pudieran detectarla).

Un aspecto, en cambio, en el que la teoría del calor como sustancia tenía dificultades era en la explicación de la aparición de calentamiento cuando no había reacciones químicas, ni cuerpos que estuvieran inicialmente a temperaturas diferentes. Esto es, como sabemos, lo que ocurre cuando se calientan los cuerpos debido al rozamiento o fricción (cuando nos frotamos las manos o lijamos un trozo de madera, por ejemplo), es decir, cuando desaparece la energía mecánica (el “movimiento”) y aparece calentamiento.

### 3. ¿POR QUÉ SE CALIENTAN LOS CUERPOS CUANDO HAY ROZAMIENTO? CRISIS DE LA TEORÍA DEL CALÓRICO

Una actividad en la que el calentamiento por fricción se produce espectacularmente era la que el científico (y también empresario, político, inventor, ..) Benjamin Thompson (1753-1814) tenía que supervisar: la de fabricación de cañones para el ejército de Baviera a finales del siglo XVIII. En una etapa del proceso de fabricación se debían perforar longitudinalmente cilindros macizos de bronce (para hacer el hueco para los proyectiles). Para ello se utilizaban máquinas taladradoras con barrenas o brocas muy afiladas que producían virutas de bronce según iban perforando el cilindro. Durante el taladrado, el cilindro y las virutas se calentaban hasta tal punto (las virutas llegaban a ponerse “al rojo”) que era necesario realizar la operación dentro de tanques de agua que, en ocasiones, llegaba a hervir.

#### A.24. ¿Qué explicación podría darse de estos hechos con la teoría del calórico?

Puesto que todos los cuerpos aumentaban su temperatura (la concentración de calórico) y no se producían reacciones químicas, ni cambios de fase (en los que podría liberarse el calor latente), la explicación fue que en las láminas finas de bronce, en las virutas, “cabía” menos calórico por kg y °C, que en los trozos macizos de bronce (es decir, el calor específico de las virutas era menor que el del cilindro) y, por tanto, cuando se cortaban virutas el exceso de calórico de éstas pasaba al cilindro y al agua.

Esta explicación podía contrastarse: podía medirse el calor específico de las virutas de bronce, y, además, el calor desprendido por las virutas debía ser proporcional a la masa de virutas que se producían.

Benjamin Thompson (que recibió el título de Conde de Rumford) comprobó que el calor específico de las virutas de bronce era el mismo que el del cilindro de bronce y, algo más importante, que el calor producido (que medía por el aumento de temperatura del agua del tanque) era mayor ¡cuando la barrena tenía menos filo y producía, por tanto, menos masa de virutas! De hecho, **mostró que cuando la broca no cortaba nada, no producía virutas, sino que sólo “frotaba” fuertemente el cilindro, el agua hervía mientras la taladradora siguiera girando.**

#### A.25. ¿Cómo podían explicarse los resultados de B. Thompson?

Para Thompson esto mostraba que el calor no era una sustancia que pasaba de unos cuerpos a otros, pues dada la enorme cantidad de calor que pasaba al agua, debería agotarse (al salir del cilindro y las virutas hacia el agua). **Sin embargo, no se agotaba: podía producirse de forma ilimitada a partir del movimiento.** Pesó, además, el cilindro y luego el cilindro taladrado y las virutas producidas, sin obtener diferencia alguna. Según sus ideas, esto mostraba que el calor no era una sustancia, sino “una forma de movimiento”, que era de “naturaleza mecánica”.

#### 4. Calor, energía y cambios

Davy, discípulo de Thompson, también realizó un experimento para fundir hielo frotando dos trozos de hielo en un recipiente cerrado (mediante un mecanismo de relojería) que estaba dentro de otro recipiente con hielo fundente. Mostraba así, que podía producirse la fusión sin que “entrara calórico” en el hielo.

No obstante, aunque en las primeras décadas del siglo XIX, se realizaron con frecuencia estudios que ponían en cuestión **la teoría del calórico**, ésta **no se abandonó por la mayoría de los científicos**. Una **teoría científica** no se abandona del todo porque falle en explicar algunos fenómenos, sino que pervive hasta que la comunidad científica dispone de claras y reiteradas evidencias en contra y, sobre todo, de otra teoría alternativa que explica lo que era explicado por la anterior y aquello en lo que fallaba. Y el desarrollo de nuevas teorías hasta un punto en que sean aceptadas por toda la comunidad científica suele llevar bastante tiempo.

Así, los trabajos pioneros de B. Thompson sólo “debilitaron” la teoría del calórico, que fue superada definitivamente hacia la mitad del siglo XIX. Durante ese tiempo una serie de factores contribuyeron a preparar el terreno para la explicación de los fenómenos caloríficos a partir del movimiento de los átomos y moléculas y de las fuerzas que se ejercen entre ellos:

- **El modelo atómico/molecular de Dalton había evolucionado.** Algunos científicos explicaron las propiedades de los gases, cuantitativamente, suponiendo que las moléculas estaban en movimiento y poseían energía cinética y cantidad de movimiento (hipótesis **cinético/molecular**).
- Se fueron acumulando descubrimientos sobre **conexiones entre fenómenos aparentemente muy distintos**, lo que favoreció el desarrollo de ideas comunes, unificadoras, a campos distintos de la ciencia. En concreto, se puso de manifiesto que :
  - ✓ *Las reacciones químicas podían producir corriente eléctrica.* La pila de Volta, inventada en 1800, se basaba en la reacción química que se produce entre metales distintos sumergidos en disoluciones salinas.
  - ✓ *La corriente eléctrica podía producir calentamiento* y utilizarse para elevar la temperatura del agua. Fue una de las primeras aplicaciones de la pila de Volta.
  - ✓ *La corriente eléctrica podía producir reacciones químicas.* Davy, a principios de siglo, consiguió descomponer muchas sustancias que hasta entonces se consideraban elementos.
  - ✓ La corriente eléctrica podía producir efectos magnéticos, como un imán (Oersted, 1820)
  - ✓ *El calor podía producir corriente eléctrica.* Seebeck, en 1822, consiguió producir una corriente eléctrica uniendo dos trozos de hilo de metales distintos, y calentando una de las uniones y enfriando la otra.
  - ✓ *La corriente eléctrica puede producir movimiento y viceversa.* Faraday, en torno a 1830, produjo una corriente eléctrica a partir del movimiento de una bobina y un imán, y viceversa: utilizando una bobina por la que circulaba corriente y un imán fabricó el primer motor eléctrico.
  - ✓ *El calor podía producir movimiento.* El auge de las máquinas térmicas, inventadas en el siglo XVI y desarrolladas durante el XVII y XVIII, había cambiado el modo de vida de países como Gran Bretaña, Francia y Alemania. En estas máquinas, el calor generado al quemar carbón hacía hervir el agua de una caldera hasta conseguir vapor de agua a una temperatura y presión muy elevadas, que se utilizaba para mover un pistón o una turbina, hasta que el agua se enfriaba y, si era de circuito cerrado, se devolvía de nuevo a la caldera para realizar otro ciclo idéntico.

Fue en esta “atmósfera científica y técnica” cuando se abordó la desaparición de energía mecánica y la aparición de calentamiento, desde un punto de *vista cuantitativo*, que permitió relacionar-

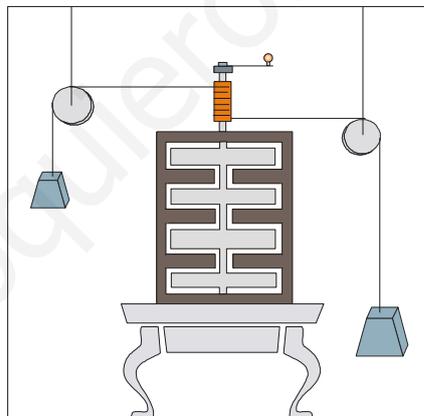
los y, al mismo tiempo formular un principio de conservación que incluía los cambios mecánicos y térmicos.

Este avance se realizó de modo casi simultáneo e independiente por varios investigadores (algo que no es raro en la ciencia). No obstante, se le reconoce al inglés James Prescott Joule (1818–1889) la gloria de su invención, porque en sus trabajos (que inicialmente pasaron desapercibidos para la comunidad científica) aunó las hipótesis especulativas con resultados empíricos variados, cuantitativos y precisos. No obstante, no debe olvidarse que Joule leyó los trabajos del Conde Rumford, fue alumno de Dalton (el “padre” de la teoría atómico/ molecular), participó en reuniones científicas, trabajó en equipo con William Thomson (Lord Kelvin, 1824 -1907) y Clausius (1822-1888), etc. **El avance científico, más aún en la actualidad, es fruto de una tarea colectiva en la que no se parte nunca de cero.**

#### 4. SUPERACIÓN DE LA BARRERA ENTRE MECÁNICA Y TERMOLOGÍA. INTERPRETACIÓN MECÁNICA DE LOS FENÓMENOS TÉRMICOS. PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

##### 4.1 Trabajos de Joule sobre la producción de calentamiento a partir de la energía mecánica

El inglés J. P. Joule estudió el calentamiento de los cuerpos producido mediante trabajo mecánico. En la figura adjunta se muestra esquemáticamente el dispositivo utilizado en una de sus investigaciones. Según las propias palabras de Joule:



“El aparato ... consiste en una rueda de palas de bronce que gira horizontalmente en un recipiente con agua. Estas palas se mueven mediante pesas que se dejan caer ... . Las palas se mueven con gran resistencia en el recipiente con agua, de modo que las pesas (de 4 libras cada una) descienden lentamente con una velocidad aproximada de 1 pie por segundo. La altura de las poleas sobre el suelo era de 12 yardas y, en consecuencia, cuando las pesas habían descendido ..., tenían que ser elevadas de nuevo para renovar el movimiento de las palas. Después de repetir esta operación dieciséis veces, se medía el aumento de temperatura del agua”.

El recipiente era un calorímetro, y, midiendo el aumento de temperatura, podía medir el calor que desprendería el agua al enfriarse a temperatura ambiente ( $m \cdot c \cdot \Delta t$ ). El trabajo realizado por las pesas al descender con velocidad constante se empleaba **únicamente** en aumentar la temperatura. No producía ningún aumento de la energía mecánica del agua (no giraba cada vez más rápida: las palas pasaban muy ajustadas entre los topes de las paredes, de forma que había gran rozamiento).

#### 4. Calor, energía y cambios

Joule medía así el trabajo mecánico “**disipado**”<sup>8</sup> (en este caso  $P \cdot \Delta h$ , siendo "P" el peso de las pesas e " $\Delta h$ " su desplazamiento en la caída) y el calor que se producía, debido a dicho trabajo. Hizo lo mismo en otros procesos en los que se realizaba trabajo mecánico cuyo único efecto era calentar un cuerpo. Y en todos ellos encontró que:

**La relación entre el trabajo mecánico disipado y el calor producido es siempre constante.** El promedio de los resultados experimentales es:

$$\frac{W \text{ (en joules)}}{Q \text{ (en calorías)}} = 4'184$$

Eso significa que cuando el trabajo se emplea únicamente en calentar, 4'184 J de trabajo producen el mismo efecto térmico que 1 cal.

**A.26.** Si el trabajo de 1 J se emplea únicamente en calentar, ¿a cuántas calorías equivaldría?  
Rdo. 0'24 cal

**A.27.** Se calientan 2 litros de agua en el calorímetro de palas de Joule dejando caer diez veces dos pesas de 1 kg que descienden 15 m de altura (a velocidad constante). Hallar el aumento de temperatura que se producirá en el agua. Rdo. 0'35 °C

Según las investigaciones llevadas a cabo por Joule, es equivalente calentar un cuerpo mediante trabajo mecánico que poniéndolo en contacto con otro cuerpo a una temperatura más elevada. Si un cuerpo pasa de un estado en que su temperatura es  $t_1$  a otro en que su temperatura es  $t_2$ , el cambio puede haberse realizado mediante trabajo mecánico, por calor o por una combinación cualquiera de ambos.

**A.28.** ¿Por qué no encontró, entonces, que la cantidad de trabajo disipado era igual a la cantidad de calor producido?

Simplemente porque, como hemos dicho, la calorimetría y la mecánica se habían desarrollado como ciencias independientes, y las unidades de calor y trabajo se habían definido sin conexión alguna. Actualmente, la unidad que se utiliza **para ambos** es el **joule**, aunque por tradición se conserva la caloría y la kilocaloría. Debemos pensar, por ejemplo, que el aumento de temperatura en 1 °C de 1 kg de agua que utilizamos para definir la kilocaloría, se puede conseguir mediante trabajo o calor. Los resultados de Joule, indican, pues, que **el calor específico del agua es 1 kcal/kg °C o 4'184 kJ/kg °C**. En todas las expresiones que hemos desarrollado hasta aquí obtendremos la cantidad de calor en kilojoules si ponemos el calor específico en kJ/kg °C. Siempre que encontremos un valor expresado en kcal (o cal) pasaremos a kJ (o J) multiplicando por 4'184.

El hecho de que el calentamiento producido por trabajo fuera indistinguible del producido por calor explicaba el calentamiento indefinido de los cañones de Rumford (que no podía ser explicado por la teoría del calórico), y reforzaba la hipótesis de la naturaleza mecánica (debido al movimiento de las partículas y a las fuerzas que se ejercen entre ellas) de los fenómenos térmicos y del calor.

Joule y sus contemporáneos fueron más allá, utilizaron los avances que, en aquella época se estaban produciendo en la teoría cinético/corpuscular de la materia, para clarificar cualitativamente la

---

<sup>8</sup> Es decir, el trabajo que no produce variación de energía mecánica, que se “gasta” en calentar.

naturaleza mecánica de los fenómenos térmicos, y ampliaron el concepto de energía para relacionarlos cuantitativamente.

#### 4.2. Interpretación mecánica del calor

**A.29.** *Según la teoría cinético corpuscular, las partículas que forman los cuerpos están moviéndose y la temperatura está relacionada con la energía cinética media<sup>9</sup> de las partículas. Mayor temperatura implica mayor energía cinética media de las partículas. Explicad, según esto:*

a) *La tendencia al equilibrio térmico*

b) *La dilatación que se produce, en general, cuando se calienta un objeto*

La energía cinética media de las partículas de un cuerpo a mayor temperatura es mayor que la de las partículas del otro cuerpo. Cuando se ponen en contacto térmico, miles de millones de millones de partículas de uno chocan con otras tantas del otro. Como resultado de estos choques, la energía cinética media de las partículas del cuerpo más caliente va disminuyendo y la del frío va aumentando, hasta que se iguala en ambos cuerpos. La temperatura de ambos es la misma: se ha alcanzado el equilibrio térmico.

La dilatación que se produce cuando se calienta un cuerpo puede explicarse porque al aumentar la energía cinética media de sus partículas (su temperatura) la distancia media de separación entre ellas también aumenta. Cuando se enfría ocurre al revés.

**A.30.** *Si las partículas se ejercen fuerzas de naturaleza eléctrica (y magnética) cuya intensidad depende de la separación entre ellas, explicad por qué:*

a) *Una misma sustancia pasa de fase sólida a líquida y de líquida a gaseosa, cuando se calienta*

b) *La temperatura permanece constante durante los cambios de fase (para una sustancia pura)*

Cuando se calienta un trozo de hierro que se encuentra inicialmente a 25 °C, por ejemplo, sus partículas van aumentando su energía cinética, pero las fuerzas entre ellas son aún suficientemente intensas para mantenerlas vibrando en torno a posiciones fijas: el hierro aumenta su temperatura pero permanece en fase sólida (tiene una estructura interna “rígida”). Al alcanzar los 1530 °C, si se sigue calentando (es decir, si sigue en contacto con otro cuerpo a una temperatura mayor) los choques no aumentan la energía cinética sino la energía potencial (debida a las fuerzas eléctricas entre las partículas), rompiendo los “enlaces” entre las partículas que causaban una estructura rígida. Mientras quedan enlaces por romper, la energía cinética no aumenta. Una vez todo el hierro ha pasado a fase líquida, la energía cinética comienza a aumentar de nuevo. Así hasta llegar a la temperatura de ebullición, 3050 °C, donde ocurre lo mismo.

**A.31.** *¿Entonces, qué es el calor?*

Como vemos, no hace falta ninguna sustancia para explicar los fenómenos térmicos. La interpretación mecánica a partir de la teoría cinético/corpuscular deja claro que:

**Calor es el nombre de un proceso en el que se transfiere energía de un cuerpo a otro debido a que sus temperaturas son diferentes.**

Igual que trabajo es el nombre que le damos a una forma de variar la energía de un sistema, y hablamos de **realizar** trabajo, deberíamos hablar de **realizar** calor.

<sup>9</sup> Los miles de millones de millones de partículas que forman un cuerpo no se mueven todas con igual rapidez, la temperatura está relacionada con la energía cinética **media**

#### 4. Calor, energía y cambios

**A.32.** Decir si se realiza calor o no en los siguientes procesos: a) Calentamiento de una bomba de hinchar balones cuando la estamos utilizando para hinchar; b) Enfriamiento de dicha bomba después de acabar de hinchar; c) Calentamiento de las ruedas de un vehículo cuando se frena; d) Enfriamiento posterior de las ruedas; e) Congelación del agua de los charcos en un día frío.

Rdo. a) No; b) Sí; c) No; d) Sí; e) Sí

#### 4.3. La invención de la energía interna. Principio de conservación de la energía

La interpretación mecánica de los fenómenos térmicos, facilitó una hipótesis de tipo cuantitativo para explicar el aumento de temperatura mediante trabajo (como en el calorímetro de Joule).

**A.33.** Si el aumento de temperatura de los cuerpos es debido a un aumento de la energía cinética de sus partículas ¿de dónde proviene dicho aumento?, ¿tendrá algún límite?

Cuando se calienta un cuerpo realizando trabajo, como ocurre en el calorímetro de Joule, la energía mecánica del sistema que realiza trabajo disminuye. Así, la energía mecánica del sistema Tierra/pesas disminuye pues lo hace su energía potencial y no aumenta su energía cinética.

La hipótesis de Joule y de otros científicos como Mayer, W. Thomson, Hemplholtz y Clausius fue que el aumento de la energía cinética y potencial de las partículas provenía de la disminución de la energía mecánica.

Eso significa que si escogemos un sistema aislado formado por el calorímetro de Joule, las pesas y la Tierra, y llamamos  $E_{ci}$  y  $E_{pi}$  a la energía cinética y potencial de las moléculas (“interna”):

$$\Delta E_m + \Delta E_{ci} + \Delta E_{pi} = 0$$

Si llamamos **energía interna** (de origen térmico) a la **suma de la energía cinética de todas las partículas de un cuerpo y de la energía potencial debido a fuerzas intermoleculares**<sup>10</sup>, y la representamos por  $U_{term}$ , la hipótesis de Joule afirma que:

**En un sistema aislado en el que sólo ocurren cambios mecánicos y térmicos, la disminución de energía mecánica (macroscópica) produce un aumento de igual valor en la energía interna (microscópica de origen térmico) :**

$$\Delta E_m + \Delta U_{term} = 0 \quad (1)$$

Eso quiere decir que, en esos sistemas, **aunque la energía mecánica no se conserve la suma de la energía mecánica y de la energía interna, que llamaremos energía total, sí se conserva.**

**A.34.** ¿Qué ocurre con la energía de un sistema cuando se le realiza trabajo y/o se le calienta, es decir, si no es un sistema aislado?

El trabajo mecánico puede variar tanto la energía mecánica como la energía interna de un sistema. Mediante calor también es posible variar la energía interna y la energía mecánica (como ocu-

<sup>10</sup> Son fuerzas atractivas de tipo eléctrico responsables de la unión de unas moléculas con otras como ocurre, por ejemplo, en el agua cuando se encuentra en fase sólida (hielo) o líquida. No son las fuerzas que mantienen unidos los átomos dentro de una molécula.

re, por ejemplo, en una olla a presión o en las máquinas térmicas). Por tanto, la relación que existirá debe ser :

$$W_{ext} + Q = \Delta E_m + \Delta U_{term} \quad (2)$$

Esta expresión se reduce a la relación anterior (1) cuando el sistema se encuentra aislado.

Las relaciones anteriores constituyen: **Principio de Conservación de la Energía**, y se basan en resultados empíricos; no se deducen matemáticamente. Dicho principio, relaciona cambios mecánicos con cambios térmicos. Fue el primer principio de una ciencia nueva (en el siglo XIX) que unificó el calor y la mecánica en un cuerpo de conocimientos llamado **Termodinámica**.

Dicho principio amplía el concepto de energía (hasta entonces limitado a la energía mecánica) y se puede enunciar como:

**Tanto la energía mecánica como la energía interna de un sistema dado, pueden aumentar o disminuir, pero que si el sistema está aislado, los aumentos de una serán compensados por las disminuciones de la otra, de manera que la energía total (la suma de la energía mecánica e interna) debe permanecer constante.**

Cuando el sistema interacciona con el exterior, la expresión (2) relaciona “algo” que se le hace al sistema por el exterior ( $W_{ext} + Q$ ) con la variación de “algo” que tiene el sistema (la energía mecánica más la interna) que sólo depende de propiedades del sistema.

Puesto que sabemos expresar los cambios de energía mecánica en función de las propiedades mecánicas (velocidad, altura, masa, estiramiento, ..), si encontramos cómo expresar los cambios de la  $U_{term}$  en función de las propiedades térmicas (temperatura, calor específico, ..) podremos usar el principio de conservación de la energía y relacionar las propiedades mecánicas con las térmicas.

**A.35.** *¿Cómo podemos hallar una expresión de la energía interna en función de las propiedades de un cuerpo?*

De la misma manera que hicimos en el tema anterior para hallar la expresión de la energía cinética, potencial gravitatoria o elástica: imaginando un proceso en el que sólo varíe la energía interna del cuerpo y expresando dicha variación en función de sus propiedades. Pero eso ya lo hemos hecho empíricamente cuando, al estudiar los fenómenos térmicos en la primera parte de este tema, hemos calentado o enfriado un cuerpo sin dejar que variara su energía mecánica ni que realizara trabajo. En ese caso, según el principio de conservación de la energía:  $Q = \Delta U_{term}$ . Y puesto que la temperatura, el calor específico a volumen constante, la masa y los calores latentes de cambio de fase son propiedades del cuerpo, ya tenemos la expresión que buscamos:

$$\Delta U_{term} = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (\text{para sólidos y líquidos, y para gases a volumen constante})$$

$$\Delta U_{term} = \Delta U_{fus} = m \cdot L_{fus}; \quad \Delta U_{term} = \Delta U_{eb} = m \cdot L_{eb}; \quad \Delta U_{term} = \Delta U_{vap} = m \cdot L_{vap} \quad (\text{en los cambios de fase})$$

**A.36.** *Calculad el aumento de energía interna de un trozo de hielo, de 2 kg, cuando pasa de  $-18^\circ\text{C}$  a agua líquida a  $20^\circ\text{C}$ . Ídem la disminución en el proceso inverso. Usad los valores del calor específico y de los calores latentes en  $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ . Rdo.  $912'1 \text{ kJ}$ ;  $-912'1 \text{ kJ}$*

#### 4. Calor, energía y cambios

**A.37.** Comparad el aumento de energía de un vehículo de 1000 kg cuando pasa de 0 a 90 Km/h, con el de 1 kg de agua cuando aumenta su temperatura en 90 °C.

Rdo. vehículo: 312.500 J; agua: 376.200 J

**A.38.** Utilizad el principio de conservación de la energía para hallar la temperatura que deben tener 20 litros de agua caliente para que al mezclarla con 35 litros de agua a 18 °C se consiga una temperatura de equilibrio de 37 °C.

El sistema formado por el agua caliente y el agua fría es un sistema aislado, por tanto:  $\Delta U_{term\ c} + \Delta U_{term\ fr} = 0$ , luego la temperatura del agua caliente,  $t_c$ , no puede ser cualquiera, sino que debe cumplir que  $c \cdot m_c \cdot (t_{eq} - t_c) + c \cdot m_{fr} \cdot (t_{eq} - t_{fr}) = 0$ ; de donde  $t_c = 70,25\text{ °C}$

**A.39.** A una mezcla de gases contenida en un cilindro con un pistón, se le realiza un trabajo (comprimiéndola) de 85 kJ y se enfría realizando un calor de 70 kJ. Calculad la variación de su energía interna térmica. Rdo. 15 kJ

#### 5. ¿QUÉ OCURRE CUÁNDO EN UN SISTEMA HAY CAMBIOS DE OTRO TIPO? PRINCIPIO GENERAL DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Ya hemos hablado de la conexión entre fenómenos de distinto tipo. Sabemos que la corriente eléctrica puede calentar agua (sin realizar calor ni trabajo mecánico) y elevar un paquete mediante un motor, que algunas reacciones químicas (por ejemplo, la combustión de gasolina) pueden utilizarse para realizar calor y para realizar trabajo, etc. Eso significa que en un sistema aislado en el que hay reacciones químicas o corriente eléctrica, o reacciones nucleares..., la suma de la energía interna térmica y la energía mecánica puede aumentar o disminuir.

Del mismo modo que hemos hecho con la energía interna térmica, podemos suponer que dicha variación es debida a la existencia de un nuevo tipo de energía asociada a los nuevos fenómenos que hay en el interior del sistema, y tratar de encontrar empírica y teóricamente la expresión de dicha energía en función de las nuevas propiedades que cambian. La energía total, que incluiría ahora la energía química, eléctrica, nuclear, ..., permanece así constante. Hasta ahora, esto siempre ha sido posible, por lo que podemos enunciar el **Principio General de Conservación de la Energía** como:

**Un sistema aislado en el que ocurren cambios mecánicos, térmicos, químicos, eléctricos, ..., puede cambiar de estado pero lo hará de manera que el valor de su energía total permanecerá constante:**

$$\Delta E_{TOTAL} = \Delta E_m + \Delta U_{term} + \Delta U_{quim} + \Delta E_{eléctrica} + \Delta E_{nuclear} + \dots = 0$$

Se trata de uno de los Principios Fundamentales de la Ciencia más fructíferos para la comprensión de la Naturaleza. Hasta ahora, nunca se ha observado un proceso que no cumpla dicho principio de conservación (cuando así parecía, se ha podido encontrar la “energía que faltaba”), desde la escala subatómica a la del Universo.

Esta ampliación de la conservación de la energía a los cambios de propiedades de cualquier tipo, también requiere una ampliación de los procesos mediante los que un sistema puede cambiar su energía total, cuando no está aislado. Así, además de mediante la realización de trabajo mecánico y/o calor, la energía total de un sistema también puede variar mediante la realización de trabajo

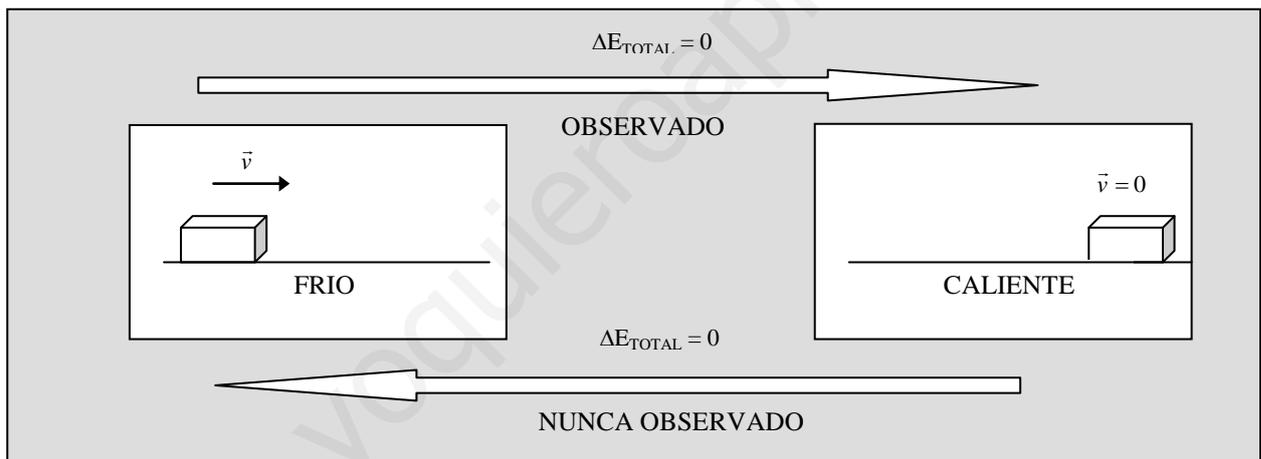
eléctrico o la emisión u absorción de radiación (cuando absorbe radiación solar, cuando emite ondas de radio o TV, ..).

## 6. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA Y “CRISIS ENERGÉTICA”

**Si, como acabamos de ver, la energía total de un sistema aislado siempre permanece constante, y siempre es posible elegir un sistema aislado (en el que se encuentren todos los objetos que interaccionan) ¿por qué se habla de “crisis de energía”?**

Efectivamente, si elegimos un sistema aislado, que contenga todos los cuerpos que experimentan cambios de cualquier tipo, podrá encontrarse en distintos estados, y, en todos ellos, la energía total será la misma.

Pensemos en el lanzamiento de un objeto sobre una superficie horizontal con rozamiento, dentro de una habitación cerrada con paredes aislantes del calor. Si escogemos el objeto (una vez lanzado), el suelo y el aire, tendremos un sistema aislado. La velocidad y la temperatura variarán. La energía cinética irá disminuyendo y la energía interna térmica aumentando. En todos los estados, desde el principio hasta que el cuerpo se para, la energía total será la misma. Sin embargo, por experiencia, sabemos que el cuerpo, una vez parado, no abandonará el reposo y se moverá con la velocidad que tenía inicialmente.



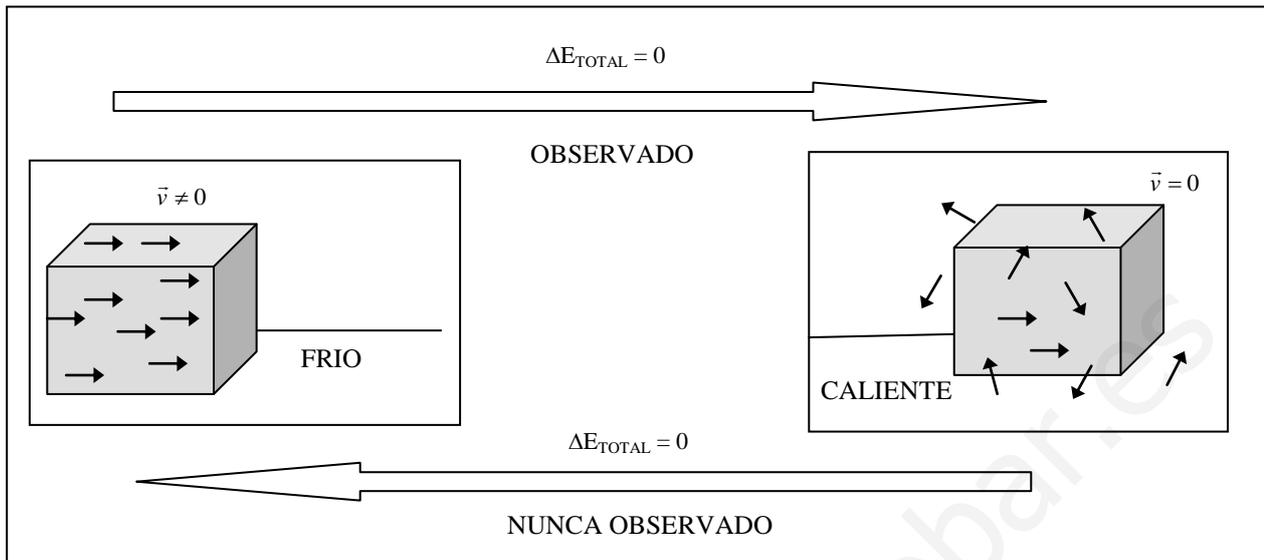
De la misma manera, si pensamos en el calorímetro de Joule y elegimos el sistema aislado formado por las pesas/ Tierra/calorímetro, siempre se ha observado que cuando las pesas descienden el agua se calienta. Nunca se ha observado que el agua se enfríe y las pesas se eleven.

**Aunque el sistema tiene la energía necesaria para ello (podría disminuir la energía interna y aumentar la energía cinética o potencial), nadie ha visto nunca que suceda esto.** El principio de conservación general de la energía no nos dice qué secuencia de estados puede ocurrir y cuál no. Sólo prohíbe el cambio del sistema aislado a un estado de mayor o menor energía total.

Para explicar estos hechos **no basta**, pues, con el concepto de energía y el principio general de su conservación. Es necesario tener en cuenta que cuando aumenta la  $U_{\text{term}}$  de un sistema aumenta la energía cinética de sus partículas de manera caótica: las vibraciones y choques producidos en el proceso de rozamiento (o cuando se realiza calor) producen un “reparto” al azar de la energía entre partículas que se mueven con velocidades distintas y en todas direcciones. Aunque la ener-

#### 4. Calor, energía y cambios

gía sea la misma, el movimiento coherente, ordenado, de las partículas del bloque se ha transformado en movimiento incoherente, desordenado, de las partículas del bloque, suelo y aire.



Para que el objeto en reposo volviera a recuperar la energía cinética inicial, los choques entre las moléculas del objeto, aire y suelo, deberían producir, **por azar**, una situación en la que las moléculas del objeto se movieran coherentemente (como al principio). ¡No es extraño que nunca se haya observado esto! Eso no quiere decir que el cuerpo no pueda recuperar su energía cinética (¡podemos empujarlo!), pero para ello es necesario la intervención de un sistema exterior (por ejemplo, una persona).

**Cuando en un sistema aislado ocurren cambios de modo que disminuye la energía mecánica y aumenta la energía interna térmica, ya no puede volver, espontáneamente, a la situación de partida. Toda la disminución de energía mecánica se puede “convertir” en aumento de energía interna térmica, pero el proceso inverso no ocurre nunca. Lo mismo sucede cuando se quema gasolina** (reacciona con oxígeno) para que un coche recorra unos kilómetros. Si escogemos el sistema aislado formado por el aire, el vehículo y el suelo, la energía total al final será la misma que al principio, pero nunca dicho sistema podrá volver a su estado inicial, de manera que se recupere la gasolina y el oxígeno de partida.

Estas ideas, que muestran la necesidad de inventar nuevos conceptos para explicar por qué ocurren los cambios, pueden concretarse de un modo cualitativo de la forma siguiente:

En un sistema **aislado**, la secuencia o cadena de cambios **que ocurren**, siempre tiene un sentido: aquél en que la energía del estado final<sup>11</sup> se encuentra más “dispersa” y “desordenada”.

Coloquialmente, se suele decir que la energía se “degrada”, que es “menos aprovechable”. Teniendo en cuenta los ejemplos que hemos analizado, podemos decir, también:

<sup>11</sup> Eso no significa que en *una parte* del sistema aislado no pueda *disminuir* la “dispersión” y el “desorden”, siempre que sea compensado por el aumento en otras partes del sistema. Algunos procesos que no son espontáneos pueden ocurrir, pero siempre “impulsados” por otros procesos espontáneos.

Cuando un sistema **aislado** evoluciona espontáneamente, aunque la energía total sea la misma que al principio, **su capacidad para realizar trabajo** (para elevar un cuerpo, por ejemplo) sobre otro sistema **disminuye** (en igualdad de condiciones que al principio).

Puesto que en cualquier sistema en el que se produzca una secuencia de cambios va a existir rozamiento y/o realización de calor, si deseamos que el funcionamiento del sistema continúe exactamente igual (realizando sin interrupción los cambios que nos interesen) será necesario “impulsar” dicho funcionamiento. Para ello se gastan grandes cantidades de materias primas como petróleo, carbón, gas y uranio, conocidas como<sup>12</sup> “fuentes de energía”. Al hablar de “crisis energética” nos estamos refiriendo, precisamente, al agotamiento de dichas materias primas (**que no son infinitas**) ocasionado por una población mundial en constante aumento y un desarrollo a todas luces insostenible basado en el hiperconsumo así como en el beneficio económico a corto plazo y a cualquier precio.

### 6.1 Cadenas energéticas y rendimiento

Cuando en nuestros hogares conectamos una batidora eléctrica o un radiador, o cuando utilizamos un vehículo para desplazarnos, **el cambio que deseamos conseguir** (hacer girar unas cuchillas; elevar la temperatura de una habitación, hacer que unas ruedas giren) **es fruto de una cadena de cambios cuyo origen puede ser una “fuente energética” que se encuentre a cientos de kilómetros** de distancia (como una central eléctrica) o que el propio vehículo lleve incorporada (como la gasolina en el depósito de un coche).

#### A.40. ¿Qué aspectos de una cadena energética sería interesante estudiar?

Es fácil comprender el interés práctico de estudiar estas cadenas de cambios para contestar cuestiones como:

- ✓ ¿Cuánto gasóleo o carbón hay que quemar en la central eléctrica para calentar el agua necesaria para una ducha?
- ✓ ¿Cómo hacer que un coche recorra más kilómetros con un litro de gasolina?
- ✓ ¿Podemos conseguir una cadena de cambios más eficiente que otras?
- ✓ ¿Cómo podemos hacer que la cadena energética cuya finalidad es realizar un cambio que deseamos sea menos contaminante?

Para contestar a estas cuestiones (que son objeto, en la actualidad, de una intensa investigación por ingenieros y científicos) es necesario descomponer la cadena energética (desde la “fuente energética” hasta el cambio final deseado), identificando los distintos sistemas que forman parte de ella y la función que desarrolla cada uno de ellos.

Una manera muy gráfica y útil de analizar cualquier cadena energética es clasificar los distintos sistemas que forman parte de la cadena, según su papel, en:

- ✓ **“Depósitos o almacenes”**, que son sistemas/componentes de la cadena que aumentan o disminuyen su energía (al final es distinta que al principio). Pueden ser **“fuentes”** o **“receptores”**. Los representaremos mediante un rectángulo, indicando el tipo de energía.

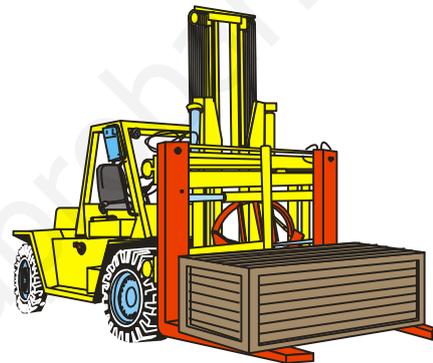
<sup>12</sup> Se trata de un nombre muy intuitivo pero erróneo: no es energía lo que se necesita para producir cambios (“energía siempre hay”). Lo que se necesita son **“cambios que puedan impulsar otros cambios”**. Cuando se quema gasolina con oxígeno, se producen otros cambios. La gasolina y el oxígeno se gastan, la energía, sin embargo, no.

#### 4. Calor, energía y cambios

- ✓ **“Convertidores”**, son aquellos componentes de la cadena que reciben energía de un “depósito” y la transfieren a otros sistemas. Su energía al final del “funcionamiento” de la cadena es la misma que antes. Un motor eléctrico, una bombilla, una célula fotoeléctrica, o una central térmica, son ejemplos de convertidores. Los representaremos por un círculo, indicando el tipo de convertidor. En algunos casos, algunos componentes pueden desarrollar una función de “depósito” y convertidor simultáneamente (por ejemplo, una persona tiene energía química, de los alimentos, y puede transformarla en energía interna térmica y en energía mecánica; una pila eléctrica es un “depósito” y transforma energía química en energía eléctrica).

Es necesario, además, identificar el **tipo de proceso** por el que se transfiere energía de un componente a otro: **calor** si es debido a diferencia de temperaturas, **radiación** si existe emisión o absorción de ondas electromagnéticas (luz, microondas, ..) o **trabajo** si es debido a otras causas (puede ser trabajo mecánico o trabajo eléctrico). Los procesos de transferencia de energía los indicaremos por flechas de color (calor: amarillo; trabajo mecánico: verde; trabajo eléctrico: rojo; radiación: violeta).

*A.41. Imaginad una máquina elevadora que utiliza como combustible gasolina y que se utiliza para elevar cajas pesadas desde el suelo hasta una cierta altura. Identificad los distintos sistemas que participan en la cadena energética como “depósitos” y “convertidores” y construid un diagrama representando todos los componentes de la cadena y los procesos de transferencia.*



Los “depósitos” son :

- ✓ El sistema gasolina + oxígeno<sup>13</sup>, que tiene energía interna química que disminuye (fuente energética)
- ✓ El sistema caja/Tierra, que aumenta su energía potencial gravitatoria (receptor)
- ✓ El aire (el medioambiente), que se calienta, aumentando su energía interna térmica (receptor). Recibe, además, gases calientes (dióxido de carbono, vapor de agua y otros contaminantes)

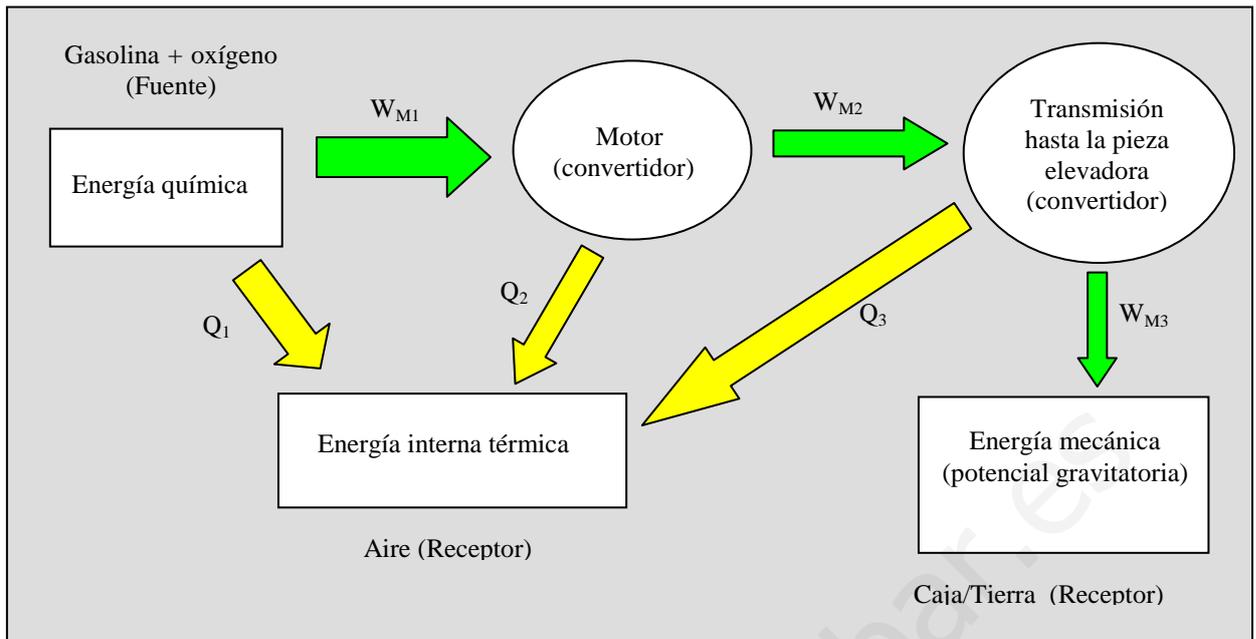
Los convertidores son:

- ✓ El motor, al que los gases de la combustión de la gasolina realizan trabajo mecánico (motores de “combustión interna”), empujando un émbolo cuyo movimiento de vaivén se transforma (mediante un conjunto de piezas) en un movimiento de rotación a la salida del motor. Inevitablemente, además, el motor se calienta y realiza calor sobre el aire.
- ✓ Las piezas y engranajes (la “transmisión”) que transmiten el movimiento a la pieza elevadora del paquete (o a las ruedas). La pieza elevadora realiza un trabajo sobre el sistema caja/Tierra, aumentando su energía potencial. La transmisión también eleva la temperatura de piezas y engranajes que calientan el aire al enfriarse.

La representación de la cadena energética sería:

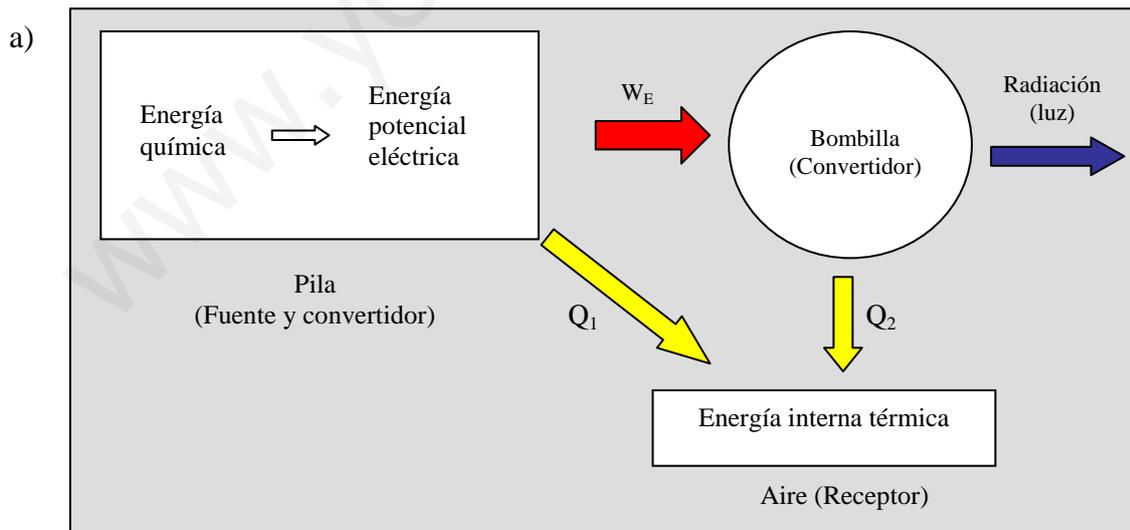
---

<sup>13</sup> Ambos son necesarios: si en la atmósfera hubiera vapor de gasolina y no oxígeno, llenaríamos el depósito de combustible de los vehículos con oxígeno.



El balance energético global es que ha disminuido la energía interna química de la fuente y ha aumentado la energía potencial del sistema caja/Tierra y la energía interna del aire. Si hemos escogido todos los sistemas/componentes de la cadena, el conjunto es un sistema aislado. Por tanto, la energía total se conserva, pero no toda la energía química que se ha gastado se ha transformado en energía potencial, que es lo que queríamos. **El rendimiento energético global de la cadena es la relación entre la cantidad de energía en la forma deseada que se obtiene al final y la cantidad de energía que ha suministrado la fuente.**

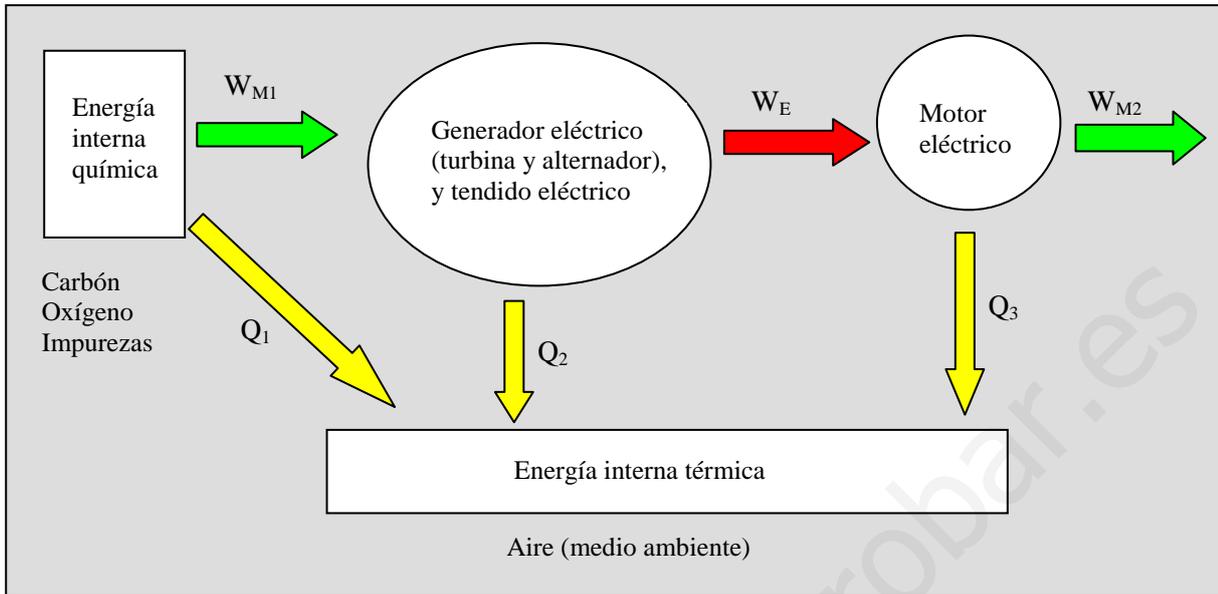
**A.42.** Dibujad la cadena energética que represente: a) El funcionamiento de una linterna. b) El funcionamiento de una batidora (comenzando, en este caso, por la central térmica en donde se genera la electricidad que llega a la batidora).



#### 4. Calor, energía y cambios

En este caso, la pila es depósito y convertidor al mismo tiempo (se produce una reacción química en ella y suministra energía potencial eléctrica).

b)



Una vez analizados los componentes de una cadena energética podemos plantearnos cómo mejorarla. La mejora puede provenir de un aumento del rendimiento y de una disminución de la contaminación, buscando fuentes energéticas más adecuadas.

### 6.2. Rendimiento de un convertidor. Generalización del concepto de potencia

**A.43.** Inventad una magnitud que nos indique el rendimiento de un convertidor, independientemente del tipo que sea.

Puesto que la función de un convertidor es transformar la energía que recibe<sup>14</sup> de una parte del sistema (mediante calor o trabajo de cualquier tipo) a la entrada, en energía útil para otra parte del sistema en la salida, una manera adecuada de expresar lo eficientemente que realiza su función es mediante el cociente entre la cantidad de energía del **tipo deseado** (útil para producir los cambios que queremos) que suministra a la salida y la cantidad de energía que recibe a la entrada:

$$\eta = E_{\text{útil salida}} / E_{\text{entrada}}$$

Como el trabajo o el calor que se le realiza y el que es realizado por el convertidor depende del tiempo que está funcionando, es mejor expresar el rendimiento en función de la potencia desarrollada y potencia consumida (esto es algo que el fabricante sí puede saber, para unas condiciones de funcionamiento determinadas). Así pues:

<sup>14</sup> Ya sabemos que ni el calor, ni la energía son sustancias. No obstante, en numerosas ocasiones hablaremos de "energía que entra o sale de un sistema" o de "calor que se absorbe o se desprende". El lenguaje estricto sobre estos aspectos resulta farragoso y nada práctico. Lo importante es que sepamos el significado físico correcto de lo que está ocurriendo y que lo expresemos así si hace falta.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil salida}}}{P_{\text{entrada}}}; \quad \text{donde } P_{\text{útil salida}} = \frac{E_{\text{útil salida}}}{\Delta t} \quad \text{y} \quad P_{\text{entrada}} = \frac{E_{\text{entrada}}}{\Delta t}$$

En los convertidores eléctricos (motores, calentadores, bombillas, ..) se indica la potencia que recibe del circuito eléctrico (la “potencia que gasta”).

El rendimiento de los convertidores depende del diseño técnico y de su estado de mantenimiento. Buena parte de la investigación tecnológica se dedica a mejorar los convertidores actuales o a inventar nuevos, de manera que aumente su rendimiento o se puedan aprovechar fuentes energéticas nuevas. En la tabla siguiente se indican rendimientos típicos de convertidores actuales:

Tipo de energía que “entra”	Convertidor	Tipo de energía útil que “sale”	Rendimiento
Radiación	Células fototérmicas	Interna térmica (calor)	0'5
	Células fotovoltaicas	Eléctrica	0'15
	Célula vegetal	Química	0'01- 0'1
Química	Estufa doméstica de gas	Interna térmica (calor)	0'9
	Pilas	Eléctrica	0'5 - 0'75
	Acumuladores	Eléctrica	0'7
	Motores a vapor	Mecánica (trabajo)	0'3 – 0'4
	Motores de combustión interna	Mecánica (trabajo)	0'15 – 0'4
Eléctrica	Cuba electrolítica	Química (trabajo eléctrico)	0'4 - 0'6
	Motores	Mecánica (trabajo mecánico)	0'1 - 0'9
	Bombillas incandescentes	Radiación	0'05
	Bombillas fluorescentes	Radiación	0'35
Mecánica	Alternador	Eléctrica	0'98

**A.44.** Una placa solar fotovoltaica tiene una superficie de  $4 \text{ m}^2$  y está colocada en un lugar donde le llega la radiación solar a razón de  $0'5 \text{ kW/m}^2$  por término medio. Hallad la potencia eléctrica media que puede suministrar a la salida, y la energía eléctrica que puede suministrar en 12 horas. Rdo.  $0'3 \text{ kW}$ ;  $12960 \text{ kJ}$

**A.45.** Las bombillas llevan una inscripción que expresa la potencia que le realiza (que “entra” a la bombilla, que “consume”) la red eléctrica normal cuando están funcionando. Teniendo en cuenta la tabla anterior, qué potencia debe consumir una bombilla fluorescente para producir la misma radiación que una incandescente de  $100 \text{ W}$ . Rdo.  $14'3 \text{ W}$

### 6.3. Fuentes de energía

Se consideran “fuentes energéticas” aquéllos sistemas que pueden utilizarse para producir cambios que necesitamos. Podemos clasificarlas en fuentes no renovables y renovables.

#### 6.3.1. Fuentes no renovables

Se trata de fuentes cuya cantidad disminuye según las vamos utilizando para impulsar otros cambios. Las más utilizadas son el carbón, el petróleo (del que se extrae la gasolina y gases licuados como el butano) y el gas natural (y el oxígeno necesario para que se quemen). Se trata de **combustibles “fósiles”** llamados así porque proceden de la transformación de restos de organismos que vivieron hace millones de años y quedaron enterrados.

#### 4. Calor, energía y cambios

Son las más utilizadas, especialmente para el transporte de personas y mercancías y en las centrales eléctricas (centrales “térmicas”, que producen energía eléctrica a partir de la energía química del combustible fósil + oxígeno).

**Existen dos grandes problemas con este tipo de fuentes.** En primer lugar, producen una gran contaminación pues al quemarse generan CO<sub>2</sub> y vapor de agua, junto con otros gases y partículas tóxicas. El CO<sub>2</sub> es el principal causante del calentamiento global de nuestro planeta (aumento del efecto invernadero). El resto causan otros efectos como la lluvia ácida y la polución atmosférica.

El otro gran problema de los combustibles fósiles, es que se están agotando. El creciente “consumo energético”, el aumento incontrolado de la población del planeta y el modelo de desarrollo económico mundial, hacen prever un cercano agotamiento del petróleo. Con el ritmo de consumo actual, por ejemplo, las reservas de petróleo se estiman entre unos 35 años (previsiones más pesimistas) a 50 años (previsiones más optimistas).

Teniendo en cuenta la gran cantidad de sustancias necesarias que se obtienen del petróleo y el estado actual de nuestro planeta, no tiene mucha justificación seguir quemando petróleo en las enormes cantidades en que lo hacemos.

El otro tipo de fuente energética no renovable son las nucleares (uranio principalmente). Aunque su utilización produce muy poco CO<sub>2</sub>, los problemas que generan este tipo de fuente, radican en los posibles accidentes, almacenamiento de residuos radiactivos de media y larga duración, tecnología muy cara, elevados costes de seguridad, posibilidad de fabricar armas atómicas, etc. La energía de la fusión nuclear (en vez de la fisión) eliminaría buena parte de los problemas, pero, por ahora, no está disponible su utilización a gran escala.

#### 6.3.2. Fuentes renovables

Se trata de sistemas capaces de impulsar cambios, cuya cantidad no se ve afectada por su utilización (“por mucho que se gaste hoy, mañana estará disponible en la misma cantidad”). La radiación solar, los vientos, las mareas, el agua de los embalses en las centrales hidroeléctricas, la biomasa (madera y plantas que se utilizan para producir combustibles menos contaminantes, es renovable si se da tiempo para la repoblación forestal). El origen de todas las fuentes renovables (y no renovables) es el Sol.

La investigación actual intenta producir convertidores cada vez más eficientes que funcionen a partir de este tipo de fuentes (ved tabla anterior). Las placas solares y parques eólicos son cada vez más abundantes, pero la demanda creciente de fuentes energéticas hace que su proporción en relación a las fuentes no renovables no aumente como sería necesario.

*A.47. ¿Qué pasaría si...? Todos los edificios tuviesen en sus tejados placas solares, se volviese al uso de envases de vidrio retornables, se cambiasen todas las bombillas y aparatos eléctricos existentes por otros de bajo consumo, se impulsara realmente el uso del tren y de las bicicletas...(id completando la lista de posibles acciones y valorad los efectos de las mismas).*

La tecnología para la utilización rentable de las fuentes renovables es cara, y los países desarrollados no la hacen asequible a los países pobres y en vías de desarrollo, que es precisamente donde se produce el mayor aumento de la población mundial. Los intereses a corto plazo parecen, desgraciadamente, prioritarios a la conservación y mejora del medio ambiente. Hemos de luchar por cambiar esta tendencia.

**A.48.** *Tan importante o más que los conocimientos que habéis adquirido de Física es la toma de conciencia de los graves problemas del planeta producidos, sobre todo, por el uso y abuso de fuentes energéticas no renovables en un mundo superpoblado. Elaborad un cartel en el que se recojan estos problemas y posibles soluciones.*

### Recapitulación

**A.49.** *Recapitulad lo que se ha tratado en el tema, expresando en vuestras propias palabras cuáles eran los problemas que nos habíamos planteado, qué respuesta podemos dar ahora y qué ideas han sido importantes para llegar a esa respuesta. Haced una lista, también, de ideas espontáneas que han surgido en las discusiones y por qué creemos que son erróneas.*

Algunas de las ideas **erróneas** típicas sobre calor y energía son:

- Confundir calor con temperatura (la invención del termómetro ayudó a diferenciar ambos conceptos).
- Pensar que en una misma habitación hay objetos más fríos (normalmente los metales) que otros (esto se debe a utilizar la sensación fisiológica del tacto en vez de un termómetro)
- Creer que el calor es una sustancia (como en la teoría del calórico)
- Pensar que el calor es una forma de energía que pueden tener los cuerpos
- Creer la temperatura de un cuerpo sólo puede aumentar calentándolo (también se puede hacer mediante trabajo).

Conviene que sepáis justificar por qué esas ideas son erróneas, qué ideas, pruebas y evidencias podemos aportar para demostrar que no son así.

## 4. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE CALOR

1. Una persona confunde calor y temperatura. Utilizando un termómetro y la teoría del calórico, poned ejemplos para que comprenda que no son lo mismo.
2. Sabemos que suministrando una cantidad de calor de 120 cal a un trozo de 24 g de un material, su temperatura aumenta 10 °C. Hallad el calor específico de dicho material. Rdo. 0'5 cal/g°C
3. ¿Con la cantidad de calor que desprende 1 litro de agua al enfriarse desde 100 °C a 20 °C, cuánto se elevaría la temperatura de 10 kg de aluminio? (Utilizad los calores específicos dados en las tablas para responder la pregunta). Rdo. 36'4 °C
4. Hallad: a) Calor que deben absorber 90 litros de agua para elevar su temperatura de 15 °C (temperatura ambiente) a 70 °C. b) Ídem que cederán al aire al enfriarse hasta la temperatura ambiente. c) Si tardan en enfriarse de 70 a 45 °C una hora, hallad la potencia térmica media, es decir, la rapidez con que cede calor al ambiente. Rdo. a) 20691 kJ; b) 20691 kJ; c) 2'6 kW
5. Hallad la cantidad de calor que debe absorber el aire de un aula de (20 x 12 x 3) m, para elevar su temperatura desde 8 °C hasta 22 °C. ¿Por qué es necesario seguir calentando una vez que se alcanzan los 22 °C? (Datos: calor específico del aire a presión constante: 0'22 kcal/ kg °C; densidad media del aire en ese intervalo de temperatura: 1'25 kg/m<sup>3</sup>). Rdo. 2772 kcal
6. ¿Qué significa que la capacidad calorífica de un objeto es 0'08 kcal/°C? ¿Y 5 kcal/°C? ¿Pueden dos objetos de materiales distintos tener la misma capacidad calorífica?

#### 4. Calor, energía y cambios

7. Hallad la capacidad calorífica de los siguientes utensilios: un calorímetro de latón de 100 g, un termómetro de vidrio de 50 g (2 g corresponden al mercurio) y un agitador de vidrio de 75 g. (Utilizad los calores específicos dados en las tablas). Rdo.  $0'034 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$

8. Tras introducir 200 g de agua en un calorímetro perfectamente aislado, medimos una temperatura de equilibrio de  $21'3 \text{ }^\circ\text{C}$ . A continuación, se añaden 20 g de agua a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y se alcanza una temperatura final de  $22'8 \text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Cuál es la capacidad calorífica del calorímetro? Rdo.  $0'029 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$ .

9. ¿Qué cantidad de agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  debemos mezclar con 30 litros de agua a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  para que la mezcla se quede a la temperatura del cuerpo humano ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Rdo.  $75'9 \text{ l}$ .

10. Se introduce un objeto a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  cuya capacidad calorífica es  $0'1 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$  en 200 g de agua a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Una vez alcanzada la temperatura de equilibrio, se saca el objeto y se introduce en 100 g de agua a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Cuál será la temperatura final del objeto? Rdo.  $33'3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

11. Con la cantidad de calor que desprende 1 kg de agua a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  cuando pasa a hielo a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , ¿qué masa de plomo a la temperatura de fusión podría pasar a plomo líquido a la misma temperatura? (Buscad los datos necesarios en el tema). Rdo.  $13'6 \text{ kg}$

12. Un calorímetro de aluminio de 500 g de masa contiene 1210 g de agua, todo ello a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si introducimos 1 kg de mercurio sólido a su temperatura de fusión ( $-39 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se alcanza una temperatura de equilibrio de  $16'5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hallad el calor latente de fusión del mercurio. (Buscad los datos necesarios en el tema). Rdo.  $2'8 \text{ kcal/ kg}$ .

13. Un alumno piensa que el calor es una sustancia que pasa de los cuerpos más calientes a los más fríos. Explicadle por qué sabemos que no es así

14. Se introduce en el congelador de un frigorífico un vaso con 0'2 litros de agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y un termómetro. El agua se congela y cuando el termómetro indica que la temperatura del hielo es  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ , se saca del congelador y se coloca sobre una mesa. Al cabo de cierto tiempo, la temperatura del agua vuelve a ser de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hallad: a) La cantidad de calor que ha debido ceder el agua hasta convertirse en hielo a  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ , indicando a quién se lo ha cedido. b) La cantidad de calor que ha debido absorber el hielo para convertirse en agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , indicando quién se lo ha suministrado. (Dato: calor específico del hielo:  $0'5 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$ ). Rdo. a) Cede  $20'8 \text{ kcal}$  al aire del congelador; b) absorbe  $20'8 \text{ kcal}$  del aire de la habitación y de la mesa.

15. Calculad el aumento de temperatura del agua que se producirá en un calorímetro de Joule cuando una pesa de 10 kg ha descendido 8 m, si su velocidad ha variado desde cero a 1 m/s en dicho trayecto. La cantidad de agua del calorímetro es 0'2 kg. Rdo.  $0'93 \text{ }^\circ\text{C}$ .

16. En una cascada, el agua cae desde una altura de 90 m sobre un lago, donde queda prácticamente en reposo. Se pide:

- Máximo aumento de temperatura que puede experimentar el agua debido a la caída.
- La altura desde la que debería caer para aumentar su temperatura en  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Rdo. a)  $0'21 \text{ }^\circ\text{C}$ ; b)  $426'5 \text{ m}$



**17.** Utilizad las ideas de Joule y la teoría cinético corpuscular de la materia para explicarle a otra persona qué es la energía interna, qué es la temperatura y cómo es posible elevar la temperatura de un cuerpo sin calentarlo. Poned ejemplos en que se produzca una elevación de temperatura mediante trabajo y otros en que se produzca mediante calor.

**18.** Hallad la variación de energía interna de 200 g de agua cuando se enfría desde 20 °C hasta convertirse en hielo a -8 °C. Rdo.  $\Delta U_{\text{term}} = - 87'03 \text{ kJ}$

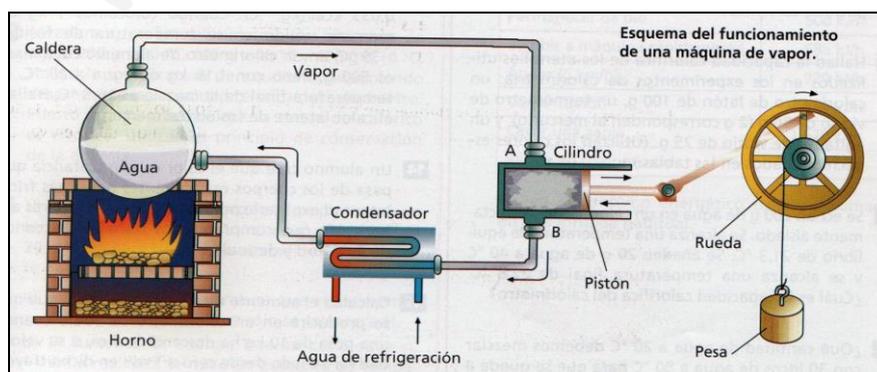
**19.** Mezclamos, en un calorímetro, tres muestras de agua: 200 g a 30 °C, 100 g a 45 °C y 400 g a 10 °C. Hallar la temperatura de equilibrio, suponiendo despreciable la capacidad térmica del calorímetro. Puesto que ya sabemos que la teoría del calórico no es adecuada, utilizad el principio de conservación de la energía. Rdo. 20'7 °C.

**20.** Un bloque de 2 kg de hierro se lanza por un plano inclinado con rozamiento con una velocidad de 20 m/s y se para cuando ha ascendido verticalmente 12 m. Calculad: a) El aumento de temperatura que experimentaría el bloque de hierro si sólo se calentara él. b) El aumento de energía interna del bloque si, en la realidad, se mide un aumento de temperatura igual a la mitad del valor hallado en el apartado anterior. a) 0'18 °C; b) 82'8 J)

**21.** Un motor eléctrico es un convertidor. Uno de ellos se utiliza para realizar trabajo. Consume una potencia eléctrica de 1'5 kW y realiza trabajo con una potencia de 1'2 kW. a) Hallad su rendimiento. b) ¿Con qué potencia está realizando calor al medio ambiente. c) Energía eléctrica que se le ha suministrado y trabajo mecánico que ha realizado durante 3 horas de funcionamiento, en kWh y en joules. d) Si debido a una mala conservación, la potencia útil se reduce a 0'8 kW, ¿cuánto aumenta la potencia con que realiza calor al medio ambiente (potencia térmica)?  
Rdo. a) 0'8 u 80 %; b) 0'3 kW; c) Energía suministrada: 4'5 kWh o 16200 kJ; trabajo mecánico realizado: 3'6 kWh o 12960 kJ; d) pasa a ser 0'7 kW.

## EL IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL DE UN CONVERTIDOR: LAS MÁQUINAS TÉRMICAS

El primer convertidor que, a escala industrial, era capaz de transformar energía interna térmica en energía mecánica, fue la máquina de vapor. Con sus cilindros de hierro y su corazón de fuego, sólo necesitaba carbón, agua y un poco de aceite, para funcionar ininterrumpidamente *allí donde se la colocase*. No es extraño que se difundiese rápidamente, modificando el transporte, la industria y toda la sociedad. Su origen está asociado al problema de la extracción del agua que inundaba muchas minas de carbón en la Inglaterra de finales del XVII. Savery y Newcomen fueron dos ingenieros que diseñaron máquinas que funcionaban con vapor, capaces de bombear fuera el agua de las minas de forma efectiva. Posteriormente ésta primitiva máquina fue objeto de sucesivas mejoras, que dieron lugar a otras más eficientes.



#### 4. Calor, energía y cambios

El vapor producido en la caldera entra a alta presión y temperatura en el cilindro metálico y empuja el pistón hacia la derecha. Cuando el pistón alcanza la posición más alejada, la válvula A se cierra y la B se abre. La inercia de la rueda hace que el pistón se mueva entonces hacia la izquierda y el vapor salga por la válvula B, del cilindro al condensador refrigerado por agua fría (donde la presión y temperatura son menores). Cuando el pistón llega a su posición más extrema, B se cierra y se abre de nuevo A, comenzando el ciclo otra vez y así sucesivamente. El movimiento de vaivén del pistón se transmite a la rueda de la derecha, que girará de forma continua (mientras funcione la caldera). El movimiento giratorio de dicha rueda pudo ser aprovechado, para mover una sierra, una máquina de hilar, una rueda de paletas (barcos de vapor) o incluso una locomotora, resolviendo muchas necesidades de una era industrial incipiente.

En la máquina de vapor una parte de la energía interna química del carbón se convierte en energía interna térmica del vapor de agua (que se encuentra a alta temperatura y presión). A su vez, parte de dicha energía interna térmica, se transformará en energía mecánica del émbolo y demás piezas móviles del sistema. En una máquina de este tipo siempre hay muchas pérdidas, ya que es imposible evitar que los propios elementos de la máquina, así como el exterior, se calienten. Además, para que la máquina pueda funcionar cíclicamente es imprescindible un *foco frío* o condensador a menor temperatura que el *foco caliente* o caldera, por lo que parte de la energía interna térmica del vapor será cedida al refrigerante. Todo ello hace que de cada 100 J de energía, tan sólo unos 20 se aprovechen para producir los cambios deseados. Aún así, la potencia que se podía conseguir, superaba con mucho, la de las ruedas hidráulicas y molinos de viento (a finales del XIX ya había máquinas de vapor capaces de desarrollar potencias del orden de  $2 \cdot 10^6$  W). Ello, junto con la posibilidad de trasladarlas o emplearlas para mover barcos, trenes y automóviles, hizo que su uso se generalizase y que al siglo XIX se le conociese con el sobrenombre de la era del vapor.

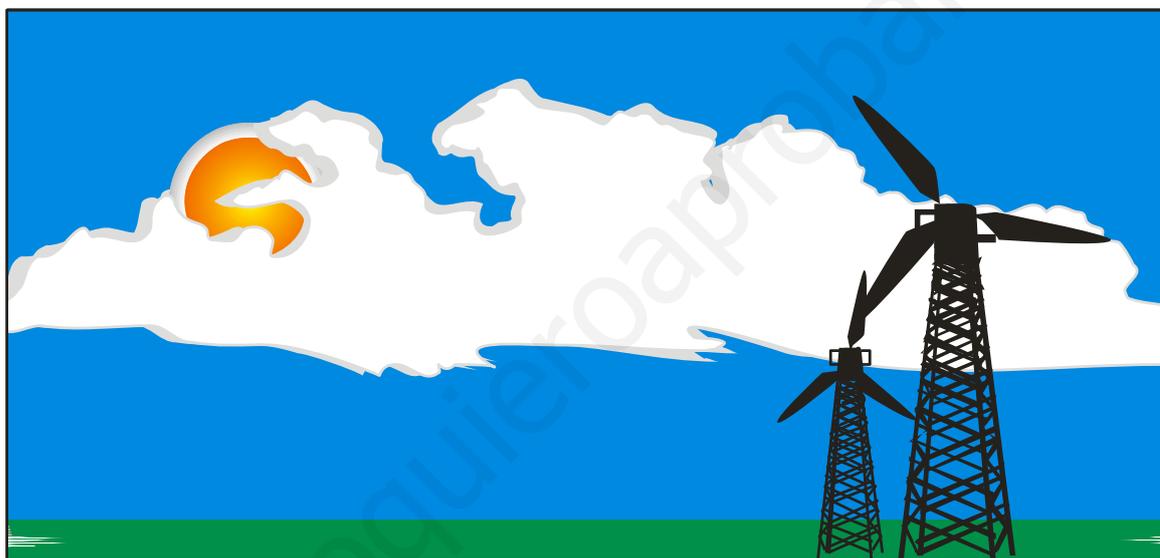
Este proceso no estuvo exento de dificultades ya que muchas personas veían en la máquina de vapor un competidor que hacía peligrar sus puestos de trabajo. No obstante, eso sólo ocurrió al principio ya que el uso creciente de máquinas de vapor pronto permitió la producción en masa de muchos bienes (por ejemplo, prendas de ropa). Por otra parte, su adaptación para mover trenes, barcos y automóviles, supuso un enorme impulso al transporte y a todo lo que gira alrededor del mismo como la industria siderúrgica (tendido de millones de km de vías de ferrocarril), el comercio, los viajes, etc. A título de ejemplo, baste decir que viajes como la travesía del Océano Atlántico que hasta entonces duraban meses, con el uso de los barcos a vapor se pudieron realizar en días.

La máquina de vapor exigía, no obstante, calderas muy grandes y pesadas. Además, el hecho de que el vapor producido en la caldera tuviese que ser utilizado en otro sitio, para mover un émbolo en un sentido y en otro que, a su vez, había de transformarse en un movimiento giratorio de una rueda, hacía que el proceso resultase costoso y que se desperdiciara una gran cantidad de la energía del combustible. Estos inconvenientes impulsaron la búsqueda de otros sistemas que proporcionasen directamente un movimiento giratorio, sin gastar tanto combustible. Este fue el caso de la turbina de vapor (a principios del siglo XX, era ya posible construir turbinas de vapor de más de  $50 \cdot 10^6$  W de potencia) y, más tarde de los motores de combustión interna (motores de explosión que utilizan derivados del petróleo como fuentes de energía). Poder disponer de grandes cantidades de petróleo, hizo que la industria de los vehículos que utilizaban este tipo de motores se convirtiese, a mediados del siglo XX, en una de las más importantes, con todo lo que ello implica respecto a la construcción de carreteras y al desplazamiento de mercancías y viajeros por todo el mundo. El uso de todo tipo de máquinas térmicas para disponer de energía, basadas en combustibles fósiles, ha hecho también que la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera pasara de 280 ppm a 400 ppm en los últimos tres siglos, provocando un aumento del **efecto invernadero** en el planeta, que es necesario frenar y detener antes de que produzca cambios irreversibles desastrosos.

## TEMA 5. LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Este capítulo está destinado a estudiar la corriente eléctrica (movimiento organizado de cargas), en su forma más simple: el desplazamiento de electrones en un solo sentido a lo largo de un hilo conductor (corriente continua en conductores metálicos).

No cabe duda de la importancia que tiene la electricidad en la sociedad actual. Para percatarse de ello basta pensar en la gran cantidad de aparatos y máquinas que la utilizan para funcionar: teléfono, ordenadores, electrodomésticos, vehículos, etc. La electricidad permitió disponer cómodamente de la energía necesaria en el lugar y momento precisos. Algunos aparatos y máquinas eléctricas desde la simple bombilla a la lavadora, el teléfono, el frigorífico, aerogeneradores, etc., tienen un papel esencial en la mejora de las condiciones de vida de muchos seres humanos.



Comenzaremos este tema preguntándonos de qué forma podemos conseguir corriente eléctrica continua. Posteriormente, introduciremos una magnitud adecuada para medir la intensidad de una corriente y realizaremos una pequeña investigación para establecer de qué factores depende dicha intensidad (lo que nos llevará, a su vez, a introducir nuevas magnitudes y a buscar relaciones entre ellas). Finalmente, profundizaremos en nuestro estudio mediante consideraciones de trabajo y energía, analizando algunos efectos de la corriente eléctrica que ponen de manifiesto su capacidad para producir transformaciones.

### 1. EL PROBLEMA DE LA PRODUCCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

El primer problema que vamos a plantearnos es cómo conseguir una circulación de carga eléctrica por un **hilo conductor** (por ejemplo, un cable de cobre), en un sentido determinado. Recordemos que, aunque la materia se presenta habitualmente neutra, existe la posibilidad de electrizar diversos objetos con cargas eléctricas de distinto signo y que una carga neta negativa significa un exceso de electrones mientras que una carga neta positiva indica un defecto de electrones. (Conviene revisar lo que, se estudió en cursos anteriores sobre fenómenos de electrización por frotamiento y su explicación).

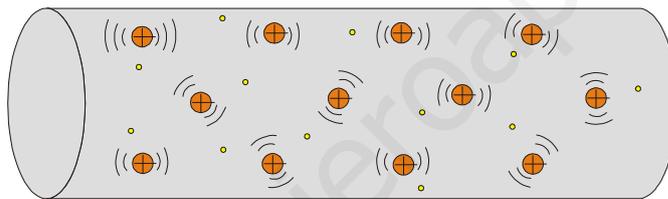
## 5. Corriente eléctrica

### A.1. ¿Cómo utilizar dos cuerpos electrizados para hacer circular electrones por un cable?

Una posibilidad sería utilizar dos esferas metálicas iguales, aisladas y cargadas eléctricamente con carga neta de distinto signo (una positiva y la otra negativa). Si las unimos mediante un hilo conductor, cabe esperar que los electrones de la esfera con carga neta negativa se muevan por el hacia la esfera con carga neta positiva que los atraerá haciendo una fuerza eléctrica sobre ellos.



En un trozo de metal descargado (es decir, sin carga neta), hay millones de electrones que se mueven entre una red de **iones positivos** (o **cationes**). Sabemos, por ejemplo, que en solo 63'5 g de cobre, hay  $6 \cdot 10^{23}$  átomos de cobre y que cada uno de ellos aporta un electrón capaz de moverse entre dichos iones positivos (también llamados **restos atómicos**), de manera que un modelo sencillo y útil es pensar en un trozo de cobre como una especie de red tridimensional en la que los nudos serían los iones positivos de cobre (con 29 protones en el núcleo y 28 electrones a su alrededor), y una "nube" o "mar" de electrones (muchísimo más pequeños) que pueden moverse libremente por la red. En la figura siguiente se representa esquemáticamente un trozo de un cable metálico, en donde se aprecian algunos cationes y parte del mar de electrones que hay entre ellos.



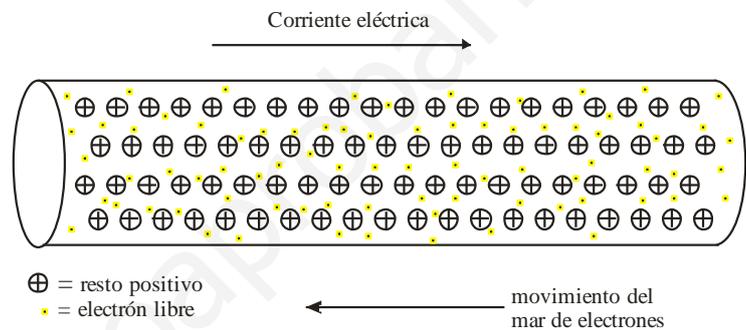
Los electrones libres no sufren fuerza resultante alguna (las fuerzas repulsivas entre electrones se compensan con las atractivas entre electrones e iones) excepto si chocan con algún ion que esté desplazado de su posición de equilibrio. Puesto que los electrones se mueven al azar (en todas direcciones) y los iones vibran, se están produciendo choques continuamente. El tiempo medio entre dos choques consecutivos dependerá de la velocidad de los electrones y de la frecuencia con que vibran los iones. Cuanto mayor es la temperatura, más frecuentes son los choques de los electrones con la red de iones (porque aumenta la amplitud de las vibraciones) y viceversa.

Al conectar con un cable de cobre las dos esferas cargadas, los electrones existentes en la esfera cargada negativamente y los propios del cable, son atraídos por la carga positiva de la otra esfera con el resultado de un movimiento del mar de electrones que se suma a la alta velocidad (pero caótica) de los electrones cuando no se ejerce fuerza eléctrica resultante sobre ellos. Entre choque y choque los electrones sufren una aceleración (cambio de velocidad) en la dirección y sentido de la fuerza eléctrica exterior que actúa sobre ellos, lo que se traducirá en un movimiento neto del mar de electrones según esta dirección y sentido. A medida que aumente la rapidez de dicho movimiento, aumentará también el número de choques por unidad de tiempo que se producen según esta dirección, lo que implica la aparición de una "fuerza de frenado" opuesta a la fuerza exterior. Podemos imaginar la situación de equilibrio (que se produce de modo prácticamente instantáneo), como una situación en la que el "mar de electrones" se desplaza con una velocidad constante muy pequeña (aproximadamente  $10^{-4}$  m/s, frente a los  $10^6$  m/s de los electrones individualmente), llamada **velocidad de arrastre**.

Así pues: el mar de electrones se desplaza como un todo cuando hay una fuerza eléctrica exterior que actúa sobre él y lo hace a la velocidad de arrastre.

En el ejemplo propuesto sí que hay una fuerza eléctrica exterior al mar de electrones (la ejercida por la carga positiva de la esfera de la izquierda) y, por tanto, el movimiento neto de los electrones libres tendrá lugar desde la esfera con carga neta negativa a la otra esfera idéntica pero con carga neta positiva, con lo que la carga negativa de la esfera derecha disminuirá. Fijémonos que **el proceso es del todo equivalente a decir que la esfera derecha gana carga positiva y la de la izquierda la pierde**. De hecho, debido a una confusión histórica, se asignó a la corriente eléctrica el sentido que correspondería a un movimiento de cargas positivas. Hoy sabemos que las cargas positivas de los átomos se hallan en el interior del núcleo y no pueden desplazarse libremente por el hilo conductor pero, dado que el movimiento de electrones en un sentido es equivalente a un movimiento de carga positiva en sentido contrario, en lugar de rectificar se prefirió mantener el sentido atribuido originariamente a la corriente eléctrica, de modo que:

A partir de ahora, cuando nos refiramos al sentido de la corriente eléctrica lo haremos pensando en el desplazamiento de unas **hipotéticas** cargas positivas (no confundir con los iones positivos de la red metálica), siempre en sentido contrario al movimiento real de los electrones).



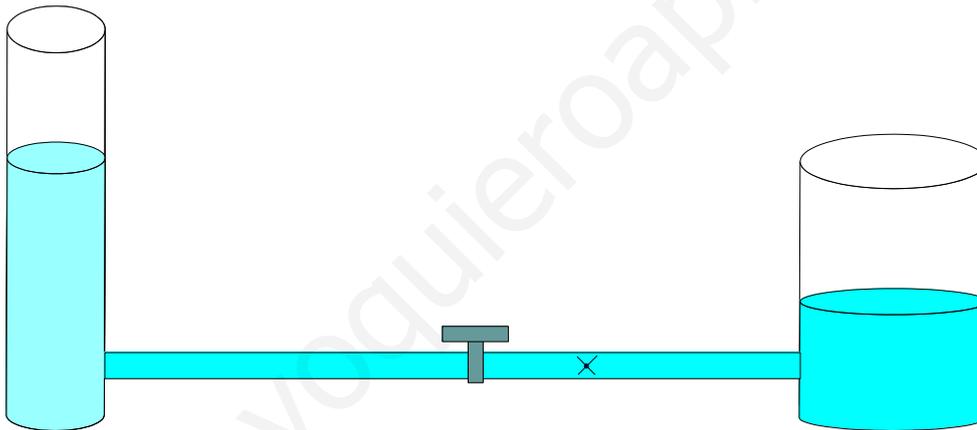
**A.2.** La corriente eléctrica también se puede producir en situaciones más complejas que la expuesta anteriormente, tal y como se muestra en el cuadro siguiente. En **todas** las situaciones propuestas el **valor absoluto** de la carga  $Q_1$  es **mayor** que el **valor absoluto** de la carga  $Q_2$ . Analizad cada caso y predecid hacia dónde iría el sentido de la corriente.

	Situación propuesta	Movimiento de electrones	Sentido corriente
a)	$Q_1^+$  $Q_2^+$ 		
b)	$Q_1^+$  $Q = 0$ 		
c)	$Q_1^-$  $Q_2^-$ 		
d)	$Q_1^+$  $Q_1^+$ 		

## 5. Corriente eléctrica

Una interpretación mínimamente adecuada de las situaciones anteriores exige profundizar un poco en cómo se distribuye la carga eléctrica en un conductor. En primer lugar hemos de tener en cuenta que una carga neta positiva no significa ausencia de electrones, sino que hay menos que protones. Ello explica que en la situación **a)** pasen electrones de la esfera de la derecha a la de la izquierda con lo que, según el acuerdo adoptado, la corriente eléctrica irá en sentido contrario ya que la esfera de la izquierda perderá carga positiva y la otra la ganará. Todo ocurre como si la carga positiva pasara desde donde hay más (esfera izquierda) a donde hay menos (derecha). En adelante pues, insistimos, hablaremos siempre del movimiento de carga positiva. Así, en el caso **b)** podemos afirmar que la corriente irá desde la esfera de nuestra izquierda a la situada a nuestra derecha, ya que en esta última no hay carga **neta** positiva. En el caso **c)** podría parecer que al no haber carga neta positiva en ninguna de las dos esferas no podría existir un movimiento de carga positiva, pero si reflexionamos un poco nos daremos cuenta de que ambas esferas son idénticas pero la de la izquierda tiene más carga neta negativa que la de otra, por lo que habrá un movimiento real de electrones de izquierda a derecha lo cual, como ya se ha explicado, equivale totalmente a un transvase igual de carga positiva en sentido contrario (de derecha a izquierda).

Interpretar lo que ocurre en el caso **d)** es más complejo, ya que en la situación descrita ambas esferas están cargadas positivamente con la misma carga neta. La única diferencia es el tamaño de la esfera. *¿Cómo es posible que en este caso se produzca también corriente?* Podemos comprender lo que sucede si consideramos un problema parecido pero con una corriente de agua:



En la situación descrita en la figura, la cantidad de agua sería equivalente a la carga neta positiva y la corriente de agua que se establece a la corriente eléctrica. Los litros de agua en ambos recipientes son los mismos, pero el **nivel** es mayor en el recipiente de la izquierda que en el de la derecha por lo que, en el momento en que se abra la llave, se establecerá una corriente de agua por la tubería que cesará en cuanto los **niveles** de agua en ambos depósitos se igualen. Vale la pena reflexionar sobre el hecho de que **cuanto mayor sea la diferencia de nivel más intensa será la corriente de agua que se establezca**. Dicha corriente lleva asociada una energía que puede utilizarse para realizar diversas transformaciones (por ejemplo mover unas paletas).

En resumen: es **la diferencia de nivel** y no la cantidad de agua en cada recipiente lo que determina realmente el flujo o corriente de agua de uno a otro.

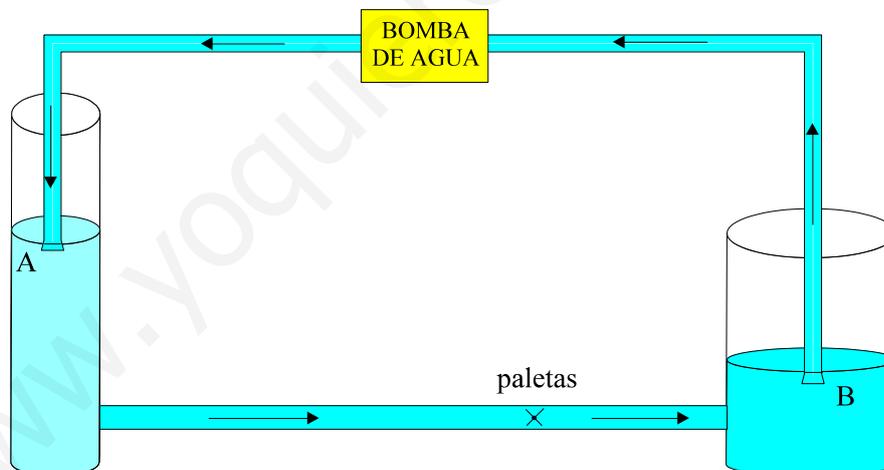
*A.3. Utilizad las ideas introducidas en los párrafos anteriores con el fin de explicar los resultados experimentales recogidos en el cuadro anterior.*

El **nivel de carga positiva** existente en cada una de las esferas anteriores es equivalente al nivel de agua en los depósitos de la figura. La corriente de agua siempre circula desde donde hay más nivel a donde hay menos y análogamente sucede con la corriente eléctrica que siempre va desde donde el nivel de carga positiva es mayor a donde es menor. Dicho nivel está relacionado de alguna manera con la **densidad de carga positiva** existente. En el ejemplo **d)** anterior, es cierto que la carga neta de ambas esferas es la misma, pero en la pequeña el nivel de carga es más alto al tener la misma cantidad de carga en un espacio más pequeño, por eso la corriente va de izquierda a derecha. Análogamente se puede explicar cualquiera de los restantes casos. En el **a)** el nivel de carga positiva es mayor en la esfera de la izquierda y lo mismo ocurre en el caso **b)**. Sin embargo en el **c)** el nivel de carga positiva es mayor en la esfera de la derecha.

En electricidad existe una magnitud llamada **potencial eléctrico** que es tanto mayor cuanto mayor es el nivel de carga positiva existente. La unidad en que se mide el potencial es el **voltio (V)**.

De los ejemplos anteriores se deduce que: **La corriente eléctrica** (entendida como un movimiento de carga positiva) **siempre circulará de mayor a menor potencial hasta que los potenciales de ambas esferas se igualen**. ¿Cuánto tiempo tarda en ocurrir esto? Lo cierto es que muy poco. Si queremos mantener la corriente eléctrica necesitamos de un dispositivo que, a su vez, mantenga constante la diferencia de potencial (o nivel de carga positiva) existente. A continuación abordaremos este problema considerando de nuevo el símil hidráulico ya manejado.

**A.4.** En la figura se describe un circuito hidráulico cerrado en el que la corriente de agua circula constantemente en sentido contrario a las agujas del reloj. Explicad con el mayor detalle posible cómo funciona y cuál es la función de la bomba de agua.

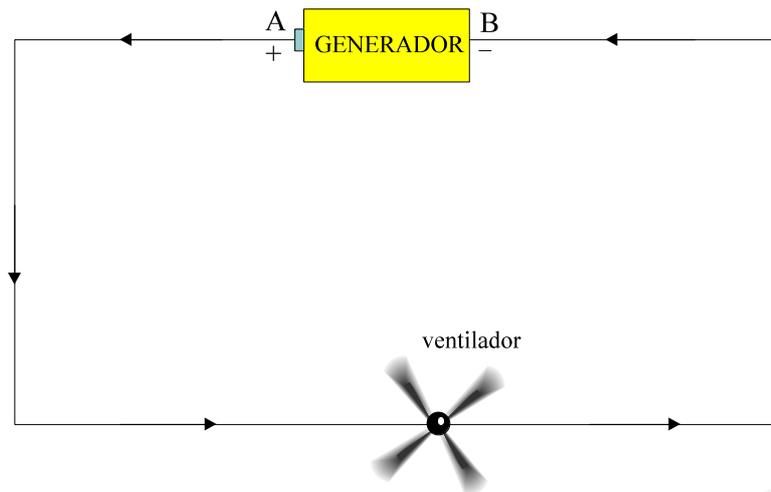


La bomba realiza trabajo venciendo la fuerza de la gravedad para subir el agua desde B hasta A aumentando así la energía potencial gravitatoria. El agua subida se mueve espontáneamente de A a B por fuera de la bomba. En esa caída devuelve la energía potencial ganada (por ejemplo, puede hacer girar unas pequeñas paletas colocadas de forma adecuada en medio de la corriente).

De forma similar, el circuito de corriente eléctrica más simple constaría de un **generador** (por ejemplo, una pila) uno de cuyos polos (el positivo) estaría a mayor potencial que el otro (el negativo). La corriente eléctrica sale del polo positivo y circula espontáneamente hacia el negativo (de mayor a menor potencial) a través de un hilo conductor. La pila utiliza energía química para realizar el trabajo necesario para “subir” la carga positiva que le va llegando al polo negativo (menor

## 5. Corriente eléctrica

potencial) hasta el polo positivo (mayor potencial) venciendo la fuerza de repulsión eléctrica que se opone a ello.



Cuando un generador hace que pase por su interior carga positiva, dicha carga (lo mismo que el agua del símil anterior) gana energía (suministrada por el generador) que luego liberará al moverse por el cable en el circuito exterior al generador (manteniendo el ventilador funcionando, encendida una bombilla, caliente un horno, emitiendo radiación, etc.). Cuanto mayor sea la diferencia de "nivel" (de potencial) más trabajo podrá realizar la corriente fuera de la pila (o, dicho de otro modo: más energía podrá transferir al exterior del circuito). Cuando un circuito funciona en **régimen estacionario**, la cantidad de energía aportada por el generador ha de ser igual a la que el circuito transfiere al exterior del mismo (en un tiempo dado).

La diferencia de potencial existente entre los extremos del generador se mide con un aparato llamado voltímetro. Esta diferencia de potencial se mantiene constante gracias a que el generador "coge" la carga positiva que le llega por el cable a su polo negativo y la traslada por su interior a su polo positivo, realizando trabajo para vencer la fuerza de repulsión eléctrica (para lo cual ha de consumir una energía). Las pilas o baterías son generadores que obtienen dicha energía de las reacciones químicas que ocurren en su interior, por eso se "gastan" con el tiempo.

En corriente eléctrica a la diferencia de potencial existente entre dos puntos dados de un circuito (de A a B) se la suele designar como "**V**" y siempre es el potencial mayor menos el menor (en este caso  $V_A - V_B$ ).

## 2. MEDIDA DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Hemos visto cómo podemos conseguir que circule corriente eléctrica constante por un hilo conductor. Otro aspecto de interés es la medida cuantitativa de la **intensidad** de una corriente. De acuerdo con lo dicho hasta aquí, podemos pensar en un hilo conductor por el que circula una corriente y en la carga que atraviesa una sección del mismo (como si le hiciéramos un corte transversal) en un tiempo dado. De dos conductores iguales parece claro que aquel cuya sección transversal sea atravesada por una cantidad de carga " $q$ " mayor, en un tiempo dado " $\Delta t$ " (igual para ambos), será por el que circule una corriente eléctrica más intensa.

**A.5.** Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, razonad cuál de las siguientes expresiones es la más adecuada para la intensidad de corriente:  $I = \Delta t/q$ ;  $I = q \cdot \Delta t$ ;  $I = q + \Delta t$ ;  $I = q/\Delta t$ .

La expresión operativa introducida para definir la magnitud intensidad de corriente eléctrica lo que nos da es el valor medio de dicha magnitud ya que es posible que durante el tiempo  $\Delta t$  dicha intensidad cambie. Sólo en el caso de que la intensidad de la corriente se mantenga constante durante todo el intervalo de tiempo considerado (circuito de corriente continua funcionando en régimen estacionario) podremos decir que la intensidad  $I$  coincide con su valor medio.

La intensidad de corriente se mide en **amperios** (A), y los aparatos que la miden se denominan amperímetros. Para intensidades pequeñas es habitual utilizar el miliamperio (mA) o milésima parte de un amperio ( $1 \text{ mA} = 0'001 \text{ A} = 10^{-3} \text{ A}$ ).

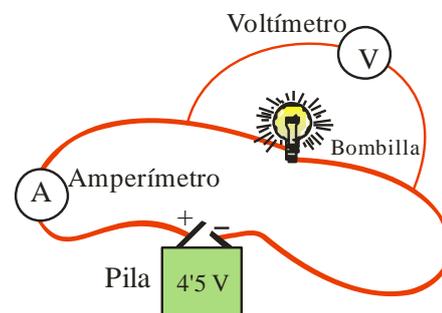
La unidad de cantidad de carga eléctrica se llama **culombio** (C). Como 1 C es una carga muy grande, a menudo se utilizan submúltiplos como, por ejemplo, el microculombio ( $\mu\text{C}$ ) o millonésima parte del culombio:  $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ . La carga eléctrica más pequeña que existe es la de un electrón y vale  $-1'6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (la del protón es la misma pero positiva).

Una intensidad de 1 A significa que cada segundo la sección transversal (perpendicular al cable) del conductor, será atravesada por una carga total de 1 C.

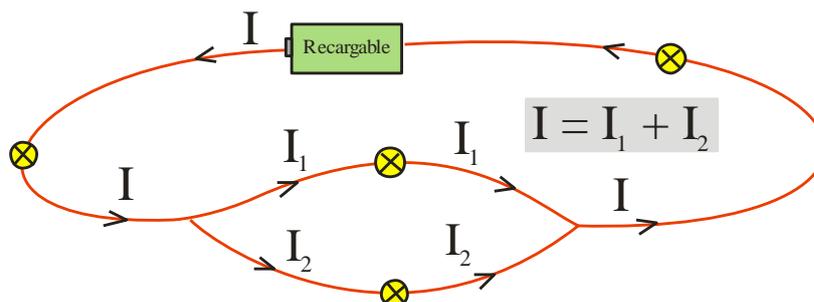
**A.6.** ¿Qué significa una intensidad de 0'2A en un punto de un cable conductor? ¿Qué carga atravesará una sección transversal de ese cable en 15 minutos? ¿A cuántos electrones corresponde? ¿En qué sentido se mueven dichos electrones? (carga de un electrón  $-1'6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).  
Rdo. 180 C;  $1'125 \cdot 10^{21}$  electrones.

**A.7.** ¿Cuánto tiempo ha de estar circulando una corriente de 0'5 A para que una sección transversal de un conductor dado sea atravesada por una carga total de 2'5 C? Rdo. 5 s.

Un amperímetro se conecta siempre **en serie** es decir, de forma que sea atravesado por toda la corriente cuya intensidad se quiere medir. No así el voltímetro que, para medir la diferencia de potencial existente entre dos puntos, ha de conectarse como se indica en la figura. Dicha forma de conexión se denomina **en paralelo**.



Conviene tener en cuenta que la intensidad de la corriente cerca del polo positivo es la misma que cerca del polo negativo y que lo mismo ocurre antes y después de una bombilla o de cualquier otro elemento que pueda haber en el circuito. En el caso de que exista una bifurcación, la suma de las intensidades por todas las ramas será igual a la intensidad en cualquier punto del cable antes o después de dicha bifurcación. En el esquema siguiente se representa un circuito en el que el cable, en un punto dado, se divide en dos ramas. Cada pequeña esfera indica una bombilla.



### 3. FACTORES DE QUE DEPENDE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE

El control de la intensidad de corriente que circula por un conductor, es un problema básico en cualquier aplicación de corriente eléctrica. Ello hace que sea conveniente conocer de qué factores depende la intensidad de una corriente y la forma en que lo hace.

*A.8. Partiendo del modelo de corriente eléctrica como desplazamiento de carga por un hilo conductor, señalad a modo de hipótesis de qué factores cabe esperar que dependa su intensidad.*

Cabe esperar que la intensidad dependa de la diferencia de potencial existente entre los extremos del hilo de modo que, cuanto mayor sea esta, mayor resulte también la intensidad producida. También deberá influir la naturaleza del hilo conductor (no será lo mismo si es cobre que hierro u otro metal). Para un hilo de un cierto metal, la hipótesis más sencilla es que la intensidad  $I$  de corriente y la diferencia de potencial  $V$  sean directamente proporcionales:

$$V = R \cdot I$$

En la expresión anterior  $R$  es una constante cuyo valor viene determinado por las características y naturaleza del hilo conductor empleado.

*A.9. Diseñad una experiencia sencilla con la que poder contrastar la hipótesis anterior.*

Podemos diseñar una experiencia en la que dispongamos de un circuito que nos permita disponer de diferencias de potencial variables y conocidas entre los extremos de un hilo conductor dado y medir la intensidad de corriente que circula por él en cada caso. Conviene realizar unas cinco medidas diferentes y recoger los resultados en una tabla como la siguiente:

V (voltios)	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
I (amperios)	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$

Cabe pensar que la hipótesis se cumple, si al dividir cada diferencia de potencial entre su intensidad correspondiente, el cociente permanece prácticamente constante o, mejor aún: si al representar los valores de  $V$  frente a los de  $I$  se obtiene una línea recta.

*A.10. Proceded a la realización del experimento y al análisis de los resultados que se obtengan.*

Los resultados experimentales confirman la hipótesis  $V = R \cdot I$

*A.11. Interpretad razonadamente el significado físico de la constante  $R$  de la expresión  $V/I = R$  considerando para ello que significará que  $R$  presente un valor muy grande o muy pequeño.*

La ecuación obtenida se puede expresar como:  $\boxed{\frac{V}{I} = R}$

Dicha expresión conoce con el nombre de Ley de Ohm para un conductor, por haber sido este científico (1789-1854) el que la estableció. En realidad, no todos los conductores siguen dicha ley, a los que sí lo hacen se les llama **conductores óhmicos**. Para un conductor de este tipo, **el cociente entre la diferencia de potencial entre sus extremos y la intensidad de la corriente que lo atraviesa es constante**. Eso significa, por ejemplo, que si la intensidad de la corriente

dobra su valor es porque la diferencia de potencial se ha hecho doble, o si se reduce a la mitad, es porque la diferencia de potencial se ha reducido a la mitad.

Si un trozo de un conductor tiene un valor de  $R$  muy grande en comparación con un segundo trozo, de acuerdo con la ley de Ohm, para conseguir que pase por el la misma intensidad de corriente será necesario que entre sus extremos apliquemos una diferencia de potencial mucho mayor que en el segundo; luego, la constante  $R$  mide la dificultad que presenta un conductor al paso de la corriente y por eso se le llama **resistencia**.

Para medir la resistencia se utiliza como unidad del sistema internacional el **ohm** (ohmio). Su símbolo es:  $\Omega$ .  $1 \Omega$  es la resistencia de un hilo conductor tal que al aplicar una diferencia de potencial de  $1 \text{ V}$  entre sus extremos, la intensidad de la corriente que circula por él es de  $1 \text{ A}$ .

**A.12.** *¿Qué significa que la resistencia de un trozo de hilo de cobre es  $2 \Omega$ ?*

Significa que el cociente entre la diferencia de potencial entre sus extremos y la intensidad de la corriente que circula por él será siempre 2, es decir: si la diferencia de potencial es  $1 \text{ V}$ , la intensidad será  $0,5 \text{ A}$ ; si la diferencia de potencial es  $10 \text{ V}$ , la intensidad será  $5 \text{ A}$ , etc.)

**A.13.** *¿Qué intensidad de corriente atravesará a una resistencia de  $20 \Omega$  cuando se conecte a una diferencia de potencial de  $120 \text{ V}$ ? Rdo.  $I = 6 \text{ A}$*

**A.14.** *¿A qué puede deberse la mayor o menor resistencia que presenta un hilo conductor al paso de corriente a través del mismo?*

Sabemos que no todos los materiales conducen por igual la corriente eléctrica. A los que conducen bien la corriente se les llama conductores. Entre ellos se encuentran la plata y el cobre. Los que conducen muy mal la corriente como, por ejemplo, la goma dura o el azufre, se les llama aislantes. En general, todos los materiales presentan una cierta resistencia al paso de la corriente. Así por ejemplo, un hilo de cobre de  $1 \text{ m}$  de longitud y  $1 \text{ mm}^2$  de sección presenta una resistencia al paso de la corriente eléctrica de  $0,017 \Omega$  frente a los  $0,1 \Omega$  si el hilo fuese de hierro. La resistencia al paso de la corriente es responsable de que los aparatos eléctricos se calienten cuando funcionan. A veces este efecto se busca deliberadamente (estufas y hornos eléctricos), pero en todos los demás casos, parte de la energía eléctrica que podríamos utilizar para diversos usos (moler café, desplazar un vehículo, escuchar la radio, etc.) se pierde debido a ese calentamiento.

La resistencia de los conductores metálicos aumenta al aumentar su temperatura. Este fenómeno se puede interpretar, en parte, si tenemos en cuenta que los **iones metálicos positivos** no están quietos sino vibrando en torno a posiciones de equilibrio. Cuando se baja la temperatura esas vibraciones se hacen menos intensas y si se baja mucho puede ocurrir que los iones positivos de la red metálica se queden prácticamente quietos. En ese caso, serían vistos como masas puntuales y apenas opondrían ninguna dificultad al desplazamiento, como un todo, del mar de electrones a través de ellos. Por el contrario, al aumentar la temperatura, aumenta la amplitud de las vibraciones, con lo que el área efectiva que cubre cada ion metálico crece (es como si aumentara de tamaño). En ese caso, las interacciones entre los iones metálicos y los electrones libres que forman la corriente eléctrica serían más frecuentes y la resistencia aumentaría.

Existen metales para los que la resistencia al paso de la corriente es prácticamente nula por debajo de una temperatura determinada (temperatura crítica). Este fenómeno se llama **superconductividad** y fue descubierto en 1911 por el físico holandés H. Kamerling Onnes. Así, por ejemplo, la

## 5. Corriente eléctrica

temperatura crítica del mercurio es de  $-268,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De hecho se han observado corrientes eléctricas en anillos metálicos superconductores que se han mantenido durante años sin apenas debilitarse. (Naturalmente es preciso gastar energía en mantener el anillo a la temperatura adecuada). En la actualidad se está investigando intensamente en la obtención de materiales que presenten superconductividad a temperaturas más altas. Una de las líneas de investigación es trabajar con unos nuevos materiales que tienen óxido de cobre en su composición (llamados cupratos). Con estos materiales se pudo alcanzar en 1993 una temperatura crítica de  $-138\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Si se consiguiera fabricar materiales que presentaran el fenómeno de la superconductividad a temperatura ambiente, ocurriría una verdadera revolución, ya que, se podría transportar la corriente eléctrica sin sufrir apenas ninguna pérdida de energía, las máquinas eléctricas trabajarían más rápido y sin calentarse con un consumo de energía mucho menor (casi el 15 % de la factura de electricidad proviene de pérdidas debidas a la resistencia eléctrica), la contaminación atmosférica disminuiría y se podrían crear campos magnéticos muy potentes.

La ley de Ohm indica que la intensidad de la corriente que circula por un hilo conductor depende de la diferencia de potencial existente entre los extremos de éste y de la resistencia del mismo al paso de la corriente. Hemos visto que dicha resistencia varía según la naturaleza del material (plata, cobre, mercurio, hierro, ...) y la temperatura a la que se encuentre. Otros factores que también influyen en el valor de la resistencia son la longitud y el grosor del hilo empleado.

**A.15.** Señalad, a título de hipótesis, que relación cabe esperar que exista entre la sección  $S$ , la longitud  $L$  y la resistencia  $R$ , de un hilo conductor dado.

Cabe pensar que la resistencia al movimiento del mar de electrones sea tanto mayor cuanto mayor sea la longitud y menor la sección. Los resultados experimentales verifican esta suposición y la ecuación que refleja dichos resultados es:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

La constante  $\rho$  se denomina "resistividad" y depende (para una temperatura dada) de la naturaleza del material de que esté hecho el cable. En unidades internacionales se mide en  $\Omega \cdot \text{m}$ .

**A.16.** Atendiendo a la expresión anterior, explicad cuál es el significado físico de la resistividad. Concretad para el caso del cobre cuya resistividad es de  $1,7 \cdot 10^{-8}\text{ } \Omega \cdot \text{m}$ .

Si en la expresión anterior suponemos que  $L = 1\text{ m}$  y que la sección sea de  $1\text{ m}^2$ , se obtiene que el valor de la resistencia y de la resistividad coinciden, por tanto, podemos afirmar que la resistividad de un material es numéricamente igual a la resistencia de un trozo de 1 m de longitud y  $1\text{ m}^2$  de sección de dicho material. De acuerdo con ello, un cable de cobre de 1 m de longitud y  $1\text{ m}^2$  de sección presentará una resistencia de  $1,7 \cdot 10^{-8}\text{ } \Omega \cdot \text{m}$ .

En la tabla siguiente se dan los valores de la resistividad de algunos materiales.

Material	Resistividad ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
Aluminio	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Hierro	$10 \cdot 10^{-8}$
Nicrom	$100 \cdot 10^{-8}$
Plata	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Plomo	$22 \cdot 10^{-8}$

Material	Resistividad ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
Wolframio	$5,5 \cdot 10^{-8}$
Grafito	$3500 \cdot 10^{-8}$
Ámbar	$5 \cdot 10^{14}$
Azufre	$10^{15}$
Cuarzo	$75 \cdot 10^{16}$
Vidrio	Entre $10^{10}$ y $10^{14}$

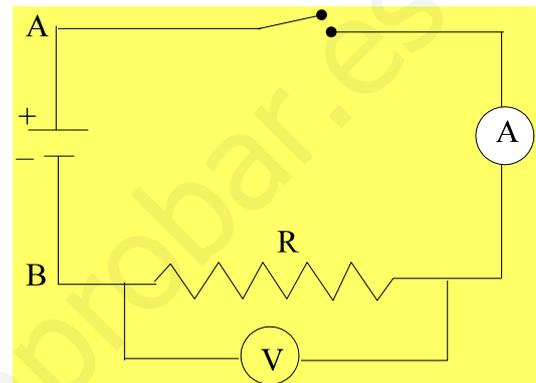
**A.17.** Calculad qué longitud de cable de cobre de  $5 \text{ mm}^2$  de sección hemos de disponer para obtener una resistencia de  $12 \Omega$ . Rdo. 3'53 km

**A.18.** Hallad la resistencia de 100 m de cable de hierro de  $3 \text{ mm}^2$  de sección. Rdo. 3'33 $\Omega$ .

**A.19.** Comparad las resistencias de 2 cm de hilo de cobre de  $0'5 \text{ mm}^2$  de sección con la de un cilindro de grafito (mina de lápiz) de igual longitud y sección. Si la diferencia de potencial (ddp) entre sus extremos es 10 V, ¿cuánto valdrá la intensidad de la corriente que los atraviesa? Si la intensidad de la corriente fuera de 0'1 A, ¿cuál sería la ddp entre sus extremos?

Rdo. Cobre:  $6'8 \cdot 10^{-4} \Omega$ ; grafito:  $1'4 \Omega$ .  $I = 14706 \text{ A}$  en el hilo de cobre, e  $I = 7'14 \text{ A}$  en el grafito.  $6'8 \cdot 10^{-5} \text{ V}$  en el cobre y  $0'14 \text{ V}$  en el grafito.

Aunque todo conductor presenta, como hemos visto, una resistencia al paso de la corriente, es muy frecuente la fabricación de resistencias eléctricas de distintos valores que se utilizan frecuentemente, por ejemplo, en aparatos eléctricos. En general, el esquema de un circuito eléctrico simple, podemos representarlo ahora como:



En la figura anterior, el generador se indica mediante dos líneas paralelas, la resistencia exterior al generador se ha representado por la línea quebrada y el interruptor por los dos puntos contiguos que pueden conectarse o desconectarse. En los tramos en los que la línea es recta se supone que no existe resistencia apreciable al paso de la corriente (se pueden dibujar de la longitud que se quiera). Ello implica que todos los puntos de un tramo rectilíneo de un circuito como el anterior se encontrarán al mismo potencial (por ser  $R = 0$ , según  $V = I \cdot R$ ). Por el contrario, la presencia de una resistencia supone la existencia de una “caída de potencial”. Otra forma de representar una resistencia es mediante:



**Nota:** Este tema se ha diseñado de tal forma que, si el profesor lo considera conveniente, se pueda saltar desde aquí directamente al apartado 6 (sin tratar 4 y 5). No obstante, debe tenerse en cuenta que esta opción supone no poder justificar adecuadamente el concepto de diferencia de potencial en términos de trabajo y energía.

#### 4. TRANSMISIÓN DE LA FUERZA ELÉCTRICA. CAMPO ELÉCTRICO

Sabemos que dos cuerpos cargados con cargas  $q_1$  y  $q_2$ , que podamos considerar como puntuales, se ejercen entre sí una fuerza que viene dada por la Ley de Coulomb:

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

En la expresión anterior,  $K$  es una constante que depende únicamente del medio y  $r$  la distancia entre las cargas. El valor de la constante  $K$  en el vacío es de  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

## 5. Corriente eléctrica

**A.20.** Hallad la fuerza que ejercerán dos cargas positivas de  $10^{-9}$  C separadas 10 cm sobre un protón que se halla a 20 cm de una de ellas y a 30 cm de la otra, sobre la línea que las une.

Dato: Carga del protón  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C. Rdo.  $F=5.2 \cdot 10^{-17}$  N.

Es fácil calcular la fuerza entre dos partículas cargadas, pero ¿cómo tiene lugar esta interacción?. Aunque durante mucho tiempo se pensó que se trataba de una interacción instantánea a distancia, podemos pensar que una carga Q crea “algo”, que llamaremos **campo eléctrico**, que atraviesa todo el espacio y la materia que le rodea pero que sólo puede ser detectado cuando colocamos una carga, q, en uno de los puntos de dicho espacio. Esto supone pensar que la interacción se produce en dos fases: primero la carga Q crea un campo eléctrico y, segundo, dicho campo interacciona con cualquier carga que esté en contacto con él, ejerciéndole una fuerza.

**A.21.** ¿Cómo podemos medir lo intenso que es el campo eléctrico en un punto dado del mismo?

Si sólo podemos detectarlo cuando ejerce fuerzas sobre objetos cargados, se podría colocar en dicho punto una carga “testigo”, q, y medir la fuerza que el campo ejerce sobre ella. Pero como dicha fuerza dependerá del valor de la carga testigo (si ponemos q, 2q, 3q, mediríamos  $\vec{F}$ ,  $2\vec{F}$ ,  $3\vec{F}$ ) podemos caracterizar la intensidad del campo eléctrico en un punto, independientemente de la carga testigo, mediante la magnitud  $\frac{\vec{F}}{q}$ , que llamaremos “**intensidad del campo eléctrico**” y

representaremos por  $\vec{E}$ , (de esta forma, siempre obtenemos la fuerza que el campo ejerce sobre cada unidad de carga, sea cual sea el valor de la carga q de prueba). Puesto que la dirección y sentido de la fuerza dependerá del signo de la carga testigo, se debe tomar un acuerdo: **La intensidad del campo eléctrico en un punto es una magnitud cuyo valor coincide con el de la fuerza que sufriría una unidad de carga positiva si se colocara en dicho punto.** El símbolo de su unidad es N/C.

En general: 
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

En la expresión anterior, q es la carga (con el signo que le corresponda) colocada en un punto dado de un campo eléctrico y  $\vec{F}$  la fuerza que el campo ejerce sobre dicha carga.

**A.22.** ¿Qué significa que la intensidad del campo eléctrico en un punto es 1 N/C? ¿Y  $2 \cdot 10^{-2}$  N/C?

**A.23.** Utilizando la ley de Coulomb, hallad el módulo de la intensidad del campo eléctrico creado por una carga puntual Q a una distancia “r” de la misma. A continuación aplicad la expresión obtenida para hallar el campo eléctrico (módulo) creado por  $Q = 10^{-6}$  C en el aire ( $K=9 \cdot 10^9$  U.I), en los puntos que se encuentran a 1, 2 y 3 m de distancia de ella. Representad, a escala, los vectores correspondientes. Rdo.  $E_1 = 9000$  N/C;  $E_2 = 2250$  N/C;  $E_3 = 1000$  N/C.

**A.24.** Dibujad un vector que represente la intensidad del campo eléctrico creado por una carga positiva  $Q = 2 \mu\text{C}$  en un punto A próximo a la misma, en los siguientes casos: a) si colocamos en A una carga de  $0.1 \mu\text{C}$ , b) ídem de  $0.5 \mu\text{C}$ , c) ídem de  $-0.1 \mu\text{C}$ , d) nada.

**A.25.** Sabiendo que  $\vec{E}$  en un punto dado se dirige horizontalmente hacia la derecha y su módulo es de  $3 \cdot 10^3$  N/C. ¿Qué fuerza sufrirá una carga de  $10^{-6}$  C si la colocamos en dicho punto? ¿y si es negativa y del mismo valor? Haced un dibujo representativo de ambos casos. Rdo.  $F=3 \cdot 10^{-3}$  N

Un campo eléctrico puede ser representado mediante líneas de fuerza. Estas consisten en líneas orientadas que indican, en cada punto de ellas, la dirección y sentido de la fuerza que el campo ejercería sobre una pequeña carga testigo positiva si la colocásemos en dicho punto. A modo de ejemplo, en la actividad siguiente abordaremos la representación del campo eléctrico en un caso particularmente sencillo.

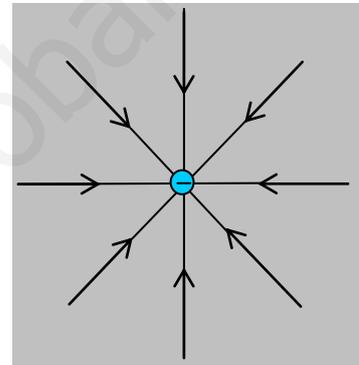
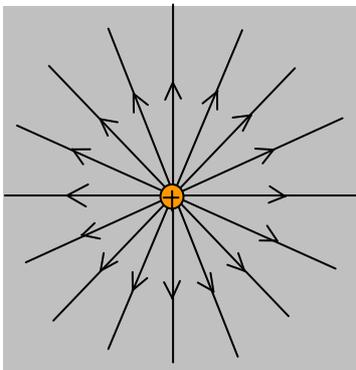
**A.26.** *Proceded a representar mediante flechas, el campo eléctrico alrededor de una esfera:*

a) *Que se halla electrizada con carga  $Q$  positiva.*

b) *Ídem con la misma carga negativa, de valor absoluto menor que el de la anterior.*

*¿Qué le ocurriría a una pequeña carga de prueba  $q$  positiva que se colocase inicialmente en reposo en un punto de las inmediaciones de cada una de dichas esferas?*

Conviene tener en cuenta que el caso considerado se trata de una situación particular y que el esquema puede ser diferente según cómo estén distribuidas las cargas creadoras del campo. Los esquemas correspondientes al ejemplo propuesto son:



Conviene tener en cuenta que, aunque los dibujos están en dos dimensiones, las líneas de fuerza están dirigidas en las tres direcciones del espacio. Como el módulo de la intensidad del campo eléctrico creado por una carga puntual  $Q$  viene dado por  $E = kQ/r^2$ , las zonas en las que la intensidad del campo tendrá el mismo valor son superficies esféricas concéntricas.

En cuanto a la cuestión que se plantea al final de la actividad, es importante destacar que la carga  $q$  por el hecho de encontrarse **libre** dentro de un campo eléctrico, estará sometida a una fuerza  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , de modo que dicha carga se moverá dentro del campo en el sentido de una línea de fuerza. De esta forma es posible comenzar a pensar en la posibilidad de aprovechar la energía cinética de millones de cargas (por ejemplo electrones) situadas en el seno de un campo eléctrico para producir determinadas transformaciones materiales (movimiento de unas piezas, iluminación, calefacción, etc.).

**A.27.** *Si colocamos una carga testigo de  $1\mu\text{C}$  en un punto, se ve sometida a una fuerza de  $5\text{ N}$ . ¿Cuál será el valor de la intensidad de campo? ¿Y si la carga fuese de  $-2\mu\text{C}$ ? Rdo.  $5 \cdot 10^6\text{ N}$*

En un circuito eléctrico como el que venimos considerando, el hecho de que entre los polos o bornes del generador exista una diferencia de potencial constante y uno se mantenga cargado positivamente y el otro negativamente, contribuye a que a lo largo del hilo conductor exista un campo eléctrico constante y, por tanto, a que haya una fuerza también constante sobre el mar de electrones. Dicha fuerza, una vez que el circuito está funcionando en régimen estacionario, es la responsable de que los electrones libres se desplacen por el cable desde el polo negativo al

## 5. Corriente eléctrica

positivo, aunque no produce aceleración neta porque, como ya hemos comentado, existe a su vez una fuerza de frenado debida a los choques, la cual aumenta con la velocidad de los electrones, alcanzándose rápidamente un movimiento global y ordenado del mar de electrones en su conjunto con una velocidad promedio constante<sup>1</sup>.

### 5. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL CAMPO ELÉCTRICO. CONCEPTO DE ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA, POTENCIAL Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

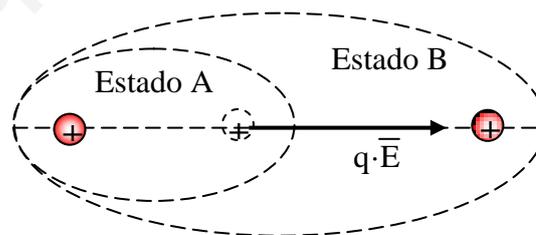
Podemos plantear otra forma de caracterizar lo intenso que es un campo eléctrico, teniendo en cuenta que las fuerzas eléctricas son conservativas, es decir, se hallan asociadas a una energía potencial eléctrica que, como sabemos, implica que existe distinta capacidad de realizar cambios dependiendo de la posición relativa de las cargas que formen el sistema considerado (análogamente a lo que ocurriría con la fuerza de la gravedad y con la fuerza elástica).

*A.28. Dibujad dos cargas,  $Q$  y  $q$ , del mismo signo, separadas por una distancia “ $r$ ” e inicialmente en reposo. Razonad qué pasará con la energía potencial del sistema si  $q$  se acerca o se aleja de  $Q$  (que consideraremos fija). Repetid lo mismo, suponiendo que son de diferente signo. (Se ha tomado el acuerdo de asignar el valor 0 a la energía potencial eléctrica correspondiente a una separación infinita de las cargas, es decir:  $Ep_{\infty} = 0$ ).*

La actividad anterior debe habernos permitido llegar a la conclusión de que la energía potencial de dos cargas del mismo signo es una cantidad positiva que disminuye cuando se alejan (y aumenta cuando se acercan). Por el contrario, si se trata de dos cargas de distinto signo, la energía potencial eléctrica es negativa y disminuye cuando se acercan (aumentando cuando se alejan, hasta alcanzar el valor 0 correspondiente a una separación infinita de las cargas).

Supongamos que el sistema de la figura, formado por dos cargas positivas, cambia del estado A al estado B. Como ya sabemos el trabajo realizado por la fuerza eléctrica (fuerza interior conservativa), se podrá expresar como:

$$W_{F_e} = -\Delta Ep_A^B = -(Ep_B - Ep_A)$$



De acuerdo con la expresión anterior, podemos ver que siempre que se trate de una transformación espontánea (el trabajo realizado por la fuerza eléctrica del campo sea positivo), la energía potencial eléctrica disminuirá de modo que  $Ep_B < Ep_A$ . Por el contrario, si el trabajo realizado por la fuerza eléctrica es negativo, la transformación es forzada y la energía potencial aumentará. (Siempre partiendo de una situación inicial de reposo).

<sup>1</sup> Aunque esa velocidad es pequeñísima, los efectos de la corriente eléctrica se transmiten de un punto a otro de forma casi instantánea porque el mar de electrones se mueve en bloque; es como si pisáramos una manguera llena de agua, por uno de sus extremos: veríamos que inmediatamente sale agua por el otro.

**A.29.** *Teniendo en cuenta que, según hemos definido, la  $E_p$  eléctrica correspondiente a una separación infinita de cargas es 0, ¿qué significará que la energía potencial de una carga "q" situada en un punto dado "A" de un campo eléctrico, valga 10 J?*

Si en la expresión anterior hacemos que B corresponda a una separación infinita de cargas,  $E_{p_B} = 0$ , con lo que la  $E_{p_A}$  coincidirá numéricamente con el trabajo que realizaría el campo eléctrico cuando esa carga "q" se trasladase desde ese punto hasta el infinito (en este caso 10 J).

El trabajo realizado por el campo eléctrico al pasar una carga q de la posición que tiene en A a la posición que tiene en B, dependerá del valor que tenga la carga q (puesto que la fuerza que el campo ejerce sobre ella viene dada por  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ ). Por tanto no nos da ninguna información respecto a la intensidad del campo. Sin embargo, si dividimos por la carga q lo que tenemos es el trabajo realizado por unidad de carga sea cual sea el valor de la carga q que se traslade de un punto a otro del campo. Así pues:

$$W_{\text{int } A \rightarrow B} = -(E_{p_B} - E_{p_A}) \rightarrow \frac{W_{Fe}}{q} = -\left(\frac{E_{p_B}}{q} - \frac{E_{p_A}}{q}\right)$$

A la magnitud  $E_p/q$  se le designa con el nombre de potencial del campo eléctrico en un punto y se le representa por el símbolo V.

$$V = \frac{E_p}{q}$$

**El potencial del campo eléctrico en un punto se define como una magnitud cuyo valor coincide con el de la energía potencial que tendría la unidad de carga positiva situada en dicho punto.** El potencial en un punto, para un campo dado, sólo depende de la situación del punto en cuestión y no de que en él se coloque o no carga alguna. Por tanto, cada punto de un campo eléctrico se caracteriza porque le corresponde un cierto potencial y el valor de ese potencial no depende de que en ese punto pongamos una carga de un valor u otro o no haya ninguna carga.

La expresión anterior puede escribirse así, como:  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = -q \cdot (V_B - V_A)$

También se puede encontrar como:  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = -q\Delta V$  o bien como:  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$

**El valor numérico de la diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico nos indica la variación en la energía potencial que se producirá en el sistema cuando la unidad de carga positiva se traslade desde un punto al otro.**

Dado que  $V = E_p/q$  el acuerdo tomado respecto al valor 0 de la  $E_p$  electrostática (separación infinita de cargas) vale también para el potencial. Ello implica que a una distancia infinita de la carga creadora del campo eléctrico el potencial ha de ser 0.

La unidad internacional para medir el potencial es el J/C que recibe, como ya se dijo anteriormente, el nombre de "volt" o **voltio** y se simboliza por V.

**A.30.** *¿Qué significa que el potencial del campo eléctrico en un punto dado del mismo sea 50 V?*

## 5. Corriente eléctrica

La respuesta a la pregunta anterior puede darse de varias formas: Que si en ese punto pusiéramos una hipotética carga puntual positiva  $q = 1 \text{ C}$ , el valor de la Ep eléctrica del sistema formado por dicha carga y el campo, sería de 50 J, o bien, que si  $q$  se trasladase desde el infinito a ese punto, la Ep aumentaría en 50 J. También podríamos utilizar la expresión  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$  y hacer en ella que el punto B fuese el infinito con lo que  $V$  en el punto A sería una magnitud cuyo valor numérico coincidiría con el trabajo que realizaría el campo cuando la unidad de carga positiva se trasladase desde dicho punto hasta el infinito (en este caso 50 J).

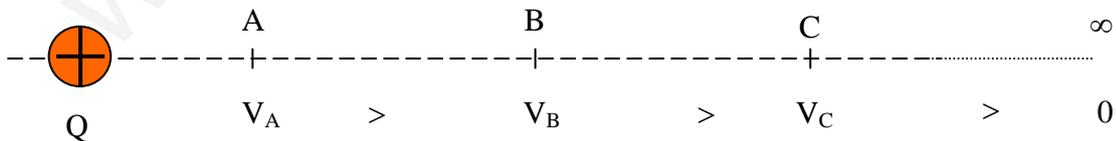
**A.31.** ¿Qué significa que entre dos puntos A y B de un campo eléctrico exista una diferencia de potencial de  $V_A - V_B = 250 \text{ V}$ ?

Según la expresión:  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$ , significa que al llevar la unidad de carga positiva desde el punto A hasta el punto B, la fuerza eléctrica del campo realizará sobre ella un trabajo de 250 J (en este caso positivo y, por tanto, transformación espontánea). En general, pues: **el valor de la ddp  $V_A - V_B$  coincide con el trabajo que realiza la fuerza del campo sobre la unidad de carga positiva cuando ésta se traslada desde un punto A a otro punto B de dicho campo.**

**A.32.** Razonad hacia donde se movería espontáneamente una pequeña carga positiva de prueba abandonada en el seno de un campo eléctrico (hacia potenciales crecientes o decrecientes). Ídem para una carga negativa.

Si la carga es positiva, de acuerdo con la expresión:  $W_{\text{int } A \rightarrow B} = -q \cdot (V_B - V_A)$ , hace falta que  $V_A > V_B$  para que el trabajo realizado por el campo eléctrico sea positivo (transformación espontánea). Por tanto toda carga  $q$  positiva de prueba que se abandone libremente en el seno de un campo eléctrico, se moverá espontáneamente hacia potenciales decrecientes. En cambio con una carga  $q$  negativa, ocurriría lo contrario ya que al ser negativa para que el trabajo sea positivo (es decir para que la fuerza eléctrica del campo no se oponga al desplazamiento de la carga)  $V_B$  ha de ser mayor que  $V_A$  y por tanto, las cargas negativas se mueven espontáneamente hacia potenciales crecientes.

Para comprender mejor la conclusión anterior, podemos imaginar un campo eléctrico creado por una carga puntual  $Q$  positiva y fija en un punto. En la figura se ve que  $V_A > V_B > V_C$ . Ello se puede explicar fácilmente teniendo en cuenta la definición del potencial del campo eléctrico en un punto dado del mismo. Si situáramos la unidad de carga positiva en A la energía potencial sería positiva (la carga  $Q$  creadora del campo también es positiva) e iría disminuyendo conforme pasáramos a B y luego a C, por tanto, lo mismo ocurrirá con el potencial del campo en esos puntos.



Si en la figura anterior colocásemos (en reposo) una pequeña carga de prueba positiva en el punto A, es evidente que espontáneamente se movería hacia la derecha (hacia potenciales decrecientes). Por el contrario, si la carga de prueba fuese negativa se movería espontáneamente hacia la izquierda (hacia potenciales crecientes).

**A.33.** *Comprobad que en el caso de que la carga  $Q$  creadora del campo fuese negativa, las conclusiones anteriores serían las mismas (las cargas positivas se moverían espontáneamente hacia potenciales decrecientes y las negativas hacia potenciales crecientes).*

**En general en corriente eléctrica se designa como  $V$  a la diferencia  $V_A - V_B$  siendo el punto A el primero y el B el segundo (siempre en el sentido de la corriente).** Como la corriente se considera como un flujo de carga positiva a través de un hilo conductor (en el interior del cual habrá un campo eléctrico) y las cargas positivas se mueven espontáneamente hacia potenciales decrecientes, el primero de los puntos siempre estará a un potencial mayor que el segundo.

En un cable conductor de un circuito, por el que pasa una corriente continua de intensidad  $I$  cte., la intensidad del campo eléctrico existente en su interior también es constante (si no lo fuese, tampoco podría serlo la intensidad de corriente) y de la misma dirección y sentido que la corriente. Por tanto, el trabajo realizado por el campo sobre la unidad de carga positiva que circula por el cable entre dos puntos A y B del mismo, se podrá expresar como:

$W = E \cdot \Delta l$  donde  $E$  es el módulo del vector intensidad de campo eléctrico (que como sabemos coincide numéricamente con la fuerza sobre la unidad de carga positiva) y  $\Delta l$  el módulo del desplazamiento experimentado por la carga entre A y B (longitud del cable entre A y B).

Sabemos también que el trabajo anterior coincide con la diferencia de potencial:  $W = V_A - V_B$

Por tanto, igualando las dos expresiones:  $E \cdot \Delta l = V_A - V_B \rightarrow$  
$$E = \frac{V_A - V_B}{\Delta l}$$

Como podemos comprobar, asociado a la diferencia de potencial entre dos puntos del cable conductor en un circuito, hay siempre un campo eléctrico. Cuanto mayor sea dicha diferencia de potencial, mayor será también la intensidad del campo y, por tanto, la fuerza ejercida sobre las cargas que se desplazan, aumentando así la intensidad de la corriente que pasa por dicho cable.

## 6. EFECTOS ENERGÉTICOS DE LA CORRIENTE

### 6.1. Efecto Joule

Ya hemos comentado que cuando una corriente pasa por una resistencia ésta se calienta. Ello se debe a las interacciones entre los electrones libres y los restos atómicos o iones positivos, y se conoce con el nombre de efecto Joule. En ocasiones, este efecto se busca expresamente; esto es lo que ocurre en la modesta bombilla en la que un filamento o resistencia se pone incandescente cuando se calienta al ser atravesado por una corriente eléctrica. Otros aparatos como la plancha eléctrica, el horno, los calentadores, etc., se basan en el mismo efecto.

**A.34.** *La diferencia de potencial  $V$  entre dos puntos de un circuito se define como una magnitud cuyo valor representa el trabajo realizado por el campo eléctrico cuando 1 C de carga pasa del punto a mayor potencial al otro de menor potencial. Proponed una expresión para calcular el trabajo realizado cuando pase una carga de  $q$  culombios. Transformad la expresión anterior de forma que aparezcan en ella la intensidad de corriente y el tiempo que ésta circula.*

La actividad anterior conduce finalmente a la expresión general: 
$$W = V \cdot I \cdot t$$

## 5. Corriente eléctrica

La caída de potencial  $V$ , puede deberse a la presencia de una simple resistencia óhmica. En ese caso, la expresión general obtenida puede modificarse teniendo en cuenta la ley de Ohm.

*A.35. Suponiendo que la caída de potencial se deba sólo a la presencia de una resistencia  $R$ , obtened las expresiones del trabajo eléctrico correspondientes a este caso particular.*

Si en la expresión anterior, sustituimos  $V$  como  $I \cdot R$ , obtenemos: 
$$W = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

También podíamos haber sustituido  $I$  como  $V/R$ , con lo que se obtiene: 
$$W = \frac{V^2}{R} \cdot \Delta t$$

Las dos últimas expresiones sólo tienen validez, insistimos, en el caso particular de que la caída de potencial  $V$  se deba únicamente a la presencia de una resistencia.

Frecuentemente estaremos interesados no en el trabajo o en el cambio de energía asociado al mismo, sino en lo rápidamente que ello se realiza, es decir, en la **potencia**. Sabemos que la potencia se simboliza por  $P$  y su valor medio se expresa como:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

La potencia se mide en  $W$  (vatios) y  $1 W = 1 J/s$ . También en  $kW$  (kilovatio) y  $1 kW = 1000 W$

*A.36. Obtened la expresión general de la potencia suministrada a cualquier componente de un circuito eléctrico y a continuación transformad dicha expresión general para el caso particular de que dicho componente sea sólo una resistencia*

La potencia suministrada (energía que llega cada segundo) a cualquier componente eléctrico (por ejemplo, una bombilla, un motor, etc.) de un circuito conectado entre dos puntos con una diferencia de potencial  $V$ , viene dada **en general** por:

$$P = I \cdot V$$

En el caso **particular** de que entre esos dos puntos exista sólo una resistencia eléctrica se cumplirá la ley de Ohm, es decir:  $V = I \cdot R$  por lo que podremos escribir también que, en ese supuesto:

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{o también como:} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

En este caso toda la energía suministrada a la resistencia por unidad de tiempo, se transfiere al exterior **mediante calor** por lo que la **potencia suministrada** y la **potencia consumida** son iguales. La relación anterior entre la potencia suministrada, la intensidad y la resistencia fue descubierta por Joule (por eso se denomina "efecto Joule"). De acuerdo con ella, el calor debido a una cierta resistencia es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad que pasa por ella. Esto justifica la conveniencia de transportar energía eléctrica desde las centrales donde se produce a los consumidores (generalmente situados a gran distancia) a la menor intensidad posible.

Otra unidad muy utilizada para medir el trabajo o la energía en electricidad, es el  $kWh$  (kilovatio hora) que se obtiene cuando la potencia eléctrica se expresa en  $kW$  y el tiempo en  $h$ .

**A.37.** *Obtened a cuántos julios equivale 1 kWh*

**A.38.** *A través de una resistencia de  $7 \Omega$  circula una corriente de  $1'5 A$  durante 2 h. Determinad el trabajo realizado por la corriente y la potencia consumida. Rdo.  $W = 113400 J$ ;  $P = 15'75 W$*

**A.39.** *Una plancha eléctrica lleva la siguiente inscripción:  $1200 W - 220 V$ , que indica la potencia del aparato en el caso de que se le conecte a una diferencia de potencial de  $220 V$ . Se pide:*

*a) Intensidad que circulará por la plancha al conectarla a  $220 V$ .*

*b) Valor de la resistencia de la plancha.*

*c) Intensidad que circularía en el caso de conectarla a  $125 V$ . ¿Cuál sería su potencia?*

*d) La energía que consumirá cuando esté conectada 10 h a  $220 V$  (expresada en kWh).*

Rdo. a)  $I = 5'45 A$ ; b)  $R = 40'33 \Omega$ ; c)  $I = 3'1 A$ ,  $P = 387'5 W$ ; d)  $12 kWh$

Dos aplicaciones importantes del efecto Joule son los fusibles y la iluminación por lámparas de incandescencia. Los primeros consisten en intercalar en un circuito un conductor que funde rápidamente en cuanto la intensidad de la corriente supere un valor determinado. De esa forma si por cualquier causa ocurre un aumento brusco en la intensidad, cesa la corriente, protegiendo así los aparatos que estén conectados al circuito. En las lámparas de incandescencia es un filamento (de tungsteno) el que hace de resistencia y se pone incandescente emitiendo luz. Sin embargo el rendimiento de este tipo de lámparas es muy bajo, ya que la mayor parte de la potencia suministrada se transfiere al exterior mediante calor y sólo un poco (menos del 15 %) es aprovechada para emitir luz. Las lámparas de bajo consumo y los LEDs son mucho más eficientes por lo que permiten un notable ahorro de energía.

## **6.2. Intensidad de corriente en un circuito con una pila ideal (no se calienta) en el que sólo hay resistencias. Asociación de resistencias (serie y paralelo).**

Sabemos que una pila realiza trabajo para trasladar la carga positiva por su interior "subiéndola de menor a mayor potencial" Ese trabajo implica una transferencia de energía al circuito por parte de la pila. ¿Qué ocurre con esa energía? El circuito (sin contar a la pila) emplea esa energía en realizar trabajo sobre el exterior y/o calor. Es decir: la energía que proporciona la pila al circuito se puede emplear, por ejemplo, en calentar agua por medio de una resistencia, mover un motor eléctrico, producir luz, etc. Naturalmente, el principio de conservación de la energía exige que:

La energía que proporciona la pila al circuito (o energía suministrada) ha de tener el mismo valor que la energía que este transfiere al exterior (o energía consumida). Ese aporte y transferencia de energía se realizan al mismo ritmo y la intensidad de corriente que circule por el circuito no puede ser cualquiera sino que debe tener un valor tal que satisfaga la condición anterior.

Se define la fuerza electromotriz (fem) como una **magnitud cuyo valor coincide con el trabajo, en julios, que realiza la pila (de origen no eléctrico) por unidad de carga, en culombios, que pasa por ella. Se simboliza por  $\varepsilon$  y se mide en voltios.** La fem es una magnitud característica del generador que "alimenta" el circuito y no depende para nada de lo que se conecte al mismo.

La fem de una pila permanece constante durante toda su vida. Según lo anterior el trabajo realizado por la pila cuando pasa por ella una carga  $q$  será precisamente  $\varepsilon \cdot q$  o lo que es equivalente:  $\varepsilon \cdot I \cdot t$  y su valor coincidirá con **la energía que la pila o generador aporta al circuito** (cuando por él circula una corriente de intensidad  $I$  durante un tiempo  $t$ ). Naturalmente, dicha energía suministrada (si la pila es ideal) deberá ser la misma que el circuito existente fuera de la pila transfiere al exterior ( $V \cdot I \cdot t$ ) siendo  $V$  la diferencia de potencial existente entre los puntos A y B (bor-

## 5. Corriente eléctrica

nes positivo y negativo respectivamente de la pila o generador). Por tanto, en este caso tendríamos que:

$$\varepsilon \cdot I \cdot t = V \cdot I \cdot t \text{ de donde: } \varepsilon = V$$

Si entre A y B sólo hay una resistencia  $R$ , entonces, aplicando la ley de Ohm:  $\varepsilon = V = I \cdot R$ , con lo que obtenemos la intensidad que circularía por ese circuito:

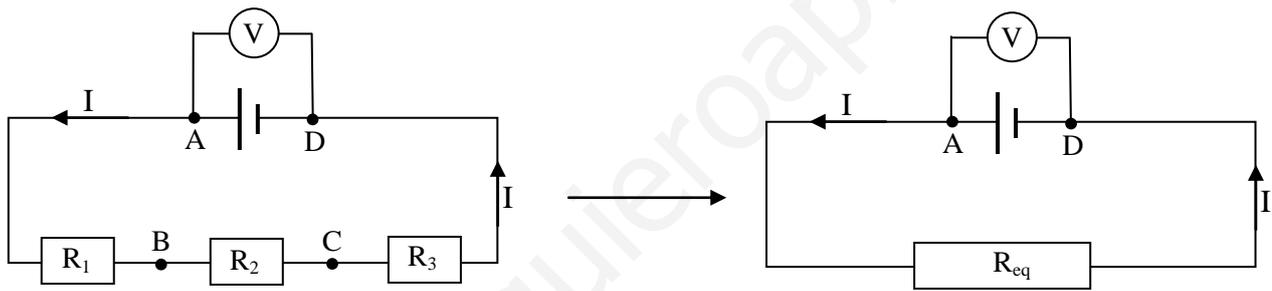
$$I = \varepsilon/R \text{ o bien } I = V/R$$

Si hay varias resistencias entre A y B, podríamos hallar la intensidad  $I$  que circularía por el circuito si fuéramos capaces de obtener la resistencia equivalente a todas ellas ( $R_{eq}$ ). Ello es fácil cuando dichas resistencias están en serie o en paralelo.

**A.40.** Dibujad distintas formas posibles de conectar tres resistencias idénticas

La resolución de la actividad anterior, conduce a la introducción de los conceptos conexión en serie y conexión en paralelo.

**A.41.** Obtened la resistencia equivalente a las resistencias en serie de la figura siguiente:



Como sólo hay un cable, el valor de la intensidad de corriente  $I$ , ha de ser el mismo en todo el circuito. Si entre A y B hubiese una sola resistencia cuyo efecto fuera equivalente al de todas ellas (y que designaremos como  $R_{eq}$ ), se cumpliría que:  $V_A - V_D = I \cdot R_{eq}$ . Pero, la conservación de la energía exige que la disminución de energía potencial por unidad de carga entre A y B sea igual a la suma de las disminuciones en cada resistencia (las cuales podemos calcular mediante la ley de Ohm). Por tanto, tendremos:

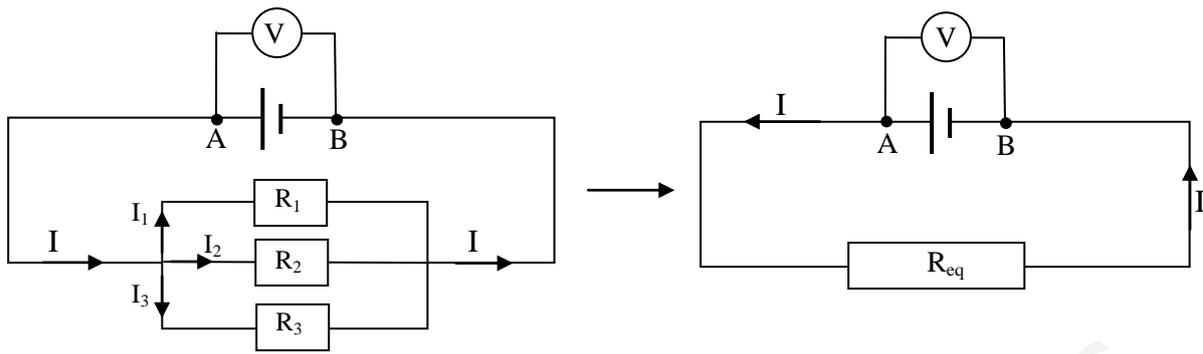
$$V_A - V_D = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D) \Rightarrow I \cdot R_{eq} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 \Rightarrow R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

En general, pues:

"La resistencia equivalente a varias resistencias en serie, es una resistencia cuyo valor se obtiene sumando los de todas esas resistencias"

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots R_n$$

A.42. Obtend la resistencia equivalente a las tres resistencias en paralelo de la figura siguiente:



Si entre A y B hubiera una sola resistencia que fuese equivalente a todas, se cumpliría que:  $V_A - V_B = I \cdot R_{eq}$ . Podemos relacionar el valor de la  $R_{eq}$ , con los de las resistencias, porque como la intensidad de corriente se debe conservar, se debe cumplir que  $I = I_1 + I_2 + I_3$ . Los valores de las intensidades que atraviesan cada resistencia vienen dados por la ley de Ohm, por lo que:

$$I = \frac{V_A - V_B}{R_{eq}}; \quad I_1 = \frac{V_A - V_B}{R_1}; \quad I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2}; \quad I_3 = \frac{V_A - V_B}{R_3}$$

y sustituyendo en la ecuación en  $I = I_1 + I_2 + I_3$  nos queda:  $\frac{V_A - V_B}{R_{eq}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \cdot (V_A - V_B)$ .

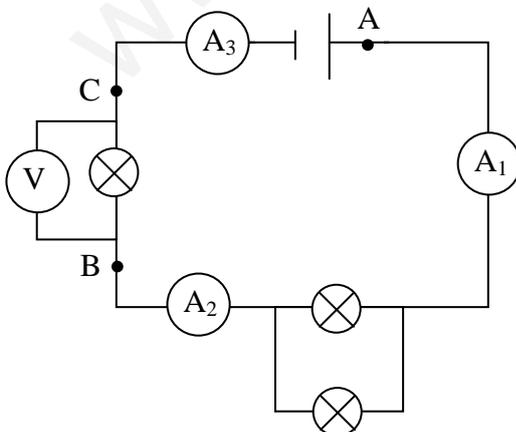
$$\text{Luego: } \frac{1}{R_{eq}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

En general, para "n" resistencias todas ellas en paralelo:

$$R_{eq} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)}$$

A.43. Mostrad que la resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo iguales es  $R_{eq} = \frac{R}{2}$

A.44. Hallad lo que marcarán los amperímetros y el voltímetro de la figura. Las tres bombillas tienen una resistencia de 20 ohmios cada una y la fem de la pila es de 6 V.



Para hallar la intensidad que atraviesa el circuito,  $I$ , es necesario hallar previamente la  $R_{eq}$  de las tres bombillas. Para ello hallaremos primero la equivalente de las dos bombillas que están en paralelo, que será  $10 \Omega$ . Ahora el circuito queda con dos resistencias en serie, una de  $20 \Omega$  y otra de  $10 \Omega$ . La  $R_{eq}$  de estas dos, será, por tanto, de  $30 \Omega$ . De manera que en el circuito final sólo tenemos la pila y una resistencia de  $30 \Omega$ , por lo que la intensidad será:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq}} = \frac{6}{30} = 0,2 \text{ A}$$

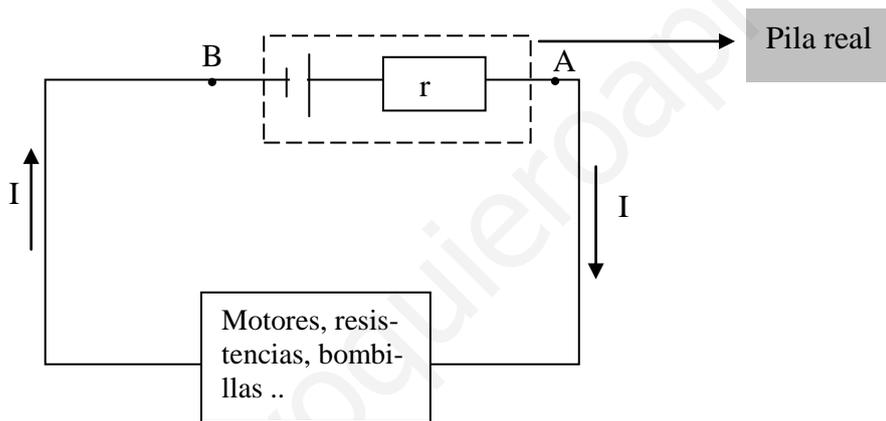
## 5. Corriente eléctrica

La intensidad anterior (0'17 A), es la que marcarán cada uno de los tres amperímetros dispuestos en el circuito, sin importar que se hallen antes o después de las bombillas (la intensidad de la corriente no se "gasta" por el hecho de pasar a través de una bombilla o resistencia). La ddp que marca el voltímetro podemos calcularla, ahora que conocemos la intensidad que pasa por la bombilla, mediante la ley de Ohm :  $V_B - V_C = I \cdot R = 0'17 \cdot 20 = 3'4 \text{ V}$  .  $V_A - V_B$  valdrá 1'6 V.

### 6.3. Intensidad de corriente en un circuito con una pila real (tiene resistencia interna). Ley de Ohm generalizada

Aunque al principio de su utilización las pilas se calientan muy poco, con el tiempo de uso se nota que se calientan más, y al final de su vida útil se calientan mucho. Todo ocurre como si la pila real fuera una pila ideal con una resistencia interna,  $r$ , en serie con ella. La resistencia interna de una pila se puede medir, y limita la intensidad máxima que puede producir una pila real (en la pila ideal, si  $R_{eq}$  tiende a cero -cortocircuito- la intensidad tiende a infinito).

Al circular una corriente  $I$  por un circuito durante un tiempo  $t$ , el generador aporta una energía dada por  $\varepsilon \cdot I \cdot t$  que es liberada al exterior del circuito en dos partes: una de ellas ( $V \cdot I \cdot t$ ) se transfiere al exterior por los elementos (resistencias, motores, etc.) que haya fuera del generador y otra ( $I^2 \cdot r$ ) se transfiere al exterior mediante calor por el propio generador.  $V$  corresponde a la diferencia de potencial existente entre los bornes del generador (ved figura siguiente).



El principio de conservación de la energía, exige que:

$\varepsilon \cdot I \cdot t = V \cdot I \cdot t + I^2 \cdot r$  de donde obtenemos la llamada ley de Ohm generalizada:

$$\varepsilon = V + I \cdot r$$

**A.45.** ¿Coincidirá la fem de una pila real con la ddp medida con un voltímetro entre sus bornes?

Como  $\varepsilon = V + I \cdot r$ , no coincidirá si tiene resistencia interna apreciable. La diferencia será mayor cuanto mayor sea la intensidad. Con el circuito abierto ( $I = 0$ ) coinciden siempre.

**En el caso particular de que entre A y B haya solo resistencias**, si designamos como  $R_{eq}$  a la resistencia equivalente a todas ellas, se cumplirá que:  $V = I \cdot R_{eq}$  de modo que  $\varepsilon = I \cdot R_{eq} + I \cdot r$  y finalmente:

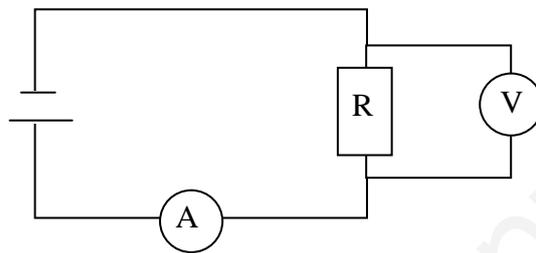
$$I = \frac{\varepsilon}{R_{eq} + r}$$

Observad que de la ecuación se deduce que si un generador tiene doble fem que otro, a igualdad de las restantes condiciones, proporcionará también doble intensidad de corriente que el otro.

**A.46.** ¿Qué significa que la fuerza electromotriz de un generador valga 12 V?

Significa que dicho generador realiza un trabajo de 12 J por cada culombio de carga positiva que traslada por su interior desde el borne a menor potencial hasta el borne a mayor potencial. También puede interpretarse como que ese generador transfiere al exterior del mismo una energía de 12 J por cada culombio de carga que pasa por él.

**A.47.** Hallad cuáles deben ser las lecturas del amperímetro y voltímetro en el circuito representado. A continuación calculad: a) Energía que suministrará la pila a la parte del circuito fuera de ella en una hora. ¿De dónde la saca? b) Energía que transferirá el circuito (sin incluir la pila) al exterior durante una hora. c) Energía que transferirá la pila al exterior durante una hora.



d) ¿Cuánto valdría  $I$  si no hubiese resistencia externa? (En ese caso se trataría de la intensidad "en cortocircuito". La pila se gastaría rápidamente).

Datos:  $\varepsilon = 20 \text{ V}$ ,  $r = 0'1 \ \Omega$ ,  $R = 3'9 \ \Omega$

Rdo.  $I = 5 \text{ A}$ ,  $V = 19'5 \text{ V}$ ; a) 351000 J; b) 351000 J; c) 360000 J; d) 200 A

**A.48.** ¿Cómo podemos controlar la intensidad que hay en un circuito?

La intensidad de corriente que hay en distintas partes de un circuito está determinada por la pila (por su fem y su resistencia interna) y por lo que se conecta fuera de ella. Esto nos permite apreciar las funciones de las resistencias en los circuitos: la de controlar la intensidad necesaria para producir un efecto deseado o la de dividir el potencial de modo que la diferencia de potencial entre dos puntos del circuito tenga un valor determinado. Para eso se utilizan los **resistores** (trozos de material de resistencia conocida, indicada por un código de barras de colores). El valor de las intensidades que hay en distintas partes de un circuito complejo se determina aplicando dos principios: el de conservación de la intensidad de corriente y el de conservación de la energía.

**A.49.** Se utiliza una pila de una fem de 12 V y una resistencia interna de  $1 \ \Omega$  para hacer funcionar una bombilla de  $20 \ \Omega$  de resistencia. Se pide: a) La intensidad de la corriente que circula por el circuito y la ddp entre los bornes de la pila. b) Idem si conectamos en paralelo con la primera otra bombilla igual. c) Idem pero tres bombillas. d) Idem si conectamos en paralelo un trozo de hilo de cobre (cortocircuito)

Rdo. a)  $0'57 \text{ A}$  y  $11'43 \text{ V}$ ; b)  $1'09 \text{ A}$  y  $10'9 \text{ V}$ ; c)  $2 \text{ A}$  y  $10 \text{ V}$ ; d)  $12 \text{ A}$  y  $0 \text{ V}$

Puesto que con los resistores podemos controlar la intensidad, se utilizan con mucha frecuencia resistores de resistencia variable (reostatos o potenciómetros) en los circuitos.

#### 6.4. Potencia consumida por un motor. Fuerza contraelectromotriz y rendimiento

Si entre dos puntos dados de un circuito conectamos un motor, la energía suministrada al motor por unidad de tiempo (o potencia "consumida" por el motor) vendrá dada por  $I \cdot V$ , siendo  $V$  la diferencia de potencial entre los bornes del motor e  $I$  la intensidad de corriente que lo atraviesa.

El motor eléctrico transfiere esa energía al exterior en dos partes: una, llamada **energía útil**, realizando el trabajo que nos interese (por ejemplo elevando un cuerpo); la otra, dado que cualquier motor se calienta, es transferida al exterior mediante calor y es una energía que no podemos aprovechar.

Al trabajo mecánico que el motor realiza por unidad de tiempo se le llama potencia del motor y se representará por  $P_M$ . (También se conoce con el nombre de **potencia útil** o **potencia motora**).

De acuerdo con las consideraciones anteriores podemos escribir que:  $I \cdot V = P_M + I^2 \cdot r$

Si en la igualdad anterior dividimos por  $I$  en ambos miembros:  $V = \frac{P_M}{I} + I \cdot r$

Al término  $P_M/I$  se le conoce como **fuerza contraelectromotriz** del motor ( $\epsilon_M$ ) y representa la energía "útil" que por unidad de carga transfiere el motor al exterior o bien la potencia del motor por unidad de intensidad que pasa por él. Se designa como  $\epsilon_M$  y se mide en voltios. Su valor depende del número de revoluciones por minuto con que gire el motor. De esta forma la ecuación anterior se puede expresar como:

$$V = \epsilon_M + I \cdot r$$

El rendimiento de un motor eléctrico será tanto mayor, cuanto mayor sea el trabajo útil que éste pueda realizar (o, lo que es equivalente, cuanta menor sea la energía que transfiere al medio mediante calor). Si designamos a dicho rendimiento mediante el símbolo  $\eta$ , podemos escribir:

$$\eta = \frac{P_M}{I \cdot V}$$

Observad que el valor máximo de dicho rendimiento sería 1 y correspondería al caso ideal de un motor en el que toda la energía que le llega pudiera convertirla en energía útil.

La expresión anterior se puede simplificar dividiendo arriba y abajo por  $I$ , con lo que se obtiene:

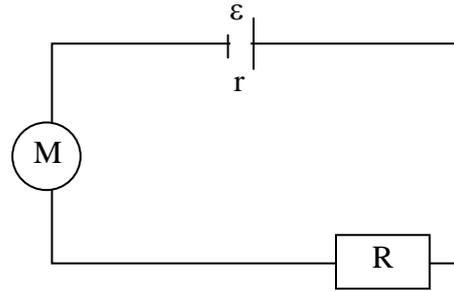
$$\eta = \frac{\epsilon_M}{V}$$

**A.50.** ¿Qué significa que la  $\epsilon_M$  de un motor es de 5 V?

Que realiza un trabajo mecánico de 5 J por cada culombio de carga que pasa a través de él, o que realiza trabajo mecánico con una potencia de 5 W por cada amperio de intensidad de la corriente que circula por él.

### 6.5. Ley de Ohm generalizada en el caso de un circuito con generador y motor

En el circuito de la figura existe un generador con resistencia interna, una resistencia externa y un motor. Si hacemos un balance energético nos queda



Energía suministrada por el generador a los elementos del circuito:  $\mathcal{E} \cdot I \cdot t$

Energía que los elementos del circuito transfieren al exterior (o, también, energía "consumida"):

$$(\mathcal{E}_M I t) + (I^2 R t) + (I^2 r t) + (I^2 r_M t)$$

Igualando las energías anteriores y despejando se obtiene fácilmente:  $I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_M}{R + r + r_M}$

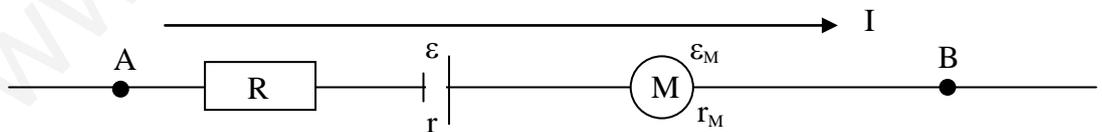
Por tanto, si adoptamos el criterio de considerar a la fceM de un motor como cantidades negativas, la expresión de la ley de Ohm generalizada para circuitos que incluyan generadores, motores y resistencias queda como:

$$I = \frac{\sum \mathcal{E}_i}{\sum R_i}$$

Conviene conocer que en un circuito puede haber también pilas cargándose, en este caso la pila está orientada al revés que el generador y presenta una fuerza contraelectromotriz (como si fuera un motor funcionando) cuyo valor será el de su fuerza electromotriz pero con signo negativo.

### 6.6 Diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un circuito (expresión general)

**A.51.** Supongamos que entre los puntos A y B de la figura circula una corriente de intensidad  $I$  constante y que entre dichos puntos hay una resistencia  $R$ , un generador y un motor (ambos con resistencia interna).



Realizad el balance energético pertinente para establecer la expresión de la diferencia de potencial  $V$  entre los puntos A y B del circuito.

Energía suministrada por el resto del circuito a los elementos existentes entre A y B:  $V \cdot I \cdot t$

Energía suministrada por el generador que hay entre A y B:  $\mathcal{E} \cdot I \cdot t$

Energía transferida al exterior por los elementos que hay entre A y B (o energía "que consumen"):  $(\mathcal{E}_M I t) + (I^2 R t) + (I^2 r t) + (I^2 r_M t)$

## 5. Corriente eléctrica

Igualando la energía suministrada con la energía transferida al exterior:

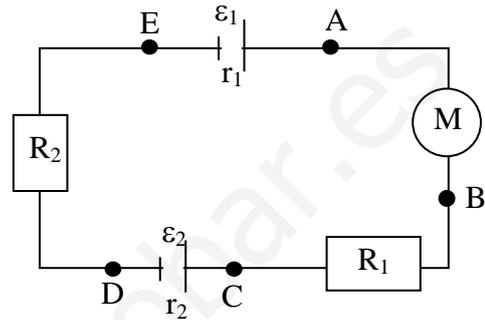
$$V \cdot I \cdot t + \varepsilon \cdot I \cdot t = (\varepsilon_M I t) + (I^2 R t) + (I^2 r t) + (I^2 r_M t) \rightarrow V = I(R + r + r_M) + \varepsilon_M - \varepsilon$$

La expresión anterior puede generalizarse como:  $V = I \cdot \sum R_i - \sum \varepsilon_i$

En la última ecuación  $R_i$  representa cualquier resistencia (exterior a un aparato o interior) y  $\varepsilon_i$  una fuerza electromotriz de un generador (positiva) o de una pila cargándose (negativa) o la fcm de un motor (negativa).

**A.52.** Dado el circuito de la figura, se pide: Hallad la diferencia de potencial  $V$  entre los puntos A y B, C y D, A y C, C y E, E y A.

Datos:  $\varepsilon_1 = 24 \text{ V}$ ,  $r_1 = 2 \Omega$ ;  $R_1 = 3 \Omega$ ;  $\varepsilon_2 = 4 \text{ V}$ ,  
 $r_2 = 2 \Omega$ ;  $R_2 = 2 \Omega$ ;  $\varepsilon_M = 10 \text{ V}$ ,  $r_M = 2 \Omega$ .



Rdo.  $V_A - V_B = 11'82 \text{ V}$ ;  $V_C - V_D = 5'82 \text{ V}$ ;  $V_A - V_C = 11'54 \text{ V}$ ;  $V_C - V_E = 7'64$ ;  $V_E - V_A = -22'18 \text{ V}$

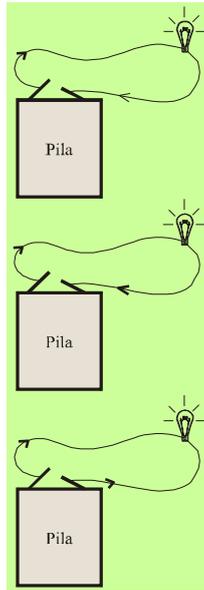
## 5. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE ELECTRICIDAD

1. Señala con una cruz cuál de las situaciones siguientes describe mejor lo que le ocurre a la corriente eléctrica:

a) Sale la corriente de un polo, pasa por la bombilla, y regresa menos corriente a la pila, entrando por el otro polo.

b) La misma corriente que sale de la pila por un polo y pasa por la bombilla, le entra a la pila por el otro polo.

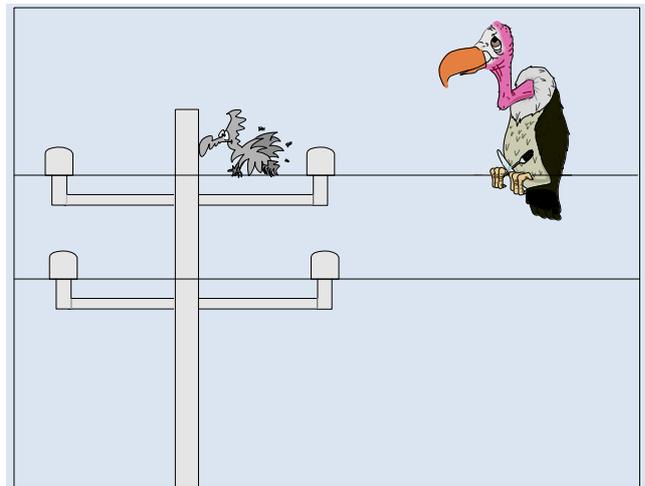
c) La corriente sale de ambos polos por la pila y se consume en la bombilla.



2. En un circuito pasan  $2 \cdot 10^{18}$  electrones/s de izquierda a derecha, por una cierta sección del hilo conductor. Indica sentido y valor de la corriente eléctrica convencional. Dato:  $q_{e^-} = -1.6 \cdot 10^{-19}$  C.  
Rdo.  $I = 0.32$  A, sentido de derecha a izquierda

3. En ocasiones para evitar que el ganado se disperse se cerca un terreno con un alambre por el que pasa una corriente eléctrica. Un excursionista afirma, sin embargo, que es capaz de coger ese cable con la mano sin notar ninguna corriente a través de su cuerpo ¿Crees que es eso posible?

4. Entre los extremos de un cable de alta tensión puede haber una diferencia de potencial de más de 300.000 V, sin embargo una persona puede suspenderse de dicho cable en el aire sin ningún peligro (algunas aves lo hacen). Claro que, en cuanto esa persona toca además tierra o un poste, queda electrocutada (lo mismo que las aves cuando se paran en un cable al lado de un poste metálico y se les ocurre picotear este último).



Utiliza la ley de Ohm para interpretar estos hechos. (Nota: la resistencia eléctrica de una persona al paso de la corriente es mucho mayor que la del pequeño trozo de cable que pueda tener entre las manos. Recordar, además que el potencial eléctrico de la tierra es  $V = 0$ ).

## 5. Corriente eléctrica

5. La gravedad de una sacudida eléctrica en un ser vivo depende de la intensidad de corriente que lo atraviese. En general se admite que una intensidad de corriente circulando por el cuerpo humano de más de 10 mA puede ocasionar graves trastornos. La resistencia de la piel al paso de la corriente depende del grado de humedad. La piel seca de una persona puede tener una resistencia eléctrica de entre  $10^4 \Omega$  y  $10^6 \Omega$ . Por el contrario si está húmeda la resistencia puede reducirse a  $10^3 \Omega$  o menos. Una persona imprudente se pone a conectar unos cables (220 V) a una lámpara sin desconectar previamente la corriente y sufre una descarga. Analiza qué puede ocurrir si la persona hace buen contacto con tierra estando o no mojada.

Rdo.  $I_{(\text{seca})} = 0,22 \text{ mA} - 22 \text{ mA}$ ;  $I_{(\text{húmeda})} = 220 \text{ mA}$  o más.

6. Analiza desde el punto de vista de la física las siguientes viñetas extraídas de una historiata de Mortadelo y Filemón (del genial dibujante Ibáñez):



7. La intensidad de un campo eléctrico uniforme en un punto es de 200 N/C. Hallad:

- La fuerza que ejercerá sobre una carga positiva de  $10^{-6} \text{ C}$ .
- El trabajo realizado por el campo al trasladarse dicha carga una distancia de 20 cm a lo largo de una línea de fuerza en el mismo sentido que el campo.
- La variación de energía del campo (variación de energía potencial eléctrica) en el apartado anterior.

Rdo. a)  $F = 2 \cdot 10^{-4} \text{ N}$ ; b)  $W = 4 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ ; c)  $\Delta E_p = - 4 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

8. Una batería de 270 V se conecta a dos placas paralelas distantes entre sí 1 mm. El campo Eléctrico entre las placas (lejos de los bordes) es constante. Hallad:

- La fuerza que ejercería sobre un electrón que está entre las placas.
- El trabajo realizado por el campo eléctrico, la variación de energía potencial y la rapidez que llevaría el electrón al golpear una de las placas, si parte del reposo desde la otra placa.

Datos: masa del electrón  $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$  kg, carga del electrón  $q = -1.6 \cdot 10^{-19}$  C

Rdo. a)  $F = 4.32 \cdot 10^{-14}$  N; b)  $W = 4.32 \cdot 10^{-17}$  J,  $\Delta E_p = -4.32 \cdot 10^{-17}$  J,  $v = 9.74 \cdot 10^6$  m/s

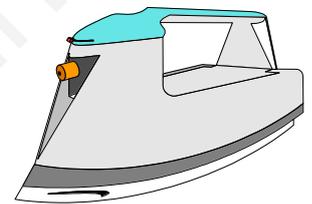
9. Hallad la intensidad del campo eléctrico en el interior de un hilo de nicromo de 30 cm y 0.25 mm de diámetro que está conectado a una pila de 1.5 V. Calculad cuánto variaría la intensidad del campo eléctrico y la intensidad de corriente si el diámetro del hilo fuera de 0.50 mm.

Rdo.  $E_1 = 5$  V/m,  $I_1 = 0.245$  A; La E no variaría ( $E_2 = E_1$ ), la I se haría el cuádruple ( $I_2 = 0.98$  A).

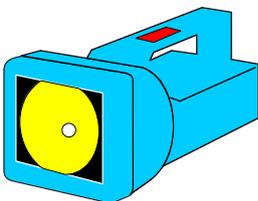
10. Una plancha eléctrica tiene una potencia de 1100 W cuando se conecta a 220 V. Se pide:

- Intensidad de corriente que pasará por ella al conectarla a 220 V.
- Gasto que supone conectarla 4 h si 1 kWh se pagase a 0.115 €.

Rdo. a)  $I = 5$  A; b) Gasto = 0.506 €



11. Una bombilla tradicional de 100 W de potencia a 220 V, suele tener una duración de 1000 h mientras que una lámpara de bajo consumo que proporcione una iluminación equivalente puede tener una potencia de 20 W a 220 V y durar unas 6000 h. Suponiendo que la primera cueste 0.6 € y la segunda 10 € y que cada kWh de energía eléctrica consumida se pague a 0.115 euros, haced un estudio comparativo aportando diversas razones a favor de una lámpara u otra.



12. Una lámpara de linterna tiene una potencia de 0.25 W cuando se conecta a 4.5 V. ¿Qué intensidad de corriente pasa por ella? ¿Por qué cuando tocamos el circuito de una linterna con la mano no notamos ningún efecto de la corriente eléctrica? Rdo.  $I = 0.056$  A

13. Una vivienda tiene contratada con la compañía eléctrica una potencia de 5 kW. En la casa existen entre otros los siguientes electrodomésticos: Tostadora de 1200 W, frigorífico de 200 W, horno eléctrico de 2000 W, TV de 100 W, plancha de 1100 W, microondas de 1200 W, lavadora que en funcionamiento normal desarrolla una potencia de 400 W y al centrifugar 1000 W. ¿Cuánta energía se consumirá en kWh al funcionar durante 45 minutos el horno eléctrico, la plancha y el televisor? Da una razón por la cual cuando estén funcionando esos tres aparatos y la lavadora no sería conveniente calentarse al en el microondas. Rdo. 2.4 kWh

14. En una bombilla antigua figura la inscripción 220 V- 100 W. Se pide:

- Intensidad de corriente que circulará por ella cuando se conecte a 125 V.
- Gasto energético en kWh cuando esté 2 h funcionando conectada a 220 V.
- Resistencia eléctrica al paso de la corriente.

Rdo. a)  $I = 0.258$  A; b) 0.2 kWh; c) 484  $\Omega$



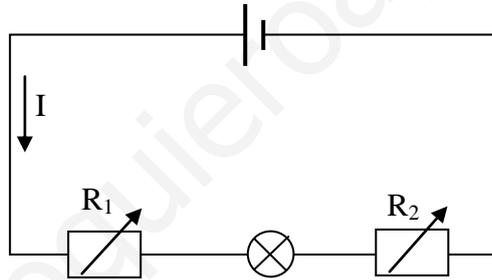
## 5. Corriente eléctrica

**15.** En algunos circuitos eléctricos se coloca un fusible que consiste en un trozo de hilo conductor de unas características tales que cuando la corriente que pasa por él supera cierto valor éste hilo se quema (funde) con lo que se interrumpe el paso de la corriente. Supongamos que al lado de un enchufe (220 V) encuentras un fusible con la inscripción  $I = 10 \text{ A}$ . ¿Podrías conectar a ese enchufe una estufa eléctrica de 2500 W?

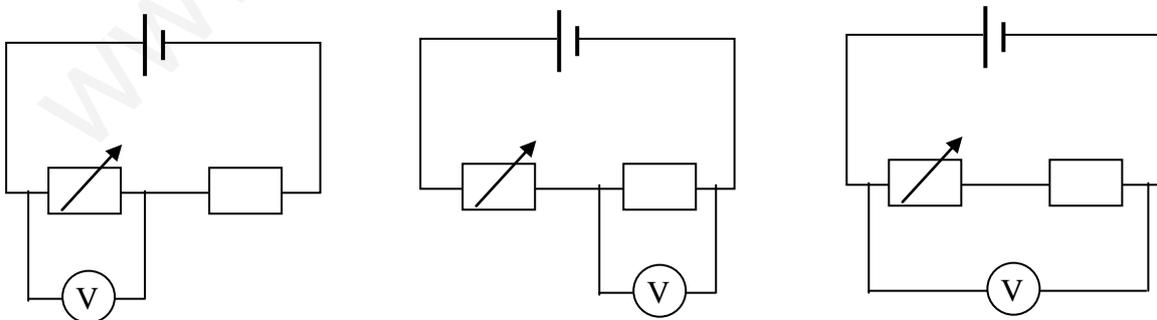
**16.** Un estudiante tiene un aparato eléctrico que lleva un fusible incorporado, pero resulta que se le fundió y luego lo perdió. Ahora quiere colocarle un fusible nuevo pero no sabe de qué intensidad máxima ha de comprarlo. Inspecciona el aparato y lo único que ve es una inscripción que pone 200 W-220 V. ¿De cuantos amperios ha de ser el fusible? Rdo. 1 A.

**17.** Una bombilla lleva una inscripción que pone 100W-220V. Eso significa que, cuando la ddp. entre sus extremos es de 220 V, la potencia que “consume” es de 100 W. Hallad la potencia que consumirá si se conecta de manera que la ddp. entre sus extremos sea de 100 V. Rdo. 20'7 W. Iluminará mucho menos. La inscripción nos permite hallar la  $R$  de la bombilla.

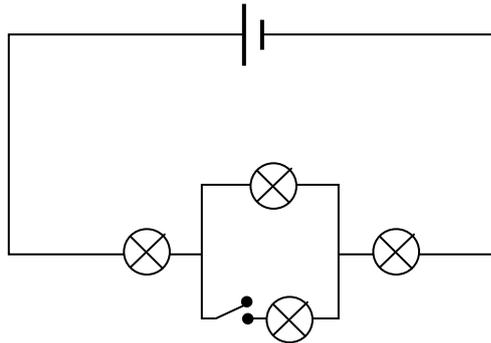
**18.** Razonad qué diferencia habrá en el brillo de la bombilla si, partiendo de dos resistencias iguales, se dobla el valor de  $R_1$  manteniendo constante el de  $R_2$ , o si se dobla el valor de  $R_2$  manteniendo constante el de  $R_1$ . Dato: El brillo de una bombilla es directamente proporcional a la intensidad de corriente que pasa por ella, es decir: a mayor intensidad, más brillo.



**19.** Razonad cómo variará la lectura del voltímetro al aumentar el valor de la resistencia variable (¿aumentará, permanecerá igual o disminuirá?) en cada uno de los siguientes circuitos.



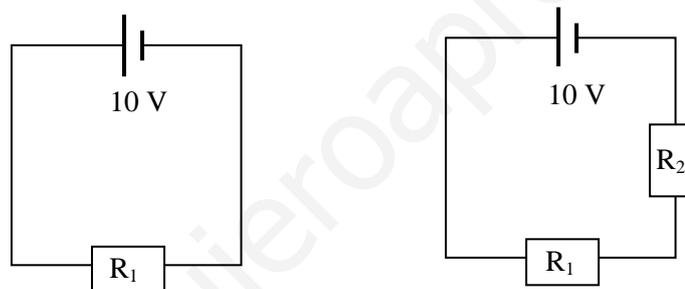
20. Las cuatro bombillas del circuito de la figura son iguales. Comparad el brillo de las bombillas, cuando el interruptor de la figura está abierto y cuando está cerrado.



21. Una pila de 4'5 V produce una intensidad en cortocircuito de 6 A. ¿Cuánta corriente producirá dicha pila cuando se le conecte un resistor de 1  $\Omega$ ? Rdo.  $I = 2'57$  A

22. Analizad la siguiente proposición argumentando si es verdadera o falsa:

“La potencia que suministra la pila al circuito es mayor en el de la derecha, porque hay un resistor más disipando potencia”



23. La batería de un automóvil tiene una fem de 12 V y cuando se encuentra conectada al motor de arranque circula una corriente de 15 A, siendo 10'8 V la ddp. entre sus bornes. Si en estas condiciones el motor de arranque desarrolla una potencia de 100 W, determinad la resistencia interna de la batería, así como la fem y la resistencia interna del motor de arranque.

Rdo.  $r_g = 0'08 \Omega$ ,  $f_{cem} = 6'67$  V,  $r_M = 0'275 \Omega$

24. Para calcular la fem y la resistencia interna de una pila, se conecta una resistencia variable (reóstato) y se mide la ddp. (o tensión) entre sus bornes con un voltímetro y la intensidad con un amperímetro. Cuando la tensión entre los bornes es de 4 V, el amperímetro marca 1 A; y cuando es de 2 V, el amperímetro marca 2 A. Se pide:

a) Hallad los valores de  $\varepsilon$  y de  $r$ .

b) Hallad la intensidad máxima que puede generar esa pila (intensidad en cortocircuito) y la tensión entre sus bornes en dicha situación.

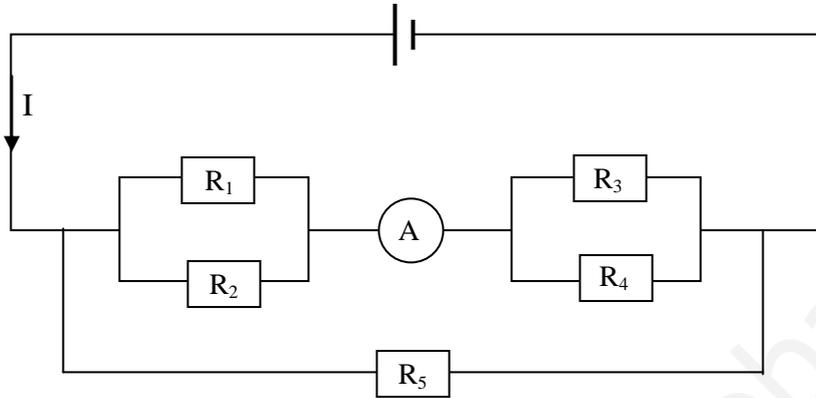
Rdo. a)  $\varepsilon = 6$  V,  $r = 2 \Omega$ ; b)  $I = 3$  A,  $V = 0$

## 5. Corriente eléctrica

**25.** A un generador de fem  $18\text{ V}$  y resistencia interna  $3\ \Omega$  se conecta una resistencia  $R$ . Comprueba, utilizando distintos valores para  $R$ , que la potencia suministrada a  $R$  es máxima cuando su valor es igual a la resistencia interna del generador.

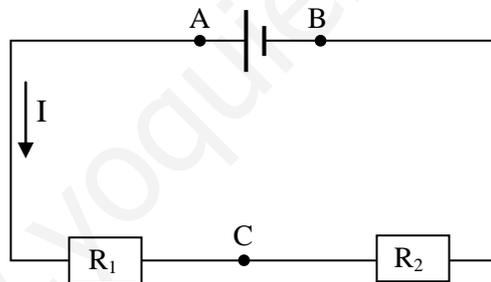
Rdo. Si  $R = r = 3\ \Omega$ ,  $P = 27\text{ W}$ . Si  $R = 2\ \Omega$ ,  $P = 2'59\text{ W}$ . Si  $R = 4\ \Omega$ ,  $P = 26'5\text{ W}$

**26.** Hallad lo que marcará el amperímetro de la figura, sabiendo que la fem y la resistencia interna de la pila son  $5\text{ V}$  y  $1\ \Omega$ , y que todos los resistores tienen una resistencia de  $2\ \Omega$ .



Rdo.  $I = 1'25\text{ A}$

**27.** Sabemos que un resistor produce una ddp. entre sus extremos. Un circuito muy utilizado para conseguir valores distintos de la ddp. que produce una pila entre sus bornes consiste en conectar dos resistores en serie con la pila, tal como se muestra en el esquema. La ddp. entre A y B, queda “dividida”, en una caída de potencial en  $R_1$ , y otra caída de potencial en  $R_2$ .



Se llama “tensión de entrada” ( $\Delta V_e$ ) a la diferencia de potencial entre A y B ( $V_A - V_B$ ) y “tensión de salida” ( $\Delta V_s$ ) a la diferencia de potencial entre C y B ( $V_C - V_B$ ). Hallad el valor de la tensión de salida. Datos:  $\varepsilon = 16\text{ V}$ ;  $R_1 = 330\ \Omega$ ;  $R_2 = 3300\ \Omega$ .

Rdo.  $V_C - V_B = 14'55\text{ V}$

**28.** Queremos usar una batería de coche ( $12\text{ V}$  de fem y resistencia interna prácticamente nula) para calentar  $2\text{ l}$  de agua de  $5$  a  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Para ello podemos utilizar un circuito que tiene un cable enrollado con una resistencia de  $100\ \Omega$  u otro con una resistencia de  $5\ \Omega$ . ¿Con cuál se calentará antes el agua? Rdo. Con la de  $5\ \Omega$  se calentará 20 veces más rápido (a igualdad de restantes condiciones).

**29.** La resistencia interna típica de una pila de 1'5 V es 0'25  $\Omega$ . Una linterna tiene 4 pilas de este tipo conectadas en serie (es decir, el polo + de una con el polo - de otra, y así sucesivamente). Cuando se conectan de este modo las pilas, el trabajo que realiza el conjunto por unidad positiva de carga que circula por el circuito es la suma de los trabajos que realizaría cada una de ellas si estuviera sola, y la resistencia interna del conjunto es la equivalente a todas las resistencias internas conectadas en serie. La bombilla de la linterna disipa, en estas condiciones, 5 W de potencia. Representad el esquema del circuito y hallad:

- La intensidad de corriente que atraviesa la bombilla.
- La ddp. entre los bornes de la asociación de pilas.
- La resistencia de la bombilla.

Rdo. Dos soluciones posibles: a)  $I_1 = 1\text{A}$ ,  $I_2 = 5\text{A}$ ; b)  $V_1 = 5\text{V}$ ,  $V_2 = 1\text{V}$ ; c)  $R_1 = 5\ \Omega$ ,  $R_2 = 0'2\Omega$

**30.** Un motor está diseñado para desarrollar una potencia mecánica de 1 CV cuando por él circula una corriente de 8 A. Sabiendo que su resistencia interna es de 1 $\Omega$ , determinad la ddp. que debemos aplicar entre sus bornes. ¿Cuál será el rendimiento del motor? Dato: 1 CV = 735 W.

Rdo.  $V = 99'875\text{ V}$ ,  $\eta = 92\%$

**31.** Se desea hallar la  $f_{cm}$  y la resistencia interna de un motor, pero solo se dispone de un calorímetro y un cronómetro. Se monta un circuito con un generador de 18 V y 0'5  $\Omega$  de resistencia interna y una resistencia de 10  $\Omega$  en serie con el motor. La resistencia se introduce dentro del calorímetro y se determina experimentalmente la potencia con que calienta el agua. Se realizan dos mediciones: una impidiendo que el motor gire (su  $f_{cm}$  es entonces 0, sólo actúa como resistencia) y otra con el motor girando a un número dado de r.p.m. Los valores obtenidos han sido:

- Cuando el motor no gira, la resistencia realiza un calor de 1.500 calorías en 6 minutos.
- Cuando gira, la resistencia realiza un calor de 120 calorías en 6 minutos.

Determinad las intensidades que circulan en cada una de las situaciones así como la resistencia y la  $f_{cm}$  del motor.

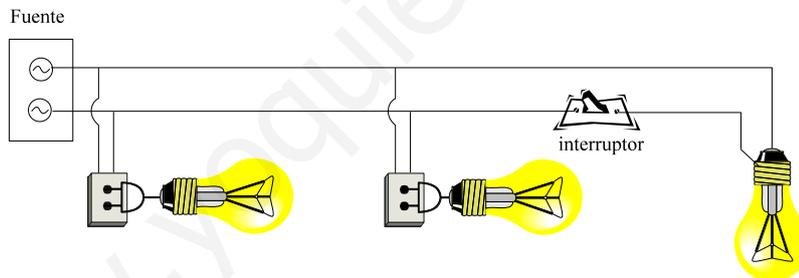
Rdo. 1) Motor no gira,  $I_1 = 1'32\text{A}$ ; 2) Motor gira,  $I_2 = 0'37\text{A}$ ,  $r_M = 3'14\Omega$ ,  $\varepsilon_M = 12'9\text{ V}$

### DE LA BOMBILLA DE INCANDESCENCIA A LAS LAMPARAS DE BAJO CONSUMO

Desde los tiempos remotos la humanidad se había ido defendiendo contra la diaria e inquietante desaparición de la luz del Sol primero con hogueras, luego con antorchas y lámparas de aceite y posteriormente con lámparas de grasa de ballena, queroseno, gas, etc. Todos estos sistemas habían proporcionado una luz mediocre y oscilante con la que combatir la oscuridad de la noche. Por otra parte, la introducción generalizada de la iluminación a gas en las fábricas en el siglo XIX no tuvo efectos sociales beneficiosos inmediatos ya que permitió a los patronos alargar unas jornadas de trabajo ya demasiado extensas.

Finalmente, ya a finales del siglo XIX, la electricidad proporcionó un sistema más seguro, mejor y más práctico. El problema era calentar con electricidad un pequeño filamento hasta hacerle emitir un resplandor incandescente. La cuestión en sí no era demasiado complicada, sin embargo muchos intentos fracasaron porque no había medio de evitar que el filamento se oxidara con el oxígeno del aire y se destruyera. En 1875, Crookes, ideó un método adecuado para hacer un vacío suficiente dentro de un recipiente de vidrio en el que se colocaba el filamento, pero los materiales utilizados eran poco satisfactorios ya que se rompían con bastante facilidad. En 1878, Thomas Edison, de 31 años, se manifestó dispuesto a abordar el problema. Su reputación como inventor era tan grande que su anuncio hizo subir la bolsa de Nueva York y Londres haciendo tambalearse las acciones de las compañías de gas encargadas de la iluminación.

Edison no fue pues el primero en inventar la luz incandescente usando una bomba de vacío y tampoco descubrió ningún principio científico básico de este sistema. Lo que hizo fue encontrar un material que funcionaba aceptablemente como filamento (hebra de algodón carbonizado) y diseñar un bulbo de vidrio adecuado en el que colocarlo. Además (lo que es aún más importante) solucionó un problema bastante más complejo: abastecer a miles de hogares con una cantidad de electricidad constante. Con ello abrió a una enorme masa de consumidores el uso de la electricidad. Edison se dio cuenta de que el sistema de distribución de la electricidad por los hogares debía de ser de tal forma que las bombillas funcionaran independientemente para que si una de ellas se fundía las demás siguieran funcionando y no se quedase el resto de la casa a oscuras. Para conseguir este efecto las distintas bombillas debían de conectarse como se indica en el esquema siguiente (conexión en paralelo).



Posteriormente se incorporaron sucesivas mejoras (filamento de tungsteno) introducción de gas nitrógeno dentro del bulbo, etc. Edison fundó una compañía de electricidad, la Edison Electric Company, que comenzó a instalar sus sistemas de iluminación en 1882. Tres años después ya habían vendido más de 200.000 lámparas. El amplio uso de las bombillas eléctricas favoreció un desarrollo rápido de sistemas para generar y distribuir energía eléctrica en millones de hogares iniciándose así la era de la electricidad. Los avances tecnológicos en este campo pronto fueron mucho más allá de la modesta bombilla de incandescencia y se incorporaron a la red eléctrica multitud de aparatos (lavadoras, tostadoras, hornos, secadoras, lavaplatos, frigoríficos, sistemas de calefacción, teléfono, radio, televisión, etc.) haciendo posible una forma muy cómoda de poder disponer de la energía necesaria para realizar muchos y diversos cambios.

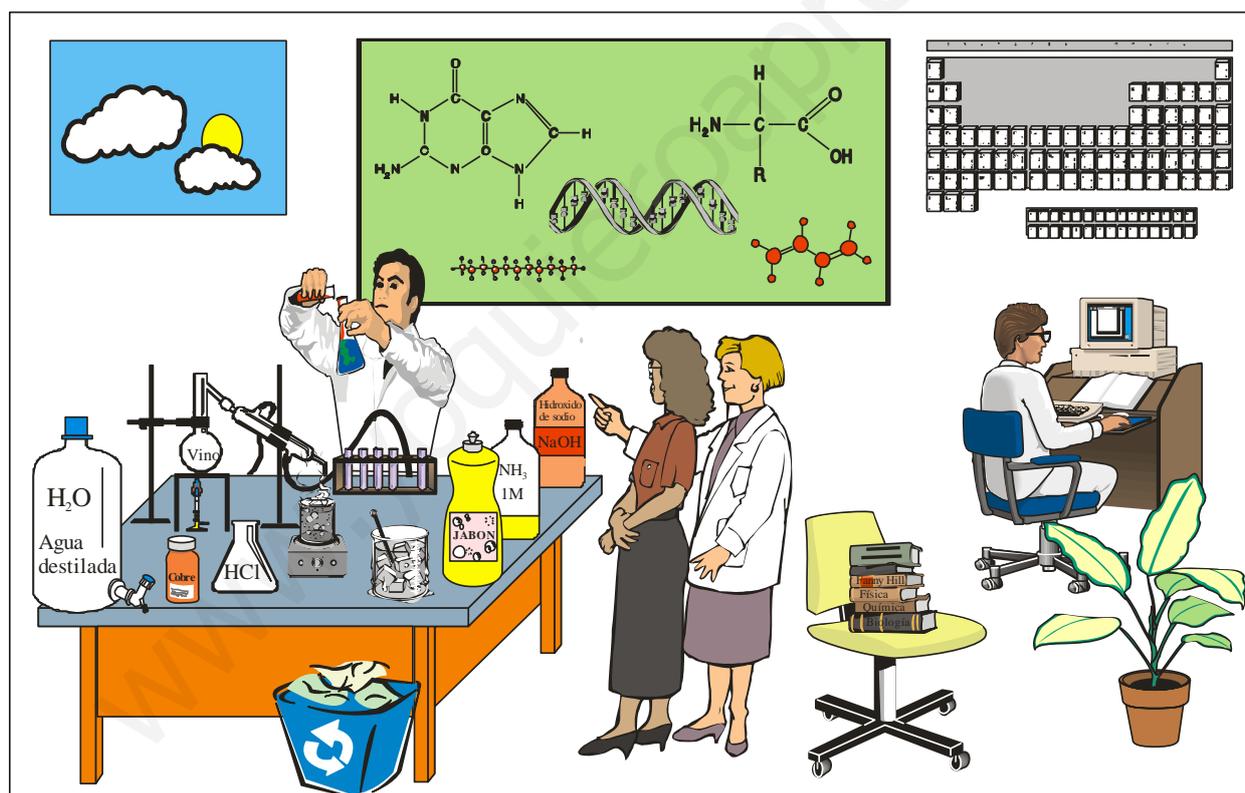
Las lámparas de incandescencia son muy poco eficientes ya que sólo utilizan para producir luz el 10% de la energía que consumen. Las denominadas bombillas de bajo consumo son mucho más eficientes y duraderas, pero cuando termina su vida útil hay que depositarlas en puntos de recogida adecuados debido a que contienen metales pesados tóxicos como el mercurio. En 2010 había ya a la venta bombillas que funcionan con leds (diodo emisor) que producen luz con una gran eficiencia energética. Su uso generalizado evitará la emisión de muchas toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## TEMA 6. TEORÍA ATÓMICO MOLECULAR DE LA MATERIA

Hasta aquí hemos estudiado los cambios en el movimiento de los objetos (mecánica) y las relaciones cuantitativas entre cambios mecánicos y no mecánicos (trabajo, calor y principio de conservación de la energía). Ahora vamos a estudiar cambios en los que desaparecen unas sustancias y aparecen otras nuevas, con propiedades distintas. Se trata de los **cambios químicos**.

**¿Qué interés puede tener estudiar los cambios en que desaparecen unas sustancias y se producen otras sustancias nuevas?**

La comprensión y el control de los cambios químicos puede permitirnos producir sustancias con unas propiedades útiles (como pinturas, medicamentos, plásticos, semiconductores, abonos, nuevos materiales, ...) o evitar la desaparición de sustancias valiosas (prevenir la corrosión de los metales, por ejemplo) o la aparición de sustancias tóxicas y contaminantes (como los gases responsables de la lluvia ácida o del calentamiento de la atmósfera).



En otros casos, las reacciones químicas pueden ser utilizadas para realizar trabajo y/o calor sobre otros sistemas y producir cambios mecánicos o eléctricos (motores de gasolina, baterías, ..). En definitiva, si miramos a nuestro alrededor es difícil encontrar algún objeto que no haya sufrido cambios químicos para llegar al estado en que lo vemos. Incluso, por supuesto, en nuestro propio cuerpo se producen miles de reacciones químicas continuamente que hacen que estemos vivos y sanos, es decir, que “funcionemos” adecuadamente. La bioquímica busca comprender y controlar las reacciones químicas que ocurren en los seres vivos, lo que permite, entre otras cosas, luchar contra muchas enfermedades.

## 6. Teoría atómico molecular

### *A.1. ¿Qué podemos hacer para avanzar en nuestra comprensión acerca de la naturaleza de los cambios químicos, de cómo se producen?*

Los distintos materiales que podemos encontrar a nuestro alrededor (sólidos, líquidos o gaseosos) tienen unas propiedades que son comunes a todos ellos (como masa, volumen, carga eléctrica) y otras propiedades que son diferentes (temperaturas de fusión y de ebullición, conductividad térmica y eléctrica, elasticidad, forma de reaccionar con los ácidos, color, ...). Explicar cómo es posible que aparezcan y desaparezcan sustancias (el cambio químico) exige, en primer lugar, que expliquemos a qué se deben las propiedades de los materiales, tanto las comunes a todos, como las diferentes. Esto conduce a la cuestión de cómo son los materiales “por dentro”, qué es lo que hace que tengan al mismo tiempo unas propiedades comunes y otras diferentes. Si comprendemos cómo son las sustancias por dentro, podremos dar el paso siguiente y plantearnos qué puede ocurrir en una reacción química para que aparezcan sustancias que no estaban al principio y desaparezcan (del todo o en parte) sustancias que estaban presentes.

Así, pues, en este tema nos vamos a plantear: *¿Cómo son los materiales por dentro? ¿Por qué existe una diversidad tan grande de materiales? ¿Cómo pueden desaparecer y crearse en las reacciones químicas?*

Sobre estas cuestiones ya tenéis algunos conocimientos. La mayoría de las personas “saben” que los materiales de los que están hechos los objetos están formados por partículas muy pequeñas llamadas átomos y moléculas. Sin embargo, es muy probable que no puedan justificar por qué estamos totalmente seguros de su existencia. Esta situación es lógica, pues no es evidente que los objetos estén formados por átomos y moléculas. Incluso, parece más bien lo contrario: que los objetos se puedan cortar en trozos más y más pequeños hasta un límite que sólo viene impuesto por el grosor del instrumento cortante. Parece que la materia es “continua” y no que esté formada por partículas indivisibles.

En la primera parte de este tema trataremos de justificar por qué creemos en la existencia de átomos y moléculas. Una vez establecida dicha existencia, en la segunda parte, desarrollaremos algunas de las consecuencias de la hipótesis atómico-molecular que han hecho posible la comprensión y el control de los cambios de unas sustancias en otras (las reacciones químicas).

### **1. ESTABLECIMIENTO DE LA ESTRUCTURA ATOMICA DE LA MATERIA**

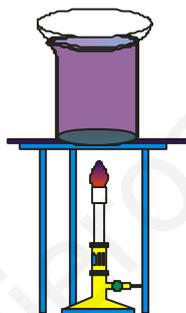
Ya hemos dicho que los materiales tienen propiedades comunes y propiedades diferentes. Si queremos investigar cómo es la materia “por dentro”, es decir, cómo es la estructura interna de los materiales, parece más sencillo empezar por tratar de explicar las propiedades comunes de todos los materiales. Sabemos que tanto los sólidos como los líquidos y los gases tienen masa (y, por tanto, pesan), ocupan un volumen (muy poco variable en sólidos y líquidos y muy variable en los gases) y que todos pueden ser electrizados (la carga eléctrica es una propiedad general de la materia). Los gases, aunque sean distintos, tienen un comportamiento físico muy parecido entre ellos (en cambio, los sólidos y los líquidos presentan una enorme variedad en sus propiedades diferenciadoras (dureza, conductividad, elasticidad, ...) por lo que no es extraño que las primeras concepciones científicas sobre la estructura de los materiales se generaran y probaran en la explicación del comportamiento físico de los gases.

### 1.1. Contribución del estudio de los gases al establecimiento de la estructura de la materia. ¿Cómo deben estar formados los gases "por dentro" para comportarse como lo hacen?

Cuando se encuentran en fase gaseosa las sustancias presentan un comportamiento más simple. No es de extrañar pues, que el estudio de las propiedades de los gases esté íntimamente ligado al desarrollo de las concepciones acerca de la estructura de la materia. Comenzaremos por una breve descripción de dicho comportamiento.

*A.2. Citad sustancias que conozcáis, las cuales se encuentren ordinariamente en forma de gas y elaborad una lista describiendo todas las propiedades que se atribuyen a los gases.*

Podemos pensar en sustancias como oxígeno, helio, dióxido de carbono, hidrógeno, etc. El hecho de que la mayoría de estas sustancias no se puedan ver, puede llevar a pensar a algunas personas que todos los gases son aire (que tampoco se puede ver). No obstante, el aire es en si mismo una mezcla de distintos gases (nitrógeno, oxígeno y otros) . El amoniaco, el agua, el butano, el hidrógeno, el helio, el sulfuro de hidrógeno, etc., son sustancias que en condiciones ordinarias se encuentran en fase gaseosa y que tienen propiedades diferentes entre ellas y con el aire. Además, es posible observar algunos gases coloreados como, por ejemplo, el yodo en fase gaseosa que es de color violeta (atención, si se hace la experiencia utilizad una cantidad mínima de yodo y dentro de una campana extractora).



A pesar de la variedad existente, la mayoría de los gases presentan toda una serie de propiedades comunes, entre las que se encuentran las siguientes:

- ✓ Se pueden recoger y almacenar.
- ✓ Se mezclan fácilmente entre si.
- ✓ Se comprimen y se expanden fácilmente.
- ✓ Ejercen presión sobre las paredes del recipiente que los contiene.
- ✓ Una muestra de gas tiene una masa definida pero no un volumen ya que los gases ocupan la totalidad del recipiente que los contiene y, por eso, han de conservarse en recipientes herméticamente cerrados.
- ✓ En el caso de que el recipiente que contiene un gas tenga alguna pared móvil (por ejemplo un émbolo) se observa que, al calentar el gas, dicha pared se mueve aumentando así el volumen (el gas se dilata). En caso de que todas las paredes sean fijas y el recipiente hermético, al calentar, el volumen no varía pero aumenta la presión que se ejerce sobre las paredes.

*A.3. Diseñad experimentos sencillos para poner de manifiesto las propiedades enumeradas.*

La **difusibilidad** de los gases o tendencia a ocupar todo el volumen del recipiente que los contiene, puede ponerse en evidencia mediante la conexión de dos recipientes, uno de los cuales contenga un gas coloreado y el otro simplemente aire. Al conectar los dos recipientes se puede comprobar como al cabo del tiempo el que contenía solo aire comienza a colorearse. El uso de bombas de aire para bicicleta o de jeringuillas taponadas, sirve para mostrar la compresibilidad de los gases ya que es posible constatar la gran disminución de volumen que podemos conseguir sin más que presionar

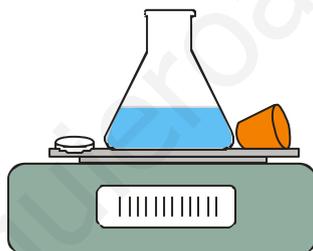
## 6. Teoría atómico molecular

sobre el émbolo manteniendo cerrado el orificio de salida. Resulta espectacular la utilización de globos colocados cerca de focos caloríficos, para comprobar cómo al aumentar la temperatura, el aire (mezcla de gases) se dilata y aumenta sensiblemente el volumen del globo.

Más dificultades plantea la constatación de la variación de la presión con la temperatura (a volumen constante), en este sentido podemos pensar en el aumento de la presión en las ruedas de los automóviles tras circular algún tiempo, pero una visión directa de este aumento de presión con la temperatura, puede conseguirse fácilmente colocando una moneda sobre el gollete de una botella vacía (mojándolo previamente para hacer un cierre hermético). Para ello y una vez puesta la moneda, se rodea la botella con las manos para elevar así la temperatura, con lo que rápidamente se observa cómo el aumento de presión interior (que se hace mayor que la atmosférica) provoca que la moneda se levante; escapa así algo de aire disminuyendo la presión, con lo que la moneda cae de nuevo y se repite otra vez el proceso (mientras que consigamos elevar la temperatura).

*A.4. Algunas personas piensan que los gases no pesan. Otras dicen que eso no es verdad ya que hay algunos, como el butano que sí pesan. Diseñad una experiencia sencilla para demostrar que los gases sí pesan.*

Se pueden llevar a cabo distintas experiencias. La más clásica consiste en pesar un balón y luego meterle aire con una bomba y volver a pesarlo. También podemos pesar un matraz abierto con agua y una pastilla efervescente (fuera del matraz) para, a continuación, echar la pastilla en el agua y comprobar cómo, conforme se va desprendiendo gas, el peso va disminuyendo, cosa que no ocurre si el matraz se cierra herméticamente (mientras no salte el tapón debido a la presión).



Después de haber descrito algunas de las propiedades comunes de los gases, podemos buscar un modelo que sea capaz de explicar todas ellas.

*A.5. Elaborad posibles modelos acerca de cómo están hechos los gases, que puedan explicar satisfactoriamente por qué estos se difunden tan fácilmente y por qué ocupan todo el volumen del recipiente que los contiene.*

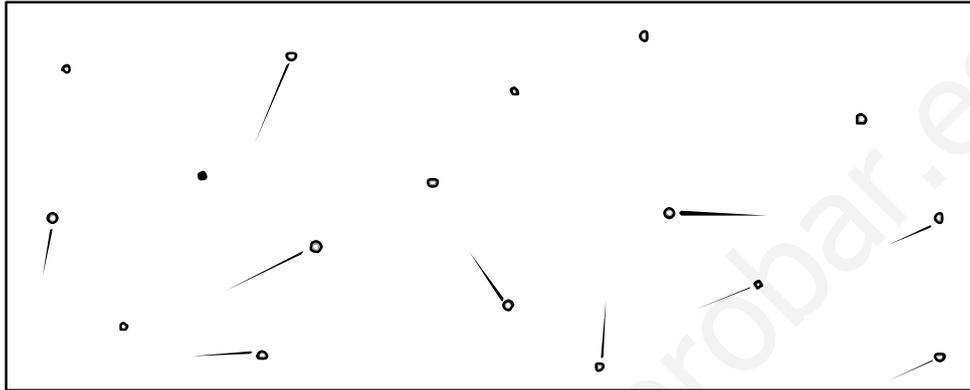
Un posible modelo sería suponer que cualquier sustancia en fase gaseosa se halla formada por pequeñas partículas que se están moviendo continuamente de forma totalmente desordenada.

*A.6. Utilizad el modelo anterior para explicar por qué los gases se pueden comprimir tanto, se pueden mezclar tan fácilmente unos con otros, ejercen presión sobre las paredes del recipiente donde se encuentran, al calentarlos se dilatan o, si el volumen del recipiente no puede variar, aumenta la presión en el interior del recipiente.*

La difusión lleva a pensar en partículas con un movimiento muy rápido y desordenado, la fácil compresibilidad permite suponer que las partículas ocupan solo una pequeña fracción del volumen, o, dicho de otro modo: que el tamaño de las partículas es despreciable frente al volumen total; el hecho de que ejerzan presión sobre las paredes se explica por los choques contra ellas de trillones de partículas en continuo movimiento; finalmente, el que al aumentar la temperatura se produzca una

dilatación o un aumento de la presión se puede explicar admitiendo que la temperatura está relacionada con la velocidad de las partículas (concretamente con la energía cinética media de las partículas), y, por tanto, con la fuerza que producen sobre las paredes del recipiente al chocar contra ellas. Todo ello describe un modelo denominado **modelo cinético** para los gases, según el cual:

**Todos los gases están formados por muchísimas partículas o corpúsculos extraordinariamente pequeños en continuo movimiento caótico y separados entre ellos por grandes distancias o espacios huecos (en comparación a su tamaño).**



Tan sólo en  $1 \text{ cm}^3$  de aire a la presión atmosférica (como un dado de jugar al parchís) sabemos que existen más de un trillón (un millón de millones de millones) de partículas correspondientes a los distintos gases que lo forman, pero aún así, la mayor parte de ese  $\text{cm}^3$  se encuentra vacío.

Otra característica del modelo cinético de los gases es que las partículas que forman un gas no sufren en sí mismas dilataciones ni contracciones ni tampoco cambios de fase (no se licuan ni se hacen gas). Se trata de corpúsculos con una masa definida y prácticamente puntuales (de tamaño despreciable en comparación con el del recipiente). De hecho, si fueran las propias partículas de un gas las que se dilataran al calentarlo, cabría esperar, por ejemplo, que al aumentar su tamaño se difundieran más lentamente al pasar a través de un orificio muy pequeño; sin embargo, ocurre justamente lo contrario, mostrando que la masa y el tamaño de las partículas que forman el gas no cambian lo que varía es la velocidad con la que se mueven, y si se mueven más deprisa también se difundirán más rápidamente.

Si el modelo elaborado para los gases es correcto, deberá servir para realizar predicciones sobre la variación de algunas propiedades, que se puedan cuantificar y comprobar experimentalmente. Esto es lo que vamos a ver a continuación:

**A.7. Partiendo del modelo propuesto para los gases, indicad, siempre a título de hipótesis, de qué factores dependerá la presión de un gas encerrado en un recipiente y la forma en que influye cada uno de ellos.**

- ✓ La presión,  $P$ , ha de aumentar con la temperatura,  $T$ , si permanecen constantes el volumen,  $V$ , y el número de partículas,  $N$ , ya que un aumento de la temperatura implica un aumento de la velocidad y, consecuentemente, un aumento de la frecuencia e intensidad de los choques de estas contra las paredes. Concretamente, se puede sugerir una relación del tipo:  $P/T = \text{cte.}$  (para  $N$  y  $V$  constantes). Si los alumnos desconocen la escala absoluta de temperaturas, el desarrollo de esta investigación permitirá su introducción.

## 6. Teoría atómico molecular

- ✓ Si  $N$  y  $T$  permanecen constantes, podemos esperar que la presión disminuya al aumentar el volumen, debido a que en ese caso deberá disminuir la frecuencia de los choques sobre cada  $\text{cm}^2$  de superficie. Por el contrario, si el volumen disminuye, aumentará la densidad de partículas y con ella la frecuencia de los choques. La relación más sencilla que contempla las consideraciones anteriores es:  $\mathbf{P \cdot V = cte}$ . (para  $N$  y  $T$  constantes).
- ✓ A igualdad de  $V$  y de  $T$ , cabe esperar que la presión aumente con  $N$  ya que en ese caso aumentará el número de choques por unidad de tiempo y de superficie. Se puede proponer entonces la relación:  $\mathbf{P/N = cte}$ . (para  $V$  y  $T$  constantes).

La relación matemática más sencilla en la que quedan plasmadas las tres hipótesis que acabamos de enunciar es:

$$P = C \cdot \frac{N \cdot T}{V}$$

En la ecuación anterior  $C$  es una constante de proporcionalidad, común para todos los gases.

La contrastación de las hipótesis planteadas requiere la realización de experiencias rigurosas. En la actividad siguiente se plantea la comprobación experimental de la segunda de dichas hipótesis.

**A.8.** *Diseñad un montaje experimental que permita contrastar la relación supuesta entre la presión y el volumen ocupado por un gas cuando se mantienen constantes el número de partículas y la temperatura.*

Si mantenemos constantes  $T$  y  $N$ , la ecuación anterior se convierte en:  $P = C' \cdot \frac{1}{V}$

(donde  $C'$  es una nueva constante).

Para comprobar si la relación entre  $P$  y  $V$  es así, podemos pensar en encerrar una cierta cantidad de aire en un recipiente graduado (que mida el volumen) y con un émbolo que pueda subir y bajar fácilmente de forma que se pueda medir el volumen en cada caso. Después se trataría ir provocando cambios en el volumen ocupado (manteniendo constantes la temperatura y la cantidad de gas) y medir la presión en cada caso. De esta forma obtendríamos una serie de valores de volúmenes de gas  $V$  y de sus correspondientes presiones  $P$ . Si la gráfica de  $P$  frente a  $1/V$  nos saliera una línea recta, el resultado apoyaría la validez de la ecuación anterior.

Un recipiente que cumple esas características y resulta fácil de adquirir, es una jeringuilla. La boca de la misma se puede cerrar soldándola a la llama (si es de plástico), colocándole un poco de pegamento (y dejándolo secar) o simplemente, presionándola contra una superficie plana de goma de forma que no salga nada de aire. Después bastará colocar con cuidado encima del émbolo y sucesivamente pesas iguales.

Pueden utilizarse jeringuillas de 10 ml (farmacias) y pesas cilíndricas de las existentes en la mayoría de los laboratorios escolares de física. Partiremos de un volumen cualquiera (con la jeringuilla ya cerrada) al que llamaremos  $V_0$  y se encontrará a una presión  $P_0$  que será igual a la presión que ejerce la atmósfera al otro lado del émbolo (1 atm). Si colocamos una o varias pesas sobre el émbolo, apreciaremos que éste baja hasta que la presión del aire en el interior se hace igual a la atmosférica más la debida a las pesas. Hay que tener en cuenta la fricción (se puede utilizar algún lubricante pero, en todo caso, conviene presionar ligera y rápidamente varias veces con la mano hasta constatar que la posición del émbolo no varía).

Normalmente es necesario que el profesor haga algunas consideraciones sobre los valores de la presión tomados, puesto que los alumnos suelen tener dificultades en el manejo de valores relativos: si cada pesa supone un incremento de presión  $\Delta P = 1$  (unidad arbitraria) y la presión atmosférica es  $P_0$ , los valores sucesivos de la presión serán:  $P_0+1$ ,  $P_0+2$ ,  $P_0+3$ , etc. Ahora basta tomar  $P_0$  como origen en el eje de presiones (es decir, desplazar la escala) para poder considerar como valores de la presión 1, 2, 3, etc., y rellenar una tabla como la siguiente:

P (atm)	Volumen ocupado (ml)	$1/V$ ( $\text{ml}^{-1}$ )
$P_0$	$V_0$	$1/V_0$
$P_1$	$V_1$	$1/V_1$
$P_2$	$V_2$	$1/V_2$
$P_3$	$V_3$	$1/V_3$
$P_4$	$V_4$	$1/V_4$

**A.9.** Realizad la experiencia diseñada y analizad los resultados obtenidos.

Si la hipótesis sobre la relación existente entre la presión  $P$  y el volumen  $V$  (a temperatura y número de partículas constantes)  $P = C \cdot (1/V)$  es cierta, cuando se representen gráficamente los valores de  $P$  frente a los valores  $1/V$ , los puntos obtenidos se deben ajustar, dentro de los límites de fiabilidad experimental, a una línea recta. Los resultados obtenidos, si se han adoptado las precauciones indicadas, confirman la hipótesis de una forma bastante aceptable.

**A.10.** Se ha medido el volumen ocupado por una cierta cantidad de gas a temperatura constante, para distintas presiones, obteniendo la siguiente tabla de valores.

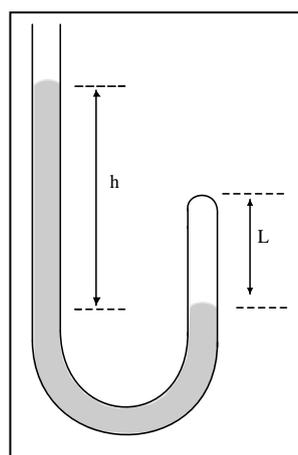
P (atm)	9	15	21	45	63
V (l)	70	42	30	14	10

Proceded al análisis de estos resultados.

**A.11.** En un experimento original, Boyle midió la longitud " $L$ " (directamente proporcional al volumen) de una columna de gas, en función de la presión ejercida por una columna de mercurio " $h$ " (ved figura adjunta). Con este procedimiento obtuvo la tabla siguiente:

L (cm)	50'0	45'0	40'0	35'0	30'0
h (cm)	0'0	8'3	18'0	32'0	50'0

(La presión atmosférica se midió en todos los casos y resultó ser de 75 cm de mercurio). Proceded al análisis de los resultados obtenidos.



## 6. Teoría atómico molecular

**A.12.** *Se ha procedido a medir el volumen ocupado por una masa dada de un gas a presión constante, para distintas temperaturas, obteniendo los valores de la tabla.*

T (°C)	0	10	20	30	40	50	60
V (cm <sup>3</sup> )	9100	9430	9770	10100	10400	10800	11100

*Analizad dichos resultados.*

Un aspecto interesante es la extrapolación de la gráfica obtenida a partir de los datos proporcionados en la tabla anterior para ver a qué temperatura el volumen del gas se haría cero (lo que sugiere la existencia de un “cero absoluto” de temperatura). Aunque, obviamente, éste proceso sea irrealizable (ya que a cierta temperatura finita todo el gas se condensará formando un líquido), no por ello esta extrapolación deja de ser indicativa de la existencia de un límite inferior de temperatura, predicho también al considerar otras situaciones físicas. Así pues, existe abundante evidencia experimental acerca del carácter de límite inalcanzable que posee el cero absoluto (-273 °C).

**A.13.** *La expresión  $PV = CNT$ , conocida como “ley de los gases perfectos”, no se cumple en realidad más que de forma aproximada, habiéndose observado que cuánto mayor es la presión a que se somete un gas, menos se ajusta su comportamiento a dicha ecuación. Tratad de justificar este hecho.*

El hecho de que basándonos en el modelo cinético-corpúscular podamos, no sólo justificar las propiedades observadas de los gases sino también hacer predicciones que luego resultan confirmadas mediante la experimentación, contribuye a su aceptación como una imagen aproximada de cómo son los gases. No obstante, es preciso tener en cuenta que en la obtención de la ecuación de los gases hemos hecho algunas simplificaciones como, por ejemplo, suponer que las partículas de gas no ocupan ningún volumen y que las únicas fuerzas que se ejercen entre ellas son debidas a los choques (de ahí el nombre de ley de los gases “perfectos” con el que también se la conoce). Conviene tener en cuenta que si se aumenta lo bastante la presión a que se somete un gas, las condiciones consideradas en el modelo se alteran: las partículas se juntan más entre sí y ya no puede suponerse que el volumen ocupado por ellas sea despreciable en comparación con el volumen del recipiente, ni tampoco que sólo se ejerzan fuerzas entre ellas cuando chocan unas con otras. La actividad permite constatar también el hecho de que cada expresión tiene un campo de validez impuesto por las condiciones en que se ha obtenido.

**A.14.** *Una jeringuilla herméticamente cerrada contiene 10 cm<sup>3</sup> de aire a la presión atmosférica (1 atm) y a una temperatura de 25° C. Se pide:*

- La presión que ejerce sobre las paredes el aire contenido cuando el volumen se reduzca a 3 cm<sup>3</sup> a la temperatura de 25°C.*
- El volumen que ocupará el aire contenido si, dejando libre el émbolo desde su posición inicial, (10 cm<sup>3</sup>) elevamos la temperatura a 50°C.*

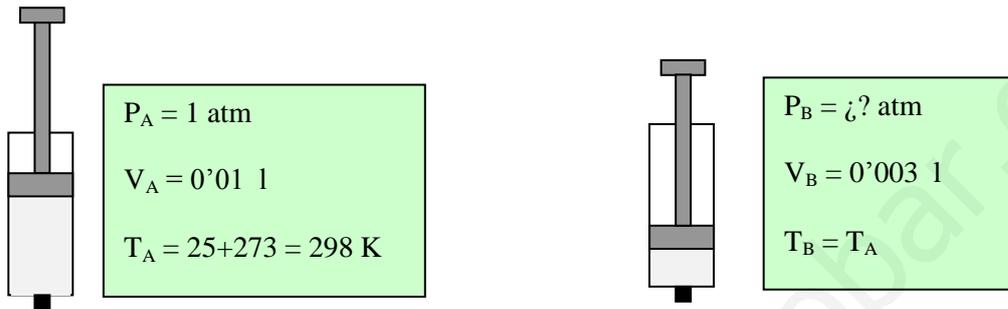
Disponemos de una muestra de gas (N partículas) en cierto estado caracterizado por los valores de P, V y T (a las que se denomina variables de estado del gas). Estos valores están relacionados de forma que, para una muestra dada de gas, cumplen :  $PV/T = CN = \text{constante}$ .

Saber que las propiedades que caracterizan el estado de una muestra dada de un gas (P,V y T) están relacionadas ente sí de manera que en cualquier estado, PV/T debe valer siempre lo mismo, permite hacer predicciones sobre el valor de alguna de dichas variables de estado si conocemos el valor de las otras. Es decir, si provocamos alguna transformación en el sistema (el gas encerrado) de manera que cambie de un estado A, caracterizado por P<sub>A</sub>, V<sub>A</sub> y T<sub>A</sub>, a otro estado B,

caracterizado por  $P_B$ ,  $V_B$  y  $T_B$ , los valores en B no pueden ser cualesquiera, sino que han de cumplir que:

$$\frac{P_A \cdot V_A}{T_A} = \frac{P_B \cdot V_B}{T_B}$$

**En el caso a)** el sistema pasa de un estado A, en el que conocemos el valor de todas las variables, a un estado B, en el que conocemos el volumen y la temperatura absoluta ( $V_B$  y  $T_B$ ) y deseamos hallar la presión,  $P_B$ . Es necesario imaginar físicamente la transformación, para lo que conviene expresarla gráficamente:



$P_B$  no puede ser cualquiera, sino que debe cumplir que:

$$\frac{P_A \cdot V_A}{T_A} = \frac{P_B \cdot V_B}{T_B}; \text{ y como } T_A = T_B, \text{ tendremos: } P_B = P_A \frac{V_A}{V_B} = 1 \cdot \frac{0'01}{0'003} = 3'3 \text{ atm.}$$

Si analizamos el resultado **literal** anterior, nos daremos cuenta de que, además de ser dimensionalmente homogéneo, contempla el hecho de que, por ejemplo, cuanto menor fuese  $V_B$  mayor resultaría la nueva presión, y que si  $V_A$  y  $V_B$  valiesen lo mismo, la presión tampoco cambiaría y obtendríamos  $P_B = P_A$ .

**En el caso b),** como el émbolo está libre, cuando la temperatura del gas es de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , éste ha pasado del estado A a un estado, C, en que la presión es la misma que en A ( $1 \text{ atm}$ ), la temperatura  $T_C = 50 + 273 = 323 \text{ K}$  y el volumen será  $V_C$ , que es lo que buscamos. Como sabemos,  $V_C$  no puede tener cualquier valor, sino que debe cumplir que:

$$\frac{P_A \cdot V_A}{T_A} = \frac{P_C \cdot V_C}{T_C}; \text{ y como } P_A = P_C, \text{ tendremos: } \frac{V_A}{T_A} = \frac{V_C}{T_C}; \text{ y despejando } V_C:$$

$$V_C = V_A \frac{T_C}{T_A} = 0'01 \cdot \frac{323}{298} = 0'0108 \text{ litros} = 10'8 \text{ cm}^3$$

Si analizamos el resultado literal anterior, nos daremos cuenta de que, además de ser dimensionalmente homogéneo, contempla el hecho de que, por ejemplo, cuanto mayor fuese  $T_C$  mayor resultaría el nuevo volumen y que si  $T_A$  y  $T_C$  valiesen lo mismo el volumen tampoco cambiaría y obtendríamos  $V_C = V_A$ .

**A.15.** *El estudio de la estructura de la materia lo hemos realizado hasta aquí a partir del comportamiento de los gases. ¿En qué medida podemos aceptar que la existencia de partículas (átomos), es una característica de toda la materia y no sólo de los gases?*

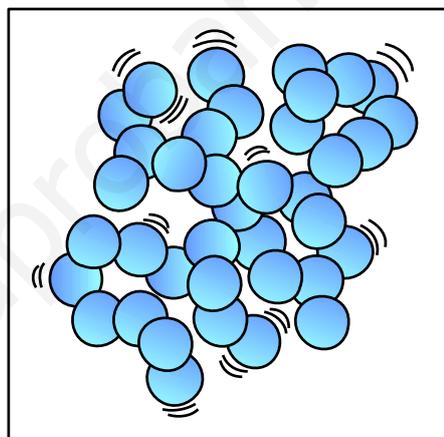
## 6. Teoría atómico molecular

Para contestar a la cuestión planteada podemos analizar algunas propiedades como las siguientes:

- ✓ Líquidos y sólidos, aunque muy poco, también se pueden comprimir y, en general, se dilatan con el calor.
- ✓ Muchas sustancias que en condiciones ambientales habituales se encuentran en forma de líquido, sólido o gas, pueden sufrir cambios de fase reversibles sin dejar por ello de ser la misma sustancia (como ocurre, por ejemplo, con el agua).
- ✓ Existen sustancias que en fase líquida se pueden mezclar fácilmente unas con otras. Así por ejemplo, al echar una gota de tinta azul a un vaso con agua, vemos cómo la tinta se va extendiendo hasta que el color azul de la misma afecta a toda la disolución.
- ✓ En algunos casos (como ocurre con el agua y el alcohol ) al adicionar dos volúmenes  $V_1$  y  $V_2$  de dos líquidos, el volumen resultante es apreciablemente menor que la suma de los volúmenes.
- ✓ Algunos sólidos como la sal común, azúcar, sulfato de cobre, etc., se pueden disolver fácilmente en líquidos como el agua extendiendo a todas las partes de la disolución su presencia (color, sabor, etc.).

La existencia de las propiedades anteriores parece apoyar la idea de que los sólidos y los líquidos están formados por las mismas partículas que los gases, aunque en estos casos, se mantienen unidas debido a fuerzas de atracción entre ellas (que no tendrían prácticamente influencia entre partículas moviéndose a grandes velocidades como es el caso de los gases).

En la figura adjunta se ha representado una pequeña parte de un líquido en la que se aprecian las partículas y los huecos que existen entre ellas, que les permiten adaptarse a la forma del recipiente.



Esta unión entre las partículas permitiría movimientos de vibración más o menos amplios según la temperatura (lo que explicaría las dilataciones que pueden sufrir muchos sólidos y líquidos al calentarse). Por último el que un líquido pueda difundirse en otro y cambiar de forma según el recipiente, sugiere la existencia de fuerzas atractivas entre las partículas pero de menor intensidad que en los sólidos, así como la existencia de huecos entre ellas de modo que, además de vibrar, puedan desplazarse ocupando alternativamente esos huecos y generando otros nuevos. En cuanto a los cambios de fase, podemos entender que, por ejemplo, un gas se pueda convertir en líquido (sin dejar de ser la misma sustancia) si admitimos que al enfriarlo o comprimirlo hacemos que las partículas se aproximen lo suficiente o vayan tan lentas que las fuerzas de atracción entre ellas tengan un efecto observable. Análogamente puede ocurrir que cuando un sólido se calienta, las vibraciones de las partículas se hacen más intensas, la distancia entre ellas aumenta, algunos enlaces se rompen (generando huecos) de modo que se pasa a fase líquida. Si se sigue elevando la temperatura la energía de muchas partículas puede ser suficiente como para escapar al medio que rodea a la sustancia y ésta pasaría a fase gaseosa.

Los razonamientos anteriores también dejan abiertas algunas preguntas como por ejemplo: ¿cómo son las partículas materiales?, ¿cuál es la naturaleza de esas fuerzas de atracción?, ¿cómo pueden enlazarse las partículas entre ellas?, que trataremos de contestar en los temas siguientes.

La hipótesis atómica de la materia explica el comportamiento de la materia en fase gaseosa y parece válido admitir que toda la materia, y no sólo los gases, está formada por partículas. La potencia de esta hipótesis se mostrará cuando intentemos abordar la complejidad de los cambios químicos.

## 1.2. Contribución de la información química acumulada en la época de Dalton al establecimiento de la estructura atómica de la materia

El establecimiento de la estructura atómico-molecular de la materia, es el resultado, básicamente, del estudio del comportamiento de los gases y de la gran cantidad de información química que había acumulada en la época de Dalton (1766-1844). Esta adquisición de información química ha estado asociada a la puesta a punto de técnicas básicas de laboratorio y a la elaboración de conceptos como los de elemento, compuesto etc. Comenzaremos por considerar dichos conceptos fundamentales que, aunque ya conocidos, se prestan a algunas confusiones.

### 1.2.1. La variedad de los materiales: Mezclas, sustancias, sustancias simples, compuestos y elementos

Empíricamente podemos identificar una **sustancia** química porque tiene una serie de propiedades que toman valores únicos y definidos que permiten identificarla y distinguirla de otras. Entre esas propiedades cabe citar la densidad, la temperatura de fusión, la temperatura de ebullición (temperatura a la que hierve), la solubilidad en otras sustancias, su dureza, si reacciona o no con otras sustancias determinadas, etc. Así por ejemplo, una sustancia que a la presión de 1 atm, funde a 0°C, hierve a 100 °C, que a 1 atm de presión y 4°C de temperatura tiene una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>, que no conduce la corriente eléctrica, y en la que se disuelven bien algunas sales (como el cloruro de sodio) y mal las grasas (aceite, por ejemplo) no cabe duda de que se trata de agua.

Durante mucho tiempo se conocían sustancias como el hierro, el azufre, el cobre, etc., que resistían cualquier intento de obtener a partir de ellas otras sustancias diferentes (es decir, de descomponerlas). Sin embargo esto no ocurría con otras. Así, por ejemplo, la puesta a punto de la técnica de la electrólisis, permitió conocer en el siglo XIX que algunas sustancias (hasta entonces tenidas por elementos) estaban en realidad formadas por la combinación de otras. A las sustancias como el hierro, azufre, cobre, oxígeno, hidrógeno, etc., de las que no era posible obtener otras, se las llamó **sustancias simples** y a las sustancias como el agua, la sosa, el amoníaco, la sal común, los distintos alcoholes, etc., de las que sí se podían obtener otras, se las denominó **compuestos**.

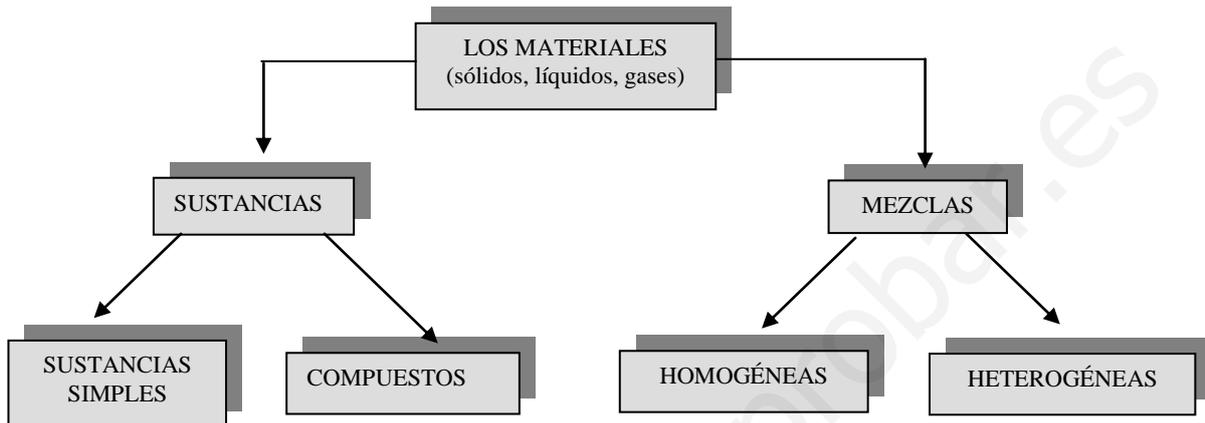
Conviene advertir, no obstante, que aunque un compuesto pueda descomponerse en sustancias simples, no es una **mezcla** de esas sustancias simples. Así el agua destilada, por ejemplo, se puede descomponer en hidrógeno y oxígeno, pero sus propiedades no tienen nada que ver con las de ninguno de ellos. El agua funde a 0°C, hierve a 100 °C, y tiene una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el hidrógeno, por ejemplo, es una sustancia que funde a -259 °C, hierve a -253°C, tiene una densidad de tan solo 0'0007 g/cm<sup>3</sup> (todo ello a temperatura ambiente y 1 atm de presión) y además es inflamable. Por otra parte, la simple mezcla de hidrógeno y oxígeno no da lugar a agua en cantidades apreciables; sólo cuando se hace saltar una descarga eléctrica o se calienta mucho una mezcla de oxígeno e hidrógeno, desaparecen estas sustancias y se forma agua (formación que va acompañada de explosión). Las sustancias que se pueden **descomponer** en sustancias simples no son, pues, una mezcla de esas sustancias.

**A.16.** *Estableced el significado de los términos manejados anteriormente: mezcla, sustancia, sustancia compuesta, disolución.*

De acuerdo con lo que hemos tratado hasta aquí, podemos afirmar que un material determinado es una sustancia química si tiene una serie de propiedades únicas y de valores definidos que caracterizan cualquier parte o trozo del mismo. Lo más frecuente, sin embargo, es que las sustancias químicas no se encuentren aisladas (excepto en algunos casos especiales como, por ejemplo el oro), sino formando mezclas con otras en distintas proporciones (de hecho, es prácticamente imposible garantizar un grado de pureza del 100% en una sustancia química, es decir que no tenga alguna

## 6. Teoría atómico molecular

traza de otra u otras). En algunos casos la presencia de las diversas sustancias que forman parte de una mezcla es evidente (granito, barro, polvo de hierro y azufre, etc.) por su apariencia **heterogénea**. En otros, sin embargo, es más difícil apreciar las distintas partes de la mezcla a simple vista, como ocurre, por ejemplo, con las disoluciones (agua y sal común, agua y gas carbónico, etc.) o con las mezclas de gases (el aire es una mezcla de varios gases) que tienen un aspecto **homogéneo**. Por otra parte, entre las sustancias químicas puede haber sustancias simples (es decir, que ya no pueden descomponerse en otras), y compuestos (como el agua, la sal común, la caliza, el amoníaco, el alcohol, etc.) que mediante reacciones químicas apropiadas pueden descomponerse en sustancias simples. Un posible esquema en el que se recogen estos conceptos y sus relaciones podría ser:



### 1.2.2. Utilización del modelo corpuscular para explicar la variedad de materiales existentes. La Teoría atómica de Dalton

El modelo corpuscular que hemos elaborado hasta aquí se basa esencialmente en suponer que todos los materiales están hechos de partículas dotadas de un cierto estado de movimiento (caótico en los gases y más ordenado y restringido en sólidos y líquidos). No obstante, dicho modelo es insuficiente para explicar la información química que hemos descrito en el apartado anterior, por lo que fue necesario profundizar en él y ampliarlo para poder explicarla, tal y como vamos a ver a continuación.

*A.17. El modelo corpuscular nos ha permitido explicar las propiedades comunes de los gases y algunas de sólidos y líquidos. Tratad de explicar ahora la enorme variedad de sustancias existentes así como la diferencia entre, mezclas, sustancias simples y compuestos químicos.*

La enorme variedad de sustancias químicas (simples y compuestas) puede explicarse si se admite que existen distintos tipos de partículas, de manera que una determinada sustancia estará formada por un mismo tipo de partículas todas iguales entre sí. De acuerdo con esta idea si dos sustancias son diferentes es porque las partículas que las forman son diferentes.

En una primera aproximación (realizada por Dalton, en 1802), se pensó que las partículas de las sustancias simples serían indivisibles, por lo que no podrían descomponerse en otras distintas. De este modo se justificaba que a partir de una sustancia simple no se pudieran obtener otras sustancias diferentes. En cambio, las partículas de los compuestos químicos serían, en realidad, "paquetes de partículas diferentes", de manera que podrían romperse y dar lugar a la formación de sustancias distintas. A las partículas de las sustancias simples, se les llamó **átomos** y a los paquetes de partículas que formaban las sustancias compuestas, se les llamó **moléculas**. Inicialmente se creyó, pues, que todas las sustancias simples eran monoatómicas, es decir, que estaban formadas por átomos individuales y se les llamó **elementos**. En cambio una molécula, según este

modelo, sería un paquete de átomos de distintos elementos. Las mezclas podrían ser entre sustancias simples, entre compuestos o entre sustancias simples y compuestos. En ellas las partículas no se combinarían sino que tan solo se mezclarían unas con otras sin perder sus propiedades.

La **Teoría atómica de Dalton** daba cuenta, pues, de la información química acumulada por aquel entonces. Los aspectos básicos de la misma se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ✓ La materia está formada por átomos (partículas sumamente pequeñas e indivisibles)
- ✓ Cada elemento químico está constituido por una sola clase de átomos (todos ellos con igual masa y propiedades).
- ✓ Los átomos de distintos elementos tienen diferente masa y propiedades.
- ✓ Los átomos son inmutables (no pueden transformarse unos en otros).
- ✓ Un compuesto químico determinado está formado por moléculas (en palabras de Dalton átomos compuestos) idénticas entre sí y éstas a su vez están formadas por un número entero de átomos de distintos elementos siempre en la misma proporción.
- ✓ Dos o más tipos de átomos pueden combinarse en distinta proporción para dar lugar a diferentes moléculas y, por tanto, a diferentes compuestos.
- ✓ La proporción en que se combinan los átomos para formar moléculas es siempre de acuerdo con una razón numérica muy sencilla de números enteros: uno a uno, uno a dos, etc. Cuando sólo existe una combinación posible de dos elementos A y B la molécula del compuesto formado contiene un átomo de cada elemento y se representa por AB (regla de la máxima simplicidad).
- ✓ En las reacciones químicas los átomos no se crean ni se destruyen, lo que ocurre es que cambia su distribución.

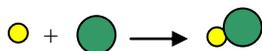
Como podrá constatarse, la teoría atómica de Dalton permitió explicar la información química que se disponía en aquella época. Sin embargo, conviene tener en cuenta que sus postulados fueron enunciados a comienzos del siglo XIX: después han ido sufriendo modificaciones sustanciales, de forma que en la actualidad muchos de ellos no se aceptan tal y como el los enunció. Así, por ejemplo, no se acepta que todas las sustancias simples en estado gaseoso sean monoatómicas (estar compuestas de átomos simples aislados) ni que los átomos sean inmutables, ni tampoco la regla de la máxima simplicidad.

### 1.2.3. ¿Cómo explicar las reacciones químicas con la hipótesis atómico-molecular?

*A.18. Proponed una explicación, a partir de la hipótesis atómico/ molecular de la estructura de las sustancias, sobre cómo puede ocurrir una reacción química, es decir, cómo pueden desaparecer unas sustancias y formarse otras que no estaban inicialmente. Concretad para el caso en que las sustancias simples hidrógeno y cloro (en fase gaseosa) reaccionan químicamente, desapareciendo (en parte) y aparece una sustancia nueva (que es un compuesto).*

Además de explicar las propiedades comunes de todos los materiales, el comportamiento físico de los gases y la diversidad de sustancias, el modelo atómico-molecular permite una fácil interpretación de las reacciones químicas, pues pueden considerarse como un proceso en el que las moléculas de las sustancias iniciales (reactivos) desaparecen debido a su ruptura (si tienen varios átomos) y en el que se forman nuevas moléculas (lo que implica nuevas sustancias) mediante la unión de los mismos átomos pero de forma distinta.

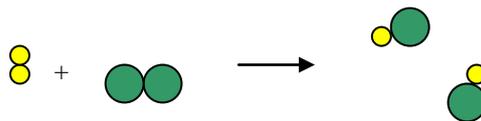
Así, si el hidrógeno y el cloro fueran monoatómicos, su reacción podría explicarse mediante el siguiente esquema:



O bien mediante símbolos:  $\text{H} + \text{Cl} \rightarrow \text{HCl}$

## 6. Teoría atómico molecular

Si el hidrógeno y el cloro estuvieran formados por moléculas diatómicas (como posteriormente se pudo comprobar) la reacción sería:



O bien, mediante símbolos: 
$$\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl}$$

Este modelo de reacción química como reordenación de átomos no sólo explica que desaparezcan unas sustancias (reaccionantes) y aparezcan otras nuevas (productos) con propiedades muy distintas, sino el que en algunos casos sea posible recuperar las sustancias iniciales (que habían desaparecido) a partir de los productos. Esto es posible, porque, según el modelo, los átomos iniciales se encuentran formando parte de las moléculas de los productos, y, por tanto, es posible, en determinadas condiciones, que dichas moléculas se rompan y los átomos se vuelvan a unir formando moléculas idénticas a las iniciales.

La validez de este modelo de reacción química puede ser contrastada, además por las predicciones macroscópicas (medibles directamente en el laboratorio) que se deducen de él, que coinciden, como veremos, con leyes empíricas que se habían obtenido sin formular hipótesis sobre la constitución submicroscópica de las sustancias y que, aparentemente, no tenían ninguna relación entre sí.

### 1.2.4. Los cambios materiales en los procesos químicos. Ley de la conservación de la masa y ley de las proporciones constantes

Aunque el desarrollo inicial de la Química es confuso y relacionado, como es lógico, con las concepciones vigentes en la época (por ejemplo, la búsqueda de la “piedra filosofal” que permitiría transformar metales en oro o del “elixir de la eterna juventud”), el modelo atómico y molecular de la materia tuvo una gran importancia para explicar satisfactoriamente importantes hechos que se observaban al estudiar las reacciones químicas, algunos de los cuales veremos a continuación.

Una transformación química supone, según la teoría atómica de Dalton, una reordenación de átomos. Así, por ejemplo, el cloro puede reaccionar con el hidrógeno y dar una nueva sustancia, de propiedades diferentes, denominada cloruro de hidrógeno. Sin embargo, si el modelo corpuscular de la materia que estamos estudiando es válido, hay algo que debe permanecer: en cualquier transformación química que se realice en un recinto cerrado, los átomos presentes seguirán siendo los mismos aunque agrupados de forma diferente.

*A.19. De acuerdo con la información contenida en el párrafo anterior sugerid alguna consecuencia respecto a las masas de las sustancias que intervienen en una reacción química.*

Puesto que los átomos y moléculas tienen masa, si la reacción química se produce de manera que pueda considerarse un sistema **cerrado** (un sistema en el que no entra ni sale sustancia alguna desde o hacia el exterior), la masa total, en cualquier momento de la reacción, será la suma de las masas de los átomos y, por tanto, como sólo suceden reordenaciones de los mismos, debe permanecer constante. Esta consecuencia, que había sido formulada de una manera empírica unos años antes de la teoría atómica de Dalton, recibe el nombre de **“Principio de conservación de la masa”** :

La masa total de las sustancias que intervienen en una reacción química que se produce en un recipiente cerrado, es constante en cualquier momento del proceso.

Anteriormente hemos visto otros principios de conservación (como el de la cantidad de movimiento y el de la energía). Dichos principios son básicos en la ciencia. Tienen en común el establecer que: **sean cuales sean los cambios que ocurran en el interior de un sistema aislado, habrá ciertas magnitudes como la cantidad de movimiento, la energía y la masa, del sistema que permanecerán constantes.**

Esta idea de la conservación de la masa en los cambios químicos es, como hemos visto, una consecuencia necesaria de la estructura atómica y molecular de la materia. No obstante, se trata de un principio al que, históricamente, no fue fácil llegar. En el siglo XVIII se admitía todavía la existencia de sustancias sin peso o, incluso, con peso negativo. Una muy importante era el **flogisto**. Se trataba de una sustancia muy curiosa, a veces se la asociaba con el fuego, no se la podía ver, unas veces no tenía peso y otras tenía peso negativo. Para los químicos, la intervención del flogisto era esencial para explicar algunos cambios. En efecto, en aquella época a un “metal oxidado” se le llamaba **CAL**. Al calentar una CAL se puede producir un cambio químico y obtenerse un “metal puro”. Así, por ejemplo, si calentamos una cal de hierro (lo que hoy llamamos óxido de hierro) podemos obtener hierro. Este cambio se explicaba entonces diciendo que al calentar la CAL el flogisto que salía del foco calorífico entraba en ella y la convertía en metal puro. *¿Cómo explicaban entonces que el metal puro pesara menos que la cal?* Admitían que el flogisto tenía peso negativo (ligereza).

Antoine Lavoisier fue un científico francés que vivió durante el siglo XVIII. Estaba formado en varias ciencias y realizó importantes trabajos en química. Desde el principio se opuso a la teoría del flogisto y otras ideas químicas tradicionales. De hecho, fue una persona que aprovechó muchos de los resultados experimentales obtenidos por otros químicos aunque, eso sí, dándoles una nueva interpretación. Así, por ejemplo, para Lavoisier, la pretendida absorción de flogisto al calentar una CAL de un metal, correspondía en realidad a una pérdida de oxígeno, lo cual explicaba que el metal “puro” pesara menos que la CAL (óxido metálico) de la cual provenía.

Sus trabajos fueron decisivos en la superación de la teoría del flogisto. Sus conclusiones se extendieron a cualquier tipo de cambio químico afirmando que **en todo sistema cerrado, aunque cambie la masa de algunos componentes, la masa total se debe conservar.** A Lavoisier se le atribuye la publicación del primero de los libros de texto de química modernos. Es curioso que, a pesar de sus ideas revolucionarias en química, fuese finalmente guillotinado (1794) durante la revolución francesa acusado de conservadurismo político.

**A.20.** *Las siguientes reacciones químicas parecen contradecir la conservación de la masa:*

- a) *Cuando se oxida un trozo de hierro pesa más después de oxidarse que antes*
  - b) *Al añadir una pastilla efervescente a un vaso con agua, el peso final es menor que el inicial*
  - c) *Al quemar un tronco de madera, la ceniza pesa menos que el tronco original*
- ¿Se trata de excepciones a dicho principio? Sugerid posibles explicaciones.*

Por supuesto, no se trata de excepciones, ya que en ninguno de los casos propuestos el sistema se encuentra cerrado. El clavo se oxida porque el hierro se combina con el oxígeno del aire, luego debe pesar más porque al final tendrá más masa (la de todo el oxígeno que se combinó con el hierro). La pastilla efervescente, al entrar en contacto con el agua se disuelve y desprende un gas (dióxido de carbono); ese gas, tiene masa y, por lo tanto pesa, por lo que al escaparse al ambiente ocurrirá que el peso del vaso de agua con la pastilla disuelta será menor que el del vaso de agua y la pastilla entera. Análogamente sucede al quemar una madera ya que entonces se desprenden gases, vapor de agua y humo, que se escapan por la chimenea, por lo que las cenizas pesarán menos que la madera original. Al estudiar las transformaciones químicas los investigadores se dieron cuenta de otro hecho de especial importancia. Este consiste en que: **siempre que se combinan dos sustancias, para dar otra sustancia nueva determinada, las masas que reaccionan se encuentran en la misma**

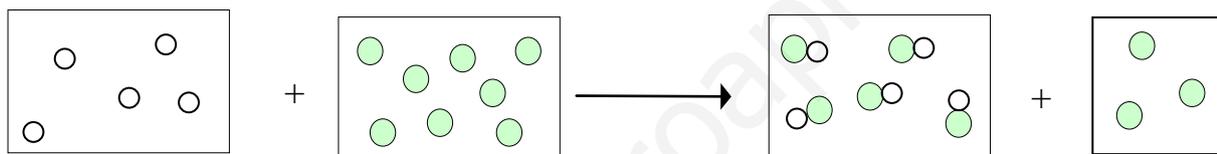
## 6. Teoría atómico molecular

**proporción (y análogamente sucede al descomponer un compuesto).** Este resultado se conoce como: Ley de las proporciones constantes y fue enunciado a principios del siglo XIX por el químico francés Proust.

Vale la pena detenerse un poco en intentar clarificar esta ley. Lo que nos dice es que, por ejemplo, cuando reaccionan el hidrógeno con el cloro para dar cloruro de hidrógeno HCl no lo pueden hacer en cantidades cualesquiera sino que siempre lo hacen en la misma proporción (en este caso, 1 g de hidrógeno por cada 35'5 g de cloro). Eso significa que si mezclamos, por ejemplo, 2 g de hidrógeno con 98 g de cloro y los hacemos reaccionar, no vamos a obtener 100 g de HCl sino tan solo 73 g de HCl y sobrarán 27 g de cloro que no se podrán combinar.

Fijémonos que esta ley es, en realidad, una consecuencia de la estructura atómica de la materia, ya que si ésta fuera continua, nada se opondría a que a partir de 2 g de hidrógeno y 98 g de cloro obtuviéramos 100 g de HCl. El hecho de que esto no suceda así se debe a que cada átomo de hidrógeno sólo puede unirse a uno de cloro para dar HCl, de modo que, una vez que se hayan combinado todos los átomos de hidrógeno existentes en esos 2 gramos iniciales, de nada nos servirá tener más cloro si ya no hay átomos de hidrógeno con lo que combinarse.

Si suponemos que partimos de hidrógeno y cloro en fase gaseosa y monoatómicos y que el cloruro de hidrógeno es HCl, el proceso podría representarse esquemáticamente como:



En cada uno de los rectángulos anteriores, las esferas verdes corresponden a átomos de cloro y las blancas a átomos de hidrógeno.

Como la molécula de cloruro de hidrógeno, HCl, está formada sólo por hidrógeno y cloro, la relación entre la masa de hidrógeno y la masa de cloro que reaccionan para dar el compuesto cloruro de hidrógeno, dependerá sólo de las masas de los átomos de hidrógeno y de cloro (que tienen un valor fijo cada una).

**A.21.** Si admitimos, como hemos hecho en el dibujo anterior, que la "fórmula molecular" del cloruro de hidrógeno es HCl y sabemos experimentalmente que cada gramo de hidrógeno que reacciona lo hace siempre con 35'5 gramos de cloro. ¿Qué consecuencias cabe esperar respecto a la relación existente entre las masas de un átomo de cloro y un átomo de hidrógeno?

Como se combinan uno con uno, podemos afirmar que en un gramo de hidrógeno hay los mismos átomos que en 35'5 gramos de cloro y, por tanto, que la masa de un solo átomo de cloro será 35'5 veces mayor que la de un solo átomo de hidrógeno. Por eso precisamente y porque cada átomo de cloro que se combina lo hace con uno de hidrógeno, se obtiene que la proporción de las masas en que se combinan es 35'5:1

**A.22.** El compuesto alcohol etílico reacciona con el oxígeno para producir dióxido de carbono y vapor de agua. Experimentalmente se comprueba que cuando 46'0 g de alcohol etílico reaccionan exactamente con 96'0 g de oxígeno, se forman 54'0 g de agua y una determinada cantidad de dióxido de carbono. a) Calculad la cantidad de dióxido de carbono que se ha formado. b) ¿Qué cantidad de oxígeno se necesitará para reaccionar totalmente con 8'0 g de alcohol etílico?

Rdo. Se formarán 88 gramos de dióxido de carbono y se precisarán 16,7 gramos de oxígeno.

Las leyes anteriores, totalmente experimentales, fueron reunidas por Dalton a comienzos del siglo XIX y explicadas por éste con una misma base teórica (Teoría atómica de Dalton) de forma similar a como hemos hecho aquí.

## 2. DESARROLLO DEL MODELO ATÓMICO-MOLECULAR DE LA MATERIA

Las hipótesis establecidas por Dalton en su teoría atómica, permitían explicar de una manera unitaria y sencilla la enorme variedad de sustancias existente y las leyes generales del cambio químico obtenidas experimentalmente hasta ese momento. Sin embargo, una buena hipótesis científica, no debe limitarse a explicar lo que ya se sabe sino que, además, ha de ser capaz de realizar nuevas predicciones que puedan comprobarse experimentalmente. El conjunto de las hipótesis de Dalton abría la posibilidad, como veremos, de obtener valores de las masas de los átomos, es decir, de unas partículas que nadie había visto pero que permitían explicar satisfactoriamente las leyes químicas conocidas. Para ello, hubo que revisar alguna de las hipótesis de Dalton, en particular la de la máxima simplicidad.

Al principio no había ninguna forma de comprobar experimentalmente las fórmulas de los compuestos. Este inconveniente impedía estar seguros de la validez de las masas atómicas obtenidas. Sin embargo, pronto nuevos hechos relacionados con las reacciones entre gases iban a permitir conocer de forma experimental la fórmula de distintos compuestos tal y como vamos a ver a continuación.

### 2.1 Trabajos de Gay-Lussac sobre reacciones químicas entre gases

Gay-Lussac investigó sobre el comportamiento de los gases estudiando las reacciones químicas entre sustancias en fase gaseosa y, en particular, la proporción en que se combinaban los volúmenes de dichas sustancias. De acuerdo con lo visto sobre el comportamiento de los gases, el estudio de los volúmenes que se combinan, puede dar información sobre la proporción en que se combinan las partículas tal y como vamos a ver a continuación.

*A.23. Partiendo de la ecuación general de los gases, indicad qué relación puede haber entre el número de partículas contenidas en volúmenes iguales de distintos gases, todos ellos a la misma presión y temperatura.*

De acuerdo con la ecuación de los gases  $PV = CNT$ , no cabe duda de que si la presión, la temperatura y el volumen son los mismos, el número de partículas (moléculas) de gas ha de ser también el mismo, ya que la constante  $C$  es la misma para todos los gases.

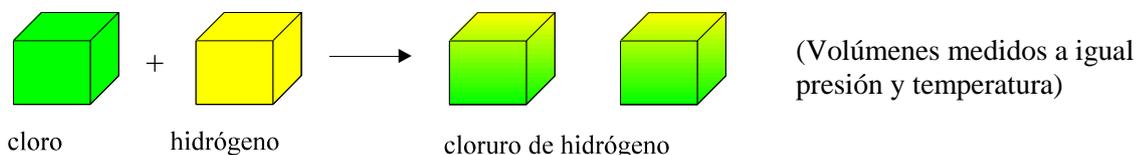
Gay-Lussac, en la primera mitad del siglo XIX, había constatado experimentalmente que los volúmenes de gases que reaccionan (en las mismas condiciones de presión y de temperatura) están en una proporción numérica muy sencilla, lo cual se interpreta fácilmente si se supone, como se deriva de las hipótesis hechas hasta aquí, que: **volúmenes iguales de diferentes gases en las mismas condiciones de presión y temperatura, contienen el mismo número de partículas** (esto mismo fue postulado por el químico italiano Avogadro, como algo que ayudaba a explicar las reacciones entre sustancias en fase gaseosa, por lo que se conoce como “hipótesis de Avogadro”).

El principal interés de los trabajos de Gay-Lussac radica en que la relación existente entre los volúmenes de distintos gases implicados en una reacción química y los números de moléculas correspondientes permite, como vamos a ver, conocer la proporción en que se combinan dichas moléculas y determinar de forma experimental la fórmula química de muchos compuestos.

## 6. Teoría atómico molecular

**A.24.** Al realizar Gay-Lussac sus experiencias encontró que al reaccionar el cloro e hidrógeno gaseosos en determinadas condiciones de presión y temperatura, ocurría que:

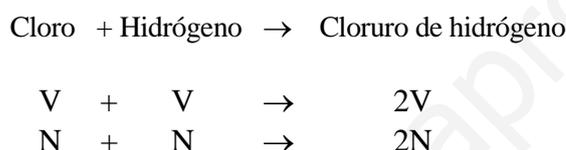
Cada volumen de cloro que reaccionaba, lo hacía con un volumen igual de hidrógeno y se obtenían dos volúmenes iguales de cloruro de hidrógeno, tal y como se en el siguiente esquema:



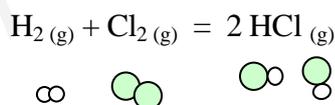
a) Deducid la relación entre el número de partículas de los distintos gases que intervienen en la reacción propuesta.

b) ¿Cuales podrían ser las fórmulas del hidrógeno, cloro y cloruro de hidrógeno para que se cumplan las proporciones establecidas?

Como se trata de volúmenes iguales a la misma presión y temperatura, el número de partículas presentes en cada uno deberá ser el mismo. Por tanto la proporción en que se combinan los gases anteriores se podrá expresar tanto en volúmenes como en número de partículas:



Los resultados experimentales nos dicen que por cada N partículas de cloro que reaccionan, lo hacen con N de hidrógeno para dar 2N partículas de cloruro de hidrógeno. Dichos resultados nos dicen también que ni la fórmula del cloro puede ser Cl ni la del hidrógeno H (ya que entonces la reacción entre ambos vendría dada por  $\text{Cl} + \text{H} = \text{HCl}$ , por lo que se deberían obtener N partículas de cloruro de hidrógeno y no 2N como se desprende de los resultados experimentales). Por otro lado, si las partículas de cloro y de hidrógeno estuviesen constituidas por dos átomos ( $\text{Cl}_2$  y  $\text{H}_2$ ) todo encajaría ya que entonces cada N partículas de  $\text{Cl}_2$  que reaccionarán lo harían con N de  $\text{H}_2$  para dar 2N de HCl coherentemente con los resultados experimentales. La reacción podría escribirse entonces como:



Es decir, las moléculas de hidrógeno y de cloro son diatómicas ( $\text{H}_2$  y  $\text{Cl}_2$  respectivamente). Este resultado y otros similares hicieron que se abandonase la idea de que las sustancias simples debían estar formadas necesariamente por átomos sueltos (ser monoatómicas). La ecuación anterior nos muestra la proporción en que se combinan el cloro con el hidrógeno. Es importante no confundirse ya que a veces se piensa, erróneamente, que los coeficientes que aparecen delante de las fórmulas indican las partículas que reaccionan. Una lectura correcta de la ecuación debería llevar a decir que, aunque suelen reaccionar entre sí muchos millones de moléculas, cada una de las moléculas de cloro que se combina lo hace con una de hidrógeno para dar dos moléculas de cloruro de hidrógeno. No hay que confundir tampoco las fórmulas de estas sustancias simples  $\text{H}_2$  y  $\text{Cl}_2$  con los símbolos de los átomos de hidrógeno y cloro (H y Cl respectivamente).

**A.25.** Interpretad la siguiente reacción, escribiendo la ecuación química correspondiente:

Por cada litro de nitrógeno gas que se combina con tres litros de hidrógeno gas, se obtienen dos litros de amoníaco gas, (siempre y cuando todos los volúmenes se midan a igual presión y temperatura). Rdo.  $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2 NH_3$  <sup>1</sup>

## 2.2. Determinación de masas atómicas relativas

La interpretación de los datos volumétricos obtenidos a partir de las reacciones entre sustancias gaseosas permitió a los químicos del siglo XIX establecer las fórmulas correctas de muchos compuestos basándose en datos experimentales (y no en la regla de la máxima simplicidad, que no siempre funcionaba) y de este modo, como veremos a continuación, se pudieron comparar las masas de los átomos de los distintos elementos.

**A.26.** Al descomponer 0'81 g de bromuro de hidrógeno, se ha obtenido 0'80 g de bromo y 0'01 g de hidrógeno. Por otra parte, en el bromuro de hidrógeno (HBr), por cada átomo de hidrógeno hay un átomo de bromo. ¿Cuántas veces es mayor la masa del átomo de bromo que la del hidrógeno?

De acuerdo con los datos del enunciado, resulta que cada gramo de hidrógeno que reaccione lo hará con 80 g de bromo. Como la fórmula del bromuro de hidrógeno es HBr en N moléculas de HBr habrá los mismos átomos de bromo que de hidrógeno. Por tanto concluimos que la masa de cada átomo de bromo debe ser 80 veces mayor que la masa de cada átomo de hidrógeno.

El razonamiento también puede realizarse matemáticamente. En efecto, si llamamos:

$m_H$  = masa de un átomo de hidrógeno

$m_{Br}$  = masa de un átomo de bromo

$N_H$  = número de átomos de hidrógeno

$N_{Br}$  = número de átomos de bromo

y tomamos 80 g de bromo y 1 g de hidrógeno, tendremos que:

$$\begin{aligned} 80 &= m_{Br} \cdot N_{Br} \\ 1 &= m_H \cdot N_H \end{aligned}$$

donde  $N_{Br}$  corresponde al número total de átomos de Br presentes en esos 80 g. Análogamente,  $N_H$  es el número total de átomos de hidrógeno presentes en 1 g de hidrógeno. En este caso sabemos que  $N_{Br} = N_H$  (la fórmula es HBr) luego dividiendo entre sí las dos ecuaciones anteriores, obtenemos finalmente que:

$$m_{Br} = 80 m_H$$

es decir: cada átomo de bromo tiene una masa 80 veces mayor que la de un átomo de hidrógeno.

**A.27.** Cuando se obtiene amoníaco, se comprueba que cada gramo de hidrógeno que reacciona lo hace con 4'67 g de nitrógeno. Por otra parte sabemos que en el amoníaco ( $NH_3$ ), por cada tres átomos de hidrógeno hay un átomo de nitrógeno. Con los datos anteriores, calculad cuántas veces es mayor la masa del átomo de nitrógeno que la del hidrógeno.

De los datos anteriores concluimos que la masa de un átomo de nitrógeno será 4'67 veces mayor que la masa de 3 átomos de hidrógeno (en el amoníaco,  $NH_3$ , hay el mismo número de átomos N

<sup>1</sup>Aquí vemos que el resultado experimental sólo puede ser explicado si se abandona la regla de la máxima simplicidad de Dalton, según la cual la molécula de amoníaco debía ser NH

## 6. Teoría atómico molecular

que grupos de 3H), luego el átomo de nitrógeno tendrá una masa 14 veces mayor que la del átomo de hidrógeno. (Fijémonos que, de acuerdo con la regla de la máxima simplicidad de Dalton, la fórmula del amoníaco sería NH y en ese caso hubiéramos obtenido un resultado incorrecto ya que nos habría conducido a que la masa del átomo de nitrógeno sería 4'67 veces mayor que la del átomo de hidrógeno).

Matemáticamente sería:

$m_N$  = masa de un átomo de nitrógeno  
 $m_H$  = masa de un átomo de hidrógeno  
 $N_N$  = número de átomos de nitrógeno  
 $N_H$  = número de átomos de hidrógeno

Si tomamos 4'67 g de nitrógeno y 1 g de hidrógeno, tendremos que:

$$\begin{aligned} 4'67 &= m_N \cdot N_N \\ 1 &= m_H \cdot N_H \end{aligned}$$

donde  $N_N$  corresponde al número total de átomos de nitrógeno presentes en esos 4'67 g. Análogamente,  $N_H$  es el número total de átomos de hidrógeno presentes en 1 g de hidrógeno. De la fórmula  $NH_3$  sabemos que el número de átomos de hidrógeno existentes en el amoníaco será justo el triple que el número de átomos de nitrógeno, es decir:  $N_H = 3 \cdot N_N$ . Sustituyendo nos queda:

$$\begin{aligned} 4'67 &= m_N \cdot N_N \\ 1 &= m_H \cdot 3 N_N \end{aligned}$$

Dividiendo entre sí las dos ecuaciones y despejando, obtenemos finalmente que:  $m_N = 4'67 \cdot 3 m_H$   
Es decir:

$$m_N = 14 m_H$$

La masa del átomo de nitrógeno es 14 veces mayor que la del átomo de hidrógeno.

Mediante experiencias semejantes a las que se desprenden de las actividades anteriores realizadas con otros muchos compuestos pronto se pudo constatar que el átomo más ligero de todos, de menor masa, era el de hidrógeno. Ello sugirió establecer una primera escala (en la actualidad es otra) de **masas atómicas relativas** tomando la masa del átomo de hidrógeno como unidad de esa escala. El símbolo que emplearemos para expresar la masa atómica relativa es  $A_r$ . De esa forma, el átomo de cloro, por ejemplo, tenía una masa atómica relativa  $A_r = 35'5$  lo cual se interpreta diciendo que un átomo Cl tiene una masa 35'5 veces mayor que la masa de un átomo H (tomando este último como unidad de masa atómica).

**A.28.** Cuando decimos que la masa atómica relativa del oxígeno es 16, queremos decir que:

- Un átomo de oxígeno tiene una masa de 16 g.
- 16 átomos de oxígeno pesan 1 g.
- Otra respuesta (especificar)

Rdo. Queremos decir que la masa del átomo de oxígeno es 16 veces mayor que la masa de un átomo de hidrógeno (que es la unidad de masa atómica a la que, para simplificar, nos referiremos en este curso).

Conocidas las masas atómicas relativas de los elementos y las fórmulas de los compuestos podemos calcular fácilmente las masas moleculares relativas ( $M_r$ ) de estos últimos.

**A.29.** Buscando los datos necesarios, calculad la masa molecular relativa de:

- a) Dióxido de carbono:  $CO_2$   
 b) butano:  $C_4H_{10}$   
 c) sulfato de aluminio:  $Al_2(SO_4)_3$

Rdo. a) 44; b) 58; c) 342

**A.30.** ¿Que quiere decir que la masa molecular del agua es 18?

Rdo. Que una molécula de agua tiene una masa 18 veces mayor que la de un átomo de hidrógeno.

Una vez conocidas las masas atómicas relativas de los elementos, pueden utilizarse estas para determinar las fórmulas empíricas y moleculares de los compuestos químicos a partir de la composición de los mismos, tal y como vamos a ver a continuación.

### 2.3. Determinación de fórmulas empíricas y moleculares

La fórmula empírica de un compuesto indica la proporción existente entre los átomos de los distintos elementos que lo forman. En cambio, en la fórmula molecular, sabemos exactamente cuantos átomos de cada clase forman la "unidad estructural" de dicho compuesto. Así, por ejemplo: la fórmula molecular del agua oxigenada es  $H_2O_2$  lo que quiere decir que en cada molécula de dicho compuesto hay exactamente 2 átomos de hidrógeno y dos de oxígeno. En cambio su fórmula empírica sería HO y nos informaría solamente de que en el agua oxigenada por cada átomo de hidrógeno hay uno de oxígeno.

En la mayoría de los compuestos inorgánicos, la fórmula empírica coincide con la molecular. No así en los compuestos orgánicos en los cuales suelen ser, como veremos, diferentes. No obstante la fórmula molecular siempre será un múltiplo entero de la empírica.

**A.31.** Dad la fórmula empírica de los siguientes compuestos: a) Glucosa:  $C_6H_{12}O_6$ ; b) Benceno  $C_6H_6$ ; Butano  $C_4H_{10}$ . Comprobad en cada caso, que la fórmula molecular dada es un múltiplo entero de la empírica.

Rdo: a)  $CH_2O$ ; b) CH; c)  $C_2H_5$

La utilidad de las fórmulas químicas radica fundamentalmente en que expresan la proporción cualitativa y cuantitativa en que se encuentran los elementos que conforman las unidades estructurales de los compuestos. Así, por ejemplo, la fórmula  $H_2O$  del agua nos informa que en el agua por cada átomo de oxígeno hay dos átomos de hidrógeno, pero, si utilizamos las masas atómicas, también nos está diciendo que por cada 18 g de agua, 16 g son de oxígeno y 2 g son de hidrógeno.

**A.32.** Determinad cual será el porcentaje en masa, de oxígeno y de hidrógeno en el agua.

Como acabamos de decir, la fórmula del agua,  $H_2O$ , nos indica que en 18 g de agua, 16 g provienen de la masa de los átomos de oxígeno y 2 g de los átomos de hidrógeno. Por tanto, el número de gramos de oxígeno en cada gramo de agua será  $16/18 = 0,889$ . Y si esa es la cantidad de oxígeno en un gramo de agua, en cien gramos será 88,9. Es decir, el porcentaje en masa del oxígeno en el agua es 88,9 % y, por tanto: 11,1 % de hidrógeno.

## 6. Teoría atómico molecular

En ocasiones es habitual el proceso contrario, esto es: analizar un compuesto cuya fórmula se desconoce y a partir de los porcentajes en masa de los elementos que lo forman, obtener su fórmula empírica. ¿Cómo se procede en este caso? Para verlo consideraremos un ejemplo:

**A.33.** *Al descomponer un óxido de cromo se ha obtenido que el porcentaje en masa de cromo ha sido del 68'42% y el de oxígeno del 31'58 %. Con estos datos, determinad la fórmula empírica de dicho óxido. (Masa atómica relativa del cromo 52 y del oxígeno 16).*

La fórmula empírica será  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  de donde tenemos que determinar los subíndices “x” e “y”

Si denominamos por N el total de unidades  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  existentes en 100 g de este compuesto, podemos escribir para la masa correspondiente de cromo presente que:

$$68'42 = N \cdot x \cdot 52 m_H$$

Análogamente, la masa de oxígeno presente en esos 100 g de compuesto vendrá dada por:

$$31'58 = N \cdot y \cdot 16 m_H$$

Dividiendo ahora las ecuaciones anteriores entre sí obtenemos:

$$\frac{68'42}{31'58} = \frac{52x}{16y} \rightarrow \frac{x}{y} = \frac{1094'72}{1642'16} \rightarrow \frac{x}{y} = \frac{1}{1'5}$$

El resultado anterior se ha obtenido dividiendo el numerador y denominador de la penúltima fracción por 1094'72 (el menor de los dos). La solución más sencilla sería  $x = 1$ ,  $y = 1'5$ . No obstante, por convenio, se expresa de modo que sean números enteros (los menores posibles), lo que en este caso conduce a los resultados  $x = 2$ ,  $y = 3$ , ( $1/1'5$  es equivalente a  $2/3$ ). Por tanto, tomaremos como fórmula empírica  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  según la cual, en este compuesto, por cada 2 átomos de cromo hay 3 átomos de oxígeno.

**A.34.** *Al analizar un compuesto de hidrógeno y oxígeno, se ha encontrado un porcentaje en masa del 94'12% de oxígeno y el resto de hidrógeno. Con estos datos y sabiendo que la masa atómica relativa del oxígeno es 16 y del hidrógeno 1, deducid la fórmula empírica del compuesto. Si la masa molecular relativa es 34 ¿Cuál será su fórmula molecular?*

Rdo. La fórmula empírica es HO y la molecular  $\text{H}_2\text{O}_2$  (agua oxigenada)

### 2.4. Determinación experimental de la fórmula empírica de un compuesto

Sabemos que a partir de la fórmula empírica y de la masa molecular de un compuesto, es posible obtener su fórmula molecular.

**A.35.** *¿Qué interés puede tener conocer las fórmulas de los diferentes compuestos químicos?*

Además de que la fórmula de un compuesto permite identificarlo y diferenciarlo de muchos otros, su conocimiento, junto con los valores de las masas atómicas relativas de los elementos que lo forman, nos permite también saber en qué proporción se hallan dichos elementos en el compuesto. Por otra parte, como veremos en el tema de reacciones químicas, el conocimiento de las fórmulas moleculares de los compuestos es imprescindible para realizar cualquier estudio cuantitativo de los

cambios químicos (por ejemplo, qué cantidad de tal o cual producto se va a obtener en una reacción).

### Planteamiento del problema

En este trabajo práctico vamos a investigar cómo obtener la fórmula empírica de un compuesto que, para simplificar, supondremos formado únicamente por dos elementos que llamaremos Q y R.

En el tema hemos visto ya que la ley de las proporciones constantes era una consecuencia de la naturaleza atómico-molecular de la materia. De acuerdo con dicha ley sabemos que cuando dos elementos Q y R se combinan para dar un compuesto  $Q_xR_y$ , la razón entre las masas que se combinan de Q y R es siempre constante, es decir:

$$\frac{\text{masa del elemento Q}}{\text{masa del elemento R}} = \text{constante} = C$$

Según el modelo atómico-molecular de la materia, si conocemos el valor de C y las masas atómicas relativas de Q y de R ( $A_Q$  y  $A_R$  respectivamente) es posible determinar los valores enteros más sencillos de "x" y de "y" y, por tanto, la fórmula  $Q_xR_y$  buscada.

En efecto, si llamamos  $m_Q$  a la masa de un solo átomo de Q,  $m_R$  a la masa de un solo átomo de R y  $m_H$  a la masa de un átomo de hidrógeno, podemos escribir que para cualquier cantidad del compuesto que contenga N unidades  $Q_xR_y$  se cumplirá que:

$$C = \frac{\text{masa del elemento Q}}{\text{masa del elemento R}} = \frac{m_Q \cdot x \cdot N}{m_R \cdot y \cdot N} = \frac{A_Q \cdot m_H \cdot x \cdot N}{A_R \cdot m_H \cdot y \cdot N} = \frac{A_Q \cdot x}{A_R \cdot y} \rightarrow \frac{x}{y} = \frac{C \cdot A_R}{A_Q}$$

Dividiendo ahora el numerador y el denominador de la última fracción por el menor de ellos, podremos obtener finalmente (como ya se vio en un ejercicio anterior) la proporción de números enteros más sencilla entre "x" e "y" y, por tanto, la fórmula empírica  $Q_xR_y$ .

Así pues, la determinación de la fórmula empírica de cualquier compuesto  $Q_xR_y$  pasa por obtener primero el valor de la constante C de proporcionalidad de la ley de las proporciones constantes.

### Elaboración de un diseño experimental

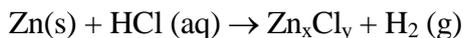
*A.36. Proponed alguna experiencia concreta, fácil de llevar a cabo en el laboratorio, que nos permita determinar el valor de la constante C de la ley de las proporciones constantes, correspondiente a un compuesto dado como, por ejemplo, el cloruro de cinc.*

En principio podríamos pensar en descomponer diferentes cantidades de cloruro de cinc, medir la masa de cloro y de cinc en cada caso y determinar el cociente entre ambas (valor de la constante C). Sin embargo se trata de un procedimiento un tanto complejo ya que habría que realizar una electrólisis a alta temperatura. Análogamente ocurre con el procedimiento inverso o síntesis del cloruro de cinc (sólido) a partir de cloro (gas) y cinc (sólido) ya que resultaría una reacción química heterogénea sin unos criterios claros para saber cuando se habría consumido todo el cinc.

*A.37. Hemos de pensar pues en un procedimiento alternativo para la obtención de un compuesto de cloro y de cinc que no tenga los inconvenientes anteriores.*

## 6. Teoría atómico molecular

Un procedimiento más sencillo consiste en obtener cloruro de cinc a partir de la reacción entre cinc (sólido) con exceso de una disolución concentrada de ácido clorhídrico de acuerdo con la reacción:



El procedimiento se puede concretar en una serie de pasos, como los siguientes:

- ✓ Utilizando una balanza, ponéla a cero colocando en ella un pequeño erlenmeyer. A continuación introducir en el recipiente una pequeña cantidad de cinc comprendida entre 0'5 g y 1 g y determinar el valor de dicha masa de cinc.
- ✓ Quitar el erlenmeyer de la balanza y añadir clorhídrico 1 molar en cantidad suficiente para que reaccione todo el cinc. A continuación eliminar el pequeño exceso de disolución de HCl calentando suavemente el erlenmeyer (conviene no excederse en la calefacción para no vaporizar parte de cloruro de cinc formado).
- ✓ Determinar mediante la balanza la masa del cloruro de cinc formado (conviene hacerlo rápidamente, en caliente, tras haber eliminado el exceso de HCl por simple calefacción, ya que el cloruro de cinc es higroscópico y puede hidratarse con el vapor de agua ambiental alterando las medidas).
- ✓ Obtener la masa de cloro presente en el cloruro de cinc formado, por simple resta entre los valores medidos para la masa de cloruro de cinc y del cinc.

Esencialmente se trata de repetir el procedimiento anterior con el fin de obtener distintos valores (es suficiente con cuatro) con los que proceder a construir una tabla como la siguiente:

masa de cinc (experimental)	masa de cloruro de cinc (experimental)	masa de cloro (calculada)
$m_1$	$m'_1$	$m''_1$
$m_2$	$m'_2$	$m''_2$
$m_3$	$m'_3$	$m''_3$
$m_4$	$m'_4$	$m''_4$

Con los datos anteriores se procede a construir la gráfica de la masa de cloro frente a la masa de cinc que, de acuerdo con la ley de las proporciones constantes, ha de conducir a una línea recta que pase por el origen y cuya pendiente representará la constante de proporcionalidad  $C$  de la ley de las proporciones constantes, es decir, los gramos de cloro existentes por cada gramo de cinc, en el compuesto cloruro de cinc:

$$C = \frac{\text{masa de cloro}}{\text{masa de cinc}}$$

### Realización del experimento

**A.38.** *Proceded a la realización del experimento sugerido y obtened el valor de la constante  $C$  de la ley de las proporciones constantes correspondiente al cloruro de cinc.*

La realización del experimento ha de permitir elaborar una tabla como la anterior y la construcción de la gráfica a que nos hemos referido anteriormente. La pendiente de dicha gráfica permite obtener (dentro de los márgenes de error) un valor de la constante próximo a  $C = 0'92$

## Análisis de los resultados

La técnica propuesta además de permitir la contrastación experimental de la ley de las proporciones constantes es también un procedimiento para establecer las fórmulas de los compuestos.

**A.39.** *Obtenida la relación entre las masas de cloro y de cinc en el compuesto cloruro de cinc y conocidas sus masas atómicas relativas ( $Ar_{Cl} = 35'5$  y  $Ar_{Zn} = 65'4$ ), estableced la fórmula del compuesto  $Zn_xCl_y$  buscada.*

La realización de los cálculos que se demandan lleva a la conclusión de que la fórmula empírica correspondiente al cloruro de cinc viene dada por  $ZnCl_2$ .

## 2.5. Un éxito fundamental del modelo atómico-molecular: El sistema periódico de los elementos

A lo largo del siglo XIX se descubrieron nuevos elementos químicos. Por otra parte se fueron conociendo de forma más precisa las propiedades de bastantes elementos y pronto se observó que existían muchos con propiedades químicas muy parecidas, lo que permitió agruparlos en familias. La mayor aportación en este sentido la realizó el científico ruso Dimitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907). Su método para clasificar y disponer todos los elementos químicos dio lugar al llamado **sistema periódico de los elementos**, uno de los instrumentos más valiosos de la química. Veamos, en palabras del propio Mendeleiev, algunos aspectos de su trabajo:

“La clasificación más corriente de los elementos en metales y no metales no es tan nítida como parecía. Por ejemplo, el fósforo puede actuar unas veces como metal y otras como no metal. Sólo para algunos grupos de elementos no hay duda que forman un todo (por ejemplo los halógenos flúor, cloro, bromo, yodo), pero se han descubierto nuevos elementos que no se sabe donde colocar. Por otra parte, algunas propiedades físicas de los elementos tales como las ópticas, eléctricas, etc., se han medido con precisión para algunos de ellos, pero sabemos que un mismo elemento puede presentar, según el estado en que se encuentre, propiedades muy diferentes (como ocurre, por ejemplo, con el grafito y el diamante). Sin embargo, lo cierto es que cualquiera que sea el cambio de propiedades que un elemento pueda experimentar según su estado, existe *algo* que nos permite afirmar que se trata del mismo elemento... En este sentido, lo único que conocemos que no cambia, que toma el mismo valor, tanto cuando el elemento está libre (en cualquier estado) como cuando se halla combinado con otros formando distintas sustancias, es la masa atómica del elemento en cuestión. Por esta razón me he ocupado de buscar un sistema de clasificación de los elementos basándome en las masas atómicas de los mismos”.

Mendeleiev ordenó los elementos químicos entonces conocidos situándolos en fila según el orden creciente de su masa atómica y cuando llegaba a un elemento que tenía propiedades análogas a otro ya situado, iniciaba una nueva fila colocándolo debajo. De este modo los elementos que se encontraban en una misma columna tenían propiedades análogas y constituían un grupo o familia. A cada fila se le denomina periodo.

Al ordenar los 63 elementos químicos entonces conocidos según este criterio Mendeleiev se encontró con algunos inconvenientes. Así, por ejemplo, se dio cuenta de que el titanio (Ti), que tiene propiedades parecidas al carbono y al silicio, ambos pertenecientes al grupo IV, caía en cambio en el grupo III (con el boro y aluminio) y que esta misma situación se repetía con los elementos que seguían al Ti, cuyas propiedades cuadraban más con las del grupo siguiente que con las del grupo en que caían. Este mismo problema se le planteó posteriormente con otros elementos.

## 6. Teoría atómico molecular

Mendeleiev supuso, acertadamente, que el lugar donde había caído el titanio correspondía a un elemento todavía por descubrir (que resultó ser el escandio, Sc) de masa atómica intermedia entre el calcio y el titanio y análogamente sucedía con otros casos similares. Además, estudiando las propiedades de los elementos que había alrededor de los huecos, pudo hacer acertadas hipótesis sobre las propiedades y características de elementos que todavía no se habían descubierto.

### RECAPITULACIÓN

El tema permite comprender cómo la hipótesis atómica de la materia mostró su validez al enfrentarse con éxito a la explicación de problemas importantes relacionados con el cambio químico tales como la gran diversidad de sustancias existentes, propiedades y comportamiento de los gases, existencia de sustancias simples, compuestos y mezclas, etc. De esa hipótesis se han derivado consecuencias que se pueden comprobar de forma experimental, como la ley de la conservación de la masa, ley de las proporciones constantes, ley general de los gases, etc., y también se ha podido determinar las masas atómicas relativas de los elementos químicos y la fórmula empírica de compuestos, así como elaborar el sistema periódico de los elementos. Todo ello forma parte ya de una gran teoría científica: la Teoría Atómico-Molecular de la Materia.

También hemos tenido ocasión de cuestionar algunas ideas espontáneas tales como:

- ✓ La creencia de que entre las moléculas de un gas lo que hay es aire.
- ✓ La idea de que los gases no pesan.
- ✓ Atribuir propiedades macroscópicas a los átomos.
- ✓ Pensar que en algunas reacciones químicas puede aparecer o desaparecer masa.

Quedan todavía planteadas muchas preguntas como:

- ✓ ¿A qué se debe la periodicidad de propiedades en los elementos químicos?
- ✓ ¿Cómo son los átomos por dentro?
- ✓ ¿Cómo se enlazan unos átomos con otros? ¿Y unas moléculas con otras?
- ✓ ¿Cómo se nombran y se escriben los compuestos químicos?

Responder a las preguntas anteriores será esencial para comprender las transformaciones químicas.

## BREVE HISTORIA DEL SISTEMA PERIÓDICO DE LOS ELEMENTOS

Durante el siglo XIX el número de elementos químicos conocidos fue aumentando, a la vez que sus propiedades características fueron mejor establecidas. En consecuencia, surgió la conveniencia de encontrar alguna forma de agruparlos que facilitara su estudio. Los intentos de clasificación de los elementos se basaban, sobre todo, en intentar establecer agrupaciones con aquellos que presentaban unas propiedades más parecidas. Se plantearon fundamentalmente dos cuestiones:

*¿Faltan todavía muchos elementos por conocer?*

*¿A qué se debe que unos elementos tengan entre sí propiedades muy distintas y, en cambio, existan otros con propiedades muy parecidas?*

Si se lograba encontrar algún criterio que sirviera para clasificar los elementos quizás se podría arrojar alguna luz sobre preguntas como las anteriores

En 1815 el físico inglés William Prout al analizar las masas atómicas otorgadas por Dalton a algunos elementos, sugirió que los distintos elementos no eran sino diferentes combinaciones de átomos de hidrógeno. Según esta hipótesis las masas atómicas debían ser múltiplos de números enteros (se tomaba como unidad de masa atómica la masa del átomo de hidrógeno). No obstante, cuando se hicieron medidas más precisas de las masas atómicas, hubo que abandonar esta hipótesis ya que había muchos casos en los que no se cumplía.

Sin embargo, aunque las masas atómicas no estaban relacionadas con los elementos de una forma tan simple como la supuesta, lo cierto es que sí que se detectaba la existencia de alguna correlación entre las masas atómicas y las propiedades de algunos elementos químicos, existiendo familias o grupos de elementos cuyas propiedades variaban progresivamente con el valor de las masas atómicas. Esto ocurre, por ejemplo, con los puntos de fusión y ebullición de la familia de los halógenos (flúor, cloro, bromo y yodo) que van aumentando progresivamente conforme lo va haciendo la masa atómica de los mismos.

En 1829 el químico alemán J. W. Döbereiner se dio cuenta de que, para algunas familias, las masas atómicas de cualquiera de sus elementos intermedios eran iguales o aproximadamente iguales al valor medio de las masas atómicas de sus vecinos anterior y posterior. Así, por ejemplo, ocurre con la masa atómica relativa del bromo (79,9) que, aproximadamente es la media entre la del cloro (35,5) y la del yodo (127). Parecía pues que las masas atómicas de una misma familia de elementos debían de ir aumentando sucesivamente en progresión aritmética. Este tipo de hallazgos fue fortaleciendo la hipótesis de una cierta relación entre masa atómica y propiedades parecidas.

En la segunda mitad del siglo XIX se conocían ya más de 50 elementos químicos. El químico inglés J.H. Gladstone señaló que podía ser útil ordenarlos según sus masas atómicas crecientes. Su compatriota J.A.R. Newlands investigó dicha posibilidad y al hacerlo obtuvo que cada 8 elementos el último era una especie de repetición (propiedades análogas) del primero. En esa misma época el ruso Dimitri Mendeleiev y el alemán Lothar Meyer, cada uno por su lado y desconociendo ambos el trabajo de Newlands, trabajaron sobre la posibilidad de relacionar las masas atómicas y las propiedades de los elementos. En las publicaciones de Mendeleiev en 1869 y, un poco más tarde, en las de Meyer, se encuentra la culminación del trabajo de décadas anteriores. Cuando todavía no se conocía nada acerca de la estructura interna del átomo, Mendeleiev publicó su tabla periódica con 63 elementos y para lograr que ciertos elementos estuviesen colocados en el grupo adecuado tuvo la brillante idea de dejar algunos huecos vacantes, prediciendo la existencia de nuevos elementos (entonces todavía no descubiertos) e indicando, anticipadamente, algunas de sus propiedades.

En 2009 se conocían 118 elementos diferentes ordenados en el sistema periódico según su número atómico creciente. La mayoría de ellos se encuentra de una forma más o menos abundante en la naturaleza (podríamos decir que en el Universo, ya que analizando meteoritos y rocas de la Luna o de Marte así como la luz que nos llega de las estrellas, no se han encontrado elementos diferentes a los conocidos en la Tierra, lo que confirma el origen común de todos los astros). Existen algunos que no se encuentran en la naturaleza sino que han sido fabricados artificialmente (fundamentalmente los elementos más pesados, a partir del uranio), coloreados de amarillo en la tabla periódica de la página siguiente).

6. Teoría atómico molecular

SISTEMA PERIÓDICO DE LOS ELEMENTOS

P	Clave																Sólidos				Gases	Líquidos	Artificiales	Gases Nobles	
	Grupo 1A 1	Número atómico ← 7 14'0 → Masa atómica										Símbole										18 (0)			
1	1 1'0 H Hidrógeno	Nombre ← Nitrógeno										Símbole										2 4'0 He Helio			
2	3 6'9 Li Litio	4 9'0 Be Berilio											5 10'8 B Boro	6 12'0 C Carbono	7 14'0 N Nitrógeno	8 16'0 O Oxígeno	9 19'0 F Flúor	10 20'1 Ne Neón							
3	11 22'9 Na Sodio	12 24'3 Mg Magnesio	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIIB 7	8	VIII 9	10	IB 11	IIB 12	13 27 Al Aluminio	14 28'0 Si Silicio	15 31'0 P Fósforo	16 32'0 S Azufre	17 35'5 Cl Cloro	18 39'9 Ar Argón							
4	19 39'1 K Potasio	20 40'0 Ca Calcio	21 44'9 Sc Escandio	22 47'9 Ti Titanio	23 50'0 V Vanadio	24 52'0 Cr Cromo	25 55'0 Mn Manganeso	26 55'8 Fe Hierro	27 58'9 Co Cobalto	28 58'7 Ni Níquel	29 63'5 Cu Cobre	30 65'4 Zn Cinc	31 69'7 Ga Galio	32 72'6 Ge Germanio	33 74'9 As Arsénico	34 78'9 Se Selenio	35 79'9 Br Bromo	36 83'8 Kr Criptón							
5	37 85'5 Rb Rubidio	38 87'6 Sr Estroncio	39 88'9 Y Itrio	40 91'2 Zr Circonio	41 92'9 Nb Niobio	42 95'9 Mo Molibdeno	43 99'0 Tc Tecnecio	44 101'1 Ru Rutenio	45 102'9 Rh Rodio	46 106'4 Pd Paladio	47 107'9 Ag Plata	48 112'4 Cd Cadmio	49 114'8 In Indio	50 118'7 Sn Estaño	51 121'7 Sb Antimonio	52 127'6 Te Teluro	53 126'9 I Iodo	54 131'3 Xe Xenón							
6	55 132'9 Cs Cesio	56 137'3 Ba Bario	57 13 8'9 La Lantano	72 178'5 Hf Hafnio	73 180'9 Ta Tantalio	74 183'8 W Volframio	75 186'2 Re Renio	76 190'2 Os Osmio	77 192'2 Ir Iridio	78 195'1 Pt Platino	79 196'9 Au Oro	80 200'5 Hg Mercurio	81 204'3 Tl Talio	82 207'2 Pb Plomo	83 208'9 Bi Bismuto	84 210'0 Po Polonio	85 210'0 At Astatio	86 222'0 Rn Radón							
7	87 223 Fr Francio	88 226 Ra Radio	89 227 Ac Actinio	104 261 Rf Rutherfordio	105 262 Db Dubnio	106 266 Sg Seaborgio	107 264 Bh Bohrio	108 269 Hs Hesio	109 268 Mt Meitnerio	110 269 Ds Darmstadio	111 272 Rg Roentgenio	112 285 Cn Copernicio	113 284 Uut Ununtrio	114 289 Fl Flerovio	115 288 Uup Ununpentio	116 292 Lv Livermorio	117 Uus Ununseptio	118 294 Uuo Ununoctio							

Lantánidos 6	58 140'1 Ce Cerio	59 140'9 Pr Praseodim	60 144'2 Nd Neodimio	61 147 Pm Prometio	62 150'3 Sm Samario	63 151'9 Eu Europio	64 157'2 Gd Gadolinio	65 158'9 Tb Terbio	66 162'5 Dy Disproso	67 164'9 Ho Holmio	68 167'3 Er Erbio	69 168'9 Tm Tulio	70 173'0 Yb Iterbio	71 174'9 Lu Lutecio
Actínidos 7	90 232'0 Th Torio	91 231 Pa Protactinio	92 238'0 U Uranio	93 237 Np Neptunio	94 242 Pu Plutonio	95 243 Am Americio	96 247 Cm Curio	97 247 Bk Berkelio	98 251 Cf Californio	99 254 Es Einstenio	100 253 Fm Fermio	101 256 Md Mendelev	102 254 No Nobelio	103 257 Lr Laurencio

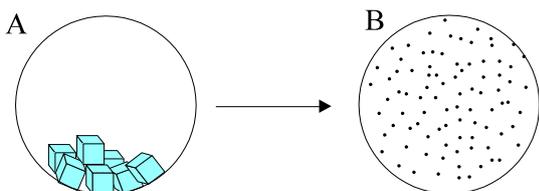
(El color indica el estado en que se encuentra en condiciones ordinarias de presión y temperatura, o si se trata de un elemento obtenido artificialmente)

## 6. CUESTIONES, EJERCICIOS Y PROBLEMAS

1. Una de las propiedades más conocidas del aire es su compresibilidad (que consiste en la reducción del volumen que ocupa, al presionar sobre él, como se comprueba fácilmente con una jeringuilla). Esto se interpreta correctamente diciendo que: (señalad la respuesta correcta).

- a) El aire es como una esponja (todo continuo), que al presionar se reduce.
- b) Entre las partículas existen espacios vacíos o huecos, que al presionar disminuyen de tamaño.
- c) Son las partículas las que al ser comprimidas se reducen de tamaño.

2. La figura A, representa una esfera conteniendo en su interior 20 g de hielo. A continuación se calienta hasta conseguir que todo se transforme en vapor de agua (figura B). Señalad con una cruz la proposición más correcta:



- a) B pesará lo mismo que A.
- b) B pesará un poco menos.
- c) B pesará 20 g menos.

3. Se sabe que conforme descendemos en el mar cada 10 m la presión aumenta aproximadamente en 1 atm. Un buceador se encuentra a 30 m de bajo la superficie respirando aire a 4 atm. Admitiendo que el volumen de aire en sus pulmones en un instante dado sea de 3 litros, se pide: Dad una explicación lo más detallada posible de por qué no debería ascender a la superficie rápidamente sin expulsar el aire que tiene en los pulmones.



4. En un recipiente con un émbolo que puede subir y bajar fácilmente existen  $750 \text{ cm}^3$  de un gas a la presión de 1 atm y  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Calentamos hasta que el gas ocupa un volumen de  $1500 \text{ cm}^3$  (manteniendo la presión constante). Calculad a qué nueva temperatura se encontrará el gas.  
Rdo. A una temperatura de  $313 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 6. Teoría atómico molecular

5. Un gas ocupa un volumen de 20 litros a 1 atmósfera y se comprime (a temperatura constante) hasta que su volumen se reduce a la quinta parte. ¿Cuál será la presión que ejercerá ahora el gas sobre las paredes? Rdo. Una presión de 5 atm

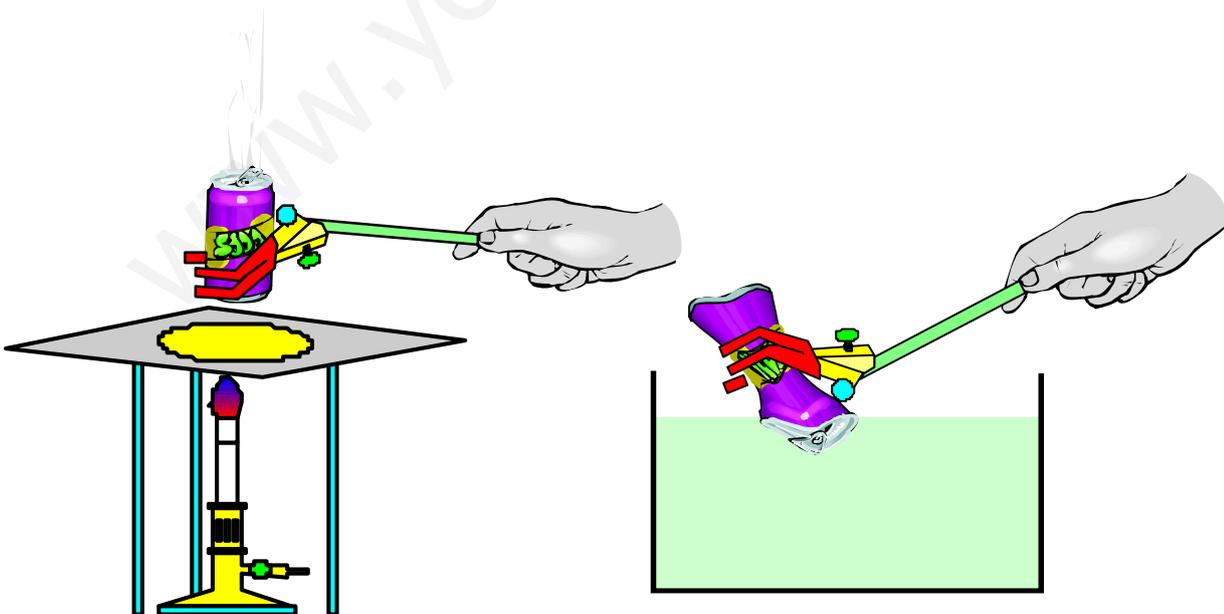
6. Un gas se encuentra en un recipiente cerrado de paredes fijas y  $750 \text{ cm}^3$  de volumen, a una presión de 740 mm de Hg y una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Determinad el nuevo valor de la presión en atmósferas, cuando se eleve la temperatura hasta  $100^\circ\text{C}$ . Rdo. El nuevo valor de la presión es  $1'24 \text{ atm}$

7. Un neumático de un automóvil contiene aire a una presión de  $2'1 \text{ bar}$  y una temperatura de  $15^\circ\text{C}$ . En una parada realizada después de recorrer un largo trayecto el conductor volvió a medir la presión y encontró una valor de  $2'5 \text{ bar}$ . ¿Funcionaba mal el aparato? Determinad la nueva temperatura del aire y explicad el porqué se recomienda siempre medir la presión de los neumáticos en frío (antes de circular con el vehículo). Nota: Haced la aproximación de suponer que la variación de volumen es despreciable. Rdo. La temperatura al final del trayecto es de  $69'9^\circ\text{C}$

8. Una persona afirma que es capaz de meter un huevo duro dentro de un recipiente con una abertura bastante más estrecha que el huevo y sin empujarlo. Primero coloca la botella debajo de un grifo del que sale agua muy caliente para calentar toda la botella bien por dentro y por fuera, echando también algo de agua dentro. Luego coloca el huevo duro (previamente pelado) sobre la boca de la botella de forma que la tape totalmente y la enfría rápidamente sumergiéndola hasta el cuello en agua fría observando que, efectivamente, el huevo se introduce dentro. Utilizad vuestros conocimientos sobre la naturaleza y comportamiento de los gases para explicar el fenómeno.



9. Se calienta un poco de agua dentro de una lata de refresco vacía. Luego, utilizando unas pinzas como las de la figura, se calienta hasta ebullición permitiendo que salga vapor de agua por el agujero de la lata durante unos instantes y después, con un movimiento muy rápido, se gira y se introduce boca abajo en un recipiente con agua dispuesto previamente al lado. Al realizar esta experiencia se comprueba que la lata se aplasta. Dad una explicación científica de este hecho.



10. A un estudiante, con la excusa de medir su capacidad pulmonar, le presentaron una botella como la de la figura y le pidieron que soplase fuertemente por el tubo para ver cuánto aire era capaz de meter dentro de la botella.



Sin pensarlo dos veces, se puso a soplar y en cuanto se separó del tubo salió por éste un chorro de agua que lo refrescó un poco. Dad una explicación científicamente satisfactoria del suceso.

11. Un profesor de ciencias realizó el siguiente experimento:

- 1º) Llenó un vaso de agua hasta el borde.
- 2º) Lo tapó con una hoja de papel plana
- 3º) Le dio la vuelta rápidamente

El resultado fue que el agua permaneció dentro del vaso sin caer. ¿Por qué?

12. ¿Por qué si se produce un agujero en el casco de un submarino que se encuentra navegando bajo la superficie del mar entra agua dentro del mismo y en cambio si se agujerea la ventanilla de un avión en pleno vuelo sale aire del avión al exterior?

13. Una persona que no sabe ciencias pero que presume de culta, está convencida de que:

- ✓ Una ventosa se mantiene sobre la pared aguantando incluso el peso de un paño de cocina porque al presionarla se ha quedado pegada.
- ✓ Se puede beber horchata mediante una pajilla porque al absorber aspiramos el líquido.
- ✓ Cuando se deja reposar un recipiente de cocina en el que ha estado hirviendo un líquido durante un rato, después no se puede quitar la tapadera porque lo de dentro se ha enfriado y por eso si se vuelve a calentar se quita fácilmente.
- ✓ El agua es una mezcla y el aire un compuesto.

Sugerid otras explicaciones más validas utilizando los conceptos aprendidos en este tema.

14. Señalad verdadero o falso a continuación de cada afirmación explicando el porqué:

- a) El vino sin ningún añadido químico es una sustancia pura
- b) El óxido de hierro es hierro que ha cambiado de color
- c) El amoniaco es un compuesto
- d) El ozono es una sustancia simple

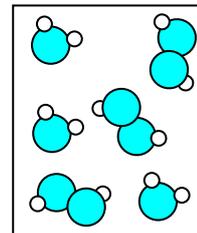
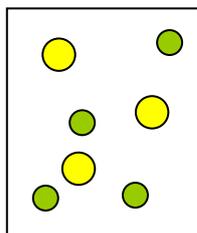
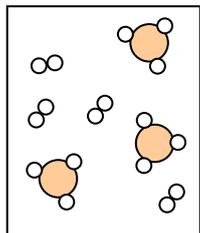
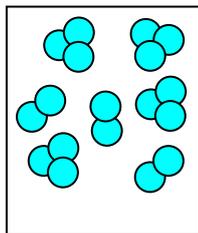
15. ¿Puede haber sustancias simples **distintas** pero formadas por el mismo elemento? Buscad en la bibliografía y dad una lista con los ejemplos que encontréis.

16. Experimentalmente se observa que al calentar mucho el hierro, se pone al rojo vivo y finalmente se funde. Este fenómeno se produce porque (explicad qué proposición es científicamente correcta).

- a) Las uniones entre los átomos de hierro cambian, de forma que se debilitan, muchas se rompen etc.
- b) Los átomos de hierro inicialmente duros, se hacen cada vez más blandos

## 6. Teoría atómico molecular

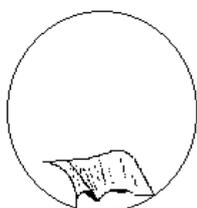
17. Los siguientes esquemas representan muestras de diferentes sustancias. Indicad en cada caso si se trata de una sustancia simple, una mezcla o un compuesto. Sugerid alguna sustancia(s) que, a presión y temperatura ambiente, pueda(n) ser la(s) representada(s) en el esquema.



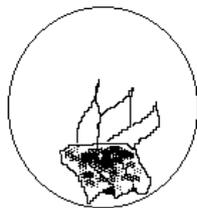
18. El agua es un compuesto cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Se pide:

- Representad dicha molécula y escribir su fórmula.
- Cuando hierve y pasa a vapor ¿sigue siendo agua?
- Representad esquemáticamente vapor de agua en un recuadro y una mezcla de oxígeno e hidrógeno gaseosos en otro.

19. Dentro de una esfera cerrada y transparente hay un trozo de papel y aire. Mediante una lupa hacemos que arda dicho papel hasta quemarse totalmente. Si pesamos todo el conjunto antes (1) y después (2) de la combustión, resultará que el peso de (2) será (señalad la propuesta correcta):



(1)



(2)

- Igual que el de (1).
- Menor que el de (1).
- Mayor que el de (1).

20. En la reacción entre hidrógeno y oxígeno a presión y temperatura constantes, se observa que cada litro de oxígeno que reacciona lo hace con 2 litros de hidrógeno para dar 2 litros de agua (todos en fase gaseosa). Utilizad estos datos para **razonar** que la molécula de agua no puede ser HO y en cambio sí puede ser H<sub>2</sub>O.

21. El metano (un gas que se desprende en los pantanos y del estiércol en descomposición) está formado por moléculas CH<sub>4</sub>. ¿Qué quiere decir esto? Al descomponer dos muestras diferentes de metano, se han obtenido los siguientes resultados:

Masa de metano descompuesta (g)	masa de carbono (g)	masa de hidrógeno (g)
15'56	11'67	3'89
21'27	15'95	5'32

- Comprobad que se cumple la ley de las proporciones constantes.
- Deducid** cuantas veces es mayor la masa del átomo de carbono que la del hidrógeno.

**22.** En la preparación de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) se obtuvieron los siguientes datos en un conjunto de experimentos:

Experimento	1	2	3	4
Masa de azufre (g)	1'92	49'30	27'04	7'68
Masa de hidrógeno (g)	0'12	3'08	1'69	0'47

- Verificad que se cumple la ley de las proporciones constantes
- Calculad la masa de hidrógeno (en g) que se habrá combinado con 10 g de azufre para formar el compuesto.
- Determinad qué masas (en g) de azufre y de hidrógeno se obtendrán cuando se descompongan totalmente 20 g de dicho compuesto en azufre y en hidrógeno.
- Hallad la masa atómica relativa del azufre respecto del hidrógeno.

Rdo. b) 0'625 g; c) 18'82 g de azufre y 1'18 g de hidrógeno

**23.** Se sabe que el carbono reacciona con el hidrógeno para dar metano. La fórmula del metano es  $\text{CH}_4$ . Experimentalmente se comprueba que al descomponer el metano por cada gramo de hidrógeno se obtienen siempre 3 g de carbono.

- Determinad la masa atómica relativa del C respecto del H
- Si mezclamos 5 g de hidrógeno con 9 g de carbono ¿Cuál será la máxima cantidad de metano que se podría obtener al hacerlos reaccionar? Rdo. b) 12 g

**24.** El nitrógeno gaseoso puede reaccionar con el oxígeno gaseoso para dar un compuesto llamado óxido de nitrógeno (I). Cuando dicha reacción tiene lugar a presión y temperatura constantes se observa que cada litro de oxígeno que reacciona lo hace con 2 litros de nitrógeno para dar dos litros del citado óxido. Con estos datos y sabiendo que tanto el nitrógeno como el oxígeno están formados por moléculas diatómicas, razona cuál ha de ser la fórmula del óxido de nitrógeno (I).

**25.** Calculad las masas moleculares relativas de los siguientes compuestos:

- $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; b)  $\text{HNO}_3$ ; c)  $\text{NH}_3$ ; d)  $\text{H}_2\text{O}$ ; e)  $\text{CH}_4$ ; f)  $\text{HCl}$

**26.** Cuando afirmamos que la masa molecular del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) es 98, queremos decir:

- Que cada molécula de ese ácido tiene una masa de 98 g.
- Que en 1 g de ese ácido hay 98 moléculas.
- Una molécula de ese ácido tiene una masa 98 veces mayor que la de un átomo de hidrógeno.

**27.** La fórmula del dióxido de carbono (uno de los principales gases causantes del efecto invernadero) es  $\text{CO}_2$ . Sabiendo que la masa atómica relativa del C es 12 y la del O es 16. Calculad cuántos gramos de  $\text{CO}_2$  se podrán obtener como máximo a partir de 100 g de carbono. Rdo. 366'7 g

**28.** Buscad los datos necesarios y calculad cuántos gramos de oxígeno y cuántos de hidrógeno se podrán obtener como máximo al descomponer totalmente un  $250 \text{ cm}^3$  de agua pura a presión y temperatura ambiente. Rdo. Se podrán obtener 27'8 g de hidrógeno y 222'2 g de oxígeno.

## 6. Teoría atómico molecular

**29.** La fórmula del óxido de hierro (III) es  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Sabiendo que la masa atómica relativa del hierro es 56 y la del oxígeno 16. Calculad el porcentaje en masa de hierro y de oxígeno que hay en este óxido.  
Rdo. Hay un 70% de hierro y un 30% de oxígeno

**30.** Los datos de la tabla siguiente corresponden a la reacción entre el oxígeno y el carbono para formar un óxido de carbono determinado, indicando la proporción en que se combinan las masas en gramos de las sustancias que intervienen.

Carbono (g)	Oxígeno (g)	Óxido de carbono (g)
6	16	
3		
		16'5

a) Completad razonadamente los datos que faltan en la tabla.  
b) Sabiendo que la masa atómica del carbono es 12 y la del oxígeno 16, **deducid** cuál será la posible fórmula de la molécula de dióxido de carbono.

**31.** Al analizar un compuesto de nitrógeno e hidrógeno, se ha encontrado un porcentaje en masa del 82'35% de nitrógeno y el resto de hidrógeno. Con estos datos, y sabiendo que la masa atómica relativa del nitrógeno es 14 y la del hidrógeno 1, **deducid** la fórmula empírica del compuesto.

Rdo.  $\text{NH}_3$

**32.** Un compuesto contiene un 74'87 % de carbono ( $A_r = 12$ ) y un 25'13 % de hidrógeno ( $A_r = 1$ ). Con estos datos deducid cuál es su fórmula empírica. Si nos dicen que su masa molecular es 16 ¿Cuál es su fórmula molecular?

Rdo.  $\text{CH}_4$

**33.** Un óxido de hierro contiene 69'94 % de hierro y 30'06% de oxígeno. Determinad la fórmula empírica de dicho compuesto. Masas atómicas relativas Fe (55'85) y O (16).

Rdo.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

**34.** Al quemar 2'371 g de carbono se forman 8'688 g de un óxido de carbono. Sabiendo que la masa atómica relativa del C es 12 y del O es 16, determina la fórmula empírica de dicho óxido.

Rdo.  $\text{CO}_2$

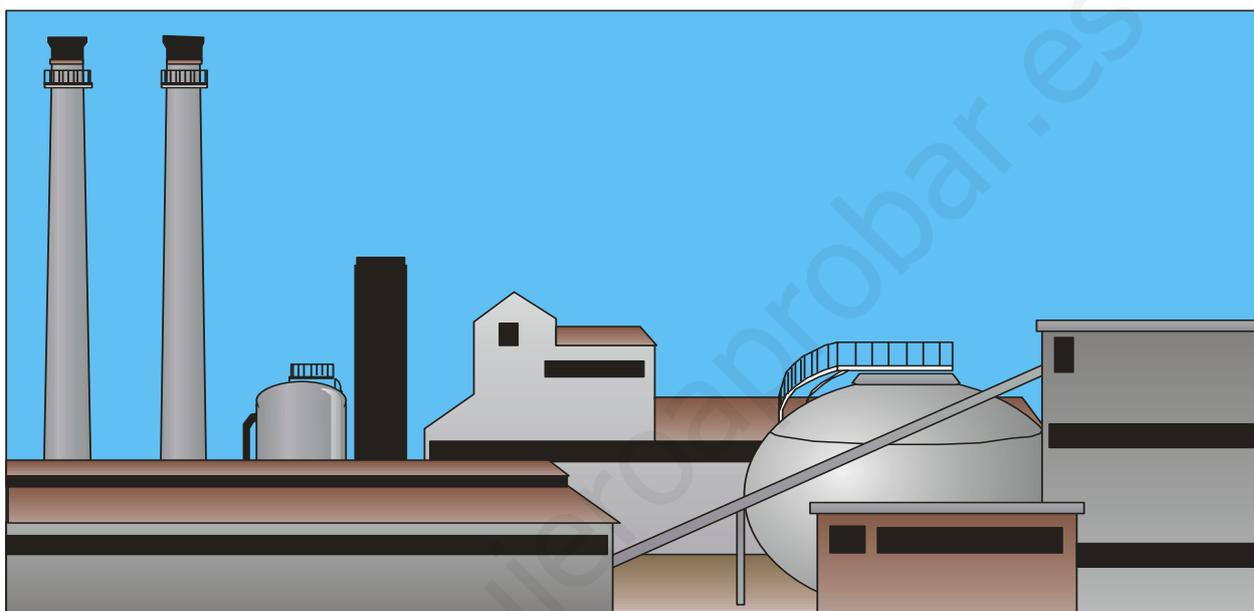
**35.** Un cloruro de mercurio contiene 84'97 % de mercurio (Hg) y el resto de cloro. Sabiendo que la masa atómica relativa del Hg es 200'5 y la del cloro 35'5, determinad la fórmula empírica de dicho compuesto. Si nos dicen que su masa molecular es 472 ¿Cuál es su fórmula molecular?

Rdo.  $\text{HgCl}$ ;  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$

## TEMA 7. REACCIONES QUÍMICAS

En este tema trataremos de profundizar y ampliar conocimientos en torno a un problema importante que ya se comenzó a estudiar el curso pasado (después de ver la estructura del átomo y el enlace químico). Dicho problema se puede enunciar así:

**¿Cómo explicar los cambios o transformaciones de unas sustancias en otras?**



Dichos cambios se denominan reacciones químicas y no sólo se producen artificialmente en los laboratorios para obtener determinadas sustancias que nos interesen, sino que también ocurren constantemente en la naturaleza (incluyendo a todos los seres vivos). No obstante, no siempre es fácil distinguir entre un proceso químico y uno físico, por lo que interesa detenerse en este aspecto antes de proceder al estudio de los procesos químicos.

En muchos casos se detecta que se ha producido una reacción química, cuando al mezclar las sustancias se forma un precipitado, se desprenden gases, se produce un cambio de color, etc. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que estos efectos no siempre garantizan que tenga lugar una reacción. Pensemos por ejemplo, en el cambio de color (y sabor) que se produce cuando mezclamos café con leche, en las burbujas de gas que se desprenden al abrir una botella de cava, en la sustancia de color blanco que se deposita en las resistencias de los lavaplatos y lavadoras, etc., que no son indicativos de ninguna reacción química.

**A.1.** *¿Por qué los cambios que acabamos de citar no se asocian a una reacción química?*

Para que pueda hablarse de una reacción química, han de producirse nuevas sustancias (productos de la reacción) diferentes a las sustancias iniciales (reaccionantes), cosa que no ocurre en ninguno de los ejemplos citados. El problema, es pues determinar cuándo se producen nuevas sustancias.

## 7. Reacciones químicas

*A.2. Clasificad los siguientes procesos como químicos o como físicos, señalando los criterios utilizados para ello: destilación del vino, dilatación de un gas, evaporación del agua, combustión de la pólvora, corrosión del hierro, disolución de sal común en agua, obtención de hierro a partir de sus minerales.*

Aunque en general resulta sencillo reconocer un proceso como físico o químico **por el hecho de la producción de nuevas sustancias**, hay algunos cambios que difícilmente entran dentro de una de estas categorías. Un ejemplo es el de la disolución de una sustancia (soluto) en un disolvente en estado líquido. Para clasificar estos cambios generalmente se recurre a ver si por evaporación del líquido puede recuperarse el soluto inicial inalterado. Así en una disolución de sal común en agua, esta puede recuperarse por evaporación cuidadosa del agua, por lo que el proceso podría en este caso considerarse como un cambio físico aún cuando la interacción entre los componentes de la disolución sea considerable. Sin embargo, la disolución de cloruro de hidrógeno gaseoso en agua habría de ser considerada como un cambio químico ya que las propiedades de la disolución son muy diferentes a las de los componentes y la evaporación no es un medio factible de recuperar por completo las sustancias iniciales. La clasificación de las disoluciones como cambios físicos o químicos muestra pues algunas dificultades en cuanto a las definiciones exactas que se pueden utilizar, presentándose algunos casos que se encuentran en la línea fronteriza.

En la cuestión propuesta, la destilación del vino, la dilatación de un gas, evaporación del agua y disolución de sal común en agua serían cambios físicos mientras que el resto serían cambios químicos.

*A.3. Indicad aquellos aspectos fundamentales de una reacción química que convendría estudiar con detenimiento bien sea por su interés práctico o por cualquier otro motivo.*

Entre otros aspectos fundamentales podríamos referirnos a los siguientes:

- ✓ ¿Para qué sirven? Es decir ¿Qué beneficios (y perjuicios) nos aportan?
- ✓ ¿Cómo tienen lugar? ¿Cómo se escriben?
- ✓ ¿Qué tipo de sustancia se formará a partir de unos reaccionantes dados?
- ✓ ¿Qué relación existe entre las cantidades de sustancias reaccionantes y de productos de la reacción?
- ✓ ¿Qué cambios energéticos ocurren?
- ✓ ¿Con qué velocidad se produce una reacción? (o bien: ¿Cuándo terminará?).

En este curso nos limitaremos a desarrollar un modelo elemental para las reacciones químicas incluyendo algunos de sus aspectos básicos como los cambios materiales y los energéticos.

### 1. LAS DOS CARAS DE LOS CAMBIOS QUÍMICOS

En la actualidad los cambios químicos tienen características negativas para muchas personas. Así, por ejemplo, la expresión “eso tiene química” se utiliza, a menudo para descalificar un producto. Se trata, sin duda, de una imagen demasiado simplista que conviene analizar.

*A.4. Sugerid razones por las cuales interese dominar la producción y el control de las reacciones químicas y discutir, la importancia que en general tiene su estudio. Dad razones a favor y en contra de fabricar cada vez más sustancias nuevas.*

- ✓ En cuanto a la utilización de las reacciones químicas como "fuentes" de energía podemos referirnos en primer lugar a la fabricación de la pólvora y, posteriormente de potentes explosivos (utilizados para derribar viejos edificios en ruinas, construir túneles, carreteras, embalses de agua, etc.). Obtención de combustibles (transporte de mercancías y personas de unos lugares a otros, lanzamiento de naves espaciales, cocinar alimentos, calefacción, etc.). Nosotros mismos, obtenemos energía mediante un proceso químico (la respiración).
- ✓ En la industria farmacéutica, resaltar la importancia de los medicamentos obtenidos mediante procesos químicos, desde la vulgar aspirina (control del dolor, de la temperatura corporal, etc.) a los anticonceptivos (control de la natalidad), anestésicos y ciertas drogas (control del dolor), antibióticos como la penicilina (combatir bacterias), las vitaminas, etc.
- ✓ En la agricultura, los abonos obtenidos artificialmente mediante reacciones químicas permiten aumentar el rendimiento de las cosechas, lo mismo que el uso de herbicidas y de insecticidas. La utilización de plásticos para fabricar invernaderos ha supuesto una auténtica revolución al posibilitar disponer de muchos productos fuera de temporada.
- ✓ En la alimentación, la fabricación de conservantes alimentarios ha permitido alargar la fecha de caducidad de muchos productos. También la fabricación de hojalata (material resistente a la oxidación) y de envases ligeros de aluminio, ha producido grandes cambios en toda la industria conservera y de refrescos.
- ✓ En la industria textil, la obtención de tejidos sintéticos artificiales a partir del petróleo, algunos de los cuales no precisan plancharse, ha sido de gran importancia para la fabricación de prendas de vestir y para aumentar la disponibilidad de tiempo libre.
- ✓ En la construcción podemos encontrar muchos ejemplos de cambios químicos y también de control de diversos cambios. La fabricación de materiales como el yeso, el cemento, cerámica, etc., tiene un papel crucial en la construcción de viviendas, etc., lo mismo que otros materiales como el hierro, el aluminio, las pinturas, etc. Otros productos como los antioxidantes, etc., sirven para evitar o frenar cambios no deseados (corrosión).
- ✓ En la industria del transporte en general, la obtención de combustibles (gasolina, gasoil, alcohol, gas, etc.), de aceites lubricantes para motores, de caucho para los neumáticos, metales, pinturas y plásticos para carrocerías, materiales más ligeros para fabricar vehículos menos pesados (ahorro de combustibles), baterías, etc.
- ✓ En la industria de productos de limpieza, la fabricación de jabones, detergentes, lejía, amoníaco, sulfamán, abrillantadores, ceras para el suelo, etc., han permitido una mayor higiene de la población y control de enfermedades. En la cosmética, los perfumes y productos de belleza en general (tintes de pelo, cremas antiarrugas, protectores solares, etc.) hacen que las personas nos encontremos mejor, con un aspecto más agradable.
- ✓ Podríamos citar otros muchos materiales importantes en cuya fabricación son necesarios cambios químicos, como, por ejemplo, el papel (periódicos, libros, etc.), el vidrio (ventanales, puertas, recipientes, etc.), los pegamentos, los quitamanchas, los anticongelantes en los vehículos, los colorantes artificiales, etc. Especial interés tiene la preparación y fabricación de nuevos materiales, como el plástico PVC (marcos de ventanas, envases, juguetes, etc.), el gore-tex (prendas y calzado deportivo), alimentos deshidratados (excursionismo, viajes espaciales, etc.), cristales líquidos (relojes, ordenadores, etc.), superconductores, etc.

## 7. Reacciones químicas

Los ejemplos anteriores permiten comprender que la Química ha tenido y sigue teniendo contribuciones muy positivas para la humanidad al posibilitar muchos cambios y el control de otros a nuestra conveniencia. Sin embargo, ello tampoco debe hacernos olvidar otros aspectos que no tan beneficiosos, como los que, a modo de ejemplo, se citan a continuación:

- ✓ El control efectivo sobre algunas reacciones químicas de interés ha producido su utilización masiva generando efectos negativos sobre el medio ambiente. Este es el caso de las reacciones de combustión. En efecto, el incremento del "efecto invernadero", responsable de un aumento de la temperatura media global del planeta, está producido por el vertido a la atmósfera de grandes cantidades de gases como el dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y otros, que se generan, sobre todo, al quemar combustibles fósiles en vehículos a motor, centrales térmicas, calefacción, ciertas industrias, etc. También contribuyen a dicho incremento ciertos gases que se utilizan en aparatos de aire acondicionado, frigoríficos, espumas, etc. Algunos de estos gases son también responsables de la disminución del espesor de la capa de ozono que nos protege de las radiaciones peligrosas que nos llegan del sol (aumento de casos de cáncer de piel y de problemas oculares).
- ✓ En muchas reacciones químicas de utilización masiva no sólo se producen las sustancias o los efectos deseados por nosotros, sino también sustancias y efectos nocivos. Por ejemplo, la contaminación atmosférica y la lluvia ácida, que se producen debido a la presencia de ciertos gases en la atmósfera, como los óxidos de nitrógeno y de azufre que se generan, por ejemplo, al quemar combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbón). Dichos gases pueden reaccionar con el vapor de agua y dar lugar a lluvias ácidas, causantes de la deforestación de muchos bosques y el deterioro de los monumentos de piedra (catedrales, etc.). La contaminación atmosférica existente en algunos grandes núcleos urbanos es causa de enfermedades respiratorias. En algunas grandes ciudades como la capital mejicana hay días en los que los niños no pueden salir a jugar fuera y frecuentemente es necesario restringir la circulación de vehículos.
- ✓ Los conocimientos sobre reacciones químicas pueden utilizarse para producir a propósito sustancias perjudiciales para la salud, como drogas sintéticas y armas químicas. El abuso de medicamentos o la drogadicción causan grandes gastos a la sanidad pública.
- ✓ A veces se producen nuevas sustancias con propiedades positivas pero de las que se desconocen (o no se valoran adecuadamente en función del interés de la mayoría de la población actual y futura) sus efectos a medio y largo plazo sobre el medio. Existen así, en tierra y mar, materiales que tardan mucho tiempo en degradarse, como latas, envases, bolsas (hojalata, aluminio, plásticos, etc.); metales tóxicos o muy tóxicos (mercurio, plomo, cadmio, etc.) utilizados en la fabricación de muchos productos (pilas y baterías eléctricas, pinturas, etc.). Contaminación de aguas subterráneas y productos del campo causada por la utilización excesiva de abonos químicos, herbicidas y plaguicidas en general. Algunos de estos contaminantes (como, por ejemplo, el mercurio) van aumentando su concentración cuando pasan de unos seres vivos a otros, hasta llegar a las personas.
- ✓ Entre los efectos negativos, tampoco podemos dejar de mencionar la utilización bélica de muchos productos (guerra química) como el fósforo, los gases venenosos, bombas y explosivos en general, etc., o los graves accidentes que con demasiada frecuencia ocurren en el transporte de ciertos productos como el petróleo crudo.

Así pues: contaminación ambiental, incremento del efecto invernadero, adelgazamiento de la capa de ozono, guerra química, pérdida de biodiversidad, aumento de enfermedades respiratorias, proliferación de alergias, lluvia ácida, aumento del consumo de drogas, descenso de la fertilidad,

aumento de cánceres, etc., son, desgraciadamente, situaciones que también guardan relación con la fabricación y utilización masiva de nuevas sustancias.

La existencia simultánea de aspectos tan positivos y otros tan negativos, hace conveniente un análisis más profundo de las causas que fomentan los negativos. Es cierto que los plásticos, por ejemplo, favorecen las cosechas en cantidad y en diversidad, pero también que contaminan el medio ambiente y no siempre es posible solucionar el problema fabricando un producto respetuoso con el medio ambiente (por ejemplo un plástico biodegradable). La ciencia no tiene solución para todo. No podemos pensar que la solución de problemas tan graves es cuestión de que los científicos encuentren el "antídoto" adecuado. Es necesario que en las decisiones para fabricar o utilizar ciertos productos, o para consumirlos, participemos todos los ciudadanos considerando sus ventajas y sus inconvenientes. Si esa toma de decisiones se hace libremente, con la información adecuada, pensando en el futuro y en el beneficio de la mayoría, posiblemente se pueda lograr un desarrollo sostenible, más respetuoso con el medio ambiente y con nosotros mismos.

Con lo que hemos avanzado en la teoría atómico-molecular de la materia ya sabemos que una reacción química supone la formación de moléculas (o agregados atómicos en general) distintas de las iniciales. Si queremos comprender y controlar las reacciones deberemos elaborar pues un modelo de formación de las nuevas moléculas y ponerlo a prueba.

## 2. UN MODELO ELEMENTAL PARA LAS REACCIONES QUÍMICAS

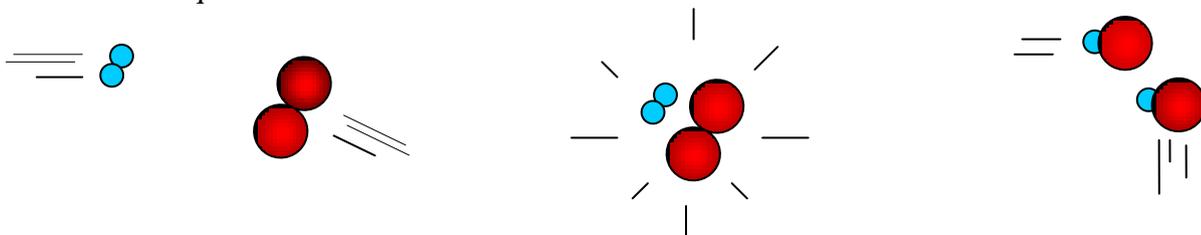
Una reacción química puede considerarse como la transformación de las sustancias presentes inicialmente (reaccionantes) en otras nuevas (productos).

*A.5. Explicad a modo de hipótesis cómo puede producirse una reacción química. Señalad las principales etapas del proceso. Concretad, por ejemplo, para el caso de la transformación de yodo e hidrógeno en estado gaseoso en yoduro de hidrógeno, también en estado gaseoso.*

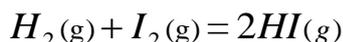
Para que una reacción ocurra es necesario un proceso de ruptura de los enlaces existentes en las sustancias reaccionantes que haga posible el establecimiento de nuevos enlaces, es decir, la formación de nuevas sustancias (productos de la reacción). El choque entre partículas (que ya sabemos que no son bolas macizas) hace posible tanto la ruptura de enlaces (si la energía del choque es suficiente) como el establecimiento de nuevas uniones. El proceso suele favorecerse cuando se aumenta la temperatura. El modelo que estamos manejando permite pensar que esto ocurre porque las partículas que chocan con una dirección favorable han de superar una energía mínima necesaria para que se puedan romper unos enlaces y formar otros (es decir, para que el choque sea "efectivo") y al aumentar la temperatura, aumenta la energía cinética de muchas partículas.

En el ejemplo considerado existen moléculas de  $H_2$  y de  $I_2$  que, tras reaccionar, producen moléculas de HI. Para que este proceso tenga lugar no es suficiente con que las moléculas de ambos gases (hidrógeno y yodo) tengan la posibilidad de chocar entre ellas. Eso es una condición necesaria pero no suficiente. En efecto, si la temperatura fuese muy baja la reacción no se produciría; por el contrario, si se eleva la temperatura se observa que se favorece la formación de HI. Este hecho se interpreta admitiendo que una elevación de temperatura supone un aumento de la energía cinética promedio con que se mueven las moléculas y, por tanto, de la violencia con que se producen los choques, lo que hace que aumente a su vez el número de estos que son efectivos, es decir, que producen roturas de enlaces H-H y I-I, dando lugar a átomos de H y átomos de I los cuales pueden unirse para formar moléculas de HI, como se indica en la figura:

## 7. Reacciones químicas



Este modelo elemental de reacción química nos indica que en una reacción, a nivel microscópico, lo que tiene lugar es una "reorganización" de los átomos que constituyen las sustancias reaccionantes, para dar lugar a nuevas sustancias. En nuestro caso, el proceso se puede esquematizar globalmente diciendo que cada molécula de hidrógeno que reacciona, lo hace con una de yodo para dar dos moléculas de yoduro de hidrógeno, y escribirlo mediante la ecuación química:



donde, como podemos ver, están representadas todas las sustancias que participan en la reacción (tanto reaccionantes como productos), la proporción en que se combinan y la fase de cada sustancia (en las condiciones de presión y temperatura a que tiene lugar la reacción).

Conviene tener en cuenta que el modelo que hemos ideado es muy elemental y que, con frecuencia, en una reacción química intervienen tantas partículas que sería imposible un choque simultáneo entre todas ellas, dada la escasa probabilidad de tal suceso. En general habrá que suponer pues, que una reacción tiene lugar a través de una serie de pasos o etapas simples, más o menos rápidas, donde se pueden formar diversos productos diferentes, de existencia más o menos efímera, pero que intervienen en las mismas. Por otra parte, en muchos casos (como el que estamos analizando) es posible que las moléculas de los productos de la reacción sufran también choques que hagan que vuelvan a dar las sustancias de partida, de forma que la reacción acabe cuando se alcance el equilibrio, es decir: cuando por cada partícula que se forme otra igual se descomponga. Una doble flecha se utiliza para resaltar que se trata de una reacción de este tipo.

No obstante, el modelo de reacción que estamos manejando, aunque es muy simple, nos va a permitir enfrentarnos a preguntas tales como:

- ✓ ¿Qué cantidad de una sustancia vamos a necesitar emplear en una reacción química para obtener una cierta cantidad de un producto determinado?
- ✓ ¿Qué calor se obtendrá al quemar una cierta cantidad de un combustible dado?

### 3. Ajuste elemental de las ecuaciones químicas

Si lo que ocurre en una reacción química a nivel macroscópico (desaparición de unas sustancias y formación de otras nuevas en determinadas cantidades), se debe a una reorganización de átomos formando nuevos agregados, la cuantificación o balance a nivel atómico y molecular del proceso, puede conducirnos a realizar predicciones macroscópicas que se pueden contrastar experimentalmente, tal y como veremos a continuación.

De acuerdo con el modelo anterior, en una reacción química (que se realice en un medio cerrado) los átomos son siempre los mismos, solo que en los productos de la reacción están agrupados de forma diferente que en las sustancias reaccionantes. Una consecuencia de esto es que la masa total habrá de conservarse durante todo el proceso. Además, en la ecuación química que representa la reacción, el número de átomos de cada elemento deberá de ser el mismo en ambos lados.

**A.6.** El hierro (sólido) en contacto con el oxígeno (gaseoso) forma, en determinadas condiciones, óxido de hierro (III), sólido. Escribid la ecuación correspondiente a dicha reacción y a continuación proponed un método para escribir correctamente una ecuación química.

Al ajustar una ecuación química es preciso estar atento a los posibles errores que se pueden cometer. Estos suelen ser principalmente de dos tipos: aplicar la conservación de los átomos cambiando las fórmulas de los compuestos (por ejemplo  $3\text{O} + \text{Fe}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o ignorar la conservación ( $\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Para evitarlos conviene escribir en primer lugar las fórmulas de reaccionantes y de productos y luego proceder a ajustar los coeficientes para que hayan los mismos átomos en ambos lados pero sin modificar para nada las fórmulas, es decir, sin cambiar los subíndices que aparecen en ellas y las caracterizan. En el caso de que al realizar el ajuste por tanteo salgan números decimales, se pueden convertir en enteros sin más que multiplicar por 2. En el caso propuesto, por ejemplo, un primer intento podría llevar a:  $2\text{Fe} + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$

Multiplicando a continuación por 2, tendremos:  $4\text{Fe (s)} + 3 \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (s)}$ .

La ecuación química anterior<sup>1</sup> indica la proporción (en principio a nivel atómico-molecular) en que se combinan las especies químicas que intervienen en ella. En este caso podría enunciarse diciendo que: Por cada cuatro átomos de hierro que reaccionan lo hacen con 3 moléculas de oxígeno para dar dos unidades de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (el óxido de hierro formado es un compuesto iónico y, por tanto, sus unidades no son moléculas).

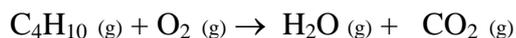
**A.7.** Aplicad el método propuesto para construir la ecuación correspondiente a las reacciones:

- a) Gas propano,  $\text{C}_3\text{H}_8$  y oxígeno para obtener dióxido de carbono y vapor de agua
- b) Dióxido de azufre y oxígeno para dar trióxido de azufre
- c) Ácido sulfúrico e hidróxido de sodio para dar sulfato de sodio y agua

Rdo. a)  $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ; b)  $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$ ; c)  $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

En muchos casos, las ecuaciones químicas son difíciles de ajustar mediante tanteo y requieren métodos más sistemáticos, como el que se expone a continuación, denominado **método algebraico** el cual resulta apropiado para aquellas reacciones en las que el número de moléculas (o unidades fórmula) no supere en más de uno al número de átomos distintos que intervienen en la reacción (contando en ambos casos reaccionantes y productos).

El método algebraico consiste en plantear una serie de ecuaciones basadas en el principio de conservación de la masa y, por tanto, en que ha de haber los mismos átomos en los productos que en los reaccionantes. Lo estudiaremos a partir de un ejemplo sencillo como es la reacción de combustión del butano. La ecuación sin ajustar correspondiente a dicha reacción es:

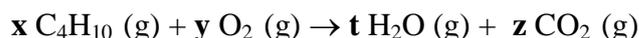


**1.** En primer lugar nos damos cuenta de que en esta ecuación hay 4 moléculas distintas y tres átomos distintos. Como el número de moléculas supera en uno al número de átomos distintos, será aplicable el método algebraico.

<sup>1</sup> A veces, en las ecuaciones químicas se indica la fase o estado de las sustancias al final de la fórmula y entre paréntesis: sólido (s), gaseoso (g), líquido (l), acuoso (ac o aq).

## 7. Reacciones químicas

2. A continuación escribimos delante de los compuestos los símbolos x, y, t, z, p, etc., indicativos de los coeficientes que hemos de determinar.



3. Según el principio de conservación de la masa el número de átomos de un mismo tipo deberá ser el mismo en los reaccionantes que en los productos de la reacción, lo que nos lleva a plantear las siguientes ecuaciones:

Para el carbono:  $4x = z$

Para el hidrógeno:  $10x = 2t$

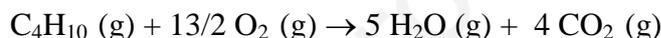
Para el oxígeno:  $2y = 2z + t$

En el sistema anterior vemos que hay tantas ecuaciones como átomos distintos (en este caso 3) y tantas incógnitas como compuestos distintos (en este caso 4). En muchas reacciones se cumple:

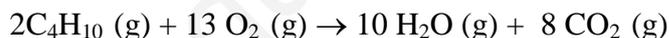
Número de sustancias distintas que intervienen en la reacción = número de átomos distintos + 1

Ello implica que dando un valor arbitrario (por ejemplo el 1) a cualquiera de las incógnitas obtendremos un sistema de ecuaciones fácilmente resoluble y un conjunto adecuado de valores para los coeficientes.

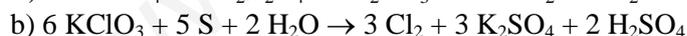
4. Si hacemos  $x = 1$ , en las ecuaciones anteriores, se deduce fácilmente que:  $z = 4$ ,  $t = 5$ ,  $y = 13/2$ , con lo cual la ecuación quedará como:



Si multiplicamos por 2 para eliminar la fracción tendremos la ecuación final ajustada según la proporción más sencilla de números enteros:



**A.8. Ajustad por el método algebraico las siguientes ecuaciones:**



Un aspecto a tener muy en cuenta es que los coeficientes o números que aparecen delante de las fórmulas no significan en modo alguno que todas esas partículas tengan que chocar a la vez para provocar la reacción. Tampoco indica las partículas que hay. De hecho aunque intervengan unos pocos gramos de sustancias, debido al pequeño tamaño de moléculas y átomos, el número de partículas implicadas es habitualmente inmensamente grande (muchos millones y millones). Lo que nos indican realmente esos coeficientes es simplemente la proporción en que se combinan las partículas implicadas. Así, en el caso de la combustión del butano antes estudiado, la ecuación ajustada a la que se ha llegado, debe interpretarse (a nivel atómico-molecular) como que de cada 2 moléculas de butano que reaccionen lo harán con 13 moléculas de oxígeno, dando 10 moléculas de agua y 8 moléculas de dióxido de carbono.

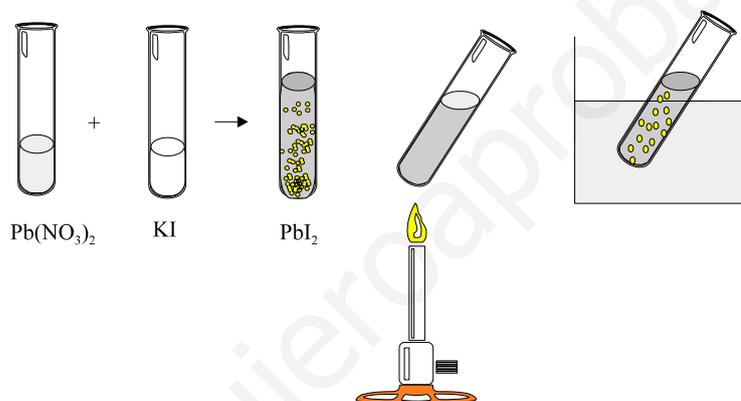
**A.9.** Realizad en el laboratorio y escribir la ecuación química correspondiente, para las siguientes reacciones, indicando el estado físico de reaccionantes y productos.

a) Ioduro de potasio y nitrato de plomo (II)

b) Cinc y ácido clorhídrico.

Las reacciones propuestas presentan un cierto interés. La primera por su espectacularidad (en la reacción se produce ioduro de plomo (II) el cual, al dejarlo enfriar, da lugar al efecto conocido como "lluvia de oro"). La segunda por plantear técnicas básicas de laboratorio (recogida e identificación del gas hidrógeno).

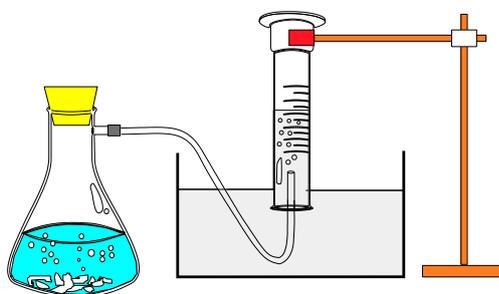
Para realizar la primera reacción basta proceder como se indica en la figura siguiente, mezclando las disoluciones de nitrato de plomo (II) y ioduro de potasio, con lo que se produce un precipitado amorfo de ioduro de plomo (II), que desaparece al calentar. Si posteriormente se enfría (por ejemplo metiendo el tubo en un recipiente con agua), se producen unos cristalitos de ioduro de plomo (II) de color amarillo (lluvia de oro).



La reacción ajustada es:  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 (\text{aq}) + 2 \text{KI} (\text{aq}) \rightarrow \text{PbI}_2 (\text{s}) + 2 \text{KNO}_3 (\text{aq})$

Para realizar la segunda reacción se necesita disponer de un poco de cinc (es suficiente con una cantidad entre 0,5 g y 1 g) y ácido clorhídrico concentrado. Se puede realizar un montaje como el de la figura para recoger el hidrógeno gaseoso que se desprende, según:

$\text{Zn} (\text{s}) + 2 \text{HCl} (\text{aq}) \rightarrow \text{ZnCl}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2 (\text{g})$



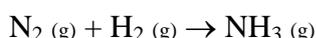
En el montaje propuesto la cubeta contiene agua y la probeta se ha llenado previamente de agua antes de darle la vuelta (tapando para que no se salga) y colocarla como se indica. Puede comprobarse que el gas recogido de esta forma se trata de hidrógeno si, después de extraer la probeta de

## 7. Reacciones químicas

la cubeta con agua, sin inclinarla, aplicamos una llama a la boca de dicha probeta. Se observa cómo se produce una pequeña explosión, resultado de la rápida combustión del hidrógeno, y se recoge el agua formada, en pequeñas gotas sobre las paredes interiores. Es importante no inclinar la probeta para evitar que el hidrógeno se mezcle con el aire dando lugar a una mezcla explosiva. Si se hace así no hay ningún peligro. No obstante se trata de una experiencia que hay que realizar en presencia del profesor y con las adecuadas medidas de precaución. También es necesario utilizar cantidades mínimas de sustancias y no verter los restos ya que tanto el cloruro de cinc como las sales de plomo son muy tóxicas para el medio ambiente (especialmente el acuático).

*A.10. El nitrógeno gas puede reaccionar con el hidrógeno gas para obtener amoníaco gas. Calculad cuantas moléculas de amoníaco se podrán formar por cada 20.000 millones de moléculas de nitrógeno que reaccionen.*

Una primera ecuación con las fórmulas correctas de reaccionantes y productos será:



Si ahora ajustamos la ecuación tendremos:  $\text{N}_2 (\text{g}) + 3\text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow 2\text{NH}_3 (\text{g})$

La ecuación anterior se interpreta diciendo que por cada molécula de nitrógeno que reaccione lo hará con 3 moléculas de hidrógeno para dar dos moléculas de amoníaco. Por tanto, atendiendo a esa proporción, la respuesta a lo que se demanda en la pregunta anterior será que se podrán formar 40 000 millones de moléculas de amoníaco.

Sabemos que en cualquier cantidad de una sustancia pura habrá un número entero de moléculas (o unidades estructurales en general) iguales. La teoría atómico-molecular y, en particular, el modelo de reacción que estamos manejando, debería permitirnos predecir, en base a la proporción en que reaccionan las moléculas, la proporción en que reaccionan las masas o volúmenes de las sustancias implicadas en la reacción, es decir: pasar de un nivel atómico (manejando átomos y moléculas) a un nivel macroscópico, (manejando masas y volúmenes).

## 4. INTRODUCCIÓN Y MANEJO DEL CONCEPTO DE MOL

El número de partículas que intervienen en general en una reacción química es enormemente grande (aunque la masa de las sustancias que intervengan sea de unos pocos gramos). Con la ecuación química correctamente escrita y ajustada, se puede conocer, por ejemplo, cuantas moléculas de un determinado producto podrían obtenerse por cada molécula de reaccionante; basta para ello, analizar los coeficientes que aparecen en la ecuación y hacer una sencilla proporción.

Sin embargo, más que saber cuántas moléculas de un producto determinado se podrían obtener (o cuántas de un determinado reaccionante se van a necesitar), lo que nos interesa es conocer la masa de esa sustancia (gramos, kilogramos, etc.) o el volumen (litros, mililitros, etc.), según el caso. Por tanto, sería muy útil poder calcular a partir de un número dado de partículas (átomos, moléculas o iones) de una sustancia determinada, su masa o su volumen (que es lo que podemos cuantificar más fácilmente en el laboratorio). El concepto de **mol** sirve para lograr este objetivo. Las actividades que siguen a continuación están destinadas a su introducción.

*A.11. Comprobad que dados dos elementos cualesquiera siempre que sus masas expresadas en gramos coincidan numéricamente con sus respectivas masas atómicas relativas el número de átomos presentes de cada uno será el mismo.*

Supongamos un elemento Q que tenga doble masa atómica que otro elemento R. Eso quiere decir que cada átomo de Q tendrá una masa justo el doble que cada átomo de R. Por tanto en una muestra de 2 gramos del elemento Q deberá haber el mismo número de átomos que en 1 gramo del elemento R. Este resultado se puede generalizar y afirmar que cualesquiera que sean las masas atómicas de Q y de R siempre que tengamos una masa del elemento Q y otra del elemento R que, numéricamente, coincidan con sus respectivas masas atómicas (o que guarden entre sí la misma proporción que sus masas atómicas), contendrán el mismo número de átomos.

El razonamiento anterior tiene, por supuesto, una base matemática: Si llamamos  $A_Q$  a la masa atómica relativa de Q,  $m_H$  a la masa que tenga un átomo de hidrógeno (sea cual sea), y  $N_Q$  al número total de átomos de Q existente en una muestra dada de dicho elemento, podemos escribir:

masa de la muestra Q =  $A_Q \cdot m_H \cdot N_Q$  (1). Si hacemos lo mismo para el elemento R:

masa de la muestra R =  $A_R \cdot m_H \cdot N_R$  (2)

Dividiendo ahora las dos ecuaciones anteriores entre sí:  $\frac{\text{masa de Q}}{\text{masa de R}} = \frac{A_Q}{A_R} \cdot \frac{N_Q}{N_R}$

La última expresión obtenida nos dice que  $N_Q$  será igual a  $N_R$  siempre que:  $\frac{\text{masa de Q}}{\text{masa de R}} = \frac{A_Q}{A_R}$

De acuerdo con los resultados anteriores, el número de átomos presentes en muestras de 1 g de hidrógeno, 14 g de nitrógeno, 16 g de oxígeno, etc., es el mismo (porque las masas atómicas respectivas son, precisamente, 1, 14, 16, etc.). Dicho número recibe el nombre de **número de Avogadro** y se designa como  $N_A$ . El valor de  $N_A$  se puede determinar experimentalmente de diversas formas y resulta ser aproximadamente de  $6'02 \cdot 10^{23}$ .

*A.12. Comprobad que dados dos compuestos químicos cualesquiera, siempre que sus masas expresadas en gramos estén en la misma proporción que sus respectivas masas moleculares, contendrán el mismo número de moléculas (o unidades fórmula) y que ese número es, precisamente el número de Avogadro  $N_A$ .*

Para comprender esta cuestión pensemos, por ejemplo, en el caso del agua y del hidrógeno. La masa molecular relativa del agua es 18, mientras que la masa atómica relativa del hidrógeno es 1, luego en 18 g de agua tendrá que haber el mismo número de moléculas de agua que átomos de hidrógeno en 1 g de hidrógeno ( $N_A$ ).

Lo mismo que hemos hecho para el agua, lo podríamos hacer para cualquier otro compuesto (amoníaco, ácido sulfúrico, cloruro de sodio, etc.) o elemento molecular ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Cl_2$ , etc.) y llegaríamos al mismo resultado. Por tanto, siempre que tengamos una masa en gramos de una sustancia pura que numéricamente coincida con su masa molecular, tendremos  $N_A$  moléculas (o unidades fórmula si es iónica).

Así pues y como conclusión general podemos afirmar que:

Siempre que tengamos masas de sustancias expresadas en gramos que numéricamente coincidan con sus masas atómicas o moleculares, en dichas masas habrán  $N_A$  átomos o  $N_A$  moléculas (o unidades fórmula) respectivamente.

Se trata de una conclusión a recordar ya que en ella se basa, como veremos, el concepto de mol.

## 7. Reacciones químicas

En efecto: un **mol** (o bien, una mol) se define como la cantidad de sustancia de un sistema que contiene el número de Avogadro de las entidades elementales características de dicha sustancia.

Entre las distintas clases de “entidades elementales” de una sustancia se encuentran los átomos (por ejemplo en el caso de un gas noble o un metal), moléculas (compuestos como el agua, amoníaco, sulfúrico... y sustancias simples como el oxígeno, cloro, ozono, ...) o unidades fórmula (compuestos iónicos como el cloruro de sodio, sulfato de potasio...). El mol es pues la unidad en que se mide una magnitud denominada **cantidad de sustancia** al igual que, por ejemplo, el gramo es una unidad que se utiliza para medir una magnitud llamada **masa**.

*A.13. Supongamos que en una cierta cantidad de sustancia hay un total de  $N$  partículas determinadas y que se conoce el valor de  $N$ . Proponed una expresión que sirva para obtener cuántos moles de esas partículas existen en dicha cantidad de sustancia.*

Dado que cada  $N_A$  partículas forman una mol, para saber el número de moles,  $n$ , que hay en  $N$  partículas habrá que hacer:

$$n = N/N_A$$

Cuando  $N$  sea el número total de átomos,  $n$  serán los moles de átomos existentes, mientras que cuando  $N$  se refiera al número total de moléculas,  $n$ , serán los moles de moléculas, etc.

Se denomina **masa molar** de una sustancia a una magnitud cuyo valor numérico coincide con el de la masa correspondiente a un mol de las entidades elementales características que conforman dicha sustancia. Dicha magnitud se designa por  $M$ . Se suele expresar en g/mol (en unidades internacionales es kg/mol) y su valor numérico coincide con el de la masa molecular relativa (en el caso de que las "unidades" de la sustancia sean moléculas o agregados de iones) o con el de la masa atómica relativa (en el caso de que las "unidades" de la sustancia sean átomos simples).

Así, por ejemplo, si la masa molecular relativa del agua es 18, su masa molar será 18 g/mol y eso significa que cada mol de moléculas de agua (las unidades o agregados atómicos característicos del agua) tiene una masa de 18 g. Análogamente, si la masa molecular relativa del nitrógeno es 28, su masa molar será 28 g/mol, lo que significa que un mol de moléculas de nitrógeno tendría una masa de 28 g.

*A.14. Averiguad la masa molar (en g/mol) del neón, oro, oxígeno, cloruro de sodio, ozono, y ácido sulfúrico, indicando su significado.*

Rdo: Ne (20'2 g/mol); Au (197g/mol); O<sub>2</sub> (32 g/mol); NaCl (58'5 g/mol); O<sub>3</sub> (48 g/mol), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98 g/mol). En todos los casos significa los gramos que tiene una mol de unidades estructurales (átomos, moléculas o unidades fórmula) características de cada sustancia.

En adelante, pues, para expresar la masa molar  $M$  de una sustancia pura se dará su masa molecular o su masa atómica (según corresponda) acompañada de la unidad g/mol.

*A.15. Deducid qué relación existirá entre la masa expresada en gramos de una cierta muestra de una sustancia, su masa molar expresada en g/mol y el número de moles de las unidades características que conforman dicha sustancia.*

Dado que, por ejemplo, a un mol de moléculas de una sustancia siempre le corresponde una masa en gramos que coincide numéricamente con su masa molar  $M$ , para determinar cuántos moles de moléculas hay en una masa cualquiera de  $m$  gramos de sustancia bastará hacer:

$$n = \frac{m \text{ (g)}}{M \text{ (g/mol)}}$$

La expresión anterior nos sirve para calcular tanto los moles de moléculas (sustancias como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.) como los moles de "unidades fórmula" (sustancias como  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaF}_2$ , etc.) o los moles de átomos (en sustancias como  $\text{He}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{C}$ , etc.).

A continuación, antes de realizar cálculos materiales en las reacciones químicas (estequiometría), se proponen algunas sencillas actividades para aprender a manejar este nuevo concepto.

**A.16.** Se disponen de 6 moles de moléculas de gas cloro. Se pide:

- ¿Cuántas moléculas de cloro hay?
- ¿Cuántos átomos de cloro?

Como en una mol de moléculas hay  $N_A$  moléculas, para saber cuántas moléculas en total ( $N$ ) hay en " $n$ " moles de moléculas, bastará hacer:

$N = n \cdot N_A$ , luego no tenemos más que sustituir los datos y obtener:  
 $N_{(\text{Cl}_2)} = 6 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 3,6 \cdot 10^{24}$  moléculas de cloro.

Para contestar la segunda pregunta es preciso tener en cuenta que cada molécula de cloro consta de dos átomos de cloro luego deberá haber el doble número de átomos de cloro que de moléculas. Por tanto la respuesta será:  $N_{(\text{Cl})} = 2 \cdot N_{(\text{Cl}_2)} = 2 \cdot 3,6 \cdot 10^{24} = 7,2 \cdot 10^{24}$  átomos de cloro.

**A.17.** Se dispone de una masa de 35 g de nitrógeno molecular. Se pide:

- ¿Cuántos moles de moléculas de nitrógeno hay?
- ¿Cuántos moles de átomos de nitrógeno hay?

Mediante un sistema periódico podemos saber que la masa atómica del nitrógeno es 14. Como su molécula está formada por dos átomos ( $\text{N}_2$ ), resultará que su masa molecular relativa será 28 y su masa molar 28 g/mol. Es decir, que en cada 28 g de nitrógeno habrá una mol de moléculas.

Para saber cuántos moles de moléculas hay en una masa  $m$ , bastará dividir el valor de dicha masa (en gramos) por el valor de la masa molar  $M$  (en gramos/mol), es decir:

$n_{\text{N}_2} = \frac{m}{M}$  y sustituyendo  $n_{\text{N}_2} = 35/28 = 1,25$  moles de moléculas de nitrógeno

Como una molécula de nitrógeno consta de dos átomos, 20 moléculas constarán de 40 átomos y  $N_A$  moléculas (1 mol) de  $2N_A$  átomos (2 moles), luego el número de moles de átomos (en el nitrógeno y, en general en todas las sustancias simples diatómicas), será el doble que el número de moles de moléculas, es decir:  $n_{\text{N}} = 2 \cdot n_{\text{N}_2} = 2 \cdot 1,25 = 2,5$  moles de átomos de nitrógeno.

**A.18.** Obtened la cantidad de sustancia en: a) 34 g de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). b) 234 g de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ). c) 3,6 g de carbono ( $\text{C}$ ). d) 602 millones de moléculas de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Rdo. a) 2 moles de moléculas  $\text{NH}_3$ ; b) 4 moles de unidades fórmula  $\text{NaCl}$ ; c) 0,3 moles de átomos  $\text{C}$ ; d)  $10^{-15}$  moles de moléculas de agua.

## 7. Reacciones químicas

**A.19.** *Determinad la masa en gramos de una sola molécula de agua. A continuación calculad cuántas moléculas de agua puede haber en una gota de 0'05 g de dicho compuesto.*

Rdo.  $2'99 \cdot 10^{-23}$  g;  $1'67 \cdot 10^{21}$  moléculas

Una gran parte de las sustancias que se manejan en un laboratorio se hallan en disolución, por lo que nos interesa también saber calcular la **cantidad de sustancia** (expresada por el número de moles de unidades estructurales correspondientes) de una sustancia que se encuentre disuelta. Conviene tener en cuenta que una disolución no tiene que ser necesariamente de un sólido en un líquido. Se dan también otros casos como, por ejemplo, gases en un líquidos (como ocurre con las bebidas carbónicas), líquidos en líquidos, etc. A la sustancia que se encuentra en menor cantidad (la que se disuelve) se la denomina **soluto** y a la otra **disolvente**. El conjunto de ambas forma la **disolución**. Cuanto más soluto exista en un volumen determinado de disolución, decimos que mayor es su concentración. A continuación trataremos el problema de cómo expresar la concentración molar de una disolución.

### 4.1. Concentración molar de una disolución

Una forma de expresar la concentración de una sustancia (soluto) en una disolución es mediante la "**molaridad**" cuyo valor coincide con el número de moles de soluto<sup>2</sup> existentes por cada litro de disolución. Cuantos más moles de soluto haya por cada litro de disolución mayor será la concentración. Para un cierto soluto X se puede designar la molaridad como [X] o como C y se mide en moles de soluto/litro de disolución. Así, por ejemplo, una disolución de un soluto X cuya molaridad sea  $C = 5$  moles/l (también suele representarse por  $C = 5$  M) significa que en cada litro de esa disolución hay 5 moles de soluto y se dice que la disolución es "5 molar".

**A.20.** *Se prepara una disolución de una sustancia añadiendo agua destilada a "m" gramos de dicha sustancia (colocados previamente en un vaso) hasta tener un volumen de disolución de "V" litros. ¿Cómo podríamos hallar la molaridad de esa disolución?*

De acuerdo con la definición de concentración molar, habrá que dividir la cantidad de sustancia de soluto (que se expresa en moles de soluto,  $n_s$ ) por el volumen V de la disolución (expresado en litros). Por tanto:

$$C = \frac{n_s}{V} \text{ moles/l}$$

El número de moles de soluto se puede calcular como  $n_s = m/M$  en donde m es la masa de soluto (en gramos) y M su masa molar (en gramos/mol), de modo que sustituyendo en la expresión anterior obtenemos:

$$C = \frac{m/M}{V} \text{ moles/l}$$

en donde m es la masa del soluto en gramos, M su masa molar (g/mol) y V el volumen de la disolución en litros.

**A.21.** *Calculad la concentración molar de una disolución preparada disolviendo 7'5 g de sulfato de cobre (II) pentahidratado en agua hasta obtener un volumen de 750 cm<sup>3</sup> de disolución.*

---

<sup>2</sup> Cuando se diga simplemente número de moles de una sustancia dada, debe entenderse que nos referimos al número de moles de las unidades estructurales (por ejemplo moléculas o unidades fórmula) características de dicha sustancia cuando ésta se encuentra en condiciones ordinarias de presión y temperatura.

Bastará con calcular la cantidad de sustancia del soluto, es decir del sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), y dividirla entre el volumen (en litros) de disolución. La masa molar del soluto es 249,5 g/mol, así que el número de moles de unidades fórmula de dicho soluto será:

$$n_s = \frac{m}{M} = \frac{7,5}{249,5} \text{ moles de } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

Si ahora sustituimos en la expresión de la concentración molar:  $C = \frac{n_s}{V} = \frac{7,5}{0,75} = 0,04 \text{ moles/l}$

**A.22.** *Describid detalladamente cómo se podría preparar un volumen de 100 cm<sup>3</sup> de una disolución de sulfato de cobre(II) pentahidratado 0,5 M.*

Una disolución acuosa se prepara añadiendo agua destilada a una cierta cantidad de soluto. Así pues tendremos que calcular primero qué cantidad de sulfato de cobre (II) pentahidratado deberemos colocar en un matraz vacío:

El número de moles de dicha sustancia será:  $n_s = C \cdot V = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05 \text{ moles de } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Puesto que la masa de 1 mol de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  es de 249,5 g/mol, la masa (expresada en gramos) correspondiente a esos 0,05 moles vendrá dada por  $m = n \cdot M = 0,05 \cdot 249,5 = 12,475 \text{ g}$

De acuerdo con lo visto, el proceso consistirá en echar en un matraz vacío 12,475 g de sulfato de cobre (II) pentahidratado (en polvo) y luego añadir agua destilada para, a continuación, remover hasta que se disuelva totalmente el sulfato y, finalmente, añadir más agua hasta enrasar a 100 cm<sup>3</sup>

**A.23.** *Calculad la masa (en gramos) de cloruro de sodio que hay en 250 cm<sup>3</sup> de una disolución acuosa 0,1 M de dicha sal.*

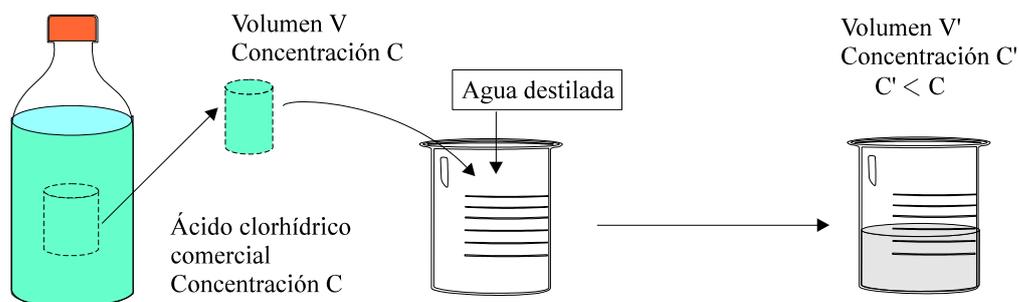
Rdo. 1,46 g de cloruro de sodio

**A.24.** *¿Qué volumen de ácido clorhídrico 12 M precisaremos para obtener 40 cm<sup>3</sup> de disolución 3 M de ese mismo ácido?*

Son muchas las situaciones en las que se tiene una o varias sustancias disueltas y se desea rebajar la concentración de la disolución. Son conocidas, por ejemplo, las prácticas de añadir agua a bebidas alcohólicas. En los laboratorios de química se suelen disponer de disoluciones acuosas de ácidos y bases muy concentradas, con lo que ocupan menos espacio. Para pintar paredes se suele rebajar la pintura con agua. En muchas operaciones habituales en los laboratorios (por ejemplo en las valoraciones) se han de manejar volúmenes de disoluciones de ácidos y bases de una concentración determinada y para ello es muy frecuente diluir adecuadamente las disoluciones concentradas que venden las casas que comercializan productos químicos.

Se trata de calcular qué volumen V de disolución de concentración molar conocida (C), se precisa para obtener un volumen V' de disolución de una concentración molar menor (C'). El proceso puede visualizarse de la manera siguiente:

## 7. Reacciones químicas



*¿De qué factores cabe esperar que dependa la magnitud buscada?*

En principio, podemos pensar que el volumen buscado dependerá de las concentraciones  $C$  y  $C'$  así como del volumen de disolución diluida que se quiera obtener. Operativamente esto puede expresarse como:

$$V = V(C, C', V')$$

Podemos tratar de ir un poco más allá y hacer alguna hipótesis respecto a la forma en que podría influir cada uno de los factores anteriores señalando que:

A igualdad de las restantes variables influyentes en el proceso, cabe esperar que:

- ✓ Cuanto mayor sea el volumen  $V'$  de disolución diluida que deseamos preparar, mayor será el volumen  $V$  de disolución concentrada que deberemos coger de la botella, es decir: Si  $V'$  aumenta,  $V$  también aumentará.
- ✓ Cuanto mayor sea la concentración  $C'$  de la disolución diluida que queremos preparar, mayor será el volumen  $V$  de disolución concentrada que deberemos coger de la botella, es decir: Si  $C'$  aumenta,  $V$  también aumentará.
- ✓ Cuanto mayor sea la concentración  $C$  de la disolución de la botella, menos volumen de disolución necesitaremos extraer de la misma para preparar un volumen  $V'$  dado de disolución diluida (de concentración  $C' < C$ ), es decir: Si  $C$  aumenta,  $V$  disminuirá.

También podemos considerar alguna situación límite evidente como, por ejemplo, que si  $C' = C$  los volúmenes  $V$  y  $V'$  deberían ser iguales (no habría que añadir nada de agua) o que si  $C'$  fuese 0,  $V$  también tendría que serlo. También es evidente que si lo que queremos es diluir, el valor de  $V$  siempre tendrá que ser inferior al de  $V'$ .

Una forma de relacionar  $V$  con las magnitudes de las cuales pensamos que depende (datos del problema), es investigando si en el proceso de dilución hay algo que se mantenga invariable (búsqueda de regularidades).

En primer lugar conviene darse cuenta que la concentración de HCl en el volumen  $V$  deberá de ser idéntica a la concentración  $C$  correspondiente al clorhídrico comercial de la botella, ya que el hecho de sacar un poco de la disolución de la botella, afecta a la cantidad de soluto (que dependerá del volumen de disolución que se extraiga) pero no a su concentración que, lógicamente, habrá de permanecer invariable.

En segundo lugar, la cantidad de soluto HCl existente en el volumen  $V$  tiene que ser la misma que la que existe en el volumen  $V'$  ya que lo único que añadimos para diluir es agua destilada. Por tanto, el número de moles de HCl existente en la disolución diluida habrá de ser el mismo que el número de moles de HCl existente en el volumen  $V$  de disolución concentrada que extraí-

gamos de la botella. Como el número de moles de soluto está relacionado con la concentración molar de la disolución y con el volumen de la misma, una forma de resolver el problema sería igualar las expresiones correspondientes a los moles de HCl en V y en V' y a partir de la ecuación resultante obtener V.

De acuerdo con el razonamiento anterior:  $n_s = n'_s$

Como el número de moles de soluto de una disolución se puede expresar como el producto de la concentración molar por el volumen (en litros), sustituyendo en la ecuación anterior tenemos:

$$C \cdot V = C' \cdot V' \quad \text{de donde obtenemos finalmente que:} \quad \boxed{V = \frac{C' \cdot V'}{C}}$$

y sustituyendo  $V = 3 \cdot 0'04 / 12 = 0'01$  litros =  $10 \text{ cm}^3$

Analizando el resultado literal anterior vemos que es dimensionalmente homogéneo y que además, contempla todas las hipótesis iniciales incluyendo los casos límite considerados.

Por otra parte, es conocido que en las botellas en donde se comercializan los ácidos y bases que se usan en los laboratorios de química, no se suele indicar la concentración molar, siendo habitual que en la etiqueta figure la densidad de la disolución y la riqueza porcentual (gramos de soluto por cada 100 gramos de disolución). *¿Cómo podríamos proceder en este caso?*

Tendríamos que variar el resultado literal anterior expresando la concentración molar C en función de los datos que conocemos (densidad de la disolución y riqueza de la misma):

Para ello sabemos que  $n_s = m_s / M$  siendo  $m_s$  la masa (en gramos) de soluto y M su masa molar (en gramos/mol). Como la masa de soluto  $m_s$  está relacionada con la masa total m de la disolución mediante la riqueza porcentual de la misma, podemos escribir que  $m_s = \frac{r}{100} \cdot m$  siendo r el valor de la riqueza en tanto por cien.

Incluyendo las transformaciones anteriores en la expresión de la concentración molar C:

$$C = \frac{n_s}{V} = \frac{m_s}{M \cdot V} = \frac{r \cdot m}{M \cdot V \cdot 100}$$

y teniendo en cuenta que  $m/V$  representa la densidad "d" de la disolución en g/l, nos queda:

$$C = \frac{r \cdot d}{M \cdot 100} \quad \text{moles/l} \quad (\text{si } r \text{ en } \%, d \text{ en g/l y } M \text{ en g/mol})$$

y sustituyendo esta última expresión en el resultado anterior obtenemos:  $V = \frac{C' \cdot V' \cdot M \cdot 100}{r \cdot d}$  litros (si C' en moles/l, V' en l, M en g/mol, d en g/l y r en %).

## 7. Reacciones químicas

### 4.2. Medida de la cantidad de sustancia en el caso de gases

En un gran número de reacciones químicas intervienen sustancias en estado gaseoso. Por ello es frecuente que en lugar de conocer la masa en gramos, se conozca el volumen ocupado por un gas a una cierta presión y temperatura. Es pues necesario aprender a calcular la cantidad de sustancia (que, como ya sabemos, se mide en moles) a partir de estos datos. A continuación veremos cómo.

**25.** Recordemos que la ecuación de los gases venía dada por la expresión:  $PV = CNT$  en la que  $C$  era una constante igual para todos los gases (ved páginas 210-212). Transformad dicha ecuación de modo que aparezca en ella el número de moles de moléculas.

Bastará tener en cuenta la expresión, ya vista anteriormente, que relaciona el número total de partículas con el total de moles de partículas, es decir:  $N = n \cdot N_A$  con lo que nos queda que:

$PV = C n N_A T$  y si designamos a  $C \cdot N_A$  como  $R$  (constante de los gases), obtenemos la ecuación:

$$P V = n R T$$

La expresión  $PV = n RT$  relaciona la cantidad de sustancia del gas que se trate, con las propiedades físicas presión, volumen y temperatura de dicho gas. Se conoce como ecuación general de los gases perfectos o gases ideales (debido que para deducirla se ha hecho la simplificación de suponer que las moléculas de los todos los gases son masas puntuales entre las que no existe ningún tipo de fuerzas atractivas, lo que no es sino una aproximación a la realidad). En dicha expresión  $R$  vale 0'082 siempre que la presión se exprese en atmósferas (1 atm = 760 mm de Hg), la temperatura en K y el volumen en litros.

**A.26.** Calculad el volumen que ocupará una mol de cualquier gas en condiciones normales de presión y de temperatura (1 atm y 0° C)

Rdo. 22'4 l

**A.27.** En un recipiente vacío de 10 l se introducen 16 g de oxígeno ( $O_2$ ). La temperatura del recipiente es de 27°C. Se pide:

- ¿Qué cantidad de sustancia hay dentro del recipiente?
- ¿Qué presión ejerce el gas sobre las paredes?
- ¿Qué cantidad de sustancia (oxígeno molecular) será preciso añadir para que la presión se duplique, manteniendo constantes la temperatura y el volumen?

La cantidad química de oxígeno molecular se mide en número de moles de moléculas de  $O_2$ . Dicho número se representa por "n" y, como ya sabemos, se puede hallar a partir de la masa mediante la expresión:

$$n_{O_2} = m/M \text{ de modo que sustituyendo obtenemos: } n_{O_2} = 16/32 = 0,5 \text{ moles de moléculas } O_2$$

Cuando la cantidad de sustancia anterior se encuentra ocupando un volumen de 10 l y a una temperatura de 300 K (27 + 273), el valor de la presión queda determinado pues, según hemos visto antes, se ha de cumplir que  $PV = n RT$ .

Despejando  $P$  y sustituyendo valores obtenemos:  $P = nRT/V = 0'5 \cdot 0'082 \cdot 300/10 = 1'23 \text{ atm.}$

Para que la presión se hiciera el doble, es decir  $P' = 2'46$  atm, a igual volumen y temperatura, la cantidad química de oxígeno molecular que debería haber en el recipiente (y que designaremos como  $n'$ ), tendría que ser tal que se cumpliera la ley de los gases perfectos  $P'V = n' RT$  de donde:

$n' = P'V/RT = 2'46 \cdot 10/0'082 \cdot 300 = 1$  mol de  $O_2$ , luego como ya había 0'5 moles deberíamos añadir otros 0'5 moles.

Una vez que nos hemos familiarizado con el concepto de mol, estamos en condiciones de comprobar su utilidad para realizar cálculos estequiométricos.

## 5. INICIACIÓN A LOS CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS

Cuando leemos la ecuación correspondiente a una reacción química, estamos obteniendo información acerca de la proporción en que los distintos reaccionantes y productos participan en esa reacción, y, puesto que lo que tenemos son proporciones, lo mismo nos da hablar de partículas que de moles de partículas.

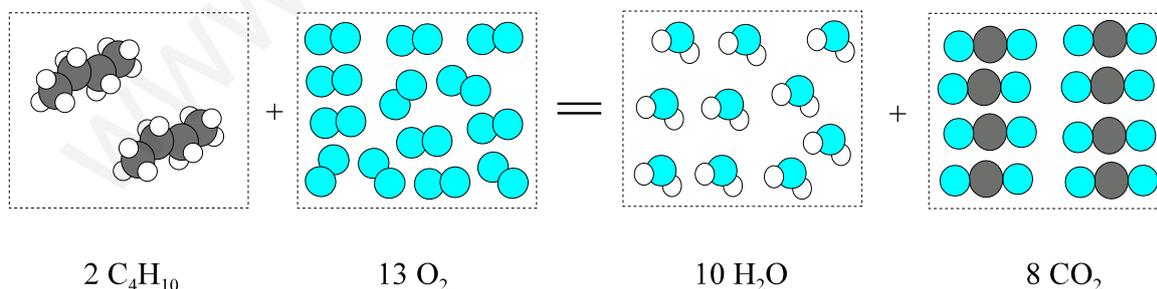
La combustión del butano es una reacción química muy utilizada, ya que la energía que se obtiene a partir de la misma se suele utilizar para calefacción, cocinar, etc. Como en todos los hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno), cuando el butano se quema en el aire, se produce dióxido de carbono y agua.

**A.28.** *Extraed toda la información posible contenida en la ecuación:*



*correspondiente a la combustión del butano.*

La ecuación química mostrada proporciona información cualitativa acerca de las sustancias que intervienen (composición y estado físico) y también información cuantitativa en dos escalas: la escala atómica (proporción en que se combinan las moléculas) y la escala macroscópica (proporción en que se combinan los moles de las distintas sustancias que intervienen). En la figura siguiente se representa de forma esquemática la proporción en que se combinan las partículas de las sustancias reaccionantes y de los productos de la reacción:



Podemos decir que esa reacción ocurre de tal manera que:

**Por cada 2 moléculas de butano que reaccionan lo hacen 13 moléculas de oxígeno y se obtienen 10 moléculas de agua y 8 moléculas de dióxido de carbono.**

## 7. Reacciones químicas

Conviene tener en cuenta que los coeficientes indican proporción en que se combinan las partículas y no, por supuesto, el número de partículas que intervienen realmente en la reacción el cual es habitualmente inmenso. Dicha ecuación nos indica también que, por ejemplo, de cada 20 millones de moléculas de butano que reaccionen, lo harán con 130 millones de moléculas de oxígeno para dar 100 millones de moléculas de agua y 80 millones de dióxido de carbono. Por lo tanto igual podemos referirnos al número de Avogadro de moléculas ( $N_A = 6'02 \cdot 10^{23}$  moléculas = 1 mol) y afirmar a nivel macroscópico que:

**Por cada 2 moles de moléculas de butano que reaccionan lo hacen 13 moles de moléculas de oxígeno y se obtienen 10 moles de moléculas de agua y 8 moles de moléculas de dióxido de carbono.**

En la identidad anterior es donde reside la gran ventaja de utilizar el concepto de mol:

Todo lo que digamos acerca de la proporción en que se combinan las partículas en una reacción (a partir de la ecuación química correspondiente debidamente ajustada), es también válido para la proporción en que se combinan los moles de las sustancias formadas por esas mismas partículas.

Es decir los coeficientes que aparecen delante de las fórmulas en las ecuaciones químicas ajustadas pueden significar tanto partículas como moles de partículas; y utilizar los moles de cantidad de sustancia para calcular, por ejemplo, los gramos de masa, es algo que ya sabemos hacer.

**A.29.** *¿Cuántos kilogramos de  $CO_2$  se obtendrán al quemarse totalmente 12 kg de butano?*

En primer lugar, como toda la información química que podemos obtener de la ecuación química ajustada se refiere a cantidades de sustancia (número de moles), debemos plantear el problema en términos de cantidades de sustancias.

De acuerdo con el razonamiento anterior la pregunta pasa a ser:

¿Cuántos moles de  $CO_2$  se obtendrán al quemarse totalmente un número de moles dado (los correspondientes a 12 kg) de butano?

En este caso la cantidad química de butano que se quema será:

$$n_{C_4H_{10}} = \frac{m}{M} = \frac{12000}{58} = 206'9 \text{ moles de moléculas de butano}$$

Al quemarse esa cantidad de butano no se puede producir cualquier cantidad de  $CO_2$ , sino que el número de moles de  $CO_2$  producido deberá cumplir la proporción que se deduce de la ecuación química ajustada. Es decir:

$$\frac{n_{CO_2}}{n_{C_4H_{10}}} = \frac{8}{2} \text{ Por tanto, sustituyendo el número de moles de butano que reacciona: } \frac{n_{CO_2}}{206'9} = \frac{8}{2}$$

Despejando el número de moles de  $CO_2$ , obtenemos:  $n_{CO_2} = \frac{8}{2} \cdot 206'9 = 827'6$  moles de  $CO_2$

Finalmente, una vez conocida la cantidad química (medida en moles) de  $\text{CO}_2$  producido, podemos obtener fácilmente su masa, sin más que sustituir en la expresión:  $m = n \cdot M$ , ya justificada anteriormente, los datos correspondientes al  $\text{CO}_2$ . Es decir:

$$m = n \cdot M = 827'6 \cdot 44 = 36.414'4 \text{ g de } \text{CO}_2 \approx 36'414 \text{ kg de } \text{CO}_2$$

**A.30.** *El fuel que se emplea en una central térmica contiene un 0'8 % en peso de azufre. Suponiendo que todo el azufre reacciona con el oxígeno para dar dióxido de azufre y que en la central citada se queman al día 40 toneladas de fuel ¿cuántos litros de dióxido de azufre gaseoso (medidos a 730 mm de Hg y 120 °C) salen por la chimenea diariamente?*

Al quemar un combustible como el fuel (mezcla de hidrocarburos pesados procedentes del petróleo) siempre se producen gases con efectos contaminantes. Uno de ellos es el  $\text{CO}_2$  (que contribuye a aumentar el efecto invernadero) que resulta de la combustión de los hidrocarburos y otro el  $\text{SO}_2$  debido a la combinación del azufre que contiene el fuel (como impureza) con el oxígeno del aire. Este último gas, contribuye a que se produzca el fenómeno de las lluvias ácidas que tantos bosques (sobre todo del norte de Europa) ha destrozado.

En general casi todas las emisiones de  $\text{SO}_2$  a la atmósfera son debidas a la utilización industrial de combustibles fósiles (con un contenido variable de azufre como impureza) fundamentalmente en la industria, el transporte y la calefacción. Sólo una mínima parte se debe a otras causas como, por ejemplo, la actividad de los volcanes. En la actualidad se emiten anualmente a la atmósfera más de 150 millones de toneladas de  $\text{SO}_2$  a nivel mundial.

Uno de los problemas causados por el  $\text{SO}_2$  es que en la atmósfera se oxida a  $\text{SO}_3$  y éste último reacciona con el vapor de agua presente en aire dando ácido sulfúrico según:



Este ácido sulfúrico forma una especie de niebla que cuando llueve cae al suelo destruyendo la vegetación, modificando la acidez de suelos, ríos y lagos y deteriorando muchos monumentos.

En este problema nos limitaremos a estudiar la producción de gas  $\text{SO}_2$  cuando se quema completamente una cierta masa de azufre procedente de un combustible fósil, como el fuel, en un ambiente atmosférico cuya presión y temperatura son conocidas.

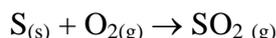
En el caso que se nos plantea, podemos pensar que, en principio, el volumen "V" de  $\text{SO}_2$  buscado va a depender de algunos factores como: la masa total "m" de fuel que se utilice cada día, la riqueza porcentual "r" que tenga dicha masa en azufre, así como la presión "P" y la temperatura "T" a las que se mida dicho volumen. Todo ello puede expresarse mediante la ecuación:

$V = V(m, r, P, T)$ , en la que r es el porcentaje (%) en masa de azufre en el fuel.

Cabe esperar que se obtendrá un volumen de gas  $\text{SO}_2$  mayor, cuanto mayor sea la masa de fuel y la riqueza en azufre de éste. En cuanto a la influencia de la presión y la temperatura, conviene tener en cuenta que una modificación de sus valores, de acuerdo con la ecuación de los gases, puede alterar el volumen V del  $\text{SO}_2$  obtenido, pero eso no afectará a su masa o a su cantidad de sustancia (mientras no se cambie la masa de fuel utilizada o la riqueza en azufre de la misma). Así mismo, es obvio que si r fuera 0 no se obtendría ningún volumen de  $\text{SO}_2$ , porque ello querría decir que el fuel utilizado no contenía nada de azufre.

## 7. Reacciones químicas

La ecuación ajustada que representa la combustión del azufre viene dada por:



Según dicha ecuación el número de moles de  $\text{SO}_2$  que se producirá cuando reaccione un número determinado de moles de azufre puro, no puede ser cualquiera, sino que deberá cumplirse que:

$$\frac{n_{\text{SO}_2}}{n_s} = \frac{1}{1}$$

Es decir, el número de moles de  $\text{SO}_2$  que se produzcan será el mismo que el número de moles de S que se quemen. De acuerdo con ello, una forma de resolver el problema será determinar los moles de S que se queman y, a continuación, el volumen que ocuparían el mismo número de moles de  $\text{SO}_2$  (en las condiciones de presión y temperatura que se indican).

Para calcular el número de moles de azufre  $n_s$ , hemos de saber primero qué masa de azufre puro  $m_s$  hay en la masa total  $m$  de fuel que se quema. Eso puede hacerse fácilmente a través de la riqueza (en tanto por cien)  $r$  de modo que:

$$m_s = \frac{r}{100} \cdot m, \text{ con lo que } n_s = \frac{m_s}{M_s} = \frac{r \cdot m}{M_s \cdot 100}$$

Según hemos razonado antes, el número de moles de moléculas de  $\text{SO}_2$  producido ha de coincidir con el número de moles de azufre S que se queman, es decir:  $n_{\text{SO}_2} = n_s$ , por tanto, podemos escribir que:

$$n_{\text{SO}_2} = \frac{r \cdot m}{M_s \cdot 100}$$

El volumen ocupado por los moles anteriores no podrá ser cualquiera, sino que será aquel que cumpla la ecuación de los gases perfectos:  $PV = nRT$ . Por tanto:

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{n_{\text{SO}_2} \cdot R \cdot T}{P} \text{ de donde } V_{\text{SO}_2} = \frac{r \cdot m \cdot R \cdot T}{M_s \cdot P \cdot 100} \text{ y sustituyendo valores: } V_{\text{SO}_2} = 335.503'6 \text{ l}$$

Analizando los resultados podemos ver que recogen todas las hipótesis anteriores. Concretamente, para una presión y temperaturas dadas, cuanto mayores sean los valores de la masa de fuel ( $m$ ) que se queme y su riqueza en azufre ( $r$ ), mayor será el número de moles de  $\text{SO}_2$  que se produzcan y el volumen ocupado por los mismos. También se puede comprobar que si  $r$  fuera 0, el volumen de  $\text{SO}_2$ , como es lógico, también lo sería. Por otra parte, basta un breve análisis de la ecuación obtenida para percatarse de que ésta es dimensionalmente homogénea.

Conviene tener en cuenta que las reacciones químicas no suelen ocurrir de manera que todas las sustancias reaccionantes se transformen totalmente en productos de la reacción. Lo habitual es que las sustancias iniciales no se encuentren justamente en la proporción en que se produce el proceso. Ello hace que la reacción finalice en cuanto se "acabe" alguna de las sustancias reaccionantes presentes inicialmente. A esa sustancia se le suele designar como "reactivo limitante"

mientras que las restantes son "reactivos en exceso". Hasta aquí las reacciones que hemos estudiado han sido de combustión en un medio abierto (el aire del medio ambiente) por lo que no había ninguna duda acerca de cuál era el reactivo limitante (la sustancia que se quemaba) y el reactivo en exceso (el oxígeno del aire). Sin embargo esto no siempre es así y, a veces, es preciso analizar con cuidado el proceso, para determinar qué sustancia reacciona totalmente y cuál sobra. Esta es la situación que se plantea en la siguiente cuestión.

**A.31.** En un recipiente que contiene  $200 \text{ cm}^3$  de disolución  $2M$  de  $\text{HCl}$  se introduce un trozo de cinc de  $16,35 \text{ g}$  de masa.

a) Determinad el volumen máximo de hidrógeno (medido a  $1 \text{ atm}$  y  $20^\circ\text{C}$ ) producido.

b) Sabiendo que los  $200 \text{ cm}^3$  de disolución de  $\text{HCl}$   $2 M$  se obtuvieron a partir de una botella de ácido clorhídrico concentrado en la que la densidad de la disolución era  $1,18 \text{ g/cm}^3$  y la riqueza en  $\text{HCl}$  puro del  $35\%$ , hallad qué volumen de dicha disolución concentrada se utilizó.

Como siempre, hemos de enunciar el problema en términos de cantidad de sustancia:

Se trata de hallar la cantidad química (número de moles) de hidrógeno molecular que se producirá cuando se introduzca una cierta cantidad química de cinc en una disolución en la que existe una cierta cantidad química de  $\text{HCl}$ .

La ecuación química ajustada es:  $\text{Zn (s)} + 2 \text{HCl (aq)} \rightarrow \text{ZnCl}_2 \text{ (aq)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$

De acuerdo con dicha ecuación por cada mol de  $\text{Zn}$  que reaccione se utilizarán 2 moles de  $\text{HCl}$  y se obtendrán un mol de  $\text{ZnCl}_2$  y un mol de  $\text{H}_2$

Si supiéramos que reacciona todo el  $\text{HCl}$  que se ha puesto en contacto con el  $\text{Zn}$ , podríamos hallar la cantidad química de  $\text{H}_2$  que se produciría, mediante la proporción (extraída de la ecuación):

$$\frac{n_{\text{HCl}}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{2}{1}$$

sustituyendo en ella  $n_{\text{HCl}}$  por el número inicial de moles de  $\text{HCl}$  existente y despejando  $n_{\text{H}_2}$ .

Por el contrario, si supiéramos que es el  $\text{Zn}$  el que reacciona totalmente, podríamos hallar la cantidad química de  $\text{H}_2$  que se produciría, mediante la expresión (extraída de la ecuación):

$$\frac{n_{\text{Zn}}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{1}{1}$$

sustituyendo en ella  $n_{\text{Zn}}$  por el número inicial de moles de  $\text{Zn}$  y despejando  $n_{\text{H}_2}$ .

Por tanto, para resolver el problema **necesitamos conocer primero cuál de las dos sustancias reaccionantes (el  $\text{Zn}$  o el  $\text{HCl}$ ) reacciona totalmente**, es decir, quién es el "reactivo limitante". Para ello sabemos que, de acuerdo con la ecuación química ajustada, la proporción entre los moles de  $\text{HCl}$  y los moles de  $\text{Zn}$  que reaccionan, debe cumplir que:

$$\frac{n_{\text{HCl}}}{n_{\text{Zn}}} = \frac{2}{1} = 2.$$

## 7. Reacciones químicas

La cantidad química inicial de HCl presente es  $n_{HCl} = C \cdot V = 0'2 \cdot 2 = 0'4$  moles de HCl

La cantidad química inicial de Zn presente es  $n_{Zn} = \frac{m}{M} = \frac{16'35}{65'4} = 0'25$  moles de Zn

Según las relaciones estequiométricas del proceso, los 0'4 moles de HCl reaccionarán con 0'2 moles de Zn (por lo que sobrarán 0'05 moles de Zn). Así pues, el HCl es, en este caso, el reactivo limitante.

(Fijémonos que no puede ser que reaccionen totalmente los 0'25 moles iniciales de Zn porque para ello se precisarían 0'5 moles de HCl y solamente tenemos 0'4 moles de HCl).

Una vez que sabemos que es el HCl quien reacciona totalmente (el reactivo limitante), ya podemos calcular la cantidad química de H<sub>2</sub> que se obtendrá, aplicando:

$$\frac{n_{HCl}}{n_{H_2}} = \frac{2}{1} \rightarrow \frac{0'4}{n_{H_2}} = \frac{2}{1} \rightarrow n_{H_2} = \frac{0'4}{2} = 0'2 \text{ moles de H}_2 \text{ o bien:}$$

$$\frac{n_{Zn}}{n_{H_2}} = \frac{1}{1} \rightarrow \frac{0'2}{n_{H_2}} = \frac{1}{1} \rightarrow n_{H_2} = 0'2 \text{ moles de H}_2$$

Dado que se formarán 0'2 moles de H<sub>2</sub>, el volumen ocupado por dicha cantidad de sustancia será aquel que satisfaga la ecuación de los gases perfectos.  $PV = nRT$ , es decir:

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0'2 \cdot 0'082 \cdot 293}{1} = 4'81 \text{ l}$$

Finalmente, para calcular el volumen de disolución concentrada que se demanda en el segundo apartado, podemos hacerlo teniendo en cuenta que el número de moles de soluto (HCl) presente en los 200 cm<sup>3</sup> de disolución 2M deberá ser el mismo que el existente en el volumen de disolución concentrada de HCl extraído de la botella.

El número de moles de HCl presente en los 200 cm<sup>3</sup> de disolución ya hemos visto que era 0'4. Este número de moles ha sido extraído de una disolución concentrada de HCl, cuya concentración (que designaremos como C') no la conocemos directamente, pero que podemos calcular utilizando la expresión anteriormente deducida:

$$C' = \frac{r \cdot d}{M \cdot 100} = 0'35 \cdot 1180 / 36'5 = 11'3 \text{ moles/litro}$$

Finalmente basta aplicar  $C' = \frac{n_{HCl}}{V'}$  para obtener  $V' = \frac{n_{HCl}}{C'} = 0'0354 \text{ l} = 35'4 \text{ cm}^3$  de disolución concentrada de HCl

La combustión del carbono con defecto de oxígeno da lugar a la formación de monóxido de carbono, que es un gas tóxico responsable de muchos envenenamientos (impide que los glóbulos rojos fijen el oxígeno del aire respirado) y uno de los contaminantes de la atmósfera más habituales. La combustión de la gasolina en los motores de explosión origina un porcentaje apreciable de

CO. Así mismo la combustión del carbón en las centrales térmicas es otra de las fuentes habituales de este gas, que se forma junto al  $\text{CO}_2$  en caso de no producirse una combustión completa.

**A.32.** En un brasero de los que antiguamente se colocaban debajo de las mesas para calentarse los pies, se quemaba carbón en un medio que a menudo estaba poco ventilado (produciéndose una carencia de oxígeno). Como consecuencia la combustión producía monóxido de carbono.

a) Escribid correctamente la ecuación química correspondiente a la reacción del  $\text{C}_{(s)}$  con el oxígeno para dar dicho gas.

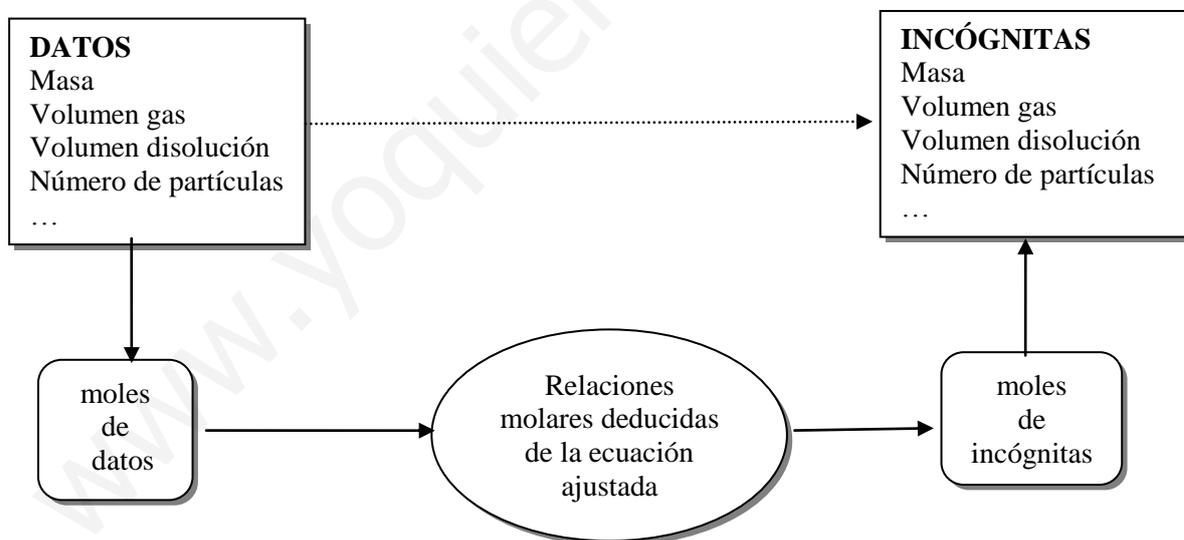
b) Calculad la masa en gramos de  $\text{CO}_{(g)}$  que se obtendría mediante la combustión de 420 g de C según la reacción anterior

c) Determinad el volumen de oxígeno gaseoso medido en condiciones normales (1 atm y 0 °C) que habrá sido empleado en dicha combustión.

Rdo. a)  $2 \text{C}(s) + \text{O}_2(g) \rightarrow 2 \text{CO}(g)$  ; b) 980 g de CO; c) 392 l

De acuerdo con las actividades anteriores, podemos establecer un método general para resolver muchos problemas de estequiometría. Esencialmente se trataría de asegurarse en primer lugar de que la ecuación química está correctamente escrita. Luego se obtendrían todos los datos del problema en moles utilizando para ello las relaciones necesarias (según esos datos estén como masas, volúmenes de gases, volúmenes de disoluciones, etc.). Después, mediante las proporciones en que se combinan los moles de las sustancias presentes en la ecuación, se obtendrían las incógnitas expresadas en moles. Finalmente habría que obtener, a partir de esos moles y de las relaciones pertinentes, los valores de las incógnitas en las unidades en que se nos pide en el enunciado.

Un posible esquema del proceso descrito sería:



## RECAPITULACIÓN

En este tema hemos comenzado por identificar la posible existencia de reacciones químicas en diferentes procesos y comentar la importancia que tienen las reacciones químicas destacando algunos de sus aspectos más positivos y también otros negativos, cuestionando la identificación simplista que, a menudo se hace, entre reacciones químicas y cambios peligrosos para las personas y el medio ambiente.

## 7. Reacciones químicas

Hemos elaborado también un modelo de reacción química, elemental, pero suficiente para comprender los cambios materiales que ocurren en las reacciones químicas. En el estudio de dichos cambios, hemos comenzado por analizar cómo escribir correctamente una ecuación química (teniendo en cuenta el principio de la conservación de la masa) y nos hemos detenido en clarificar algunas confusiones que se suelen producir tales como:

- ✓ Pensar que los coeficientes que aparecen en la ecuación representan el número de partículas realmente existente o la masa de las sustancias que intervienen.
- ✓ Pensar que se puede ajustar una ecuación química alterando convenientemente las fórmulas de algunas sustancias.

El concepto de mol ha resultado fundamental para poder contestar algunas preguntas como, por ejemplo, la masa de tal o cual producto que se podrá obtener en una determinada reacción, aunque debe haber quedado claro que el mol y el gramo son dos unidades que se utilizan para medir dos magnitudes diferentes: la cantidad de sustancia y la masa, respectivamente.

Quedan pendientes algunas preguntas de interés como, por ejemplo:

¿Cómo influir en la velocidad a la que transcurre una reacción química?

¿Qué pasa en aquellas reacciones en las que los productos se combinan entre sí para dar lugar a las sustancias reaccionantes? ¿Cómo abordar el estudio de este tipo de reacciones reversibles?

¿Cómo estudiar los cambios energéticos de reacciones asociados a muchas reacciones?

Así como un estudio detallado de algunos tipos de reacciones en particular, como son las reacciones entre ácidos y bases y las reacciones de oxidación-reducción. Todo ello se abordará en cursos posteriores de química.

### **Anexo 7.1. ¿CÓMO SE COMPORTAN LAS MEZCLAS DE GASES?**

Hasta aquí hemos considerado a los gases como si estos fueran sustancias, es decir, formados por un único tipo de partículas, pero lo cierto es que existen muchos gases que son mezclas de diferentes sustancias. Por ejemplo, el aire que respiramos es en realidad una mezcla de gases cuya composición a nivel del mar excluyendo el vapor de agua (aire seco) es del 78'08% en nitrógeno, 20'95% en oxígeno, 0'93% de argón y el resto está formado por otros gases minoritarios. Esto hace que nos planteemos hasta qué punto lo tratado anteriormente respecto de los gases será válido también para el caso de mezclas gaseosas.

*A.1. Determinad, a modo de hipótesis, si la ecuación de los gases ideales será válida para el caso de mezclas como el aire. Explicad las razones utilizadas para formular vuestra hipótesis.*

La ecuación de los gases ideales ha sido deducida a partir de los enunciados del modelo cinético de los gases según el cual estos se hallan formados por partículas de dimensiones tan reducidas (comparadas con las distancias que las separan), que pueden considerarse como si realmente se tratase de partículas puntuales, sin dimensiones. Esto implica que las partículas de diferentes gases son indistinguibles y, como también se deduce de la hipótesis de Avogadro, cantidades iguales de gases diferentes en iguales condiciones de temperatura y ocupando el mismo volumen ejercerán la misma presión sobre las paredes del recipiente. Por tanto, parece razonable admitir que en esas condiciones, la presión ejercida por un gas no dependerá de si se trata de una sola sustancia o de una mezcla de varias, sino del número total de partículas. La expresión de la ecuación de los gases ideales será, pues, válida también para una mezcla gaseosa, siendo el número de moles de gas la suma de moles de los diferentes componentes que conforman dicha mezcla.

Así, para una mezcla gaseosa de dos componentes A y B, tendremos:  $P \cdot V = n_t \cdot R \cdot T$

En la ecuación anterior  $n_t$  es el número total de moles, que en este caso vendrá dado por la suma de moles de A y moles de B, es decir:  $n_t = n_A + n_B$

Se entiende que esta relación será válida para gases que no reaccionen entre sí para formar nuevas sustancias y en condiciones en las cuales se comporten como gases ideales, es decir, a temperaturas elevadas y presiones relativamente bajas.

John Dalton a principios del siglo XIX contrastó esta hipótesis y formuló el siguiente enunciado que se conoce como **Ley de Dalton de las presiones parciales**:

“La presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los componentes de la mezcla”

Siendo la presión parcial de un gas la presión que ejercería dicho gas si estuviese el solo a la misma temperatura y ocupando el mismo volumen que ocupa toda la mezcla gaseosa.

**A.2.** Verificad la ley de Dalton para una mezcla de dos gases “A” y “B” a partir de la ecuación de los gases ideales y de la definición de presión parcial.

La presión de la mezcla o presión total se podrá expresar según la ecuación:

$$P_t = \frac{n_t \cdot R \cdot T}{V} = \frac{(n_A + n_B) \cdot R \cdot T}{V} = \frac{n_A \cdot R \cdot T}{V} + \frac{n_B \cdot R \cdot T}{V} = P_A + P_B$$

Por tanto:  $P_t = P_A + P_B$ ; Y en general, para una mezcla de “i” componentes:  $P_t = \sum_{i=1}^N P_i$

Siendo la presión parcial de un componente “i” de la mezcla que contiene N componentes:

$$P_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{V}$$

Observad que si dividimos la presión parcial de un componente en particular por la presión total, obtenemos el cociente entre los moles de partículas de dicho componente y los moles totales de la mezcla. Dicho cociente nos indica la composición de la mezcla de gases y se denomina **fracción molar**, representándose como “ $x_i$ ”.

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{\frac{n_i \cdot R \cdot T}{V}}{\frac{n_t \cdot R \cdot T}{V}} = \frac{n_i}{n_t} = x_i$$

La expresión anterior también suele escribirse como:  $P_i = x_i \cdot P_t$

**A.3.** ¿Qué significa que la fracción molar de un componente dado de una mezcla gaseosa valga 0’3?

De acuerdo con la expresión anteriormente obtenida ( $x_i = n_i/n_t$ ), ello se puede interpretar como que de cada mol de partículas en total (sin distinguir entre unas u otras), 0’3 moles correspondrán a ese componente en particular (y los 0’7 moles restantes serán del resto de componentes). En otras palabras: las partículas de dicho componente constituyen el 30% del total de partículas que forman la mezcla gaseosa.

## 7. Reacciones químicas

Análogamente, si consideramos la expresión en la forma  $x_i = p_i/p_t$ , también podríamos decir que de cada atmósfera de presión total ejercida por la mezcla, 0'3 atm se deben a la presión ejercida por el componente en cuestión o, lo que es equivalente, que dicho componente contribuye al 30 % de la presión total ejercida por la mezcla gaseosa sobre las paredes del recipiente que la contiene.

También a partir de la ecuación de los gases ideales, podemos expresar el volumen de un componente y el volumen total en función de la presión total y de la temperatura y seguidamente dividiendo ambos, obtener de nuevo, la fracción molar:

$$\frac{V_i}{V_t} = \frac{\frac{n_i \cdot R \cdot T}{P}}{\frac{n_t \cdot R \cdot T}{P}} = x_i$$

La expresión anterior también suele escribirse como:  $V_i = x_i \cdot V_t$

Conviene darse cuenta que la fracción molar es una magnitud que no tiene unidades.

**A.4.** Una mezcla gaseosa que contiene 1 gramo de helio (A), 3'5 gramos de nitrógeno (B) y 2 gramos de oxígeno (C), ejerce una presión total sobre las paredes del recipiente de 2'15 atmósferas. Determinad, la presión parcial y los porcentajes (en volumen) de cada uno de dichos componentes.

$$n(\text{He}) = \frac{m_A}{M_A} = \frac{1}{4} = 0'25 \text{ moles}; n(\text{N}_2) = \frac{m_B}{M_B} = \frac{3'5}{28} = 0'125 \text{ moles de He}$$

$$n(\text{O}_2) = \frac{m_C}{M_C} = 6'25 \cdot 10^{-2} \text{ moles de O}_2$$

$$x(\text{He}) = \frac{n(\text{He})}{n_t} = \frac{0'25}{0'25 + 0'125 + 0'0625} = 0'57; x(\text{N}_2) = \frac{0'125}{0'4375} = 0'29$$

$$x(\text{O}_2) = \frac{n(\text{O}_2)}{n_t} = \frac{0'0625}{0'4375} = 0'14$$

Por tanto, las presiones parciales serán:  $P_i = x_i \cdot P_t$

$$P(\text{He}) = 0'57 \cdot 2'15 = 1'2255 \text{ atm}; P(\text{N}_2) = 0'29 \cdot 2'15 = 0'6235 \text{ atm};$$

$$P(\text{O}_2) = 0'14 \cdot 2'15 = 0'301 \text{ atm}$$

Como es lógico, la suma de las presiones parciales obtenidas nos da la presión total.

Para calcular los porcentajes en volumen aplicaremos la expresión:  $V_i = x_i \cdot V_t$  en cada uno de los casos, con lo que se obtiene que por cada litro de mezcla de gas 0'57 L corresponden a He, 0'29 L corresponden a N<sub>2</sub> y 0'14 L corresponden a O<sub>2</sub>. O, lo que es equivalente, los porcentajes (en volumen) son: 57% de He, 29% de N<sub>2</sub> y 14% de O<sub>2</sub>.

**A.5.** Un matraz de 4 litros que contiene argón a 3 atmósferas se pone en contacto con otro matraz de 3 litros que contiene nitrógeno a 4 atmósferas, dejando que ambos gases se mezclen a temperatura constante. Determinad:

- Las presiones parciales de cada gas después de que se hallan mezclados.
- La presión total de la mezcla.
- La fracción molar del argón.

a) Dado que ni la temperatura ni el número de moles de moléculas cambia, podemos utilizar la ley de Boyle para determinar las presiones parciales de cada uno de los gases.

Para el argón, se cumplirá que  $P \cdot V = \text{cte}$ . Por tanto dicho producto deberá ser el mismo, antes de la mezcla (1) que después (2). Es decir:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow 3 \cdot 4 = P_2 \cdot 7 \rightarrow P_2 (\text{Ar}) = 12/7 = 1'71 \text{ atm}$$

Haciendo lo mismo para el nitrógeno:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow 4 \cdot 3 = P_2 \cdot 7 \rightarrow P_2 (\text{N}_2) = 12/7 = 1'71 \text{ atm}$$

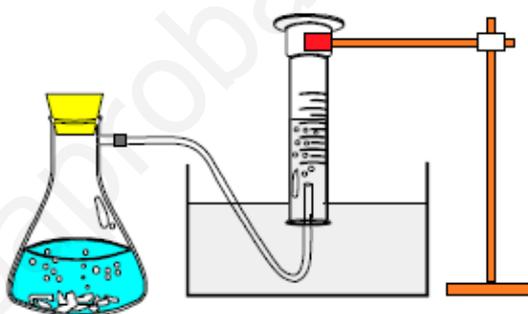
b) Para calcular la presión total de la mezcla, basta con sumar las presiones parciales obtenidas, con lo que:

$$P_t = 1'71 + 1'71 = 3'42 \text{ atm}$$

c) En cuanto a la fracción molar del argón, se puede obtener directamente sin más que aplicar la expresión:

$$x(\text{Ar}) = \frac{P(\text{Ar})}{P_t} = \frac{1'71}{3'42} = 0'5$$

Algunos gases pueden ser recogidos sobre agua utilizando un sencillo dispositivo como el mostrado en la figura adjunta. Consiste en una probeta llena de agua que se sumerge invertida en un recipiente que también contiene agua, si el montaje se realiza con cuidado y se evita la entrada de aire en la probeta, la presión atmosférica sobre la superficie libre del agua del recipiente mantendrá el agua en el interior de la probeta, evitando que esta se vacíe.



Por la parte inferior de la probeta se introduce el tubo con la salida del gas que deseamos recoger. Si queremos hacer cálculos a partir del volumen recogido, es necesario conocer la presión del gas. Esto se puede conseguir de forma sencilla elevando o bajando la probeta hasta hacer coincidir el nivel del agua en el exterior y el interior, en ese momento la presión en el gas del interior será igual a la presión atmosférica, de modo que, para conocer la presión del gas, bastará con medir la presión atmosférica mediante un barómetro.

Sin embargo, el gas recogido mediante el procedimiento que acabamos de describir, al estar en contacto con el agua se mezcla con vapor llegando a la saturación rápidamente. Por tanto, la presión dentro del recipiente es la suma de la presión del gas recogido más la presión ejercida por el vapor de agua. Anteriormente hablamos de la presión de vapor de un líquido y vimos cómo esta solo depende de la temperatura. En la tabla siguiente se muestran los valores de la presión de vapor del agua para valores de temperatura cercanos a la temperatura ambiente.

#### Presión de vapor del agua para diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$P_v$ (mm de Hg)	16'48	17'54	18'65	19'83	21'07	22'38	23'76	25'21	26'74	28'35

## 7. Reacciones químicas

A continuación intentaremos aplicar los conocimientos construidos respecto de las mezclas de gases y la presión de vapor de un líquido a la situación concreta de recogida de gases sobre agua para determinar la cantidad de gas “seco” recogido.

**A.6.** En una probeta invertida se recogió sobre agua a 22 °C el hidrógeno desprendido de una reacción. Al hacer coincidir la altura del líquido en el interior y en el exterior de la probeta el volumen de gas que indicaba la probeta era 246 cm<sup>3</sup>. Si la presión atmosférica era de 749'25 mm de Hg, determinad:

- ¿Cuántos moles de hidrógeno se recogieron?
- ¿Cuántos moles de vapor de agua estaban presentes en la muestra húmeda de gas?
- ¿Cuál sería la masa de gas si la muestra estuviera seca?

a) Para determinar el número de moles de gas calcularemos previamente la presión parcial de H<sub>2</sub>. Para ello, teniendo en cuenta que la presión total es la suma de las presiones parciales de hidrógeno y vapor de agua (y que 760 mm Hg = 1 atm), haremos:

$$P(\text{H}_2) = P_t - P(\text{vapor H}_2\text{O}) = 749'25 - 19'83 = 729'42 \text{ mm de Hg} = 0'96 \text{ atm}$$

Reordenando de la ecuación de los gases ideales obtenemos:

$$n(\text{H}_2) = \frac{P(\text{H}_2) \cdot V}{R \cdot T} = \frac{0'96 \cdot 0'246}{0'082 \cdot 295} = 9'76 \cdot 10^{-3} \text{ moles}$$

b) Para el caso del vapor de agua, bastará con obtener de la tabla anterior la presión correspondiente a la temperatura de 22 °C y dividir entre 760 para expresarla en atm, procediendo después como en el caso anterior:

$$P(\text{H}_2\text{O}) = 19'83 \text{ mm de Hg} = 0'0261 \text{ atm}$$
$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{P(\text{H}_2\text{O}) \cdot V}{R \cdot T} = \frac{0'0261 \cdot 0'246}{0'082 \cdot 295} = 2'65 \cdot 10^{-4} \text{ moles}$$

c) A partir de los moles de H<sub>2</sub> calculados en el primer apartado, podemos obtener fácilmente la masa en gramos:

$$m(\text{H}_2) = n(\text{H}_2) \cdot M(\text{H}_2) = 9'76 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 1'95 \cdot 10^{-2} \text{ g}$$

### Anexo 7.2. PROPIEDADES DE LAS DISOLUCIONES QUE NO DEPENDEN DE LA NATURALEZA DEL SOLUTO: PROPIEDADES COLIGATIVAS

Cuando se prepara una disolución es razonable esperar que las propiedades de la mezcla adquieran valores diferentes en función de la composición y de la naturaleza de las sustancias que actúan como disolvente y soluto. Así sucede con propiedades como la densidad o la temperatura de ebullición. En cambio, existen otras propiedades de las disoluciones cuyo valor depende de la naturaleza del disolvente y del número total de partículas de soluto (o provenientes del mismo) que hay en la disolución (para una masa de disolvente dada), pero no de la naturaleza del soluto (da igual que este sea glucosa, cloruro de sodio, sacarosa, etc.). Estas propiedades se denominan “**coligativas**”. Algunos ejemplos de propiedades coligativas son el descenso de la presión de vapor, el aumento de la temperatura de ebullición, el descenso de la temperatura de fusión y la presión osmótica.

Cuando se sitúa una determinada cantidad de un líquido en un recipiente herméticamente cerrado en el que previamente se había extraído el aire se observa un aumento de la presión, en la zona libre de líquido, hasta que se estabiliza, momento en el que se dice que ha alcanzado el equilibrio. Esta presión de equilibrio, llamada **presión de vapor**, depende de la naturaleza del líquido y de la temperatura pero es independiente de la cantidad de líquido y de la forma del recipiente.

*A.I. Explicad, aplicando el modelo cinético, a que es debido que la presión de vapor de un líquido dependa de la temperatura.*

Cuando se sitúa el líquido en el matraz cerrado, algunas partículas del líquido que se aproximen con suficiente velocidad a la superficie del mismo podrán vencer las fuerzas de atracción del resto de partículas y escapar, dando lugar a un gas por encima del líquido. De esta forma la presión va aumentando al incrementarse el número de partículas que van formando el gas y, por tanto, la frecuencia de choques de las mismas sobre las paredes del recipiente. Al mismo tiempo, algunas partículas del gas (vapor) al colisionar con la superficie del líquido pueden ser atraídas por el resto de partículas del líquido incorporándose de nuevo a la fase líquida. En realidad, estos dos procesos se producen simultáneamente solo que, al principio, cuando la cantidad de partículas en el gas es menor, la velocidad a la cual las partículas se escapan del líquido (o velocidad de vaporización) es mucho mayor que la velocidad a la que las partículas del gas se reincorporan al líquido (o velocidad de condensación), por eso la presión se hace cada vez mayor, pero al ir aumentando la cantidad de partículas en el gas aumentará también la velocidad de condensación llegando un momento en que se igualará a la velocidad de vaporización alcanzándose entonces el equilibrio (el mismo número de partículas que escapan de la fase líquida por unidad de tiempo, vuelven a entrar). Se trata de un equilibrio dinámico puesto que aunque macroscópicamente no se observan cambios (la presión no varía) siguen produciéndose transferencias de partículas desde la fase líquida a la gaseosa y viceversa, pero a la misma velocidad. La presión correspondiente a la situación de equilibrio descrita se denomina “**presión de vapor**” y la representaremos por  $P_v$ .

Cuando la temperatura aumenta, la fracción de moléculas con velocidades lo suficientemente altas como para disponer de la energía cinética suficiente para abandonar la fase líquida, también aumentará y con ello la velocidad de vaporización. Además la fracción de moléculas del gas que tienen velocidades bajas y son susceptibles de reincorporarse de nuevo al líquido será menor, disminuyendo así la velocidad de condensación. Sin embargo, el aumento progresivo de la presión de vapor hará que la vaporización se frene y que, en cambio, la condensación aumente, hasta conseguir que ambas velocidades se igualen otra vez.

Como es lógico, la naturaleza del líquido influirá en la presión de vapor puesto que las fuerzas que mantienen unidas a las partículas del líquido son fuerzas intermoleculares cuya intensidad depende de la naturaleza del mismo.

En cambio, la cantidad de líquido o la forma del recipiente no influye en la presión de vapor puesto que el intercambio de partículas entre el líquido y el gas se produce en la superficie del líquido. Cuanto mayor superficie presente el líquido mayor será la cantidad de partículas por unidad de tiempo que pasaran del líquido al gas, pero también mayor será la cantidad de partículas del gas por unidad de tiempo que chocaran con la superficie del líquido en las condiciones adecuadas para incorporarse al mismo. Por tanto estos dos efectos se compensarán haciendo que la presión de vapor no dependa de la superficie del líquido.

### 1. ¿Varía la presión de vapor de un líquido volátil al añadirle un soluto?

A continuación nos referiremos a disoluciones de solutos no electrólitos y no volátiles. Los **no** electrólitos son sustancias covalentes moleculares que en disolución **no** conducen la corriente eléctrica, por ejemplo, la glucosa en agua. Los electrólitos son especies que en disolución forman

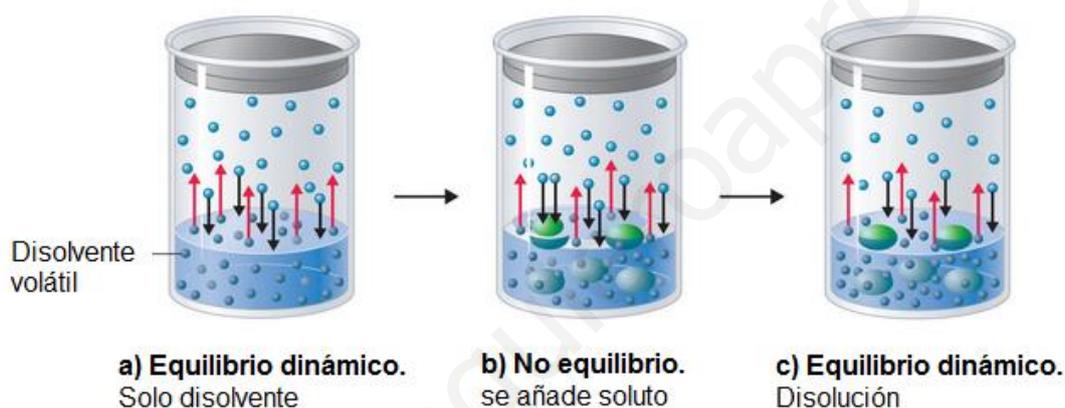
## 7. Reacciones químicas

iones bien porque se trata de sustancias iónicas, por ejemplo NaCl, o bien porque se trata de sustancias covalentes moleculares que reaccionan con el disolvente para dar iones, por ejemplo HCl.

**A.2.** *Aplicando las ideas del modelo cinético predecid razonadamente lo que sucederá a la presión de vapor de un líquido al disolver en él un soluto a temperatura constante.*

Al producir la mezcla y mantener la temperatura constante, disminuirá la cantidad de partículas del líquido que llegaran a la superficie y por lo tanto disminuirá la velocidad a la cual las partículas de la fase líquida pasan a la fase gas. Sin embargo, puesto que solo pasan las partículas del disolvente, la velocidad a la cual estas partículas se incorporan de nuevo al líquido no se verá afectada, provocando que se igualen las velocidades de vaporización y condensación para una menor cantidad de partículas en el gas. Consecuentemente, la presión de vapor será menor cuanto mayor sea la concentración de partículas de soluto en la disolución.

En la figura siguiente se representa cómo al adicionar un soluto sobre un disolvente volátil en equilibrio (a), se perturba la situación de equilibrio (b) debido a la disminución de la velocidad de evaporación del disolvente volátil. La presión disminuirá hasta alcanzar una nueva situación de equilibrio (c), cuando se igualen de nuevo la velocidad de vaporización y la de condensación de las partículas del disolvente, para una presión de vapor menor.



Experimentalmente el químico francés François Marie Raoult (1830-1901) comprobó que esta relación propuesta a modo de hipótesis era cierta, y estableció cuantitativamente (Ley de Raoult) que:

A una temperatura determinada, la presión de vapor de una disolución disminuye respecto del líquido puro al aumentar la concentración de soluto.

La disminución de la presión de vapor de la disolución en relación a la presión de vapor del disolvente puro, no depende la composición química del soluto (naturaleza del soluto), sino tan solo del número total de partículas de soluto presentes (disoluciones no electrolíticas). La presión de vapor es, por tanto, una propiedad coligativa. A continuación veremos como este efecto se relaciona también con un ascenso del punto de ebullición de una disolución por encima de lo que corresponde al disolvente puro.

### 2. ¿Qué pasa con el punto de ebullición de las sustancias al añadir un soluto?

El punto de ebullición de un líquido es la temperatura a la cual se produce el paso de líquido a gas en todo el volumen del líquido, esto se hace visible por la aparición de burbujas de gas en todo el líquido. El punto de ebullición, por tanto, es la temperatura a la cual su presión de vapor se iguala con la presión sobre su superficie. Para líquidos en recipientes abiertos esta es la presión atmosférica.

**A.3.** *Teniendo en cuenta la ley de Raoult, anteriormente enunciada, y la información proporcionada sobre el punto de ebullición, deducid que sucederá con la temperatura de ebullición de un líquido al añadirle un determinado soluto.*

Parece evidente que si al añadir soluto a una disolución disminuye su presión de vapor y el punto de ebullición corresponde a la temperatura a la cual se iguala la presión de vapor con la presión exterior, el punto de ebullición aumentará al aumentar la cantidad de soluto. De tal forma que cuanto mayor sea la cantidad de soluto menor será la presión de vapor de la disolución y mayor habrá de ser la temperatura para que se iguale la presión de vapor con la presión exterior, y como consecuencia la disolución entre en ebullición.

Cuantitativamente se puede expresar el aumento del punto de ebullición mediante la relación:

$$\Delta T = K_e \cdot b$$

En la expresión anterior,  $\Delta T$  es el aumento del punto de ebullición respecto del disolvente, es decir, la temperatura de ebullición de la disolución menos la temperatura de ebullición del disolvente.  $\Delta T = T - T_0$ ; la constante  $K_e$  es una constante de proporcionalidad que depende del disolvente y se llama constante ebulloscópica;  $b$ , es la **molalidad**<sup>3</sup>, una forma de expresar la composición de la disolución, definida como la cantidad de soluto B (número de moles de soluto) por unidad de masa de disolvente A. De acuerdo con ello, la molalidad se calculará como:

$$b = \frac{n_B}{m_A}$$

En este caso, la masa de disolvente se suele expresar en kg, con lo que la unidad para esta nueva magnitud será: mol/kg o lo que es equivalente: mol·kg<sup>-1</sup>

La expresión del aumento del punto de ebullición es coherente con las previsiones realizadas (directamente proporcional a la concentración de soluto de la disolución). Pero, *¿por qué no se expresa esa concentración en forma de molaridad (mol/L)?*

La respuesta es sencilla, los puntos de ebullición corresponden a diferentes temperaturas según la sustancia y la composición de la disolución. Puesto que el volumen depende de la temperatura, la concentración molar (mol/L) cambiará al variar la temperatura a pesar de que el total de partículas de soluto no se modifique. Sin embargo, la concentración expresada como molalidad (mol/kg) no se modificará mientras no cambie el número de partículas de soluto presentes, a pesar de que sí que lo haga la temperatura.

**A.4.** *A partir de la expresión del aumento del punto de ebullición razonad cuál es el significado de la constante ebulloscópica y determinad sus unidades en el sistema internacional.*

Despejando dicha constante de la expresión anteriormente propuesta obtenemos que  $K_e = \Delta T/b$  y sustituyendo  $b$ :

$$K_e = \frac{\Delta T \cdot m_A}{n_B}$$

<sup>3</sup> Para designar la molalidad podemos utilizar los símbolos “b” o “m”. Nos hemos decantado por “b” para no confundirla con la masa.

## 7. Reacciones químicas

De esta forma resulta sencillo comprender que el valor de la constante ebulloscópica para un determinado disolvente indica el aumento de la temperatura de ebullición producido al disolver un mol de cualquier soluto ( $n_B = 1$ ) en un kilogramo de dicho disolvente ( $m_A=1$ ). Un valor alto de dicha constante, nos informa de que con una pequeña cantidad<sup>4</sup> de soluto por cada kilogramo de disolvente, se pueden conseguir importantes aumentos en el punto de ebullición (y viceversa).

También, a partir de la última expresión obtenida, podemos ver que las unidades en que se suele expresar la constante ebulloscópica:  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}/\text{mol}$  (o lo que es lo mismo:  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

**A.5.** ¿Cuál será el punto de ebullición de una disolución preparada disolviendo 5 gramos de sacarosa  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  en 30 gramos de agua?

Dato: La constante ebulloscópica del agua vale  $0,512\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ .  $P = 1\text{ atm}$ .

De acuerdo a lo tratado anteriormente, sabemos que al disolver sacarosa en agua, el punto de ebullición del agua aumentará en una cantidad dada por:  $\Delta T = K_e \cdot b$

De la expresión anterior:  $T - T_0 = K_e \cdot b \rightarrow T = T_0 + K_e \cdot b$

Siendo  $T_0$  la temperatura de ebullición del agua pura a una presión de 1 atm (es decir,  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Por tanto, para resolver el problema, habremos de determinar previamente la molalidad de la disolución o bien expresar esta en función de los datos que conocemos. Haciendo esto último:

$$T = T_0 + K_e \cdot b \rightarrow T = T_0 + K_e \cdot \frac{n_B}{m_A} \rightarrow T = T_0 + K_e \cdot \frac{m_B}{m_A \cdot M_B}$$

Donde  $M_B$  es la masa molar de la sacarosa.

Podemos comprobar ahora cómo si sustituimos los datos del enunciado en la última ecuación, obtenemos que:

$$T = 100,25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Observad que la variación de la temperatura es muy pequeña y requerirá de termómetros muy sensibles para poder apreciarla.

### 3. El punto de congelación, ¿es también una propiedad coligativa?

Hasta aquí, hemos visto que el punto de ebullición de una disolución es una propiedad coligativa, es decir, depende de la naturaleza del disolvente y de la concentración de la disolución pero no de la naturaleza del soluto. Podemos plantearnos ahora si ocurrirá lo mismo con el punto de congelación y se podrá hablar de una constante crioscópica de un disolvente análogamente a como anteriormente nos referíamos a la constante ebulloscópica.

**A.6.** Un grupo de alumnos para comprobar si la variación del punto de congelación de una disolución es una propiedad coligativa diseñaron una serie de experiencias. Prepararon diferentes disoluciones de sacarosa, etilenglicol y glucosa en agua. En todos los casos partieron de 100

<sup>4</sup> Utilizamos el término cantidad para referirnos a la cantidad de sustancia, magnitud cuya unidad es el mol.

gramos de agua pura y añadieron sucesivas cantidades de los solutos (columna de la izquierda). Seguidamente, disminuyendo la temperatura determinaron el punto de congelación. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas de congelación de las diferentes disoluciones. Al tratarse de agua (que congela a 0 °C), los descensos experimentados en el punto de congelación respecto del disolvente puro a 1 atm coincidirán (en valor absoluto) con la temperatura de congelación de la disolución.

a) Argumentad si a partir de la experiencia se puede concluir que el punto de congelación es una propiedad coligativa.

b) Determinad la constante crioscópica del agua  $K_c$

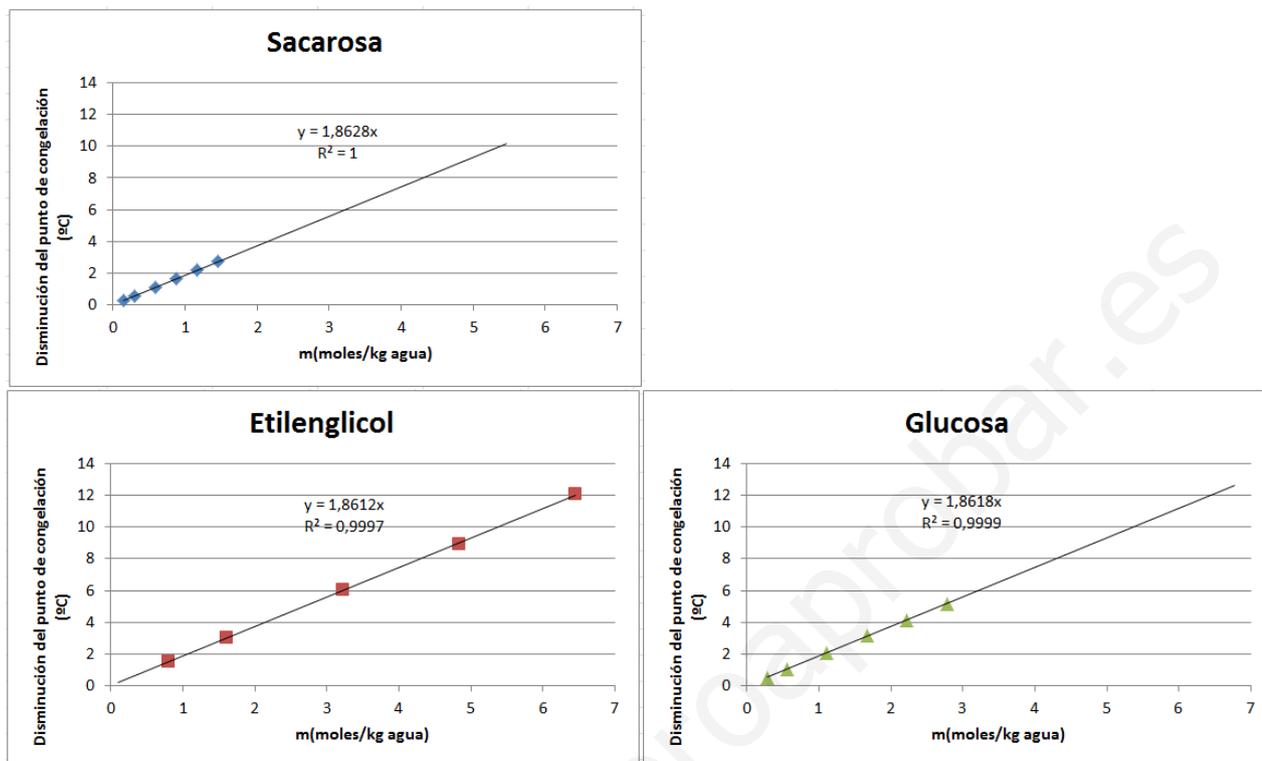
Masa soluto (g)	Temperatura de congelación (°C)		
	Sacarosa (C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> )	Etilenglicol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	Glucosa (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )
0	0'00	0'00	0'00
5	-0'27	-1'51	-0,52
10	-0,54	-2'99	-1,04
20	-1'09	-6'02	-2,07
30	-1,64	-8'89	-3.13
40	-2,18	-12'09	-4,13
50	-2,72		-5,16

En los tres casos se observa que la temperatura de congelación disminuye al aumentar la masa de soluto. Para tratarse de una propiedad coligativa la disminución de la temperatura debería de ser igual en los tres casos, es decir, depender del número total de partículas de soluto pero no de cuál sea dicho soluto (en relación a una misma masa de agua, en este caso, 100 g). Por tanto, para poder comparar los valores deberemos trabajar con molalidades y no con masas. De acuerdo con ello, a partir de los datos anteriores podemos obtener la siguiente tabla, en la que se han incluido los descensos (en valor absoluto) del punto de congelación de cada disolución respecto del valor del disolvente puro a la presión atmosférica (en este caso 0 °C):

	$\Delta T$	b	$\Delta T$	b	$\Delta T$	b
Masa de soluto (g)	Sacarosa (C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> )	(moles/kg agua)	Etilenglicol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	(moles/kg agua)	Glucosa (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	(moles/kg agua)
5	0'27	0,146	1'51	0,806	0,52	0,278
10	0'54	0,292	<b>2'99</b>	<b>1,613</b>	1,04	0,556
20	1'09	0,585	6'02	3,226	2,07	1,111
30	1'64	0,877	8'89	4,839	<b>3.13</b>	<b>1,667</b>
40	2'18	1,170	12'09	6,452	4,13	2,222
50	<b>2'72</b>	<b>1,462</b>			5,16	2,778

## 7. Reacciones químicas

Si se analiza la tabla con detenimiento se observa que disminuciones parecidas del punto de fusión de diferentes disoluciones corresponden a molalidades semejantes (ved el ejemplo resaltado en negrita). Una forma más rigurosa de comprobar dicha hipótesis sería representar la disminución de la temperatura de congelación en función de la molalidad, si fuera una propiedad coligativa las gráficas de las tres sustancias deberían de ser iguales.



Disminución del punto de congelación frente a la molalidad para un estudio experimental de un grupo de alumnos

Del análisis de las gráficas anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-Los tres solutos disminuyen de forma idéntica la temperatura a la que se congela la disolución, por tanto el punto de congelación es una propiedad coligativa.

-La disminución del punto de congelación es directamente proporcional a la concentración molar. Podríamos escribir la siguiente relación similar a la correspondiente al aumento del punto de ebullición:

$$\Delta T = K_c \cdot b$$

Siendo  $\Delta T$  la disminución del punto de fusión,  $K_c$  la constante crioscópica, que solo depende de la naturaleza del disolvente y  $b$  la molalidad de la disolución (disolvente A y soluto B).

-El valor de la constante crioscópica se podría obtener para cada punto experimental dividiendo la disminución de la temperatura entre la molalidad. Sin duda es un método mucho más riguroso determinar la constante de proporcionalidad " $K_c$ " de la pendiente del gráfico  $\Delta T = f(m)$ . La pendiente ha sido determinada mediante un ajuste lineal de mínimos cuadrados obteniendo una pendiente de  $1,86 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$  para los tres solutos.

El estudio experimental realizado por estos alumnos ha permitido concluir que el descenso del punto de congelación es una propiedad coligativa. Evidentemente dicha conclusión no responde a una investigación real, pero permite evaluar la validez del diseño experimental y mejorar la com-

petencia científica. En una investigación “real”, el resultado obtenido originaría nuevos problemas de interés como, por ejemplo: ¿sucedería lo mismo con otro disolvente diferente al agua?, ¿qué aplicaciones prácticas tienen este tipo de propiedades?, etc., que a su vez podrían convertirse en punto de partida de nuevas investigaciones.

*A.7. El cobre puro funde a  $1083^{\circ}\text{C}$  y su constante crioscópica es  $23^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$  ¿Cuál será el punto de fusión del bronce hecho con un 10% de zinc y un 90% de cobre?*

*Rdo.  $1044^{\circ}\text{C}$*

*A.8. Cita algunos ejemplos de aplicaciones en la vida cotidiana de los conceptos estudiados hasta aquí de las propiedades coligativas.*

Los conceptos estudiados permiten interpretar algunos fenómenos o actividades habituales. Por ejemplo: ahora es más fácil justificar por qué el agua de mar requiere temperaturas más bajas para congelarse que la de ríos y lagos; ante amenazas de heladas se esparcen en calles y carreteras, sales solubles como cloruro de sodio  $\text{NaCl}$  o cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$ , debido a que la presencia de sales disminuye el punto de congelación del hielo lo que provoca que las placas de hielo que contienen dichas sales no se formen o se derritan a bajas temperaturas; en el agua del circuito de refrigeración de los motores de combustión o en el agua de los circuitos de calefacción de las viviendas se añaden sustancias anticongelantes como el etilenglicol, que al disminuir el punto de congelación y aumentar el punto de ebullición, amplían el intervalo de temperaturas en el que la mezcla se encuentra como líquida y evita procesos de congelación o de ebullición indeseados, etc.

#### 4. Ósmosis y presión osmótica

Para explicar el funcionamiento de muchos sistemas naturales es necesario hacer referencia al comportamiento de las disoluciones respecto de membranas especiales. De esta forma se explica el intercambio de sustancias de las células vivas a través de la membrana celular o se justifica cómo árboles de gran tamaño transportan la savia a todas sus hojas. Este comportamiento especial de determinadas membranas ha sido utilizado también para la purificación y la desalación de agua en un proceso llamado de **ósmosis** inversa.

La ósmosis es el proceso espontáneo que se produce cuando dos disoluciones de diferente concentración se sitúan a ambas partes de una membrana semipermeable, consistente en un flujo de disolvente desde la disolución diluida a la concentrada.

Las membranas semipermeables son aquellas que solo dejan pasar determinadas, a través de ellas. Habitualmente dejan pasar las moléculas del disolvente y retienen al resto de partículas. A la presión necesaria para detener el flujo de disolvente, se le llama **presión osmótica**.

La ósmosis es un proceso de gran importancia para la vida de la mayoría de organismos vivos (incluidos los seres humanos).

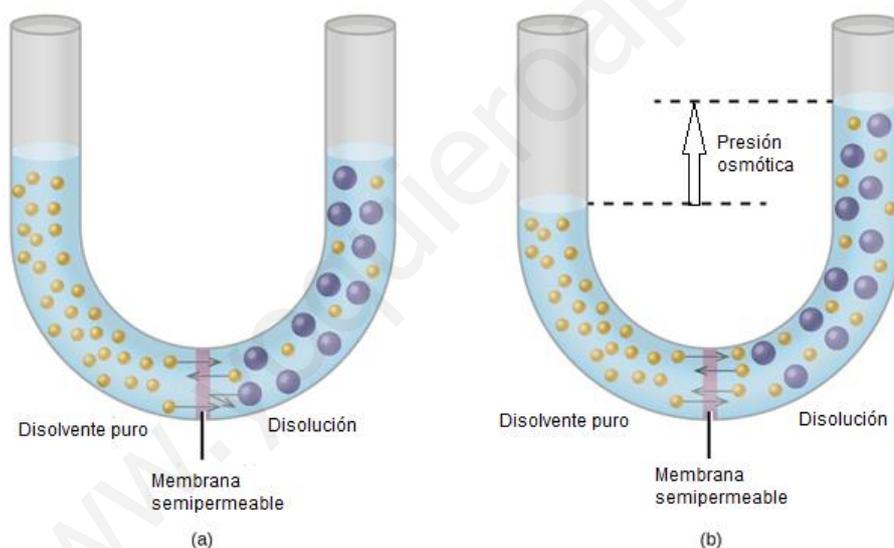
*A.9. Suponiendo que una membrana semipermeable es como un filtro con poros minúsculos que dejan pasar las moléculas pequeñas de disolvente y retiene las moléculas de soluto de mayor tamaño y utilizando el modelo cinético para las disoluciones líquidas proponed una hipótesis a modo de posible explicación (a nivel microscópico) del porqué se produce la ósmosis.*

Las moléculas del disolvente que están en continuo movimiento en ambas disoluciones, la concentrada y la diluida, atravesarán la membrana en ambos sentidos. Pero debido a que la propor-

## 7. Reacciones químicas

ción de moléculas de disolvente en la disolución diluida será mayor que en la concentrada, la velocidad de las moléculas del disolvente desde la disolución diluida a la concentrada superará a la velocidad de las moléculas del disolvente en sentido contrario, provocando un flujo neto de moléculas de disolvente desde la disolución diluida a la concentrada. Otra forma de verlo es fijándonos en el papel de las partículas de soluto, las cuales en unos casos por sí mismas y en otros (algunos iones) por estar revestidas de moléculas de agua son de mayor tamaño que las del disolvente de tal forma que no pueden atravesar la membrana semipermeable porque no caben por sus orificios. Esas partículas de soluto obstaculizan el paso de las moléculas de disolvente lo que explica que dicho disolvente fluya desde la disolución más diluida (donde hay menos obstaculización) hacia la más concentrada, y no al contrario, hasta que las concentraciones se igualen.

En la figura siguiente se representa un esquema de un dispositivo en el que se sitúan en un tubo en U dos disoluciones separadas mediante una membrana semipermeable. Inicialmente (a) se observa un flujo neto de disolvente hacia la disolución aumentando el volumen total de dicha disolución. Esto hace que aumente el nivel de la disolución aumentando así la presión hidrostática en el lado de la disolución. Este aumento de la presión hidrostática provocará un aumento de la velocidad de flujo de las partículas de disolvente de la disolución hacia el disolvente puro disminuyendo así el flujo neto de disolvente por ósmosis. Cuando la presión hidrostática adquiere un valor determinado las velocidades de flujo se igualan y la transferencia neta de disolvente cesa manteniéndose estable la diferencia de altura entre las dos ramas del tubo en U (b). La presión correspondiente a dicha situación de equilibrio es la presión osmótica, la cual se representa por  $\pi$ .



**Dispositivo para observar el efecto de la ósmosis**

Por tanto:

La presión osmótica de una disolución sobre una membrana semipermeable es igual a la presión que se debería de ejercer sobre la membrana para impedir el flujo de líquido por ósmosis a través de ella.

**A.10.** *El comportamiento de las moléculas del soluto en disoluciones diluidas se puede considerar semejante al comportamiento de las moléculas de un gas ideal. Teniendo en cuenta esto, proponed a modo de hipótesis de qué factores dependerá la presión osmótica " $\pi$ " de una determinada disolución.*

La presión osmótica dependerá de la diferencia entre la cantidad de moléculas de disolvente a ambas partes de la membrana, de forma que cuanto mayor sea la concentración de la disolución mayor será la presión osmótica. También dependerá de la temperatura, puesto que a mayor temperatura mayor será la velocidad de las moléculas de disolvente y por tanto mayor será el flujo neto por la membrana semipermeable. No dependerá del tipo de membrana ni de su extensión puesto que la presión es una magnitud intensiva que no depende de las dimensiones del objeto sobre el que se ejerce. Tampoco dependerá de la naturaleza del disolvente puesto que en este caso para que se dé la ósmosis la única condición necesaria es que el tamaño de las partículas del disolvente sea menor que el de los orificios de la membrana.

Si consideráramos las moléculas del soluto como moléculas de gas contenidas en un recipiente, la presión que estas moléculas originarían sobre las paredes, en este caso sobre la membrana, se podría calcular, como ya sabemos, mediante la expresión:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Sustituyendo el símbolo de la presión del gas por la presión osmótica “ $\pi$ ” y reordenando la expresión, obtenemos:

$$\pi = \frac{n}{V} \cdot R \cdot T \rightarrow \pi = C \cdot R \cdot T$$

Donde C es la concentración molar (mol/L) de la disolución y R es la constante molar de los gases ideales  $R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

En 1885 el químico holandés J. Van't Hoff comprobó experimentalmente la validez de la expresión anterior (por lo que se la denomina ecuación de Van't Hoff).

**A.11.** *Determinad la presión osmótica de una disolución de sacarosa preparada disolviendo 60 g de sacarosa  $C_{12}H_{22}O_{11}$  hasta completar un volumen total de 0,5 L a 25°C*  
Rdo. 8'57 atm

### 5. Otra aplicación de las propiedades coligativas: Determinación de la masa molar.

Las propiedades coligativas de las disoluciones también nos permiten conocer la masa molar de un soluto cuya naturaleza ignoramos. Esta información junto a la composición en masa del compuesto puede ser suficiente para determinar la fórmula molecular y saber de qué sustancia se trata. Teóricamente, para determinar la masa molar, se puede utilizar cualquiera de las cuatro propiedades coligativas estudiadas pero en la práctica se suelen usar el descenso del punto de congelación y la presión osmótica porque son las que presentan los cambios más pronunciados.

**A.12.** *A partir de un compuesto de naturaleza desconocida se prepara una disolución disolviendo 1'5 g en agua hasta completar un volumen de 250 mL. Experimentalmente se comprueba que la presión osmótica de dicha disolución a 20°C es 2,403 atm. Determinad la masa molar del compuesto.*

Aplicando la ecuación de Van't Hoff:

$$\pi = C \cdot R \cdot T \rightarrow \pi = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \rightarrow M = \frac{m \cdot R \cdot T}{\pi \cdot V} \text{ y sustituyendo } M = \frac{1'5 \cdot 0'082 \cdot 293}{2'403 \cdot 0'25} = 60 \text{ g/mol}$$

## 7. Reacciones químicas

**A.13.** Una muestra de 6'56 gramos de un compuesto (B) de fórmula molecular desconocida se disuelve en 200 gramos de benceno (A), que tiene un punto de fusión de 5'5 °C y una constante crioscópica de 5'07 °C·kg·mol<sup>-1</sup>. Al determinar el punto de fusión de la mezcla se obtiene un valor de 4'2°C. Determinad la masa molar del compuesto B.

Aplicando la relación de la disminución del punto de congelación de la muestra:

$$\Delta T = K_c \cdot b$$

$$b = \frac{n_B}{m_A} = \frac{m_B}{M_R \cdot m_A}$$

Siendo  $b$  la molalidad de la disolución,  $n_B$  los moles de soluto en la disolución,  $m_A$  la masa de soluto,  $M$  masa molar del soluto,  $m_d$  masa de disolvente en kilogramos.

Reordenando la expresión, y teniendo en cuenta que la disminución del punto de congelación es  $\Delta T = T_0 - T = 5'5 - 4'2 = 1'3^\circ\text{C}$ , obtenemos que:

$$M_B = \frac{K_c \cdot m}{\Delta T \cdot m_d} = \frac{5'07 \cdot 6'56}{1'3 \cdot 0'2} = 127'9 \text{ g/mol}$$

**A.14.** Buscad información sobre las diferentes aplicaciones de la presión osmótica y realizar un resumen donde se describa con detalle alguna de estas aplicaciones.

La presión osmótica interviene decisivamente en muchos procesos fundamentales para los seres vivos a la vez que presenta muchas aplicaciones técnicas de gran interés. Así, por ejemplo: En medicina es importante controlar la presión osmótica de los sueros utilizados puesto que si estos tuvieran menor o mayor presión osmótica que el interior de las células (sueros hipotónicos o hipertónicos), podrían provocar la destrucción de las células sanguíneas por aumento de volumen o deshidratación (respectivamente). Desde el origen de la civilización se ha utilizado la deshidratación mediante procesos de ósmosis para la conservación de alimentos añadiendo para ello grandes cantidades de azúcar (compotas y jaleas) o de sal (salazones) a algunos alimentos, lo que hace que las bacterias que producen la descomposición de los alimentos queden inactivas ya que estas no pueden vivir en medios hipertónicos (alta concentración de soluto) porque esto hace que pierdan agua a través de su membrana celular. La denominada ósmosis inversa se utiliza para la desalación del agua del mar y para producir agua para la bebida y el riego; ejerciendo una presión superior a la presión osmótica del agua del mar se consigue que las moléculas de agua del mar atraviesen una membrana semipermeable en el sentido del agua de mar hacia agua de menor salinidad. Es como si se exprimiese el agua pura de la disolución salina que es el agua de mar.

### Anexo 7. 3. ¿EN QUÉ CONSISTEN LOS CAMBIOS EN LA CAPA DE OZONO?

El ozono es una sustancia simple que se encuentra en estado gaseoso y que está formada por agregados de tres átomos de oxígeno (O<sub>3</sub>). Aproximadamente el 80% de este gas se encuentra entre los 10 km y los 30 km de altura. La luz solar, en determinadas condiciones, puede romper algunas moléculas de oxígeno, los átomos resultantes son muy reactivos y se pueden combinar con otras moléculas de oxígeno completas dando lugar a O<sub>3</sub>. La capa de ozono envuelve a todo el planeta y actúa como una barrera protectora contra los efectos perjudiciales de la luz ultravioleta solar (que es una radiación bastante energética). Sin embargo, algunos productos químicos sinté-

ticos como los clorofluorcarbonos y el monóxido de nitrógeno, están produciendo cambios importantes en dicho escudo protector. En el año 1987 en sólo 6 semanas se destruyó el 97'5 % de la capa de ozono que cubre la Antártida, creando una zona con muy poca densidad de ozono, de la extensión de los Estados Unidos y la altura del Everest. Este fenómeno, se ha convertido ya en un acontecimiento anual en la Antártida y comienza a aparecer también en otras latitudes.

*¿Qué importancia puede tener la destrucción de la capa de ozono?*

Hemos de tener en cuenta que la vida en la Tierra no hubiera podido desarrollarse tal y como la conocemos hoy si no hubiera sido por la capa de ozono. Las intensas radiaciones ultravioletas que llegarían del sol llevarían energía suficiente como para destruir las células. El ozono filtra esas radiaciones perjudiciales. Si el escudo protector de ozono se hace demasiado delgado, se perjudicaría la reproducción del plancton marino alterando toda la cadena alimentaria del mar. De hecho, los efectos de la destrucción del ozono están causando ya un aumento en la incidencia de enfermedades como cánceres de piel y daños oculares. Es por ello que las autoridades sanitarias aconsejan seriamente la utilización de cremas y de gafas protectoras cuando se está expuesto al sol, así como limitar los baños de sol a las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde ya que entonces al estar el sol más bajo la luz ha de recorrer más distancia en la atmósfera hasta llegar a nosotros y, por tanto, pasar a través de más cantidad de ozono. Por otra parte, no podemos olvidar que el ozono también tiene una gran importancia en la regulación del clima ya que al filtrar las radiaciones ultravioleta contribuye a que la superficie del planeta no se caliente demasiado.

La Comunidad Europea adoptó un acuerdo por el que se comprometía a haber reducido en un 85% para el año 2000 la producción y consumo de clorofluorcarbonos en todo su territorio. Sin embargo, según la Agencia Americana del Medio Ambiente, si cesara al 100 % su fabricación en todo el mundo, no se volvería a los niveles de ozono existentes en el año 1985 hasta pasados 50 años, debido a que esos compuestos se difunden lentamente por la atmósfera y tienen una vida media muy larga. Los clorofluorcarbonos son productos que solían utilizarse en los aerosoles, motores frigoríficos e instalaciones de aire acondicionado (actualmente están prohibidos en muchos países).

El llamado Protocolo de Montreal es un tratado internacional para evitar la destrucción de la capa de ozono mediante el control de los compuestos responsables de dicha destrucción. Firmado en 1987, entró en vigor en 1989 y desde entonces está dando muy buenos resultados, mostrando que se pueden lograr acuerdos y con ellos avanzar en la solución de los graves problemas medioambientales que amenazan al planeta en su conjunto.

## 7. CUESTIONES, EJERCICIOS Y PROBLEMAS

1. Construid una tabla de dos columnas en donde en una se enumeren todos aquellos aspectos que se consideren más positivos relacionados con las reacciones químicas frente a lo más negativos.
2. Citad hasta cinco productos cuya obtención se base en reacciones químicas, que hayan tenido una importancia crucial en la vida de las personas, argumentando por qué.
3. Un estudiante ha escrito las siguientes ecuaciones para representar reacciones químicas a partir de sustancias en su estado ordinario (presión atmosférica y temperatura ambiente):



## 7. Reacciones químicas

Corregid todos los errores cometidos escribiendo, en su caso, la ecuación correctamente.

4. Ajustad por el método algebraico las siguientes ecuaciones:

- a)  $\text{Cu} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- b)  $\text{Ag}_2\text{O} + \text{Co}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ag} + \text{Co}(\text{OH})_3$

5. Ordenad razonadamente las siguientes cantidades de menor a mayor masa en gramos:

- a) 602 millones de moléculas de  $\text{NH}_3$
- b) 5 moles de moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$
- c) 500 moles de átomos de nitrógeno
- d) 448 litros de oxígeno gaseoso medidos en condiciones normales (1 atm y 0 °C)
- e) 1 átomo de plomo

6. Si disponemos de 9 g de metano ( $\text{CH}_4$ ) y eliminamos  $1,5 \cdot 10^{23}$  moléculas: ¿Cuántos gramos de metano quedan? Rdo. 5,01 g

7. El nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) es un compuesto que se emplea como fertilizante.

- a) ¿Cuántas moles de átomos de nitrógeno hay en 0,020 moles de nitrato de amonio?
- b) Calculad los gramos de nitrógeno, oxígeno y de hidrógeno que hay en 1 kg de dicho fertilizante, supuesto puro.

Rdo. a) 0,04 moles de átomos; b) 350g, 600g y 50 g, respectivamente.

8. A  $50 \text{ cm}^3$  de disolución acuosa 0,2 M de sulfuro de potasio se le añade agua hasta tener un volumen de  $250 \text{ cm}^3$ . Calcula los gramos de soluto existentes y la concentración de la disolución final. Rdo.  $m = 1,10 \text{ g}$ .  $C_2 = 0,04 \text{ M}$ .

9. Disponemos de hidróxido de sodio (sólido) y agua destilada. Explicad lo más detalladamente posible todos los pasos a seguir para fabricar  $100 \text{ cm}^3$  de disolución 2M de hidróxido de sodio.

10. En un recipiente se dispone de 0,5 l de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10 M. Si extraemos  $30 \text{ cm}^3$  de dicha disolución y los vertemos en una probeta vacía a la que, posteriormente, añadimos agua hasta completar un volumen total de  $80 \text{ cm}^3$ , ¿cuál será la molaridad de la disolución final? Rdo. 3,75 M

11. ¿Qué volumen de una disolución de ácido fosfórico del 60% de riqueza y cuya densidad es de  $1,64 \text{ g/cm}^3$  se necesita para preparar 500 ml de una disolución 1 M? Rdo.  $V = 0,05 \text{ l}$

12. ¿Cuál es la molaridad de una disolución de ácido sulfúrico cuya densidad es de  $1,84 \text{ g/cm}^3$  y riqueza del 98%? Si echamos 10 ml de ese sulfúrico concentrado sobre agua hasta completar un volumen total de 100 ml ¿Qué molaridad tendrá la disolución final? Rdo. 18,4 M, 1,84 M

13. El amoniaco reacciona con el ácido clorhídrico dando cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Calculad qué volumen de disolución de amoniaco de una riqueza del 18% y densidad  $0,93 \text{ g/cm}^3$ , se habrá empleado para formar 50 g de cloruro de amonio, sabiendo que el rendimiento del proceso ha sido del 75%. Rdo.

14. Determinad la masa molecular relativa de un compuesto gaseoso, sabiendo que a 273 °C y 780 mm Hg su densidad es  $1,35 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ . Rdo. 58,89

15. En un recipiente de 10 l se han introducido 16 g de oxígeno. La temperatura del recipiente es de 27 °C. ¿Cuántas moles de moléculas de oxígeno hay en el recipiente? ¿Qué presión ejerce el

gas? ¿A qué temperatura habría que enfriar el recipiente si se desease que la presión se redujese a la mitad? Rdo. 0'5 moles, 1'23 atm, 150 K = -123 °C.

**16.** Un recipiente de 5 l contiene 14 g de nitrógeno, siendo la temperatura 127 °C. La presión atmosférica exterior es de 760 mm de Hg.

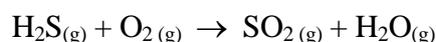
a) Calculad la presión ejercida por el nitrógeno.

b) Se abre el recipiente hasta que se iguale la presión interior con la exterior manteniendo la temperatura constante. Calculad la masa de nitrógeno que sale del recipiente.

c) Una vez cerrado de nuevo el recipiente ¿a qué temperatura deberíamos llevarlo para que se encontrara a la presión inicial ?

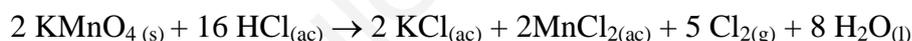
Rdo. a) 3'28 atm; b) 9'73 g; c) 1042'8 °C

**17.** El sulfuro de hidrógeno emitido por las sustancias orgánicas en descomposición (p.e., los huevos podridos), se convierte en dióxido de azufre en la atmósfera (uno de los contaminantes ambientales causantes de la lluvia ácida), mediante la reacción no ajustada:



Calculad el volumen de SO<sub>2</sub> que se producirá a 1 atm y 27°C, por cada kg de sulfuro de hidrógeno que reaccione. Rdo. V = 723'53 litros de SO<sub>2</sub>.

**18.** El cloro es un gas verde amarillento de olor picante y **muy venenoso**. Se trata de una sustancia muy reactiva que mata rápidamente a las plantas; sin embargo, también es un producto que tiene múltiples usos (plásticos, anestésicos, insecticidas, desinfección del agua, blanqueador del papel, etc.). El cloro se puede obtener en el laboratorio haciendo reaccionar permanganato de potasio con ácido clorhídrico. La reacción que tiene lugar puede representarse por medio de la siguiente ecuación química:

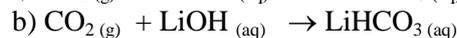


a) Calculad la masa en gramos de permanganato que habrá reaccionado para obtener un volumen de 100 cm<sup>3</sup> de cloro medido a 25 °C y 500 mm de Hg de presión.

b) Calculad el volumen de cloro en condiciones normales que puede obtenerse cuando 100 cm<sup>3</sup> de una disolución de permanganato 0'5 M reaccione con exceso de ácido clorhídrico.

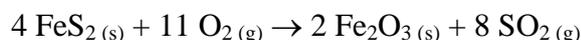
Rdo. a) 0'17 g de KMnO<sub>4</sub>; b) 2'8 litros de Cl<sub>2</sub>

**19.** El problema de la eliminación del CO<sub>2</sub> exhalado por los tripulantes de las naves espaciales y estaciones orbitales, puede resolverse mediante su absorción por disoluciones de bases fuertes como NaOH y LiOH según las reacciones:



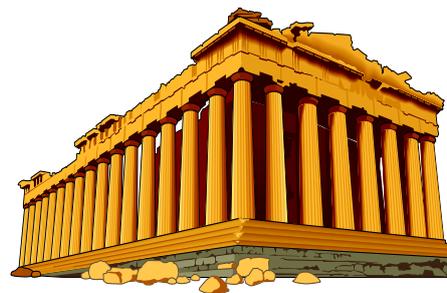
Dad alguna razón **de peso** por la que convenga utilizar una u otra disolución.

**20.** Casi todo el carbón de hulla que se quema en Estados Unidos contiene de 1 a 3% de azufre, el cual se halla generalmente formando parte de minerales como las piritas, FeS<sub>2</sub>. Durante la combustión del carbón, este azufre se convierte en dióxido de azufre según:



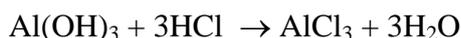
## 7. Reacciones químicas

Parte del  $\text{SO}_2$  producido reacciona con el oxígeno del aire convirtiéndose en  $\text{SO}_3$  que finalmente se combina con el agua presente en la atmósfera dando lugar a nieblas de ácido sulfúrico, que atacan a los materiales de construcción como el mármol, intervienen en la formación de lluvias ácidas, etc. De esta forma se ha afirmado, por ejemplo, que la Acrópolis de Atenas ha sufrido más daños en los últimos 50 años que durante los 20 siglos precedentes.



Cierto tipo de carbón contiene un 8% en peso de  $\text{FeS}_2$ . Calculad las masas (en kg) de  $\text{SO}_2$  y de óxido de hierro (III) que se producirán al quemar completamente una tonelada de dicho carbón. Hallad también el volumen (en litros) de oxígeno (medido a  $27^\circ\text{C}$  y 1 atm) consumido.  
Rdo.  $85'5$  kg de  $\text{SO}_2$ ;  $53'3$  kg de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $45175'3$  L de  $\text{O}_2$ .

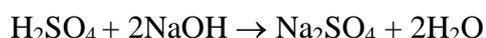
**21.** Los ácidos pueden reaccionar con hidróxidos metálicos (sustancias básicas) dando una sal y agua, de modo que sus propiedades ácidas queden neutralizadas. Un enfermo de úlcera de estómago se toma un medicamento a base de hidróxido de aluminio para neutralizar la acidez (debida al ácido clorhídrico presente en los jugos gástricos). La ecuación que representa esa neutralización es:



Suponiendo que cada día su estómago reciba 3 litros de jugo gástrico con una concentración de  $\text{HCl}$  de  $0'08$  moles/l. Imagínate que eres su médico. ¿Cuántos  $\text{cm}^3$  de un medicamento consistente en una disolución de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  de concentración  $0'8$  moles/l le recetarías para que se tomase cada día? Rdo.  $100 \text{ cm}^3$

**22.** Calculad el volumen de disolución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $0'02$  M (solución saturada) necesario para neutralizar una muestra de 25 ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$   $0'05$  M dando fosfato de calcio y agua.  
Rdo. Volumen de disolución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 93'75$  ml

**23.** Se disuelven 10 g de hidróxido de sodio en agua hasta completar  $250 \text{ cm}^3$  y se pone la disolución resultante dentro de un frasco al que se etiqueta con la letra **B**. En otro frasco, etiquetado con la letra **A**, tenemos una disolución de ácido sulfúrico de concentración desconocida. Sabiendo que  $20 \text{ cm}^3$  de B son neutralizados por  $40 \text{ cm}^3$  de A, según la reacción:



a) Obtened razonadamente la concentración molar de la disolución A.

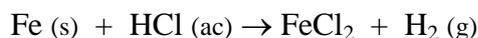
b) Calculad la riqueza de la disolución A, sabiendo que su densidad es de  $1'06 \text{ g/cm}^3$ .

Rdo. a)  $C_A = 0'25$  M; b)  $r_A = 2'31\%$

**24.** El magnesio, en forma de cinta, arde en el aire formando óxido. Se dispone de un trozo de cinta con  $4'86$  g de Mg puro y se desea saber si se quemará o no completamente en un recipiente que contiene 20 l de aire, a 1 atm y  $27^\circ\text{C}$ . Calculad el rendimiento del proceso si se obtienen  $6'2$  g de  $\text{MgO}$ . (Suponed que el aire contiene aproximadamente un 20%, en volumen, de oxígeno).  
Rdo. El rendimiento es del  $76'92\%$

**25.** Se quiere sintetizar cloruro de sodio en el laboratorio y para ello se disponen de 5 g de sodio y de 6 g de cloro. Calculad la masa de producto que se podrá obtener como máximo, y si sobrar  alguno de los reactivos. Rdo. 9'89 g de NaCl; exceso de 1'11 g de Na.

**26.** El hierro se disuelve en ácido clorhídrico dando cloruro de hierro (II) e hidrógeno según la ecuación **no ajustada**:



Si introducimos un clavo de hierro de 14 g en un vaso que contiene 125 cm<sup>3</sup> de una disolución de clorhídrico 2 M, se pide:

- a)  Se disolverá todo el clavo?  
 b)  Cu ntos gramos de cloruro de hierro (II) se formarán?  
 c)  Qu  volumen de hidrógeno, medido en condiciones normales, se desprenderá?  
 Rdo. a) No; b) 15'86 g de FeCl<sub>2</sub>; c) 2'8 l de H<sub>2</sub>.

**27.** Bucear a grandes profundidades conlleva determinados riesgos relacionados con las altas presiones. Así, el n trgeno al ser respirado en esas condiciones produce un efecto llamado "narcosis del n trgeno" que es semejante a la intoxicación etílica, mientras que el oxígeno se puede convertir en tóxico.



Por ello los submarinistas de profundidad utilizan un gas respirable denominado "trimix" formado por una mezcla de oxígeno, n trgeno y helio, cuanto mayor es la profundidad de buceo mayor es la proporción de helio que se ha de utilizar en la mezcla. En una botella de 12 L se ha introducido una mezcla de trimix que contiene 39'5% de N<sub>2</sub>, 17'5% de O<sub>2</sub> y el resto de He, a 20 C y 8 atm. Determinad las presiones parciales de cada gas y la composición porcentual en masa de la mezcla

Rdo. P(N<sub>2</sub>)= 3'16 atm, P(O<sub>2</sub>)=1'4 atm, P(He)=3'44 atm; 60'17% N<sub>2</sub> y 30'47% de O<sub>2</sub>

## 7. Reacciones químicas

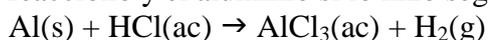
**28.** El aire correspondiente a una exhalación normal tiene un volumen de 500 mL a una temperatura de 37°C y una presión de 771 mm de Hg, si contiene un 74'5% de N<sub>2</sub>, un 15'7% de O<sub>2</sub>, un 3'6% de CO<sub>2</sub> y un 6'2 % de H<sub>2</sub>O. Determinad las presiones parciales de los gases que forman la mezcla y la masa de aire que se expulsa en la exhalación.

Rdo.  $P(\text{N}_2)=574'4$  mm de Hg;  $P(\text{O}_2)=121'0$  mm de Hg;  $P(\text{CO}_2)=27'8$  mm de Hg;  $P(\text{H}_2\text{O})=47'8$  mm de Hg;  $m(\text{aire})=0'566$  g

**29.** Se recoge, sobre agua saturada en oxígeno a 25°C, el oxígeno desprendido en la reacción de descomposición térmica del clorato de potasio KClO<sub>3</sub>. El volumen de gas recogido a la presión de 770'6 mm de Hg es 125 mL. Sabiendo que la presión de vapor del agua a 25 °C es 23'8 mm de Hg, calculad la masa de oxígeno recogido.

Rdo.  $m=0'161$  g de O<sub>2</sub>

**30.** Una aleación de aluminio y cobre fue tratada con ácido clorhídrico de forma que el cobre no reaccionó y el aluminio si lo hizo según la ecuación química no ajustada:



Si se recogieron sobre agua 415 cm<sup>3</sup> de gas al hacer reaccionar una muestra de 0'35 g de la aleación a 0'998 atm de presión y 25°C. Determinad el porcentaje en masa de aluminio en la muestra.

Dato: la presión de vapor del agua a 25 °C es 23'8 mm de Hg

Rdo. 84'4%

**31.** Una disolución que contiene un gramo de hemoglobina en 100 mL presenta una presión osmótica de 2'75 mm de Hg a 25°C. Calculad:

a) La concentración molar de la disolución de hemoglobina.

b) La masa molecular relativa de la hemoglobina

Rdo.  $C=1'48 \cdot 10^{-4}$  moles/L;  $M=6'7 \cdot 10^4$

**32.** Los motores de combustión interna suelen utilizar como refrigerante agua, pero el agua congela a 0°C, por lo que se le añade sustancias que actúan como anticongelantes. Una muy utilizada es el 1,2-etanodiol o etilenglicol (CH<sub>2</sub>OH-CH<sub>2</sub>OH). Sabiendo que las constantes ebulloscópica y crioscópica del agua son respectivamente 0'52 y 1'86 °C·kg/mol, determinad:

a) Cuánto anticongelante se ha de añadir a 1 L de agua para que la mezcla no congele hasta -12°C.

b) A qué temperatura hervirá la mezcla de agua y anticongelante.

Rdo.  $m=400$  g;  $T_{\text{eb}}=103'35^\circ\text{C}$

**33.** La presión osmótica de nuestra sangre a 37°C, es de 7'65 atm. Calculad la masa de glucosa (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) que ha de contener un inyectable de 2 cm<sup>3</sup>. Explicad que sucedería si la masa de glucosa fuera el doble, o la mitad.

Rdo.  $m=0'108$  g

**34.** Se disuelven en agua 135 gramos de azúcar (sacarosa) de fórmula C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>, hasta obtener un volumen de 1 L de disolución. La densidad de la disolución obtenida a 25°C es 1050 kg/m<sup>3</sup>. Sabiendo que las constantes ebulloscópica y crioscópica del agua son respectivamente 0'52 °C·kg·mol<sup>-1</sup> y 1'86 °C·kg·mol<sup>-1</sup>, calculad:

a) La molalidad

b) La concentración molar.

c) Las temperaturas a las que hervirá y se congelará esta disolución.

d) La presión osmótica de la disolución.

Rdo.  $b=0'43$  moles/kg;  $C=0'395$  moles/L;  $T_{\text{eb}}=100'22$  °C,  $T_{\text{f}}=-0,80^\circ\text{C}$ ;  $\pi=9'65$  atm

## 8. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y ESPONTANEIDAD DE LAS REACCIONES QUÍMICAS

### INTRODUCCIÓN

En los temas 3 y 4 estudiamos cómo los cambios producidos en los sistemas materiales están siempre relacionados con intercambios de energía. Dichos intercambios de energía pueden realizarse mediante la realización de trabajo o mediante calor.

En este tema continuaremos el estudio de los cambios químicos analizando el intercambio de energía que tiene lugar entre las sustancias que intervienen en una reacción química (en adelante “sistema químico”) y el medio que le rodea (en adelante “el exterior”).

*A.1. Citad ejemplos o situaciones en las que se ponga de manifiesto la importancia que tienen los intercambios de energía asociados a determinadas reacciones químicas. A continuación, sugerid qué preguntas podríamos plantearnos para profundizar en el estudio de dichos intercambios.*

Desde la antigüedad los seres humanos hemos venido realizando reacciones químicas para obtener energía con la que producir determinados cambios. Si retrocedemos en el tiempo, podemos pensar, por ejemplo, en la combustión de la madera y carbón para calentarse, cocinar los alimentos u obtener y trabajar materiales como los metales o la cerámica. Otros ejemplos, más actuales, son la utilización de explosivos en la minería, construcción de carreteras, conflictos bélicos, etc., o el uso creciente de combustibles fósiles (derivados del petróleo, carbón y gas natural) en los medios de transporte, la calefacción o la producción de energía eléctrica, aumentando como consecuencia las emisiones de dióxido de carbono (y con ello el efecto invernadero). La energía que necesitamos para vivir la ingerimos a través de los alimentos y es absorbida, almacenada y transferida a través de reacciones químicas que se producen en nuestro organismo. En gran parte, nuestro estado de salud depende de una dieta adecuada a nuestras necesidades energéticas.



Entre las preguntas que podemos plantearnos:

- ✓ ¿De dónde sale la energía que podemos obtener a partir de reacciones químicas?
- ✓ ¿Por qué hay reacciones químicas que proporcionan (al exterior) energía mientras que en otras ocurre lo contrario y lo que hacen es absorber energía (del exterior)?
- ✓ ¿Cómo podemos medir la cantidad de energía transferida en una reacción química?

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

- ✓ ¿Se puede saber con antelación qué cantidad máxima de energía podemos obtener a partir de una reacción química?
- ✓ ¿Podemos realizar trabajo mecánico a partir de reacciones químicas apropiadas?
- ✓ ¿Por qué unas reacciones se producen de forma espontánea y otras no?

Para poder avanzar hacia la solución de los problemas anteriores tendremos que utilizar los conceptos de trabajo y calor como dos formas distintas de transferir energía de un sistema a otro. También hará falta utilizar el concepto de **energía interna** e introducir el concepto de **energía química**. Ello nos permitirá comprender qué es lo que hace que unas veces se transfiera energía desde los productos de una reacción al exterior y otras suceda al revés (reacciones **exotérmicas** y **endotérmicas** respectivamente). Para poder medir la energía transferida deberemos utilizar el principio de conservación de la energía (en este caso el primer principio de la termodinámica) y aprender a calcular el calor de reacción en diversas condiciones, para lo cual tendremos que introducir una nueva magnitud denominada **entalpía** de reacción. Seguidamente estudiaremos la espontaneidad o no de los cambios químicos, para lo que introduciremos dos nuevas magnitudes: la **entropía** i la energía **libre** de Gibbs, que nos permitirán predecir si una reacción será o no espontánea (segundo principio de la termodinámica) y la cantidad máxima de trabajo útil que se puede obtener a partir de una reacción.

Antes de comenzar, conviene que nos detengamos brevemente en la observación cualitativa de dos reacciones químicas, que nos permitirán una primera aproximación al concepto de reacción exotérmica y endotérmica.

*A.2. Realizad las siguientes experiencias, observando todos los cambios que se produzcan:*

- a) En un tubo de ensayo colocad 2 mL de ácido clorhídrico 2 M y añadid un par de trozos de zinc metálico.*
- b) En un vaso de precipitados mezclar agitando con una varilla de vidrio 4 g de hidróxido de bario hidratado  $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$  con 2 g de tiocianato de amonio.*

En la primera reacción se observa que se desprenden unas burbujas de un gas incoloro, disminuye la cantidad de metal y a la vez el tubo de ensayo que contiene la reacción se calienta. El gas que se desprende se puede comprobar que es inflamable puesto que al acercar una llama a la boca del tubo de ensayo se produce una pequeña deflagración. Se trata de hidrogeno ( $H_2$ ).

En la segunda reacción, al mezclar los dos sólidos, que en principio presentaban un aspecto polvoriento, se forma una pasta (debido a la aparición de agua líquida) y se aprecia claramente el olor característico del amoniaco que se desprende del vaso donde se produce la reacción. Además, las paredes del recipiente se enfrían y el vapor de agua atmosférico condensa sobre ellas llegando a congelarse.

La primera reacción es un ejemplo de reacción **exotérmica**, mientras que la segunda, se trata de una reacción **endotérmica**. En ambos casos se produce un intercambio de energía entre la reacción química y el exterior. **En la exotérmica se transfiere energía mediante calor desde el sistema químico al exterior** (por eso las paredes del tubo y el aire de alrededor se calientan). **En la endotérmica, en cambio, es el sistema químico quien gana energía del exterior** (por eso las paredes del vaso y el aire de alrededor se enfrían).

Hemos de insistir en que aunque el calor no es ni una sustancia ni tampoco una energía, es habitual utilizar expresiones tales como calor ganado (o calor cedido) u otras similares. Lo importante es comprender que cuando se utilicen lo que se quiere decir realmente es energía ganada (o energía cedida) mediante calor. En realidad el calor es un proceso, no una sustancia ni una energía.

## 1. ¿A QUÉ SE DEBEN LOS CAMBIOS DE ENERGÍA QUE SE PRODUCEN EN LAS REACCIONES QUÍMICAS?

Como ya sabemos, las sustancias químicas están formadas por átomos o iones que, habitualmente, forman agregados de relativa estabilidad como las moléculas, los cristales iónicos o los cristales atómicos (metales). Una muestra dada de una sustancia se caracteriza por tener una energía "propia" a la que denominaremos como **energía interna** y que se representa por el símbolo  $U$ . Para el estudio de los cambios químicos en las sustancias dicha energía se considera, fundamentalmente, como el fruto de tres aportaciones: la energía cinética asociada a los posibles movimientos (de todo tipo) de las partículas (**energía térmica**), la energía potencial eléctrica asociada a la existencia de débiles fuerzas de unión entre agregados de partículas (por ejemplo, las fuerzas entre moléculas o intermoleculares) y la energía potencial eléctrica asociada a la existencia de uniones fuertes entre las propias partículas que forman los agregados (por ejemplo, las fuerzas entre átomos de una misma molécula o fuerzas intramoleculares)<sup>1</sup>. A la suma de las dos últimas (energía interna potencial) la designaremos como **energía química**, ya que en todo cambio químico se rompen unos enlaces en las sustancias reaccionantes y se forman otros nuevos en los productos de la reacción. Dado que es bastante improbable que la energía química de los productos coincida con la de las sustancias reaccionantes, en la mayoría de las reacciones se producirá un cambio o variación de energía química, dada por:

$$\Delta U_q = U_{q_{\text{prod}}} - U_{q_{\text{reac}}}$$

De la ecuación anterior resulta evidente que el cambio de energía química en una reacción (o **energía de reacción**) será positivo cuando la energía química de los productos sea mayor que la de los reaccionantes, mientras que será negativo en caso contrario.

Para romper cualquier enlace químico (como, por ejemplo, el que mantiene unidos a los dos átomos de oxígeno en la molécula de  $O_2$ ), se requiere siempre una cierta cantidad de energía. Por el contrario, cuando se produce un enlace químico entre átomos (o grupos de átomos) inicialmente aislados, siempre se "libera" energía. De acuerdo con el principio de conservación, la energía necesaria para romper un enlace determinado habrá de coincidir con la energía que se libere al producirse ese mismo enlace.

El valor de la energía interna  $U$  de una muestra de una sustancia depende del estado físico de la misma (sólido, líquido, gas), de las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentre, y de la masa de la muestra (a igualdad de los restantes factores 20 g de agua tendrán doble energía interna que 10 g de agua). En realidad no podemos medir el valor absoluto de  $U$  para una muestra dada de sustancia, aunque sí sabemos que dicha energía debe tomar el mismo valor (sea el que sea) siempre que las condiciones en que se encuentra esa sustancia (masa, temperatura, fase, etc.) se repitan (sea cual sea el procedimiento seguido para obtener esa sustancia). Decimos entonces que  $U$  es una "función de estado". Una consecuencia de ello es que cuando un sistema químico evolucione entre dos estados (1) y (2),  $\Delta U$  no dependerá del proceso o camino que se haya seguido para llegar de un estado al otro. Por ejemplo: el cambio de energía interna que se produce en 1 g de agua cuando pasa de  $0^\circ\text{C}$  y 1 atm a 1 g de agua a  $100^\circ\text{C}$  y 1 atm, es el mismo independientemente del método que hayamos seguido para realizar el proceso (calentar con una llama, con un microondas, con una resistencia eléctrica, etc.), del tiempo empleado, o de si lo hacemos directamente o por etapas.

<sup>1</sup> Conviene tener en cuenta que esta energía, asociada a enlaces entre los átomos que forman los agregados, puede ser más de un centenar de veces mayor que la energía potencial asociada a la existencia de las débiles fuerzas de unión que puedan haber entre dichos agregados (fuerzas de Van der Waals).

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**A.3.** *Escribid y ajustad las ecuaciones químicas que representan las reacciones observadas en la actividad A.2. ¿Cómo se justifica el cambio de temperatura de los recipientes en los que se ha realizado la reacción?*

La forma más adecuada de justificar el cambio de temperatura observado es suponer que ambos recipientes estuviesen aislados y aplicar el principio de conservación de la energía, según el cual, en esas condiciones, la energía interna total del sistema químico antes y después de la reacción ha de ser la misma. También supondremos que las sustancias reaccionantes se encontraban inicialmente a la misma temperatura que el medio circundante.

a) En el primer caso, puesto que ha aumentado la temperatura, la energía cinética media de las partículas que forman los productos de la reacción es mayor de la energía cinética media de las de las sustancias reaccionantes. Como la energía interna total ha de ser la misma al final que al principio de la reacción, hemos de concluir que la energía química de los productos es menor que la de los reactivos. En otras palabras: El aumento de la energía térmica producido coincide con la disminución de la energía química.

Otra forma de entenderlo, es partiendo del hecho de que la rotura de enlaces químicos presentes en los reactivos requiere aportar energía, mientras que la formación de enlaces en los productos lo que hace es liberar energía. En este caso, la segunda es mayor que la primera, por lo que la diferencia se queda en forma de energía interna cinética de los productos (o energía interna) y por eso la temperatura del sistema químico aumenta.

Si el recipiente no estuviese aislado, una parte de la energía térmica del sistema químico pasaría (mediante calor) al recipiente y al aire de alrededor (que se calentarían, aumentando su temperatura). Esto se suele expresar habitualmente diciendo que:

**Una reacción exotérmica es aquella en la que se "cede calor" al medio exterior**

En el segundo caso ocurre lo contrario. Puesto que ha disminuido la temperatura, la energía cinética promedio de las partículas que forman los productos, es menor que la de las sustancias reaccionantes. Como la energía interna total ha de ser la misma al principio que al final de la reacción, concluimos que la energía química de los productos es mayor que la de los reactivos. En otras palabras: La disminución de la energía térmica producida coincide con el aumento de la energía química.

Otra forma de entender el proceso es tener en cuenta que, en este caso, la energía que se libera en la formación de enlaces de los productos es menor que la que se necesita para romper los de las sustancias reaccionantes, por lo que la energía que falta proviene de la energía cinética interna, la cual, por tanto, disminuirá (lo que se traduce en una bajada de la temperatura o enfriamiento del sistema químico).

Si el recipiente no estuviese aislado, no cabe duda que se produciría una transferencia de energía mediante calor desde el entorno o medio exterior hacia el sistema químico (que se ha enfriado) hasta que se igualasen las temperaturas. Este hecho se expresa habitualmente diciendo que:

**Una reacción endotérmica es aquella en la que se "absorbe calor" del medio exterior**

De acuerdo con los razonamientos anteriores:

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

En un sistema químico, no aislado del exterior, en el que se produzca una reacción exotérmica, la energía interna del sistema disminuirá, es decir:

Reacción exotérmica  $\rightarrow \Delta U < 0$

En un sistema químico, no aislado del exterior, en el que se produzca una reacción endotérmica, la energía interna del sistema aumentará, es decir:

Reacción endotérmica  $\rightarrow \Delta U > 0$

## 2. LA ENERGÍA SE CONSERVA. PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Si aplicamos el Principio General de Conservación de la Energía teniendo en cuenta que las dos formas en que un determinado sistema químico puede modificar su energía interna es mediante trabajo y/o calor, podremos escribir la expresión:

$$W_{\text{ext}} + Q = \Delta U$$

La ecuación anterior es una forma de sintetizar el primer principio de la Termodinámica, aplicado a un sistema químico, según el cual: siempre que la suma del trabajo exterior realizado sobre el sistema y el calor sea 0, la energía interna del sistema no cambia y siempre que dicha suma es positiva (negativa), la energía interna aumenta (disminuye).

Conviene saber que con frecuencia se habla de calor "absorbido" por el sistema del exterior (positivo) y "cedido" por el sistema al exterior (negativo), aunque ya sabemos que lo que se quiere decir realmente es energía ganada o perdida por el sistema mediante calor.

En cuanto al trabajo exterior realizado sobre el sistema, su signo dependerá únicamente de si la fuerza exterior que actúa sobre el sistema químico lo hace favoreciendo el desplazamiento (en cuyo caso dicho trabajo será positivo) u oponiéndose al desplazamiento (en cuyo caso dicho trabajo será negativo).

*A.4. Un sistema pasa de un estado A a otro estado B absorbiendo 4000 J de energía mediante calor al tiempo que las fuerzas exteriores realizan sobre el mismo un trabajo de 1000 J. Después regresa de B a A realizando el sistema un trabajo de 4500 J ¿Cuánto calor se liberará o se absorberá?*

Suponemos que se trata de un sistema cerrado en el cual podemos aplicar la expresión del primer principio de la Termodinámica. Cuando el sistema evoluciona desde el estado inicial A al estado final B la variación de la energía interna será:

Desde A hasta B:  $\Delta U = U_B - U_A = W_{\text{ext}} + Q = 1000 + 4000 = 5000 \text{ J}$

Desde B hasta A:

Como la energía interna es una función de estado  $U_A - U_B = -(U_B - U_A) = -5000 \text{ J}$ .

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Si consideramos siempre procesos reversibles<sup>2</sup> (como haremos durante todo este tema), el trabajo exterior y el trabajo realizado por el sistema serán iguales y de signo contrario ( $W_{\text{sist}} = -W_{\text{ext}}$ ) por lo que, teniendo esto en cuenta, podremos escribir:

$$\Delta U = U_A - U_B = W_{\text{ext}} + Q = -4500 + Q = -5000 \text{ J} \rightarrow Q = -5000 + 4500 = -500 \text{ J}$$

El signo negativo de  $Q$  nos indica que el sistema al pasar del estado B al estado A, transfiere energía mediante calor al medio exterior o como suele decirse “libera” o “cede” calor.

**A.5.** *Un sistema absorbe 4180 J del medio mediante calor, realizando al mismo tiempo sobre el exterior un trabajo de 500 J ¿Cuál será la variación de la energía interna?*

*Rdo. 3680 J*

Es necesario tener en cuenta que, a diferencia de la energía interna, el calor y el trabajo no son funciones de estado, es decir, su valor depende de cómo se realice la transformación. Calor y trabajo son dos formas de intercambiar la energía que dependen de cuál es el procedimiento empleado para realizar este cambio mientras que la energía es una propiedad que solo depende de cuál es el estado del sistema y viene determinada por las variables termodinámicas del mismo (presión, temperatura, fase, concentración...).

De todas las formas de transformación de un sistema químico son particularmente interesantes las que se producen a volumen constante, cuando se realizan en un recipiente cerrado de paredes rígidas o las que tienen lugar a presión constante, como por ejemplo aquellas que se realizan en un recipiente abierto a presión atmosférica. A continuación estudiaremos estas transformaciones

### 3. TRABAJO DE EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

Como ya hemos comentado anteriormente, los sistemas químicos pueden intercambiar energía con el entorno mediante calor, pero también pueden modificar su energía interna mediante la realización de trabajo (lo que involucra fuerzas y desplazamientos).

**A.6.** *Propone ejemplos de reacciones químicas que vayan acompañadas de la realización de trabajo.*

Los motores de combustión interna son un ejemplo bien conocido de sistemas en los que se aprovecha el trabajo de expansión que se produce a consecuencia de una reacción de combustión. La gasolina, una mezcla de hidrocarburos, junto con el oxígeno del aire reacciona en el interior de un cilindro produciendo fundamentalmente  $\text{CO}_2$  y vapor de agua. Los productos de la reacción ejercen una gran presión sobre el émbolo (o pared móvil) del cilindro que contiene la mezcla, haciendo que este se desplace realizando un trabajo (mecánico). Otro ejemplo serían las reacciones utilizadas en las pilas electroquímicas en las que una reacción química transfiere energía interna en forma de trabajo (eléctrico). Las pilas alcalinas están formadas por zinc y óxido de mangane-

---

<sup>2</sup> En Termodinámica, un proceso reversible es aquel que puede ser revertido haciendo que evolucione en sentido contrario al que lo está haciendo, mediante la modificación infinitesimal de una variable (decimos que en este caso el sistema está en equilibrio con el entorno). Un ejemplo de reversibilidad se da cuando tenemos dos sistemas a la misma temperatura. En ese caso, la transferencia de energía mediante calor de uno a otro es reversible, porque si la temperatura de uno de ellos baja en una cantidad infinitesimal, la energía fluye desde el otro hacia él hasta que se igualan ambas temperaturas, pero si en lugar de bajar, sube, el sentido del proceso cambia y la energía fluye en sentido contrario al anterior.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

so(IV), que al ponerse en contacto mediante un conductor eléctrico exterior, reaccionan proporcionando una corriente eléctrica continua.

El trabajo mecánico realizado por un sistema químico dependerá de cómo se realice la transformación para pasar del estado inicial al final del sistema. Si en la reacción no se produce un cambio de volumen porque reactivos y productos ocupan el mismo volumen o porque la reacción se produce en un recipiente de paredes fijas herméticamente cerrado, el trabajo será nulo, ya que para que se produzca trabajo mecánico es imprescindible que haya no solo fuerza sino también desplazamiento.

Si al llevar a cabo una reacción en un recipiente, alguno de los productos que se producen se encuentra en fase gaseosa y existe una pared móvil, se puede producir un aumento del volumen del sistema químico con lo que en ese caso el trabajo exterior no será nulo.

*A.7. Obtened la expresión del trabajo exterior realizado sobre un gas encerrado en un cilindro como el de la figura al expandirse entre un volumen  $V_0$  y un volumen  $V_1$ , en función de la presión exterior ( $P_{ext}$ ) y la variación del volumen.*

*Suponed que la presión interior se mantiene en equilibrio con la presión exterior y esta es constante.*

Sabemos que el trabajo mecánico realizado por una fuerza constante  $\vec{F}$  viene dado por el producto de la componente tangencial de dicha fuerza por el desplazamiento.

$$W = F_t \cdot \Delta e.$$

La fuerza exterior es debida a la presión exterior y, de acuerdo al criterio de signos adoptado (ved figura) la componente tangencial de dicha fuerza será negativa. Por lo que la expresión del trabajo quedará como:

$$W_{ext} = -F_{ext} \cdot \Delta e$$

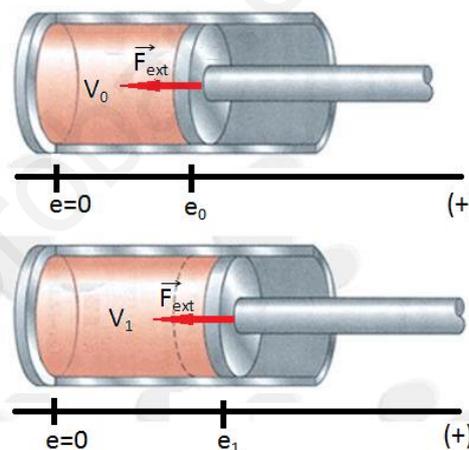
Podemos expresar la fuerza exterior como  $F_{ext} = P_{ext} \cdot S$ , donde  $S$  es la superficie del émbolo o pared móvil del cilindro.

$$W_{ext} = -P_{ext} \cdot S \cdot \Delta e$$

Y puesto que:  $S \cdot \Delta e = S \cdot (e_1 - e_0) = S \cdot e_1 - S \cdot e_0 = V_1 - V_0 = \Delta V$ , obtenemos que:

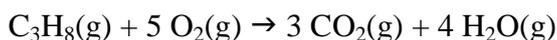
$$W_{ext} = -P_{ext} \cdot \Delta V$$

De acuerdo con la expresión obtenida, está claro que siempre que se produzca una expansión (lo que implica  $\Delta V > 0$ ) el trabajo exterior resultará negativo, y siempre que se produzca una compresión (lo que implica  $\Delta V < 0$ ) el trabajo exterior resultará positivo. Por tanto, el efecto del trabajo exterior será disminuir la energía interna del sistema en la expansión y aumentarla en la compresión.



## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**A.8.** *Determinad el trabajo de expansión realizado por un sistema al quemarse un mol de propano a la presión constante de 1 atmósfera y 273 K según la reacción dada por:*



En este caso se nos pide el trabajo realizado por el sistema. Si suponemos que dicho sistema está continuamente en equilibrio con el exterior (proceso reversible), dicho trabajo será igual al trabajo exterior cambiado de signo. Es decir:

$$W_{\text{sist}} = -W_{\text{ext}}$$

Por tanto, para calcular el trabajo que se demanda en el enunciado, bastará obtener el trabajo exterior y cambiar el signo del resultado. Comenzaremos, pues, por calcular  $W_{\text{ext}}$ .

$$W_{\text{ext}} = -P_{\text{ext}} \cdot \Delta V$$

Una cuestión importante es cómo podemos determinar el cambio de volumen producido. Para ello supondremos que los gases que intervienen se comportan como gases ideales. En ese caso, la variación de volumen será directamente proporcional a la variación del número de moles de gas en la reacción.

$$\Delta V = V_{(\text{productos})} - V_{(\text{reactivos})} = \frac{n(\text{productos}) \cdot R \cdot T}{P} - \frac{n(\text{reactivos}) \cdot R \cdot T}{P} = \frac{\Delta n \cdot R \cdot T}{P}$$

A partir de los coeficientes estequiométricos de la ecuación química sabemos que cada mol de propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) que reaccione lo hará con 5 moles de  $\text{O}_2$  y se formaran 3 moles de  $\text{CO}_2$  y 4 moles de  $\text{H}_2\text{O}$ .

$$\Delta n = n_{(\text{productos})} - n_{(\text{reactivos})} = (3+4) - (1+5) = 1 \text{ mol}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{1 \cdot 0,082 \cdot 273}{1} = 22,38 \text{ L} = 2,238 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$W_{\text{ext}} = -P_{\text{ext}} \cdot \Delta V = -1,013 \cdot 10^5 \cdot 2,238 \cdot 10^{-2} = -2,27 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$\text{Finalmente: } W_{\text{sist}} = -W_{\text{ext}} = -(-2,27 \cdot 10^3) = 2,27 \cdot 10^3 \text{ J}$$

Observad que el trabajo exterior es negativo, puesto que se produce un aumento del volumen en la reacción y el sistema se expande. Dicha expansión se traduce en una disminución de la energía del sistema.

**A.9.** *El trabajo exterior de expansión o compresión de un gas a presión constante, se calcula mediante la expresión  $W_{\text{ext}} = -P \cdot \Delta V$  y se suele expresar en atm·L, pero: ¿a cuántos julios equivale 1 atm·L? ¿Cómo podemos expresar el valor de la constante de los gases  $R=0,082 \text{ atm}\cdot\text{L}/\text{mol}\cdot\text{K}$  utilizando unidades del sistema internacional,  $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ ? ( $1 \text{ atm} \approx 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$ ).*

$$\text{Rdo. } 1 \text{ atm}\cdot\text{L} \approx 102 \text{ J}; \quad R \approx 8,2 \text{ J}/\text{mol}\cdot\text{K}$$

#### 4. ¿CÓMO DETERMINAR EL CALOR DE REACCIÓN A VOLUMEN CONSTANTE?

En las reacciones a volumen constante ( $\Delta V = 0$ ), siempre que no se realice ningún otro tipo de trabajo no mecánico (como podría ser trabajo eléctrico) el trabajo exterior será nulo ( $W_{\text{ext}} = 0$ ), por lo que al aplicar el primer principio de la Termodinámica se llega fácilmente a la conclusión de que la variación de la energía interna será igual al **calor a volumen constante** (que en adelante designaremos como  $Q_V$ ). Es decir:

$$Q_V = \Delta U$$

Para una reacción exotérmica, que ocurre en un sistema químico no aislado, la energía interna de los productos es inferior a la energía interna de las sustancias reaccionantes, ya que el sistema transfiere energía mediante calor a su entorno. Por tanto, de acuerdo con la ecuación anterior, en este caso, el calor de reacción a volumen constante resultará negativo. En cambio, en una reacción endotérmica ocurre justo lo contrario y el calor de reacción a volumen constante será en estos casos positivo.

En general, si consideramos una reacción química en el curso de la cual, las sustancias reaccionantes tomadas en proporciones estequiométricas a una temperatura dada "t" (que habitualmente coincide con la del medio exterior) reaccionan totalmente para dar unos productos, los cuales se llevan rápidamente a la temperatura "t" a la que se encontraban inicialmente las sustancias reaccionantes, el valor del calor de reacción a volumen constante ( $Q_V$ ) nos indicará:

La cantidad de energía intercambiada mediante calor entre el medio exterior y el sistema químico considerado (para que la temperatura de los productos sea la misma que tenían inicialmente las sustancias reaccionantes).

Como ya hemos razonado anteriormente, dicho calor deberá expresarse con signo negativo en las reacciones exotérmicas y con signo positivo en las endotérmicas.

Como los cambios energéticos producidos en una reacción química dependen (entre otros factores) de las cantidades de sustancias que intervengan, para poder comparar calores de reacción se suelen dar éstos por mol de sustancia formada o por mol de sustancia reaccionante (especificando el estado físico de la misma). Lo designaremos como **calor de reacción molar**. Se mide, pues, en J/mol (unidades internacionales) aunque también se suele dar en kJ/mol ( $1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$ ) y, en ocasiones, en kcal/mol ( $1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$ ).

*A.10. ¿Cómo podríamos medir experimentalmente el calor de reacción molar a volumen constante? Sugierid alguna experiencia fácil de realizar en el laboratorio.*

Una forma de medir el calor de reacción a volumen constante es mediante la utilización de un calorímetro. Para que ello pueda hacerse, es necesario que el calorímetro esté bien aislado con el fin de que el intercambio de energía entre el calorímetro y sus alrededores, durante el tiempo que dure la reacción, se pueda considerar despreciable.

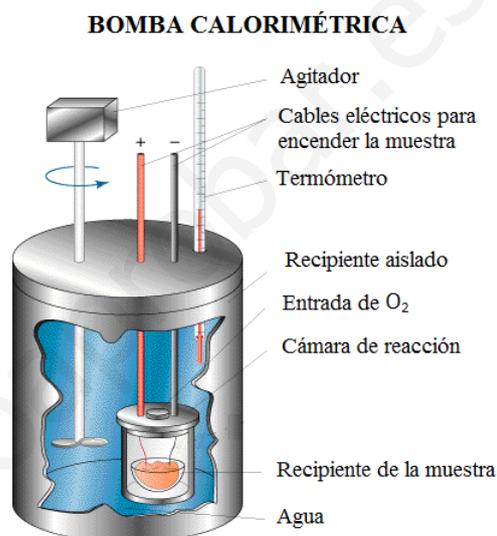
Supongamos que en el interior de un calorímetro con agua hay una determinada mezcla reaccionante y que la reacción es exotérmica. Si tenemos la precaución de que las cantidades de sustancias que intervienen en la reacción sean muy pequeñas en comparación con la cantidad de agua presente en el calorímetro y la reacción se realiza de forma completa, siendo la temperatura inicial de los reaccionantes y del agua del calorímetro igual a la temperatura ambiente, podremos considerar que el calor de reacción coincide muy aproximadamente con el "calor ganado" por el

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

agua y las paredes del calorímetro (cuyo valor podremos conocer midiendo la variación de temperatura que experimentan). Esta aproximación será tanto más ajustada a la realidad cuanto menos cantidad de mezcla reaccionante se utilice (respecto al agua existente), más rápidamente transcurra la reacción y más aislante resulte el calorímetro empleado. Así, por ejemplo, una gran cantidad de agua en comparación con la cantidad de mezcla reaccionante nos asegura que aunque el proceso sea muy exotérmico el agua apenas aumentará su temperatura y, en consecuencia, la energía transferida desde ella al exterior del calorímetro será despreciable.

Así pues, en las condiciones especificadas anteriormente, si medimos la cantidad de energía absorbida mediante calor por el agua y las paredes del calorímetro podremos considerar que coincide, en valor absoluto, con la energía que mediante calor han de ceder los productos de la reacción para quedar a la misma temperatura que tenían inicialmente los reactivos y, por tanto, con el valor del calor de reacción a volumen constante  $Q_v$ .

Un caso especial de calorímetro utilizado para medir los calores de reacción a volumen constante es la denominada "bomba calorimétrica", utilizada principalmente para estudiar calores de combustión. (De esta forma podemos conocer, por ejemplo, el "poder calorífico" de los diferentes combustibles). En ella, se introduce la muestra, después de determinar su masa, en la cámara de reacción junto con el oxígeno necesario, se cierra herméticamente dicha cámara y se sumerge en una cantidad conocida de agua contenida dentro de un recipiente aislado del exterior. Luego se realiza la combustión de la muestra mediante un dispositivo eléctrico y se mide el cambio de temperatura del agua.



**A.II.** Una cantidad de 1,435 g de naftaleno ( $C_{10}H_8$ ) se quema en una bomba calorimétrica, comprobándose que la temperatura del agua aumenta en 5,67 K. Si la masa de agua que rodea la bomba es de 2 kg y la capacidad calorífica<sup>3</sup> total de la bomba y calorímetro es de 1800 J/K, calculad el calor molar de combustión del naftaleno a volumen constante.

El calor que "absorbe" el agua será:

$$Q_{\text{agua}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 2 \cdot 4180 \cdot 5,67 = 47\,401,2 \text{ J} = 47,401 \text{ kJ}$$

El calor que "absorbe" la bomba:

$$Q_{\text{bomba}} = C_{\text{bomba}} \cdot \Delta T = 1800 \cdot 5,67 = 10\,206 \text{ J} = 10,206 \text{ kJ}$$

El calor de combustión a volumen constante (reacción exotérmica) será:

$$Q_v (\text{proceso}) = - (Q_{\text{bomba}} + Q_{\text{agua}}) = -57,607 \text{ kJ}$$

<sup>3</sup> Se denomina capacidad calorífica de un sistema determinado a la cantidad de energía que mediante calor absorbe dicho sistema por cada grado que aumenta su temperatura.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Finalmente para calcular el calor de reacción molar a volumen constante (también llamado aquí calor molar de combustión), habrá que dividir el resultado entre el número de moles de naftaleno (cuya masa molar es  $M = 128 \text{ g/mol}$ ), de modo que:

$$n(\text{C}_{10}\text{H}_8) = \frac{m}{M} = \frac{1,435}{128} \text{ moles}$$

El calor molar a volumen constante del naftaleno será:

$$Q_{V(\text{molar})} = \frac{Q_V}{n} = \frac{-57,506 \cdot 128}{1,435} = -5138,5 \text{ kJ/mol}$$

¿Qué significado cabe atribuir al resultado anterior?

De acuerdo con los razonamientos realizados, significa que por cada mol de naftaleno que se quemó (a volumen constante) se producen 5138,5 kJ de energía.

Conviene saber que con frecuencia, en lugar de darnos la capacidad calorífica del calorímetro, nos informan de su **equivalente en agua** ( $m_E$ ) o masa de agua que al absorber la misma energía que dicho sistema sufre el mismo aumento de temperatura.

**A.12.** *Deducid la relación existente entre el equivalente en agua del calorímetro y la capacidad calorífica del mismo.*

Dicha relación se puede obtener fácilmente a partir de la igualdad:  $m_E \cdot c_{\text{agua}} \cdot \Delta T = C \cdot \Delta T$

En efecto, despejando  $m_E$  obtenemos que:  $m_E = C/c_{\text{agua}}$

En el ejercicio anterior, por ejemplo, el equivalente en agua del sistema formado por calorímetro y bomba resulta ser  $m_E = 1800/4180 = 0,4306 \text{ kg} = 430,6 \text{ g}$ , lo que significa que 430,6 g de agua absorben el mismo calor que el calorímetro utilizado.

Mediante el equivalente en agua sabemos que si a la masa real de agua contenida en un calorímetro le añadimos el equivalente en agua del mismo, únicamente tendremos que evaluar el calor absorbido por esta hipotética masa de agua (la real existente más la equivalente) para conocer el calor de reacción.

**A.13.** *En un experimento se quemaron 1,38 g de etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) en una bomba calorimétrica que contenía 3,92 kg de agua (contado el equivalente en agua de la bomba y calorímetro) y se observó un aumento de la temperatura de 2,5 K. Calculad el calor molar de combustión del etanol a volumen constante.*

Rdo.  $Q_{V(\text{molar})} = -1365,5 \text{ kJ/mol}$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

### 5. CALOR DE REACCIÓN A PRESIÓN CONSTANTE. CONCEPTO DE ENTALPIA

Todas las reacciones que se realizan en un recipiente abierto son reacciones que se producen a presión constante puesto que el sistema está en equilibrio con el entorno y la presión se mantiene constante e igual a la presión atmosférica.

En este caso, siempre que en la reacción intervengan especies en estado gaseoso y la cantidad de moles en reactivos y en productos sea diferente se produce un trabajo exterior no nulo, que como ya determinamos anteriormente se puede calcular mediante la expresión:

$$W_{\text{ext}} = -P_{\text{ext}} \cdot \Delta V$$

Por tanto, aplicando el primer principio de la termodinámica, a las reacciones que se producen a presión constante:

$$\Delta U = Q_P - P_{\text{ext}} \cdot \Delta V;$$

Reordenando la expresión:  $Q_P = \Delta U + P_{\text{ext}} \cdot \Delta V$

Donde el valor de  $Q_P$  o **calor de reacción a presión constante**, nos indica la cantidad de energía intercambiada mediante calor entre el sistema químico y el entorno a presión constante, de forma que la temperatura de los productos sea igual a la de las sustancias reaccionantes.

El calor de una reacción depende de múltiples factores como son la temperatura, la presión y, por supuesto, la cantidad de sustancia que reacciona. Por ello, para poder comparar, se expresa el calor de reacción por mol de sustancia reaccionante o de producto formado en iguales condiciones de presión y temperatura. A este calor se le llama **calor molar a presión constante** " $Q_{P(\text{molar})}$ " que en unidades del Sistema Internacional se expresa en J/mol.

En las reacciones que se llevan a cabo a volumen constante, como ya vimos anteriormente, la variación producida en la energía interna del sistema químico viene dada por el calor  $Q_V$ .

Sin embargo, en el caso de las reacciones que se realizan a presión constante el valor del calor  $Q_P$  solo coincidirá con el cambio producido en la energía interna cuando no se produzca ninguna variación de volumen en el sistema químico implicado, ya que si se produce una compresión o expansión, el trabajo no será nulo, afectando esto también a la energía interna. Por ello, se introdujo una nueva variable termodinámica simbolizada por  $H$  y llamada **entalpía**, de forma que su variación ( $\Delta H$ ) coincide con el calor intercambiado a presión constante en la reacción química.

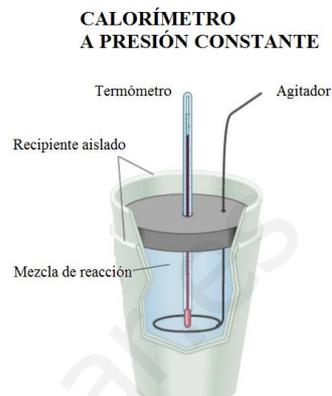
Definimos la entalpía como:  $H = U + P \cdot V$

Si a la presión exterior la llamamos simplemente " $P$ " tenemos que:

$$Q_P = \Delta U + P \cdot \Delta V = (U_2 - U_1) + P \cdot (V_2 - V_1) = (U_2 - U_1) + P \cdot V_2 - P \cdot V_1$$

Reordenando:  $Q_P = (U_2 + P \cdot V_2) - (U_1 + P \cdot V_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$  . Por tanto:

$$Q_P = \Delta H$$



## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

De acuerdo con la expresión anterior, la entalpía es una magnitud tal que su variación es igual al calor de reacción (a presión constante y siempre que no se realice ningún tipo de trabajo).

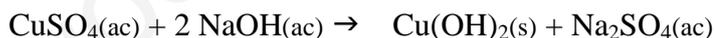
La entalpía es una función de estado puesto que depende de la energía interna que es una función de estado y de la presión y el volumen que son variables que definen el estado del sistema. Al igual que ocurre con la energía interna "U" no podemos conocer el valor de la entalpía de un sistema, pero sí podemos medir su variación,  $\Delta H$ , cuando un sistema químico pase de un estado a otro, para ello bastará con medir el calor de reacción a presión constante.

**A.14.** *¿Cómo podemos medir experimentalmente el calor molar de reacción a presión constante?*

Naturalmente al igual que en el caso de la determinación del calor de reacción a volumen constante se deberá de utilizar un calorímetro, pero en este caso la reacción se deberá de realizar a presión constante. El calorímetro deberá de estar diseñado de forma que las pérdidas de energía mediante calor sean despreciables y la energía intercambiada por la reacción coincida con la energía absorbida o cedida por el agua y el calorímetro.

Un calorímetro simple que se puede utilizar para determinar calores de reacción en disolución consiste en un vaso de poliestireno de los utilizados para servir bebidas calientes "para llevar", con un termómetro que a su vez puede utilizarse como agitador. Si la reacción es suficientemente rápida, se alcanzará una temperatura máxima (o mínima) en la disolución y las pérdidas de energía serán despreciables. En algunos casos, debido a la baja capacidad calorífica del calorímetro, podremos considerarla despreciable y suponer que todo el calor intercambiado en la reacción se ha empleado en producir el cambio de temperatura de la disolución en la que se produce la reacción. Por otra parte, si las disoluciones son suficientemente diluidas podemos considerar que la capacidad calorífica de la disolución es aproximadamente igual a la del agua  $C_{\text{agua}} = 4180 \text{ J/kg}$ .

**A.15.** *En un calorímetro se introducen 100 mL de disolución 0,5 M de  $\text{CuSO}_4$  y 100 mL de disolución 1 M de  $\text{NaOH}$ . La temperatura inicial de las disoluciones es  $23,4 \text{ }^\circ\text{C}$  i la final  $29,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Suponiendo que la densidad de la disolución final es  $1 \text{ g/cm}^3$  y la capacidad calorífica de la disolución es igual que la del agua pura ( $4,18 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ ), determinad la entalpía de la reacción:*



El valor de la entalpía de la reacción vendrá dado por el calor molar a presión constante de la reacción que se produce al mezclar las dos disoluciones. Puesto que la reacción tiene lugar en disolución y en un recipiente aislado térmicamente pero abierto a la atmosfera, el calor corresponderá a la reacción a presión constante. Por otra parte, supondremos que todo el calor se emplea en variar la temperatura de la disolución, es decir, no se producen "pérdidas de calor" en el calorímetro, de forma que el calor cedido por la reacción es igual al calor ganado por la disolución, con lo que podemos escribir:

$$Q_{\text{reacción}} = - Q_{\text{disolución}}$$

$$\text{Donde: } Q_{\text{disolución}} = m \cdot c \cdot \Delta T = (100 + 100) \cdot 4,18 \cdot (29,3 - 23,4) = 4932,4 \text{ J}$$

Observad en el cálculo anterior que se ha tenido en cuenta la densidad de la disolución para calcular la masa de ambas disoluciones ( $m = \rho \cdot V = 1 \cdot 100 = 100 \text{ g}$ ) y el incremento de temperatura absoluta coincide con el incremento de temperatura centígrada.

$$Q_{\text{reacción}} = - Q_{\text{disolución}} = - 4932,4 \text{ J}$$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Para calcular el calor molar habremos de calcular los moles que han reaccionado:

$$n(\text{CuSO}_4) = C \cdot V = 0,5 \text{ moles/L} \cdot 0,1 \text{ L} = 0,05 \text{ moles de CuSO}_4$$

$$n(\text{NaOH}) = C \cdot V = 1 \text{ mol/L} \cdot 0,1 \text{ L} = 0,1 \text{ moles de NaOH}$$

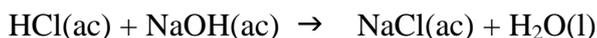
Los reactivos se encuentran en proporción estequiométrica, puesto que 1 mol de  $\text{CuSO}_4$  reacciona con dos moles de  $\text{NaOH}$ , por lo que reaccionarán totalmente.

$$Q_{\text{P (molar)}} = \frac{Q_{\text{P}}}{n} = \frac{-4932,4}{0,05} = -98648 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = -98,648 \frac{\text{kJ}}{\text{mol de CuSO}_4}$$

$$\text{Por tanto: } \Delta H = Q_{\text{P (molar)}} = -98,648 \frac{\text{kJ}}{\text{mol de CuSO}_4}$$

**A.16.** Diseñad una experiencia sencilla para determinar la entalpía de la reacción de neutralización de un ácido fuerte como clorhídrico con una base fuerte como el hidróxido de sodio.

La ecuación química correspondiente a la reacción que debemos estudiar es:



Como se trata de una reacción en disolución en la que no están implicadas sustancias gaseosas podremos utilizar un calorímetro sencillo. Este calorímetro consiste en un recipiente aislado térmicamente pero no cerrado herméticamente, de forma que la presión se mantendrá constante e igual a la presión atmosférica.

Se prepararan dos disoluciones de los reactivos,  $\text{HCl(ac)}$  y de  $\text{NaOH(ac)}$ . La concentración de las disoluciones no ha de ser muy elevada para evitar así que la variación de la temperatura de la disolución sea muy grande, minimizando así la pérdida de calor en el calorímetro. La cantidad de moles de los dos reactivos ha de ser igual puesto que la reacción tiene una estequiometría 1:1.

Se mezclarán las dos disoluciones y se medirá la temperatura antes y la temperatura máxima (o mínima) alcanzada después de la mezcla.

En el caso de que la absorción de calor del calorímetro no sea despreciable se deberá de determinar el equivalente en agua del calorímetro.

**A.17.** En un calorímetro de laboratorio se situaron  $200 \text{ cm}^3$  de una disolución de  $\text{HCl(ac)}$  2 M y se midió su temperatura que resultó ser de  $21,2^\circ\text{C}$ . A continuación se añadieron  $200 \text{ cm}^3$  de una disolución a la misma temperatura de  $\text{NaOH}$  2 M. Se tapó el calorímetro y se agitó la disolución con una varilla para homogeneizar la mezcla, observando que la máxima temperatura que llegó a medir el termómetro fue de  $34,8^\circ\text{C}$ . Haced la simplificación de considerar las disoluciones como si fueran sólo agua y no hubieran pérdidas de calor (el calor específico del agua es de  $4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  y su densidad es de  $1 \text{ g/cm}^3$ ) y determinad la entalpía de neutralización del ácido en  $\text{kJ/mol}$  de ácido clorhídrico. Indicad si se trata de una reacción exotérmica o endotérmica y explicad el significado de la magnitud obtenida.

Rdo.  $\Delta H = -56,85 \text{ kJ/mol}$ . La variación de entalpía de la reacción es negativa, reacción exotérmica, esto indica que la entalpía de los productos es inferior a la entalpía de las sustancias reaccionantes. Esta diferencia de energía es liberada mediante calor durante el progreso de la reacción.

## 6. ¿EXISTE ALGUNA RELACIÓN ENTRE EL CALOR A VOLUMEN CONSTANTE Y EL CALOR A PRESIÓN CONSTANTE?

Como ya hemos visto anteriormente, existen fundamentalmente dos formas de determinar el calor de reacción, a presión constante como se realiza en la mayoría de reacciones en las que no intervienen gases, y a volumen constante, correspondiente a aquellas reacciones en que intervienen gases y en particular, reacciones de combustión. Para poder establecer comparaciones entre diferentes reacciones interesa encontrar alguna relación que permita calcular un calor conociendo el calor intercambiado mediante el otro proceso. Además, puesto que los calores de reacción a volumen y a presión constante están relacionados con las variaciones de energía interna y de entalpía respectivamente, el conocimiento de una relación entre  $Q_V$  y  $Q_P$  nos permitirá relacionar también  $\Delta U$  con  $\Delta H$ .

*Utilizando las expresiones vistas anteriormente para  $Q_V$  y para  $Q_P$ , deducid la relación existente entre ambas magnitudes.*

Sabemos que  $Q_P = \Delta U + P \cdot \Delta V$  y que  $Q_V = \Delta U$ . Luego:  $Q_P = Q_V + P \cdot \Delta V$

Conviene recordar que esta expresión será válida para aquellos sistemas que no intercambien energía en forma de trabajo no mecánico, como puede ser el caso de trabajo eléctrico o la emisión de energía en forma de radiación como sucede en las reacciones quimioluminiscentes.

Por otra parte como  $Q_P = \Delta H$ , la relación entre el cambio de entalpía y el de energía interna, vendrá dada por:

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V$$

Esta última expresión nos muestra que :

**La diferencia entre  $\Delta H$  e  $\Delta U$  corresponde a la cantidad de energía implicada en el proceso de expansión (o compresión) del sistema químico en cuestión.**

De forma que en aquellas reacciones en las cuales no se produzca variación de volumen ( $\Delta V=0$ ), la variación de la entalpía será igual a la variación de la energía interna:  $\Delta H = \Delta U$ . Esta situación se produce en aquellas reacciones en disolución y en general en aquellas reacciones donde no intervienen gases. Tampoco se produce variación de volumen en las reacciones en las que hay la misma cantidad de moles de sustancias gaseosas en productos y en reactivos, como, por ejemplo en:  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{HI}(\text{g})$

**A.18.** *A partir de la relación anterior entre  $\Delta H$  e  $\Delta U$  y de la ecuación de los gases ideales, deducid una expresión matemática que relacione la variación de la entalpía con la variación de la energía interna y la variación del número de moles de gas en una reacción química. Deducid relaciones generales a partir de la expresión.*

A partir de la ecuación de los gases ideales " $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ " podemos expresar el volumen ocupado por el gas como:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Con lo que la variación del volumen (a presión constante) será:  $\Delta V = \Delta \left( \frac{n \cdot R \cdot T}{P} \right) = \frac{\Delta n \cdot R \cdot T}{P}$

Por tanto:  $P \cdot \Delta V = P \cdot \frac{\Delta n \cdot R \cdot T}{P} = \Delta n \cdot R \cdot T$

La relación entre  $\Delta H$  y  $\Delta U$  será entonces:  $\Delta H = \Delta U + \Delta n \cdot R \cdot T$

En una reacción endotérmica ( $\Delta U > 0$ ), si se produce un aumento del número de moles de gas ( $\Delta n > 0$ ) la variación de la entalpía será mayor que la variación de la energía interna:  $\Delta H > \Delta U$ . En cambio, si en la reacción se produce una compresión puesto que el número de moles de sustancias gaseosas en los productos es menor que en los reactivos ( $\Delta n < 0$ ), entonces la variación de la entalpía será menor que la variación de la energía interna.

En el caso de una reacción exotérmica tanto la variación de energía interna como la variación de entalpía son negativas ( $\Delta U < 0$ ,  $\Delta H < 0$ ), así que cuando aumente el número de moles de gas, de acuerdo con la expresión anterior el valor absoluto de  $\Delta H$  será menor que el valor absoluto de  $\Delta U$ . Si lo analizamos en términos de calor, podemos decir que en una reacción exotérmica en la que se produce un aumento del número de moles de gas, la energía transferida al medio externo mediante calor es mayor cuando el proceso se realiza a volumen constante que cuando se realiza a presión constante (ya que, en valores absolutos,  $Q_V > Q_P$ ).

Lógicamente, cuando la reacción es exotérmica ( $\Delta U < 0$ ) y se produce una disminución de los moles de gas ( $\Delta n < 0$ ), la variación de la entalpía en valor absoluto será mayor que la variación de la energía interna.

Finalmente, podemos calcular la diferencia entre  $\Delta H$  y  $\Delta U$  por mol de variación de gas en la reacción:

$$\Delta H - \Delta U = \Delta n \cdot R \cdot T; \text{ si } \Delta n = 1 \text{ a } T = 298 \text{ K} \rightarrow R \cdot T = 8,31 \cdot 298 = 2476 \text{ J/mol} = 2,476 \text{ kJ/mol}$$

Hay que resaltar que al realizar cálculos en termoquímica, a diferencia de lo que sucede en cálculos estequiométricos, se utilizan unidades del Sistema Internacional por lo que el valor de la constante molar de los gases ideales es  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

**A.19.** Cuando se realiza la combustión de la glucosa,  $C_6H_{12}O_6(s)$ , en una bomba calorimétrica de volumen constante, se observa que se desprenden 14217 J por gramo de azúcar que se quema en presencia de suficiente oxígeno y se produce dióxido de carbono gas y vapor de agua. Determinad la variación de la entalpía del proceso de combustión de la glucosa a 25°C.

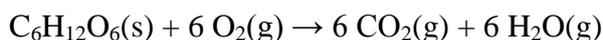
En este caso, como se determina el calor intercambiado a volumen constante, podremos calcular fácilmente la variación de la energía interna calculando el calor molar a volumen constante.

$$\Delta U = Q_{V(\text{molar})}$$

Seguidamente, conocido  $\Delta U$  calcularemos  $\Delta H$  a partir de la variación del número de moles de gas en la reacción  $\Delta n$ .

La ecuación de la reacción química es:

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas



El valor de la masa molar de la glucosa es:  $M(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = 6 \cdot 12 + 12 \cdot 1 + 6 \cdot 16 = 180 \text{ g/mol}$

con lo que el número de moles será:  $n(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = \frac{m}{M} = \frac{1}{180} \text{ moles}$

$$\Delta U = \frac{Q_V}{n} = \frac{-14217}{\frac{1}{180}} = -2559060 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = -2559 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

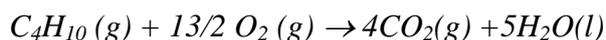
El signo es negativo puesto que se trata de "calor desprendido".

De la ecuación química calculamos:  $\Delta n = n_{(\text{productos})} - n_{(\text{reactivos})} = (6+6) - 6 = 6 \text{ moles}$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n \cdot R \cdot T = -2559060 + 6 \cdot 8,31 \cdot 298 = -2544202 \text{ J/mol} = -2544,2 \text{ kJ/mol}$$

Observad como la variación de entalpía en valor absoluto es menor que la variación de energía interna. Para esta reacción, el calor desprendido a presión constante es menor que el calor desprendido a volumen constante a la misma temperatura (valores absolutos).

**A.20.** Explicad los signos de  $Q$  y de  $W_{\text{ext}}$  en la reacción de combustión del butano:



¿Cuál es la diferencia entre la entalpía de la reacción y la variación de la energía interna del sistema, suponiendo que ambas están medidas en condiciones estándar? ( $R = 8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ . Condiciones estándar:  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $P = 1 \text{ atm}$ ).

Rdo.  $Q < 0$  (reacción exotérmica);  $W_{\text{ext}} > 0$  (hay compresión debido a la disminución del volumen de sustancias gaseosas);  $\Delta H^\circ - \Delta U^\circ = -8667,3 \text{ J/mol}$  de  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ .

## 7. LA VARIACIÓN DE ENTALPIA EN UNA REACCIÓN

Como vimos anteriormente la entalpía se define como la suma de la energía interna más un término que corresponde al producto de la presión por el volumen. Este término tiene dimensiones de energía y corresponde al producto de dos variables de estado, cuyo valor solo depende de en qué condiciones se encuentra en dicho momento el sistema. ¿A qué corresponde este término "P·V" de la entalpía? Podríamos decir que este término corresponde al trabajo realizado por el sistema sobre el entorno para pasar de ocupar un volumen nulo al volumen que ocupa en dicho momento "V", y por tanto este producto nos cuantificará la energía potencial del entorno del sistema en estudio.

En cualquier caso, el valor de la entalpía absoluta de un sistema químico es prácticamente imposible de calcular puesto que también lo son los dos términos que forman la entalpía: energía interna "U" y energía potencial del entorno "P·V". Pero esto no es un inconveniente puesto que realmente la magnitud que nos interesa conocer no es el valor absoluto de la entalpía "H" si no su variación "ΔH" que como vimos anteriormente se puede determinar de una forma razonablemente sencilla, a partir de los calores de reacción a presión o a volumen constante.

La variación de entalpía de una reacción se puede expresar como la entalpía de los productos menos la entalpía de las sustancias reaccionantes (o reactivos).

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

$$\text{Es decir: } \Delta H = \sum H_{\text{productos}} - \sum H_{\text{reactivos}}$$

A menudo se le llama simplemente **entalpía de reacción**.

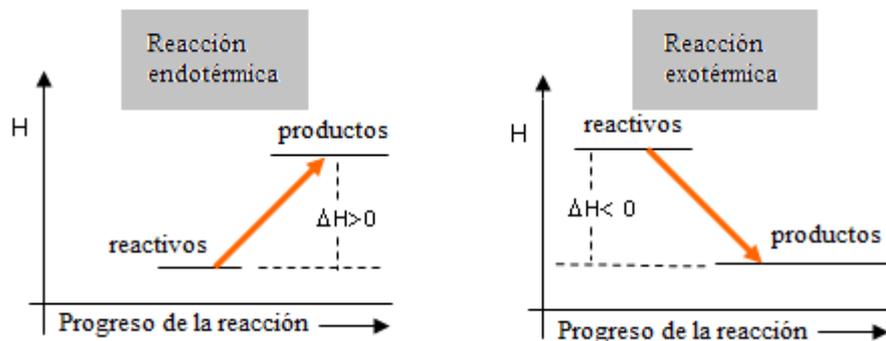


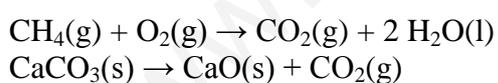
Figura 1: Diagramas entálpicos cualitativos para reacciones endotérmicas y exotérmicas

El conjunto de la ecuación química junto al valor de la entalpía correspondiente se llama ecuación termoquímica y los diagramas en los que representan las entalpias de las sustancias reaccionantes y de los productos correspondientes a los estados inicial y final del sistema se llaman diagramas entálpicos.

En la ecuación termoquímica es importante escribir los estados físicos de cada una de las sustancias que intervienen en la reacción, reactivos y productos, puesto que la entalpía de las sustancias cambia según el estado de agregación en que se presentan.

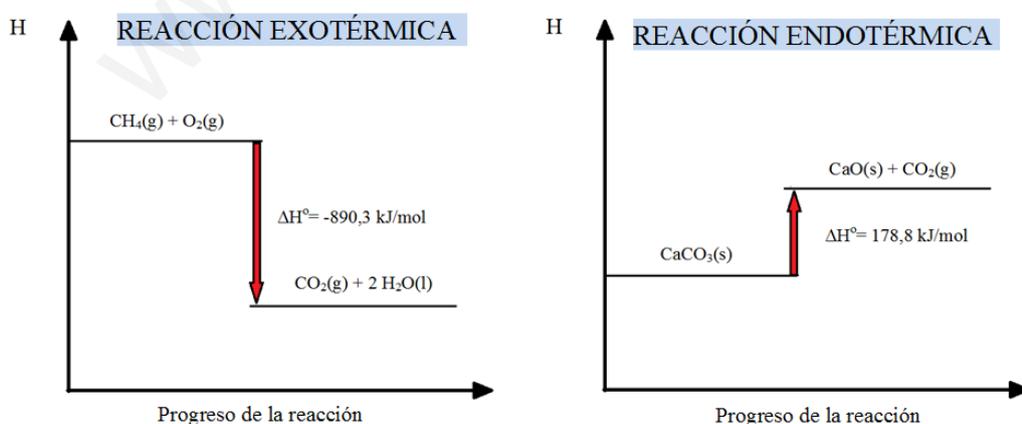
Cuando una reacción es endotérmica la entalpía de los reactivos es inferior a la entalpía de los productos, mientras que en una reacción exotérmica la entalpía de los reactivos es superior a la entalpía de los productos. Observad cómo en la figura anterior solo se representan la situación inicial y final de la reacción, este diagrama no nos informa de los cambios energéticos que se producen durante el proceso de transformación desde los reactivos a los productos.

A continuación se representan dos ecuaciones termoquímicas y sus diagramas entálpicos correspondientes.



$$\Delta H^0 = -890,3 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^0 = 178,8 \text{ kJ/mol}$$



## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Dado que la entalpía depende entre otros factores de la cantidad de sustancia, sus variaciones en una reacción química deberán estar referidas a una determinada cantidad de sustancia de algún producto o reactivo. Por ello se habla de entalpía molar (su unidad internacional será J/mol).

Cuando hablamos en términos de entalpía, se define una reacción exotérmica como aquella que presenta una  $\Delta H$  negativa mientras que en una endotérmica  $\Delta H$  debe ser positiva.

El valor de  $\Delta H$  de una reacción depende de las condiciones en que transcurre la reacción, por ello se ha tomado el acuerdo internacional de referirse siempre a unas condiciones estándar.

El cambio de entalpía estándar de una reacción se define como: la diferencia entre la entalpía de los productos puros a 1 atm de presión y a una cierta temperatura (que suele ser 25°C) y la entalpía de los reaccionantes puros a la misma presión y temperatura.

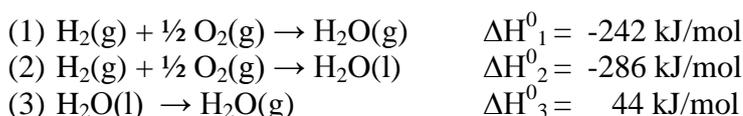
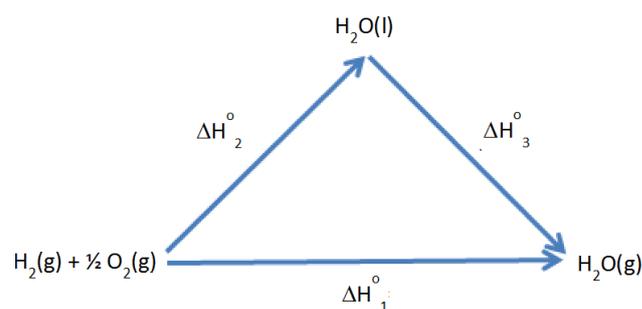
Al cambio de entalpía estándar o normal de una reacción se le designa como  $\Delta H^\circ$ .

### 8. LA ENTALPIA ES UNA FUNCIÓN DE ESTADO. LEY DE HESS

La entalpía, como ya comentamos anteriormente, es una función de estado puesto que su valor sólo depende de en qué situación se encuentre el sistema y **no** de cómo haya llegado a esta situación. Por ello, la variación de la entalpía sólo dependerá de la entalpía final y de la entalpía inicial del sistema. Utilizando un símil mecánico podríamos decir que con la entalpía sucede igual que con la energía potencial gravitatoria. Una persona asciende desde la primera a la tercera planta de un edificio y queremos saber cuál es la variación de la energía potencial gravitatoria que se produce en este proceso. Para hacer este cálculo será suficiente conocer la energía potencial gravitatoria en la tercera y en la primera planta y realizar la resta, puesto que la diferencia no dependerá de cómo se haya realizado el proceso de ascensión: por la escalera, en vertical por la fachada, por el ascensor o por tramos de planta en planta con descansos intermedios.

Esta propiedad de la entalpía permite hacer cálculos de entalpías en el caso de reacciones en las que la determinación experimental directa del calor de reacción es difícil o imposible.

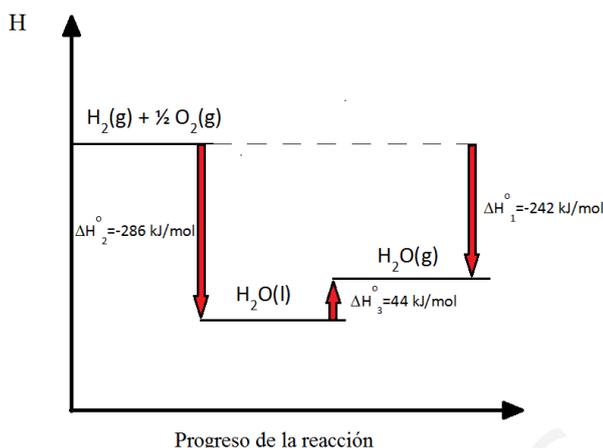
Un ejemplo de proceso que se puede realizar directamente o en dos etapas es la reacción de formación de agua vapor a partir de los elementos constituyentes. Esta reacción, como se muestra en el ciclo de la derecha, se puede realizar directamente (1) o en dos etapas, en la primera etapa (2) se forma agua líquida y posteriormente (3) el agua líquida es transformada en agua vapor, tal y como se muestra en las ecuaciones termoquímicas:



## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Se observa que la suma de las ecuaciones químicas (2) y (3) da como resultado la ecuación química (1). Simultáneamente se comprueba experimentalmente que la suma de las entalpías de las reacciones (2) y (3) da como resultado la entalpía de la reacción (1).

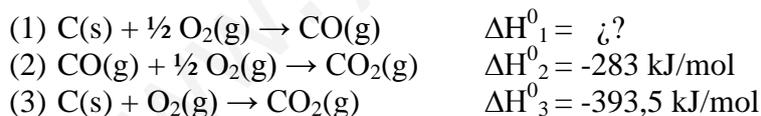
A continuación se representa en el gráfico el diagrama entálpico correspondiente a las tres reacciones implicadas en el ciclo termoquímico estudiado.



Este comportamiento, que puede ser generalizado a cualquier reacción química, es una consecuencia del principio de conservación de la energía aplicado a las reacciones químicas y se conoce como la **ley de Hess**. Según dicha ley, si una reacción química se puede expresar como la combinación lineal de un conjunto de reacciones químicas de entalpía conocida, la entalpía de la reacción se puede calcular mediante esa misma combinación lineal de las entalpías de las reacciones en iguales condiciones de presión y temperatura.

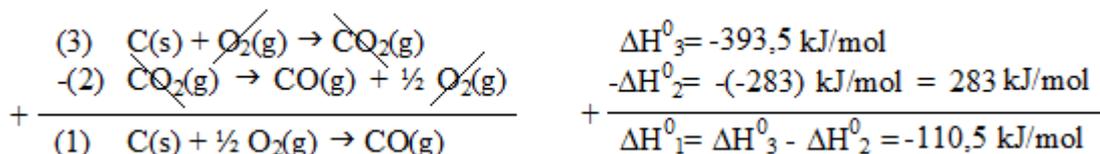
Especial interés adquiere la ley de Hess en el cálculo de calores de reacción de aquellos procesos en los que estos no se puedan determinar experimentalmente. Por ejemplo, la reacción de formación del monóxido de carbono a partir de sus elementos constituyentes es difícil de llevar a cabo puesto que si se utiliza un exceso de oxígeno la reacción da como producto dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) mientras que si se mantiene la cantidad de oxígeno en la proporción estequiometría de la reacción o en defecto, la reacción es incompleta. Debemos, pues, buscar otro camino para conseguir la misma reacción por medio de reacciones cuya entalpía pueda determinarse sin dificultad.

**A.21.** La entalpía de formación del monóxido de carbono correspondiente a la ecuación química (1) es imposible de determinar directamente, pero es posible determinar las entalpías de combustión de  $\text{CO}$  y de  $\text{C}$  para obtener  $\text{CO}_2$ , tal y como se muestra en las ecuaciones termoquímicas (2) y (3). Aplicad la ley de Hess y determinad la entalpía de la reacción (1) de formación del monóxido de carbono en condiciones estándar.



Se puede obtener la ecuación (1) combinando de la siguiente forma las ecuaciones (2) y (3):

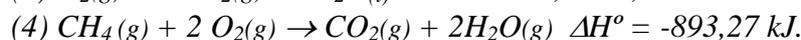
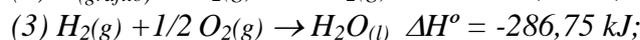
$$(1) = (3) - (2)$$



Se observa cómo se puede obtener  $\text{CO}$  por dos caminos alternativos (1) directo, o la combinación del (3) y la reacción inversa a (2) que corresponde a un proceso de dos etapas. Con las tres ecuaciones se puede escribir un ciclo entálpico que permite calcular la entalpía de la reacción (1):  $\Delta H_1^0 = -110,5 \text{ kJ/mol}$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**A.22.** La entalpía de formación del metano no se puede determinar directamente mediante la reacción (1)  $C_{(\text{grafito})} + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$  ¿ $\Delta H^\circ$ ?; este es otro caso en el que la ley de Hess nos puede ayudar, pues las entalpías de combustión de los reactivos y del metano sí se pueden medir a partir de medidas en bombas calorimétricas. Determinad la entalpía de formación estándar del metano a partir de las entalpías de las siguientes reacciones de combustión:



Rdo.  $\Delta H^\circ_1 = -74,99 \text{ kJ}$

## 9. ¿CÓMO DETERMINAR LAS ENTALPIAS DE REACCIÓN A PARTIR DE LAS ENTALPIAS DE FORMACIÓN?

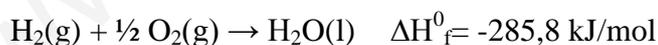
Se define la **entalpía estándar de formación** de una sustancia como la **variación de la entalpía de la reacción en la que se forma un mol de sustancia a partir de sus elementos constituyentes en estado estándar.**

Se considera estado estándar, el correspondiente a una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 25°C, y en el que las sustancias se presentan:

- ✓ Para una sustancia pura en fase líquida o sólida, como el líquido o sólido puro.
- ✓ Para una sustancia pura en estado gas, como el gas a una presión de 1 atm. Para una mezcla de gases, la presión parcial<sup>4</sup> de cada gas ha de ser 1 atm.
- ✓ Para una sustancia en disolución, la concentración de los componentes ha de ser 1 M.

Evidentemente, según la definición de entalpía de formación, la entalpía de formación de los elementos en estado estándar es cero, puesto que: ¿qué reacción se producirá para obtener un elemento a partir del mismo elemento que lo forma? De esta forma se establece un criterio arbitrario para poder asignar valores de entalpía absolutos a las sustancias. Recordar que más que el valor absoluto de la entalpía de las sustancias lo que nos interesa conocer son las variaciones de entalpía de los cambios químicos.

De esta forma cuando nos indican que la entalpía estándar de formación del agua líquida es -285,8 kJ/mol nos informan de la siguiente ecuación termoquímica:

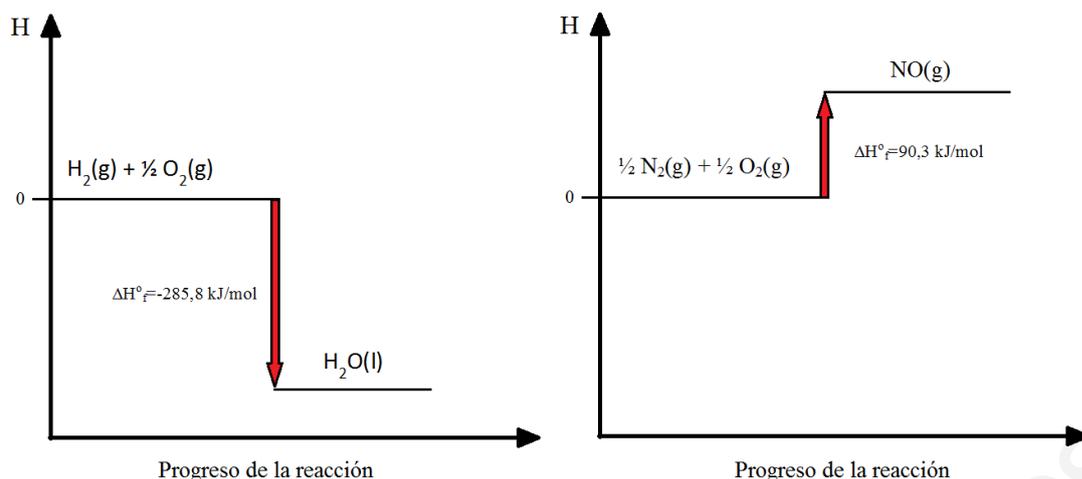


Donde hay que destacar que el coeficiente estequiométrico de la sustancia formada será siempre uno. Los reactivos serán siempre los elementos que constituyen el compuesto en la forma más estable a la presión de una atmósfera y temperatura 25°C.

---

<sup>4</sup> Recordemos que la presión parcial de un gas concreto en una mezcla de gases es la presión que ejercería dicho gas si solo estuviera este componente ocupando el mismo volumen y a la misma temperatura que toda la mezcla gaseosa.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

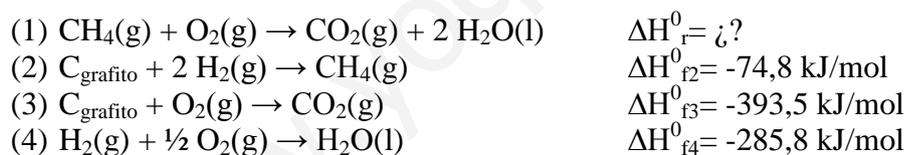


En la figura se representan los diagramas entálpicos correspondientes a las reacciones de formación de  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  y de  $\text{NO}(\text{g})$ . Observar como en los dos casos las entalpías de los elementos es cero, por lo que podemos asignar un valor de entalpía absoluto a los compuestos. En el caso de la formación del agua el proceso es exotérmico, indicando que el compuesto es más estable que los elementos que lo constituyen. Mientras que en el caso del óxido de nitrógeno(II), el proceso es endotérmico indicando que el compuesto es menos estable que los elementos que lo constituyen en estado estándar

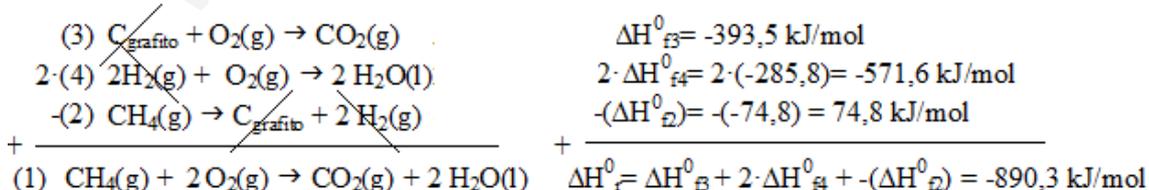
**A.23.** A partir de las entalpías de formación del metano, del dióxido de carbono y del agua líquida, mediante la ley de Hess, determinad la entalpía estándar de combustión del metano. Deducid una expresión general que permita calcular la entalpía de una reacción a partir de las entalpías de formación de las sustancias que intervienen en la reacción.

$$\Delta H_{\text{f}}^{\circ}(\text{CH}_4) = -74,8 \text{ kJ/mol}; \Delta H_{\text{f}}^{\circ}(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ kJ/mol}; \Delta H_{\text{f}}^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) = -285,8 \text{ kJ/mol}$$

A continuación expresamos las ecuaciones termoquímicas implicadas en nuestro problema.



Para obtener (1) deberemos de sumar (3), el doble de (4) y la inversa de la ecuación (2). La entalpía de la reacción se puede calcular mediante la misma operación con las entalpías de las reacciones de formación:



Si observamos con atención la expresión obtenida para la combinación de las entalpías veremos que corresponde a la suma de las entalpías de formación de las sustancias que aparecen en los productos, multiplicadas por sus respectivos coeficientes estequiométricos menos las entalpías de

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

formación de las sustancias reaccionantes, también multiplicadas por sus coeficientes estequiométricos.

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

En la expresión anterior, “ $v_i$ ”: son los coeficientes estequiométricos correspondientes a las especies que intervienen en el sistema. Se trata de una aplicación de la ley de Hess que, aunque la hemos obtenido para este caso particular, se puede comprobar que se cumple para cualquier reacción química. Por consiguiente disponiendo de las entalpías de formación de las especies en condiciones estándar es muy fácil calcular las entalpías de reacción en condiciones estándar.

Tabla 1. Entalpías de formación estándar de algunas sustancias

Fórmula	Nombre	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)
C <sub>diamante</sub>	Carbono diamante	1,9
C <sub>grafito</sub>	Carbono grafito	0,0
CH <sub>4</sub> (g)	Metano	-74,8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	Etano	-84,8
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	Eteno o Etileno	52,2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	Etino o acetileno	226,9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	Propano	-103,8
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	Butano	-124,7
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (l)	Hexano	-198,7
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	Benceno	82,8
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> (l)	Tolueno o metilbenceno	50,0
CH <sub>3</sub> OH(l)	Metanol	-236,7
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (l)	Etanol	-277,7
HCOOH(l)	Ácido fórmico o metanoico	-424,7
CH <sub>3</sub> COOH(l)	Ácido acético o etanoico	-484,5
CO(g)	Monóxido de carbono	-110,5
CO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de carbono	-393,5
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (s)	Glucosa	-1274,4
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> (s)	Sacarosa	-2221,2
CCl <sub>4</sub> (l)	Tetracloruro de carbono	-138,7
CHCl <sub>3</sub>	Cloroformo o triclorometano	-131,8
CaO(s)	Óxido de calcio	-635,0
CaCO <sub>3</sub> (s)	Carbonato de calcio	-1207,6
HCl(g)	Cloruro de hidrogeno	-92,3
H <sub>2</sub> O(g)	Agua (gas)	-241,6
H <sub>2</sub> O(l)	Agua (liquida)	-285,5
H <sub>2</sub> O(s)	Agua (solida) o Hielo	-292,6
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	Peróxido de hidrogeno o Agua oxigenada	-186,3
NO(g)	Monóxido de nitrógeno	90,3
NO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de nitrógeno	33,2
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	Tetraóxido de nitrógeno	9,7
NH <sub>3</sub> (g)	Amoníaco	-46,2
HNO <sub>3</sub> (l)	Ácido nítrico	-173,2
O <sub>3</sub> (g)	Ozono	142,0
SO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de azufre	-296,9
SO <sub>3</sub> (g)	Trióxido de azufre	-394,8
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	Ácido sulfúrico	-811,3

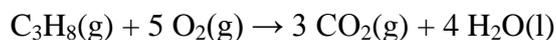
## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**A.24.** La entalpía molar de formación de una sustancia pura se define como la entalpía de la reacción mediante la cual se forma 1 mol de unidades fórmula de dicha sustancia a partir de sus elementos en su estado natural de mínima energía. Escribid las reacciones termoquímicas de formación del metano, etano y propano (utilizad los valores de la tabla anterior). ¿Cuál es la entalpía molar de formación del  $H_2(g)$  o de cualquier otro elemento como el  $O_2(g)$  en su estado natural de mínima energía? Datos: el  $C_{(grafito)}$  es el estado natural de mínima energía del carbono (a  $P = 1 \text{ atm}$  y  $T = 298 \text{ K}$ )

Rdo.  $C_{(grafito)} + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g) \quad \Delta H^\circ = -74,8 \text{ kJ/mol}$ ;  $2C_{(grafito)} + 3H_2(g) \rightarrow C_2H_6(g) \quad \Delta H^\circ = -84,8 \text{ kJ/mol}$ ;  $3C_{(grafito)} + 4H_2(g) \rightarrow C_3H_8(g) \quad \Delta H^\circ = -103,8 \text{ kJ/mol}$ . La entalpía de formación del  $H_2(g)$  o del  $O_2(g)$  son nulas, como se deduce de la propia definición de entalpía de formación.

**A.25.** Determinad la entalpía de combustión del propano para obtener agua líquida a partir de las entalpías de formación estándar de la tabla anterior. ¿Obtendríamos el mismo resultado si en la reacción se formara agua vapor?

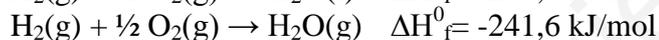
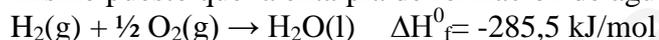
La reacción de combustión ajustada del propano es:



Aplicando la ley de Hess:

$$\Delta H_r^\circ = 3 \cdot \Delta H_f^\circ(CO_2) + 4 \cdot \Delta H_f^\circ(H_2O) - \Delta H_f^\circ(C_3H_8) = 3 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-285,5) - (-103,8) = -2218,7 \text{ kJ/mol}$$

Si determinamos la entalpía de combustión para formar agua vapor, el valor obtenido no será el mismo puesto que la entalpía de formación de agua líquida y agua vapor son diferentes.



Esto es lógico, ya que la variación de la entalpía depende de la variación de la energía interna y de la variación de la energía potencial del entorno ( $P \cdot \Delta V$ ). La variación de la energía interna es más negativa en el caso del agua líquida, puesto que en el agua líquida además de los enlaces intramoleculares actuarán de forma apreciable los enlaces intermoleculares (puentes de hidrógeno), por lo que su energía química será mayor en valor absoluto. Además, la variación de la energía potencial del entorno será negativa en los dos casos puesto que se produce una compresión del sistema, pero en el caso de la formación del agua líquida la variación del volumen será mayor, dado que la variación del número de moles de gas en la formación del vapor es de  $-0,5$  y en la formación de agua líquida resulta ser  $-1,5$  moles.

Aplicando la ley de Hess en el caso de la reacción en la que se forma vapor de agua:

$$\Delta H_r^\circ = 3 \cdot \Delta H_f^\circ(CO_2) + 4 \cdot \Delta H_f^\circ(H_2O(g)) - \Delta H_f^\circ(C_3H_8) = 3 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-241,6) - (-103,8) = -2043,1 \text{ kJ/mol}$$

Como podemos ver, la energía que se libera mediante calor en la combustión de propano a presión constante, es menor cuando se forma agua vapor que cuando en la reacción se forma agua líquida.

## 10. ENERGÍA DE LOS ALIMENTOS Y VIDA SALUDABLE

En las células vivas de nuestro cuerpo tienen lugar un conjunto de reacciones químicas que conducen a determinados cambios materiales y de energía que nos mantienen vivos. A ese proceso se le conoce como **metabolismo humano**.

Nuestro cuerpo es como un sistema que contiene una cierta cantidad (no sabemos cuánta) de energía interna. Lo que sí sabemos, es que cada vez que realizamos determinadas acciones tales como subir por una escalera, cortar leña, hacer deporte o simplemente, mantener nuestra sangre circulando y nuestra temperatura corporal constante, utilizamos parte de esa energía interna.

Esa energía que utilizamos no se puede reponer mediante el calor del medio ambiente ya que, aunque el exterior se encuentre a una temperatura más elevada que nuestro cuerpo, no disponemos de ningún mecanismo que nos permita ganar energía exterior en base a esa diferencia de temperatura.

*¿De dónde obtenemos pues la energía para reponer toda aquella que empleamos en realizar nuestros procesos vitales y, en general, todas aquellas acciones en las que realizamos trabajo o calor?*

Sabemos que en las sustancias orgánicas que forman los alimentos que ingerimos existe energía interna (energía cinética y potencial electromagnética de las moléculas que forman dichas sustancias).

En la digestión, algunas sustancias orgánicas contenidas en los alimentos como, por ejemplo, hidratos de carbono, grasas y proteínas, se transforman en otras sustancias más sencillas como, monosacáridos, ácidos grasos y aminoácidos, que son transportadas a las células por la corriente sanguínea.

Mediante el proceso de la respiración dichas sustancias se oxidan en las células. En esas reacciones de oxidación se producen moléculas con un gran contenido energético como, por ejemplo, las moléculas de ATP (siglas de un compuesto químico llamado adenosín-trifosfato). Ese tipo de moléculas se caracterizan por que pueden proporcionar fácilmente su energía para realizar calor y trabajo así como para la síntesis de otras sustancias que precisa nuestro cuerpo.

Así pues, la energía que utilizamos para vivir e interaccionar con el medio que nos rodea, la extraemos de la energía interna contenida en los alimentos que ingiere nuestro cuerpo y, en ese proceso, la respiración tiene un papel esencial. En la oxidación de la glucosa (un hidrato de carbono) la entalpía de combustión es de  $-16 \text{ kJ/g}$ , es decir: al oxidarse 1 g de glucosa se obtienen 16 kJ de energía (suficiente para elevar en unos  $4^\circ\text{C}$  la temperatura de 1 litro de agua). Una unidad muy común utilizada en nutrición es la caloría alimentaria o “Cal” (que equivale a 1 kcal o  $4.18 \text{ kJ}$ ). Las grasas son otra fuente importante de energía. Los animales usan estas sustancias como reservas de energía y las queman cuando lo precisan. En la oxidación de la triestearina (una grasa) la entalpía de combustión es de unas 20 Cal (calorías alimentarias) por cada gramo.

**A.26.** *En un calorímetro a presión constante de capacidad calorífica  $1700 \text{ J/K}$  se quema una muestra de  $1,086 \text{ gramos}$  de cacahuets tostados sin cáscara. Si la masa de agua del calorímetro es de  $2 \text{ kg}$  y se observa que el aumento de la temperatura del calorímetro es de  $2,5 \text{ K}$ , determinad:*

- El contenido energético por cada  $100 \text{ gramos}$  de cacahuets.*
- Sabiendo que, por promedio, se considera que la energía consumida al realizar una actividad física intensa (como correr a  $12 \text{ km/h}$ ) es de  $1900 \text{ kJ/hora}$ , determinad el tiempo en el que se deberá estar realizando dicha actividad para compensar el aporte energético extraordinario ingerido al comer  $75 \text{ gramos}$  de cacahuets tostados.*

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Suponemos que el calor proporcionado por la combustión de la muestra de cacahuete se empleará totalmente en aumentar la temperatura del agua y del calorímetro

$$Q = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{calorímetro}} = m_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} \cdot \Delta T + C_{\text{calorímetro}} \cdot \Delta T$$

Por otra parte si queremos determinar el contenido energético por cada 100 gramos de alimento ( $\Delta H_e$ ) deberemos realizar la siguiente corrección:

$$\begin{aligned} \Delta H_e &= \frac{Q}{m} \cdot 100 = \frac{(m_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} + C_{\text{calorímetro}}) \cdot \Delta T \cdot 100}{m} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{(2000 \cdot 4,18 + 1700) \cdot 2,5 \cdot 100}{1,086} = 2,316 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{100 \text{ g}} = 2316 \frac{\text{kJ}}{100 \text{ g}} \end{aligned}$$

Para calcular el tiempo de ejercicio utilizaremos la siguiente relación para la energía consumida ( $\Delta H_{\text{cons}}$ ):

$$\Delta H_{\text{cons}} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{por tanto } \Delta t = \frac{Q}{\Delta H_{\text{cons}}} \quad \text{y como } Q = \frac{\Delta H_e \cdot m}{100}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta H_e \cdot m}{100 \cdot \Delta H_{\text{cons}}} = \frac{2,316 \cdot 10^6 \cdot 75}{100 \cdot 1,9 \cdot 10^6} = 0,91 \text{ h} \approx 55 \text{ minutos de ejercicio intenso}$$

**A.27.** *La velocidad a la cual transferimos energía interna de nuestro cuerpo al exterior se llama velocidad metabólica: la velocidad metabólica de una actividad, muy intensa, como correr rápidamente, es de unos 2500 kJ/h. Una persona que ha ingerido alimentos con un aporte energético "extra" de 1000 Cal, quiere "quemar" estas calorías de sobra, corriendo: ¿Cuánto tiempo tiene que estar practicando esta actividad? (Tened en cuenta que 1 Cal = 1 caloría alimentaria = 1 kcal; 1 cal = 4,18 J).*

Rdo. Aproximadamente 100 minutos.

## 11. ¿SE PUEDE RELACIONAR LA ENTALPIA DE REACCIÓN CON LAS ENERGÍAS DE LOS ENLACES?

Una reacción química a nivel submicroscópico se interpreta como un proceso en el que se rompen los enlaces en las sustancias reaccionantes y se forman nuevos enlaces para dar las sustancias de los productos. De forma que sería fácil calcular los calores implicados en la reacción imaginando que esta se da en dos etapas: en una primera etapa se rompen todos los enlaces de los reactivos y en una segunda etapa se forman los enlaces de los productos.

**A.28.** *Proponed una relación que permita calcular la variación de la entalpia que se produce en una reacción ( $\Delta H_r$ ) a partir de las energías de enlace entre las partículas que forman los reactivos y los productos.*

El proceso de ruptura de enlaces requerirá un aporte de energía, por lo que será un proceso endotérmico; mientras que en el proceso de formación de los enlaces se desprenderá energía, por lo que será un proceso exotérmico. Si la cantidad de energía liberada en la formación de los enlaces supera a la cantidad de energía requerida para romper los enlaces iniciales, la reacción será una reacción exotérmica que se producirá con cesión de energía mediante calor hacia el entorno

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

(siempre que el sistema no esté aislado). Por el contrario, una reacción endotérmica será aquella en la que la energía de los enlaces de los productos es inferior a la energía de los enlaces en los reactivos.

Por tanto, podremos calcular la variación de la entalpía de la reacción restando de la energía de los enlaces rotos la energía de los enlaces formados.

$$\Delta H_r^0 = \sum H_{\text{enlaces}}^0(\text{rotos}) - \sum H_{\text{enlaces}}^0(\text{formados})$$

Pero, ¿Cómo determinar las energías de los enlaces? Se define la **energía de enlace** o **entalpía de enlace**<sup>5</sup>, como la energía necesaria para romper un mol de enlaces de una sustancia covalente en fase gaseosa para formar productos en fase gaseosa a temperatura y presión constante.

Observad que en la definición se hace referencia solo al enlace covalente para el estado de agregación gas, puesto que en los otros estados se deberían de considerar los enlaces que mantienen unidas a las partículas en el líquido y en el sólido. Es decir, la relación anterior solo será aplicable a aquellas reacciones que se den en estado gaseoso entre sustancias covalentes moleculares.

Cuando las sustancias forman moléculas diatómicas será fácil determinar la entalpía de enlace a partir de la reacción de disociación. Por ejemplo, puesto que la ecuación termoquímica de la reacción de disociación del hidrogeno es:



Podemos concluir que la energía de enlace entre dos átomos de hidrogeno es:

$$H^0(\text{H-H}) = 436 \text{ kJ/mol}$$

Más complicado resulta determinar la energía de enlace cuando las moléculas no son diatómicas o incluso cuando los enlaces se producen entre átomos diferentes, puesto que no será idéntica la energía requerida para la separación de los diferentes átomos. Por ejemplo, en el caso del agua no se requiere igual cantidad de energía para la ruptura del primer enlace ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO} + \text{H}$ ) que para la ruptura del segundo ( $\text{HO} \rightarrow \text{O} + \text{H}$ ). Tampoco será igual la energía requerida para romper el enlace O-H en la molécula de agua que en la molécula de agua oxigenada  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Estas limitaciones se soslayan calculando valores promedio para las energías de enlace, con las que se confeccionan tablas como la que se presenta a continuación.

Por tanto, mediante las energías de enlace tabuladas y utilizando la expresión anteriormente definida se puede calcular la entalpía de las reacciones, pero siempre teniendo en cuenta que los valores calculados serán valores aproximados, puesto que los valores de energía de enlace son valores promedio. Y, como dijimos anteriormente, estos cálculos solo serán aceptables para aquellas reacciones que se produzcan en estado gaseoso y entre especies covalentes moleculares.

---

<sup>5</sup> A efectos prácticos la energía de enlace es la misma que la entalpía de enlace puesto que en la definición se acota el proceso de ruptura de enlaces a condiciones de presión constante.

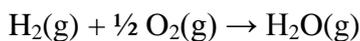
## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Tabla 2. Energías promedio de enlace

Enlace	Energía de enlace $H^0$ (kJ/mol)	Enlace	Energía de enlace $H^0$ (kJ/mol)
H-H	436	O-O	143
C-H	412	O=O	496
N-H	388	C-F	485
O-H	463	C-Cl	330
C-C	348	C-Br	276
C=C	612	C-I	238
C≡C	837	F-F	155
C-N	305	Cl-Cl	244
C=N	615	Br-Br	192
C≡N	891	I-I	151
C-O	360	H-F	569
C=O	743	H-Cl	431
N-N	163	H-Br	368
N=N	418	H-I	297
N≡N	944	H-S	339

**A.29.** Utilizando las energías de enlace calculad la entalpía de formación del vapor de agua

La ecuación correspondiente a la formación de vapor de agua es:



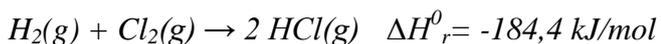
El esquema de los enlaces:  $H-H + 1/2 O=O \rightarrow H-O-H$

Por tanto, se comprueba del esquema que en la reacción tal y como está escrita en la ecuación, se rompe 1mol de enlaces H-H y medio mol de enlaces O=O y se forman dos moles de enlaces O-H.

$$\Delta H_r^0 = 436 + \frac{1}{2} \cdot (496) - 2 \cdot (463) = -242 \text{ kJ/mol}$$

Si observamos el valor de entalpía de formación que aparece en la tabla de entalpías de formación, éste es -241,6 kJ/mol, valor prácticamente idéntico al calculado mediante las energías de enlace. Recordad que el valor calculado mediante las energías de enlace es un valor aproximado o estimativo dado que las energías de enlace son valores promedio.

**A.30.** Calculad la energía del enlace H-Cl a partir de los siguientes datos:



Entalpías de enlace H-H y Cl-Cl son respectivamente 435 kJ/mol y 243 kJ/mol.

$$\text{Rdo. } H^0(H-Cl) = 431,2 \text{ kJ/mol}$$

## 12. ¿CÓMO EVOLUCIONAN LOS SISTEMAS? CAMBIOS ESPONTÁNEOS Y NO ESPONTÁNEOS.

Hasta aquí hemos estudiado algunas consecuencias de la aplicación del principio de conservación de la energía a los sistemas químicos. Esto nos ha permitido definir el primer principio de la termodinámica que establece los límites de los posibles cambios que se producen en las reacciones químicas. A su vez, hemos podido definir nuevas magnitudes como la entalpía o la energía de enlace que nos permiten, a partir de datos calorimétricos, obtener información sobre propiedades del sistema relacionadas con su energía química.

Pero el primer principio de la termodinámica no nos proporciona información respecto de si un determinado proceso tendrá lugar o no, es decir, sobre las causas de evolución de un sistema en un sentido y no en otro. Por otra parte, se observa que los sistemas tienen una tendencia natural a cambiar en un sentido bajo un conjunto dado de condiciones. Así, una esfera en un plano inclinado tiende a moverse hacia abajo, o un objeto de hierro expuesto al aire en presencia de humedad tiende a oxidarse. Decimos que estos procesos son **espontáneos**, porque tienen lugar de forma “natural”, sin ninguna influencia exterior continua. Los procesos contrarios son **no espontáneos**, pero esto no quiere decir que no puedan producirse, sino que para que sucedan es imprescindible una intervención exterior con un aporte continuo de energía. Podemos subir la esfera del ejemplo anterior por el plano inclinado realizando un trabajo. También se puede obtener de nuevo el hierro a partir del óxido de hierro, con carbón en presencia de oxígeno y aportando grandes cantidades de energía, tal y como se realiza en un alto horno.

*¿Qué es lo que determina que un proceso sea espontáneo?*

Sabemos que los sistemas mecánicos tienden a evolucionar hacia las situaciones de mínima energía, así, en el ejemplo anterior de la esfera que cae por el plano inclinado, podríamos decir que tiende a caer y acabar finalmente en reposo, porque de esa forma disminuye su energía mecánica. Pero si aplicamos este criterio a los sistemas químicos, llegaríamos a la conclusión que todas aquellas reacciones que son exotérmicas deberían de ser espontáneas y todas las reacciones endotérmicas deberían de ser no espontáneas.



Esto no es así puesto que, como hemos visto anteriormente, algunas reacciones endotérmicas son espontáneas. (Recordad, por ejemplo, la reacción de la A.2 entre el hidróxido de bario y el tiocianato de amonio).

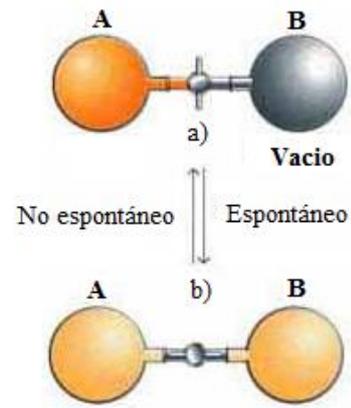
También existen casos de procesos físicos espontáneos que son endotérmicos como la disolución de algunas sales. Así, por ejemplo, la disolución de urea en agua es un proceso fuertemente endotérmico, aprovechado para fabricar bolsas que son utilizadas por deportistas para enfriar alguna parte del cuerpo evitando inflamaciones.

Otros cambios físicos endotérmicos como la evaporación de un líquido, o la fusión de un sólido cuando la temperatura supera el punto de fusión, son también espontáneos.

Por tanto, el criterio de evolución hacia un estado de mínima energía no es el único que determina la espontaneidad de los cambios. Para ver qué otros factores influyen, podemos analizar algunos procesos espontáneos con el fin de intentar averiguar si hay alguna propiedad común a todos ellos.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Imaginemos un sistema formado por un gas contenido en un recipiente (A) que a la vez está conectado con un segundo recipiente en el que se ha hecho el vacío (B) y que ambos recipientes están térmicamente aislados del exterior. Cuando se abre la llave de separación entre los dos recipientes el sistema evoluciona de forma que el gas pasa del recipiente A hacia el recipiente B hasta que la presión en ambos se iguala. Nunca se ha observado el fenómeno contrario de forma espontánea, es decir, que al conectar dos recipientes con gas, este se acumule totalmente en uno de los dos recipientes dejando el otro vacío (ved esquema de la figura adjunta).



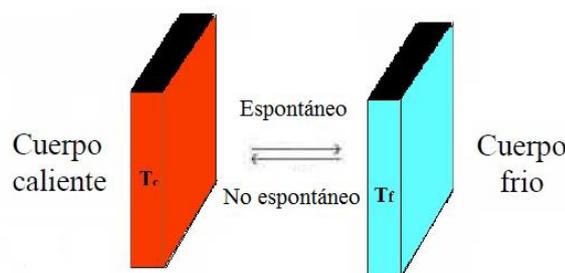
Al tratarse de recipientes perfectamente aislados del exterior, la energía interna del sistema no cambiará por el hecho de que pase gas del recipiente A al B. Sin embargo, tampoco cambiaría en el proceso contrario (conectar dos recipientes con gas y que todo el gas se acumule en uno de ellos quedando el otro vacío). En este caso, también se conservaría la energía interna del sistema, pero sabemos que dicho proceso no se da nunca de forma espontánea.

*Si en ambos procesos se conserva la energía ¿qué es entonces lo que los diferencia y podría explicar, al menos en parte, el que uno tenga lugar de forma espontánea y el otro no?*

Si nos detenemos en analizar la figura anterior, podemos establecer que en el proceso espontáneo, el sistema evoluciona hacia un estado de mayor **desorden** (el gas ocupando totalmente el volumen resultante de conectar ambos recipientes), mientras que en el proceso no espontáneo, se daría la situación contraria y, si se produjera, el sistema evolucionaría hacia un estado de menos desorden (o más ordenado), en el que el gas ocuparía solo una parte del sistema (A), dejando la otra parte (B) vacía.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, podríamos avanzar, a modo de hipótesis, que el grado de desorden es un factor a tener en cuenta para determinar la espontaneidad o no de un proceso y que, en general, dicha espontaneidad va asociada a un aumento del desorden.

Otro proceso espontáneo es el que se produce cuando un objeto sólido y caliente se sitúa en un medio que se encuentra a una temperatura más baja que él (por ejemplo aire). En ese caso, es el sólido quien cede calor al medio hasta llegar a una situación de equilibrio térmico en la que el calor cedido por el sólido es igual al calor ganado por el aire que le rodea, sin que nadie haya observado el proceso contrario, es decir, que el sólido espontáneamente se caliente todavía más (aumentando su temperatura) absorbiendo calor del entorno (más frío).



Podemos plantearnos qué ocurre en este proceso con el grado de desorden. En principio, parece claro que al sólido más frío hay que atribuir menos desorden que al sólido más caliente, puesto

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

que menor temperatura supone que las partículas que lo constituyen vibran con menor intensidad (se mueven menos). Podría pensarse así que en este caso no se cumple la hipótesis formulada, ya que el sólido evoluciona espontáneamente hacia menos desorden. No obstante, si comparamos la distribución energética en las dos situaciones veremos que se produce un aumento del “desorden energético global”. En efecto: parte de la energía cinética de las partículas del sólido, que es de vibración, pasa a las moléculas de los gases que forman el aire, distribuyéndose como energía de vibración y también de traslación. Por tanto, si analizamos únicamente el sistema (sólido), podríamos concluir que está más ordenado cuando la temperatura es inferior, pero el aumento del desorden del entorno compensa con creces la disminución del desorden del sistema. Estos nuevos hechos, conducen a precisar más la hipótesis anterior y reformularla diciendo que:

En los procesos espontáneos se produce un aumento del grado de desorden (espacial y energético) del conjunto sistema y entorno.

(Conviene tener en cuenta que en Termodinámica se denomina “sistema” a aquello que se selecciona para estudiar, “entorno” es todo aquello que rodea al sistema, y al conjunto del sistema y del entorno se le llama “universo”).

La contrastación de la hipótesis anterior dio lugar a la relación que se conoce como **Segundo Principio de la Termodinámica**, en el cual se utiliza una nueva magnitud denominada **entropía** ( $S$ ), relacionada con el grado de desorden, de forma que cuanto mayor sea el valor de  $S$  de un sistema, mayor es su grado de desorden. Dicho principio se puede enunciar como:

Un sistema evolucionará de forma espontánea siempre que la **entropía** del universo aumente con la transformación.

Una consecuencia muy importante de este segundo principio es que el Universo evoluciona de forma que su entropía aumenta continuamente.

**A.31.** Utilizando la hipótesis anterior, que relaciona espontaneidad con aumento del desorden del universo, justifica la espontaneidad de los siguientes procesos:

- Disolución de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Proceso endotérmico.
- Disolución de cloruro de sodio. Proceso ligeramente endotérmico.
- Disolución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ). Proceso exotérmico.
- Sublimación del yodo.
- Fusión del hielo por encima de la temperatura de fusión ( $0^\circ\text{C}$ )

¿Por qué los sistemas evolucionan espontáneamente aumentando el grado de desorden?

El hecho de que todos estos procesos sean procesos espontáneos implica necesariamente, según indica el Segundo Principio de la Termodinámica, que la variación de la entropía del universo al producirse el proceso sea positiva, es decir, que aumente el grado de desorden (espacial y energético) del conjunto sistema y entorno.

En el caso de las disoluciones de sólidos, puesto que pasamos de una situación más ordenada espacialmente (un sólido y un líquido por separado) a otra menos ordenada (un líquido en el que se mueven con mucha libertad las partículas que formaban el sólido), aumenta el grado de desorden espacial del sistema. Cuando el proceso de disolución es exotérmico también aumenta el grado de desorden energético puesto que parte de la energía del sistema pasa al entorno donde se distribuye de forma más diversa. Por tanto, la disolución de hidróxido de sodio (c) es un proceso espontáneo puesto que al producirse tiene lugar un aumento del desorden espacial y energético

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

del universo. En el caso de las disoluciones de las sales en las que se produce una absorción de energía mediante calor (procesos endotérmicos), como la disolución del nitrato de amonio (a), dado que el proceso es espontáneo, el efecto del aumento del desorden espacial del sistema será mayor que el efecto de la disminución del desorden energético del entorno, con lo que se produce un aumento del desorden del universo. Evidentemente, en el caso de disolución de sólidos en los que no haya un gran intercambio de energía con el entorno, como ocurre en la disolución de cloruro de sodio (b), el factor determinante será el aumento de desorden espacial.

Los cambios de estado también se producen mediante un intercambio de energía, de forma que unos cambios llamados progresivos (fusión, vaporización y sublimación) se producen con absorción de energía por el sistema, mientras que los procesos inversos (solidificación, condensación y sublimación inversa) se denominan regresivos y se producen cediendo energía al entorno. En el proceso (d) el yodo aumentará el desorden espacial del sistema al pasar de sólido a gas, pero al ser un proceso endotérmico disminuirá el grado de desorden energético del entorno, por lo que el proceso es espontáneo cuando el aumento del grado de desorden espacial del sistema compensa la disminución del desorden energético del entorno. Los mismos argumentos se pueden utilizar en el caso de la fusión del hielo (e), puesto que al pasar de sólido a líquido aumenta el desorden del sistema y se trata de un proceso endotérmico.

Una explicación de este fenómeno (tendencia al aumento de desorden), se puede realizar de una forma meramente probabilística, según la cual, los estados desordenados son mucho más probables que los estados ordenados. Imaginemos, por ejemplo, que tomamos una baraja inicialmente ordenada y procedemos a barajar las cartas; como consecuencia, se pueden dar dos situaciones diferentes: que la baraja quede ordenada o que quede desordenada. Observad que la segunda opción es mucho más probable que la primera, puesto que existen muchas más disposiciones diferentes de las cartas que corresponden a la categoría desordenada. Por ejemplo, en una baraja de 10 cartas hay 3628799 disposiciones desordenadas y solo 1 ordenada, por eso se dice que “la tendencia natural” al mezclar las cartas será la de obtener una disposición desordenada.

En las reacciones químicas sería interesante poder predecir si una determinada reacción es espontánea o no sin la necesidad de recurrir a la experimentación. Es decir, tener un método que nos permitiera evaluar la variación del grado de desorden del universo que se produce asociado a una determinada reacción química.

## 13. ENTROPIA: UNA PROPIEDAD QUE RIGE LA EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS

Según lo expuesto anteriormente determinar si un proceso es espontáneo no es una empresa fácil, puesto que supone evaluar la variación del grado de desorden del universo asociado al cambio. Acotaremos inicialmente este estudio a un proceso más sencillo como sería un sistema aislado. En este caso puesto que el desorden del entorno no variará lo único que tendremos que evaluar es el cambio en el desorden del sistema, en caso de que aumente el proceso será espontáneo.

La entropía es una magnitud termodinámica que mide el grado de desorden espacial de un sistema a nivel submicroscópico y el grado de desorden energético.

El grado de desorden espacial está relacionado con el número de maneras diferentes en que las partículas se pueden distribuir en el sistema. Y el grado de desorden energético está relacionado con el número de maneras diferentes en que la energía se puede distribuir en el sistema.

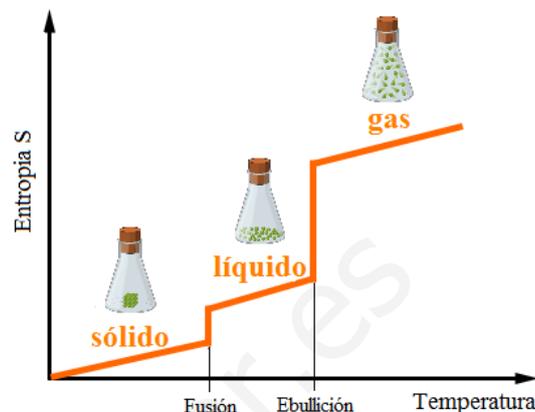
Cualitativamente podemos establecer algunas relaciones sobre las entropías de las sustancias. Una entropía baja corresponde a poco desorden en la distribución de las partículas y la energía,

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

en cambio una entropía elevada corresponde a un alto grado de desorden. Por tanto, el valor de la entropía solo depende del estado del sistema y de la cantidad de sustancia que contiene, es decir es una función de estado y en consecuencia su variación solo dependerá del estado inicial y final del sistema.

En el caso de las sustancias y puesto que la entropía depende de la cantidad de partículas, para poder establecer comparaciones entre sustancias diferentes deberemos de trabajar con entropías molares, es decir, el grado de desorden referido al mismo número de partículas.

La entropía de las sustancias se incrementa con la temperatura puesto que aumenta la velocidad media de las partículas y además se amplía la dispersión de las velocidades de las partículas, con lo cual aumentará tanto el desorden espacial como el energético.



Como se puede observar en el gráfico de la figura, la entropía de las sustancias se incrementa de forma drástica al cambiar de estado. Cuando el sólido se transforma en líquido aumenta de forma considerable la libertad de movimiento de las partículas que forman la sustancia y por tanto el grado de desorden. El mismo fenómeno se observa en el cambio de estado de líquido a gas, que corresponde al estado donde las partículas tienen una mayor libertad de movimiento y por tanto es el más desordenado de los tres.

Otro factor que tiene influencia en el valor de la entropía molar de las sustancias es la intensidad de los enlaces. Cuanto más fuerte son los enlaces que actúan entre las partículas que forman la sustancia menor será la entropía, puesto que menor libertad de movimiento presentarán las partículas. Por ejemplo, en el caso del etano  $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ , eteno  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  y el etino  $\text{CH}\equiv\text{CH}$ , las entropías respectivas son: 229,6, 219,5 y 200,9  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ , correspondientes a un enlace covalente sencillo, uno doble y uno triple entre los átomos de carbono.

Cuanto mayor es la masa de las partículas que forman la sustancia mayor es la entropía molar de esta, puesto que mayor es la diversidad de estados energéticos posibles para las mismas. Por ejemplo, en el caso de los halogenuros de hidrogeno  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$  los valores de entropía correspondientes son: 173,8; 186,9; 198,7 y 206,6  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ .

En el caso de sustancias que presentan el mismo estado de agregación y una masa parecida, cuanto mayor es la complejidad química de la sustancia mayor es la entropía, por ejemplo, cuanto mayor es la cantidad de átomos diferentes que forman una misma sustancia mayor es su entropía.  $\text{CO}_2$  y  $\text{C}_3\text{H}_8$  tienen la misma masa molecular relativa  $M_r=44$  y las siguientes entropías 213,7 y 269,9  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ . La entropía del propano es mayor puesto que tiene mayor cantidad de átomos.

Para mayor simplicidad, en los párrafos anteriores hemos utilizado las unidades internacionales en que se expresa la entropía sin justificarlas, lo cual haremos más adelante.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**A.32.** *Predecid de forma razonada quien tendrá mayor entropía molar de cada una de las parejas propuestas:*

a) *He (25°C y 1 atm ) y He (100°C y 1 atm)*

b) *C(grafito) y C(diamante)*

c) *CO(g) y CH<sub>3</sub>OH(l)*

Rdo. He(100°C); C(grafito); CO(g)

Conociendo las entropías de las sustancias implicadas en un proceso es posible evaluar de forma cualitativa la variación de la entropía que se produce en un sistema al realizar un cambio determinado.

**A.33.** *Indicad razonadamente como variará la entropía en los siguientes procesos:*

a) *Solidificación del agua.*

b) *Descomposición del amoníaco:  $2 \text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g})$*

c) *Separación de los componentes de una mezcla.*

d) *Combustión del metano para dar vapor de agua:  $\text{CH}_4(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$*

e) *He(g) (T=100 K, P= 1 atm) → He(g) (T= 298 K, P= 0,1 atm)*

En el proceso de la solidificación del agua se produce una disminución de la entropía ( $\Delta S < 0$ ) puesto que en el estado sólido el grado de ordenación es mucho mayor que en el estado líquido, las partículas en el líquido presentan una mayor libertad de movimiento que en el sólido.

En la reacción de descomposición del amoníaco se produce un aumento de la entropía ( $\Delta S > 0$ ) debido a que aumenta de forma apreciable la cantidad de partículas en los productos respecto de las sustancias reaccionantes, con el consiguiente aumento del grado de desorden del sistema. Los moles de gas en los productos son cuatro, mientras que solo hay dos en los reactivos ( $\Delta n = 2$ ).

Cuando se separa una mezcla en sus componentes disminuye el grado de desorden ( $\Delta S < 0$ ) puesto que el número de maneras diferentes en que se podrán distribuir las partículas será menor con lo que disminuye el desorden espacial y, por consiguiente, la entropía.

En la reacción de combustión del metano, la cantidad de partículas de gas en reactivos y en productos es igual ( $\Delta n = 0$ ), por lo que no podremos utilizar esta característica de la reacción como criterio para predecir la variación de la entropía; pero si observamos las especies de reactivos y productos, vemos que el grado de complejidad química en los productos es mayor que en los reactivos por lo que, a pesar de que la variación de entropía no será muy grande, cabe esperar que la entropía aumente ( $\Delta S > 0$ ).

En el caso del helio gas, en la transformación ha cambiado la temperatura y la presión. Supondremos que la cantidad de gas no se ha modificado por tratarse de un sistema cerrado, que no intercambia materia con el exterior. Al aumentar la temperatura aumentará el grado de desorden energético y el grado de desorden espacial. Además al disminuir la presión aumentando la temperatura para igual cantidad de gas esto solo se puede conseguir aumentando el volumen. Al aumentar el volumen aumenta el número de formas diferentes en que se pueden disponer las partículas y por tanto el desorden espacial. En conclusión en este caso la entropía aumentará de forma apreciable ( $\Delta S > 0$ ).

A continuación figura la tabla de las entropías molares estándar de algunas sustancias, donde se puede observar que todas tienen valores positivos, puesto que, a diferencia de la entalpia, para la entropía conocemos las condiciones para las cuales las sustancias tendrán un mínimo de entro-

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

pía<sup>6</sup>, correspondiente al mínimo desorden que se puede conseguir, al cual se le asigna valor cero de entropía.

Este valor viene indicado por el tercer principio de la Termodinámica que dice:

La entropía de un cristal perfecto para una sustancia a la temperatura de 0 K (correspondiente a una ausencia total de movimiento) es cero.

Por lo tanto, los elementos en su estado más estable, a diferencia de lo que sucede con la entalpia, tienen valor diferente de cero (y positivo) de entropía molar en condiciones estándar (25°C y P=1 atm).

**Tabla 3. Entropías molares estándar**

Fórmula	Nombre del compuesto	S <sup>0</sup> (J/mol·K)	Fórmula	Nombre del compuesto	S <sup>0</sup> (J/mol·K)
Br <sub>2</sub> (l)	Bromo	152,2	Ca(OH) <sub>2</sub> (s)	Hidróxido de calcio	83,4
C <sub>diamante</sub>	C (diamante)	2,4	CaCO <sub>3</sub> (s)	Carbonato de calcio	92,9
C <sub>grafito</sub>	C (grafito)	5,7	F <sub>2</sub> (g)	Flúor	202,7
CH <sub>4</sub> (g)	Metano	187,9	H <sub>2</sub> (g)	Hidrogeno	130,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	Etano	229,6	HCl(g)	Cloruro de hidrógeno	186,8
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	Eteno	219,5	H <sub>2</sub> O(g)	Agua (gas)	188,7
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	Etino	200,9	H <sub>2</sub> O(l)	Agua (liquida)	69,9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	Propano	269,9	H <sub>2</sub> O(s)	Agua (solida)	48
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	Butano	310,1	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	Agua oxigenada	109,6
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (l)	Hexano	295,9	He(g)	Helio	126,2
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	Benceno	172,2	I <sub>2</sub> (s)	Yodo	116,6
CH <sub>3</sub> OH(l)	Metanol	126,8	N <sub>2</sub> (g)	Nitrógeno	191,6
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (l)	Etanol	160,7	NO(g)	Monóxido de nitrógeno	210,8
CH <sub>3</sub> COOH(l)	Ácido acético	159,8	NO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de nitrógeno	304,3
CO(g)	Monóxido de carbono	197,6	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	Tetraóxido de nitrógeno	240,1
CO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de carbono	213,7	NH <sub>3</sub> (g)	Amoníaco	192,4
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (s)	Glucosa	182,4	HNO <sub>3</sub> (l)	Ácido nítrico	155,6
CCl <sub>4</sub> (l)	Tetracloruro de carbono	216,4	Ne(g)	Neón	146,3
CHCl <sub>3</sub>	Cloroformo	201,7	O <sub>2</sub> (g)	Oxígeno	205,1
Cl <sub>2</sub> (g)	Cloro	223,0	O <sub>3</sub> (g)	Ozono	238,9
CaC <sub>2</sub> (s)	Acetiluro de calcio	64,1	SO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de azufre	248,2
CaO(s)	Óxido de calcio	39,8	SO <sub>3</sub> (g)	Trióxido de azufre	256,8

Una vez conocidas las entropías de las sustancias que intervienen en un sistema químico y puesto que la entropía es una función de estado, aplicando una relación semejante a la obtenida en la ley de Hess para las entalpias, se puede determinar la variación de la entropía que se produce en una reacción química.

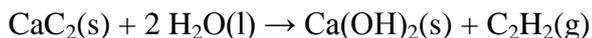
$$\Delta S_R^0 = \sum v_p \cdot S^0(\text{productos}) - \sum v_r \cdot S^0(\text{reactivos})$$

**A.34.** *Determinad, a partir de los valores de entropía estándar de la tabla anterior, la variación de entropía correspondiente a la reacción entre el acetiluro de calcio sólido y el agua líquida para formar hidróxido de calcio sólido y acetileno gas.*

<sup>6</sup> Un cristal perfecto es un modelo ideal correspondiente a un sólido perfectamente ordenado con ausencia total de defectos de red o impurezas que se extiende hasta el infinito.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

La ecuación de la reacción del acetiluro de calcio es:

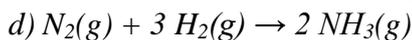
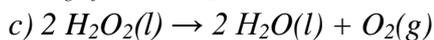
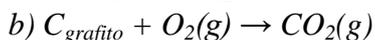
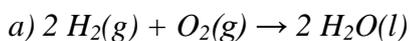


La variación de entropía vendrá dada por:

$$\Delta S_r^0 = \sum \nu_p \cdot S_{\text{productos}}^0 - \sum \nu_r \cdot S_{\text{reactivos}}^0 \rightarrow \Delta S_r^0 = 83,4 + 200,9 - 64,1 - 2 \cdot 69,9 = 80,4 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

Como vemos, el valor de la variación de entropía de la reacción es positivo, indicando que la entropía de los productos es mayor que la entropía de los reactivos, es decir, que con la reacción aumenta el desorden del sistema. Este resultado era previsible puesto que en esta reacción aparece un producto en estado gaseoso y sabemos que la entropía de los gases, en general, es mayor que la entropía de sólidos y líquidos.

**A.35.** *Determinad, utilizando los valores de la entropía molar estándar de la tabla anterior, las entropías de las siguientes reacciones:*



Rdo.  $-326,7 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ;  $2,9 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ;  $125,7 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ;  $-198,9 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ .

Hasta aquí hemos estudiado cómo se puede calcular la entropía correspondiente al sistema, de tal forma que para sistemas aislados, puesto que la variación de la entropía del entorno será nula, podremos concluir que aquellos procesos cuya variación de la entropía sea positiva serán espontáneos. Podemos plantearnos ahora, qué es lo que sucede en aquellos sistemas que no estén aislados. Concretamente: ¿Cómo podemos calcular la variación de la entropía del entorno? Anteriormente estudiamos el caso de un cuerpo sólido que se enfría espontáneamente. Recordemos que el que dicho proceso sea espontáneo se debe al aumento neto del desorden producido por el aumento de entropía del entorno que compensa la disminución de entropía del sistema formado por el cuerpo (ya que la entropía del cuerpo frío es menor que la del cuerpo caliente). Algo similar ocurre con determinadas reacciones químicas, por ejemplo, la reacción entre el hidrogeno gas y el oxígeno gas para dar agua líquida o vapor:



Se trata de una reacción con variación de entropía del sistema negativa puesto que la cantidad de sustancias gaseosas en los productos es inferior a la de las sustancias reaccionantes. Sin embargo, esta reacción es espontánea, puesto que al tratarse de una reacción fuertemente exotérmica cederá calor al entorno provocando así un aumento de la entropía del entorno mayor que la disminución de la entropía del sistema y en consecuencia aumentará la entropía del universo.

La variación de la entropía del entorno dependerá del calor intercambiado entre el sistema y el entorno, de tal forma que cuanto mayor sea dicho calor mayor será la variación de entropía. Por otra parte, dado que el calor cedido por el sistema al entorno ha de ser el mismo que el calor ganado por el entorno (y viceversa), ambos serán iguales y de signo contrario.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

La variación de entropía del entorno también dependerá de la temperatura, puesto que no tendrá el mismo efecto sobre el entorno la cesión de una determinada cantidad de calor cuando la entropía del mismo ya es alta (temperatura elevada), que cuando la entropía es baja<sup>7</sup>. Por tanto, la variación de la entropía será inversamente proporcional a la temperatura a la cual se realiza el intercambio de energía entre el sistema y el entorno.

**A.36.** *Atendiendo a los razonamientos anteriores, analizad las siguientes expresiones y argumentad cuál de ellas es la más apropiada para calcular la variación de entropía del entorno en el que se produce una reacción química.*

$$\text{a) } \Delta S_{ent} = \frac{T}{\Delta H_{sis}}, \quad \text{b) } \Delta S_{ent} = \frac{\Delta H_{sis}}{T}, \quad \text{c) } \Delta S_{ent} = -\frac{\Delta H_{sis}}{T}$$

La primera expresión (a) no es posible puesto que cuanto mayor fuese la temperatura, mayor sería el cambio de entropía y cuanto mayor fuese el calor intercambiado, menor sería el cambio de entropía. La segunda expresión (b) sí cumple las condiciones (el cambio de entropía aumenta con el calor intercambiado y disminuye con la temperatura; sin embargo, no tiene en cuenta que el calor ganado (o perdido) por el entorno, ha de ser de signo contrario al calor perdido (o ganado) por el sistema, el cual viene dado por  $\Delta H_{sis}$ .

Por tanto, la expresión que cumple con las condiciones establecidas es la tercera (c):

$$\Delta S_{ent} = -\frac{\Delta H_{sis}}{T}$$

Conviene tener en cuenta el campo de validez de dicha expresión, que solo podrá aplicarse en aquellos procesos que se realizan a presión y temperatura constantes, ya que, como sabemos, para que el valor del calor intercambiado coincida con el del cambio de entalpía, la presión ha de permanecer constante.

**A.37.** *A partir de la expresión propuesta para determinar la variación de la entropía del entorno en el que se produce una reacción química deducid en que unidades del Sistema Internacional se expresa la entropía.*

**A.38.** *Para la reacción de formación del amoníaco (gas) a 25°C calculad a partir de los valores de las tablas la variación de entropía del sistema, la variación de entropía del entorno y razonad si la reacción es espontánea.*

La ecuación de formación del amoníaco es:  $\frac{1}{2} \text{N}_2(\text{g}) + \frac{3}{2} \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g})$

$$\Delta S_r^0 = \sum \nu_p \cdot S_{productos}^0 - \sum \nu_r \cdot S_{reactivos}^0$$

$$\Delta S_{sis}^0 = S^0(\text{NH}_3) - \frac{1}{2} \cdot S^0(\text{N}_2) - \frac{3}{2} \cdot S^0(\text{H}_2) = 192,4 - \frac{1}{2} \cdot (191,6) - \frac{3}{2} \cdot (130,7) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -99,45 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

<sup>7</sup> Una explicación poco rigurosa (pero intuitiva) que suele proponerse para ayudar a comprender mejor este hecho, es que no es lo mismo dar dinero a una persona muy rica que a otra muy pobre. El estado de las finanzas, perspectivas, estilo de vida, etc., cambiarán menos en la primera que en la segunda.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

$$\Delta H_{\text{sis}}^0 = \Delta H_f^0(\text{NH}_3) = -46,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -46200 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S_{\text{ent}}^0 = -\frac{\Delta H_{\text{sis}}^0}{T} = -\frac{-46200}{298} = 155,03 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta S_{\text{univ}}^0 = \Delta S_{\text{sis}}^0 + \Delta S_{\text{ent}}^0 = -99,45 + 155,03 = 55,6 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Puesto que la variación de la entropía del universo para esta reacción es positiva la reacción será espontánea para estas condiciones de presión y temperatura (condiciones estándar).

## 14. ¿CÓMO MEDIR LA ESPONTANEIDAD? ENERGÍA LIBRE DE GIBBS

Para determinar la espontaneidad de un determinado proceso debemos de determinar la variación del grado de desorden que se genera en el universo. Expresado de esta forma parece ser una operación muy compleja por ambiciosa, pero afortunadamente ya hemos visto que a pesar de que el cálculo de la entropía del entorno es algo muy complejo de realizar, la variación de la entropía se puede hacer de forma sencilla para procesos que se realizan a presión y temperatura constantes. Así, la variación de la entropía del universo se puede realizar a partir de funciones termodinámicas que pertenecen exclusivamente al sistema como son la variación de entropía y la variación de entalpía:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} = \Delta S_{\text{sis}} - \frac{\Delta H_{\text{sis}}}{T}$$

Si queremos simplificar la forma en que se mide la espontaneidad de los procesos, deberemos buscar una nueva variable termodinámica que esté directamente relacionada con la variación de la entropía del universo. Esta nueva variable es la variación de la **energía libre de Gibbs** “ $\Delta G$ ” cuyo valor está relacionado con la variación de la entropía del universo  $\Delta S_{\text{univ}}$  mediante la expresión:

$$\Delta G = -T \cdot \Delta S_{\text{univ}} \rightarrow \Delta G = -T \cdot \left( \Delta S_{\text{sis}} - \frac{\Delta H_{\text{sis}}}{T} \right) = \Delta H_{\text{sis}} - T \cdot \Delta S_{\text{sis}} \rightarrow \Delta G = \Delta H_{\text{sis}} - T \cdot \Delta S_{\text{sis}}$$

Puesto que la temperatura absoluta no puede ser nunca negativa, el signo de la variación de la energía libre será siempre contrario al signo de la variación de la entropía del universo, de tal forma que cuando un determinado proceso tenga un valor de  $\Delta G < 0$ , el proceso será espontáneo.

Si la variación de energía libre de un proceso es positiva,  $\Delta G > 0$ , entonces el proceso será no espontáneo, de forma que el proceso que se dará de forma natural será el proceso contrario.

*¿Qué sucederá cuando la variación de energía libre no sea positiva ni negativa,  $\Delta G = 0$ ?*

Según los razonamientos anteriores el sistema no evolucionará según lo previsto, ni en sentido contrario al previsto, por tanto, el sistema no evolucionará en ningún sentido y en consecuencia se encontrará en equilibrio.

**A.39.** *A partir de la relación entre energía libre, entalpía y entropía, determinad en qué condiciones una reacción química será espontánea.*

Si analizamos la expresión  $\Delta G = \Delta H_{\text{sis}} - T \cdot \Delta S_{\text{sis}}$ , observamos que hay dos términos diferentes que pueden determinar el signo de la energía libre. El primer término,  $\Delta H_{\text{sis}}$ , conocido como término entálpico, puede tener signo negativo (correspondiente a reacciones exotérmicas) o positivo

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

(para reacciones endotérmicas). Cuanto más negativo sea dicho término, más exotérmica será la reacción y mayor probabilidad habrá de que sea espontánea.

El segundo término,  $-T \cdot \Delta S$ , conocido como término entrópico, también puede tener signo negativo cuando la variación de la entropía del sistema sea positiva, es decir, aumente el grado de desorden en la reacción, o puede ser positivo cuando la variación de la entropía es negativa (disminuya el grado de desorden). Cuanto más positiva sea la variación de la entropía del sistema más probable será que la reacción sea espontánea.

Por consiguiente, se pueden dar cuatro situaciones diferentes para el caso de la espontaneidad de las reacciones químicas:

Reacciones exotérmicas,  $\Delta H_{\text{sis}} < 0$ , con aumento del grado de desorden,  $\Delta S_{\text{sis}} > 0$ , puesto que los dos términos, entálpico y entrópico, son negativos, la energía libre será siempre negativa. Estas reacciones son siempre espontáneas, cuanto mayor sea en valor absoluto el cambio de la entalpía y de la entropía más espontáneas serán las reacciones.

Reacciones exotérmicas,  $\Delta H_{\text{sis}} < 0$ , con disminución del grado de desorden,  $\Delta S_{\text{sis}} < 0$ , el primer término será negativo mientras que el segundo será positivo. Mientras que en valor absoluto el término entálpico sea mayor al entrópico la reacción será espontánea. Dado que el término entrópico aumenta al aumentar la temperatura cabe esperar que estas reacciones sean espontáneas a “relativamente” bajas temperaturas.

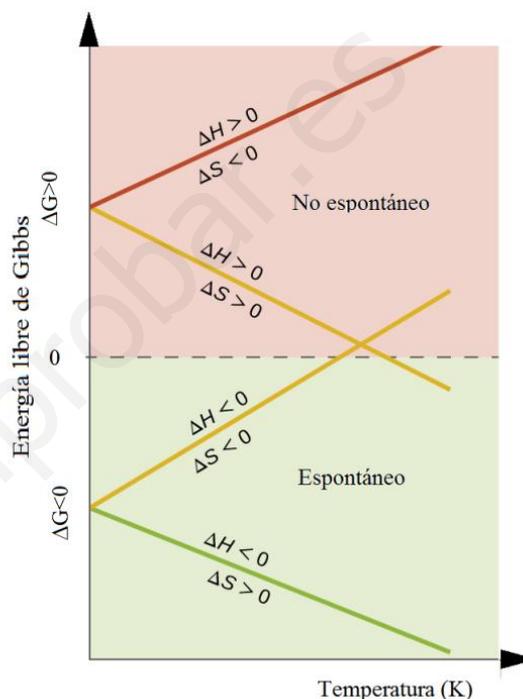
Reacciones endotérmicas,  $\Delta H_{\text{sis}} > 0$ , con aumento del grado de desorden,  $\Delta S_{\text{sis}} > 0$ , siempre que en valor absoluto el término entálpico supere al entrópico las reacciones serán no espontáneas. En cambio, para temperaturas elevadas el término entrópico superará al entálpico y la variación de la energía libre será negativa y por consiguiente la reacción espontánea.

Finalmente, reacciones endotérmicas,  $\Delta H_{\text{sis}} > 0$ , con disminución del grado de desorden,  $\Delta S_{\text{sis}} < 0$ , puesto que el signo de los dos términos será siempre positivo, la energía libre será siempre positiva y la reacción química será siempre no espontánea o dicho de otra forma la reacción inversa será espontánea a cualquier temperatura.

**A.40.** Explicad, justificando las respuestas, si las siguientes reacciones serán o no espontáneas:

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| a) $2 \text{H}_2\text{O}_2(l) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(l) + \text{O}_2(g)$ | $\Delta H^0 = -196 \text{ kJ/mol}$  |
| b) $3 \text{H}_2(g) + \text{N}_2(g) \rightarrow 2 \text{NH}_3(g)$                  | $\Delta H^0 = -92,4 \text{ kJ/mol}$ |
| c) $\text{N}_2\text{O}_4(g) \rightarrow 2 \text{NO}_2(g)$                          | $\Delta H^0 = 56,7 \text{ kJ/mol}$  |
| d) $\text{N}_2(g) + 2 \text{O}_2(g) \rightarrow 2 \text{NO}_2(g)$                  | $\Delta H^0 = 16,6 \text{ kJ/mol}$  |

Para que la reacción sea espontánea la variación de la energía libre de Gibbs de la reacción debe ser negativa. La variación de la energía libre depende del factor entálpico y del entrópico. Conocemos la variación de la entalpía y podemos estimar la variación de la entropía, de forma que podremos estimar también el signo de  $\Delta G$  y por consiguiente la espontaneidad de la reacción.



## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Aplicando estos razonamientos a la expresión:  $\Delta G = \Delta H_{\text{sis}} - T \cdot \Delta S_{\text{sis}}$ , tenemos:

En la reacción a) el término entálpico es negativo y puesto que aparece un gas en productos que no existía en reactivos, la variación de entropía será positiva y el término entrópico negativo. La variación de la energía libre de esta reacción será a todas las temperaturas negativa, por lo que la reacción resultará siempre espontánea.

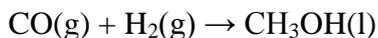
Para la reacción b), como disminuye el número de moles de gas en la reacción, la entropía es negativa y el término entrópico positivo. Esta reacción será espontánea cuando el término entálpico supere en valor absoluto al entrópico. Es decir, la reacción será espontánea para bajas temperaturas.

La reacción c) es una reacción en la que se aumenta el desorden, puesto que aumenta el número de moles de gas, por eso el término entrópico será negativo. Sin embargo, se trata de una reacción endotérmica (el término entálpico es positivo), por lo que será espontánea cuando el término entrópico supere en valor absoluto al entálpico, lo cual ocurrirá cuando la temperatura  $T$  supere un determinado valor, es decir, esta reacción será espontánea a temperaturas elevadas.

En la reacción d), puesto que disminuye la cantidad de moles de gas el término entrópico será positivo al igual que lo es el entálpico, por tanto, el signo de la energía de Gibbs será siempre positivo y la reacción será siempre no espontánea. Por el contrario, la reacción inversa será espontánea a todas las temperaturas.

**A.41.** *A partir de los datos termodinámicos de entalpía de formación y entropía molar estándar de las tablas, determinad si la reacción de síntesis del metanol a partir de monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso será espontánea en condiciones estándar.*

La ecuación química de la reacción a que hace referencia el problema es:



Con la ley de Hess obtenemos a partir de las entalpías de formación la entalpía de reacción:

$$\Delta H_{\text{r}}^0 = \Delta H_{\text{f}}^0(\text{CH}_3\text{OH}) - \Delta H_{\text{f}}^0(\text{CO}) = -126,7 \text{ kJ/mol}$$

Calculamos la entropía de la reacción a partir de las entropías molares estándar aprovechando que la entropía es una función de estado.

$$\Delta S_{\text{r}}^0 = S^0(\text{CH}_3\text{OH}) - S^0(\text{CO}) - S^0(\text{H}_2) = 126,8 - 197,6 - 130,7 = -201,5 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

El resultado negativo de la variación de entropía es razonable puesto que en la reacción disminuye el número de moles de especies gaseosas.

Aplicando la expresión que relaciona la energía libre con la entalpia y la entropía calculamos la energía libre en condiciones estándar.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0 \rightarrow \Delta G^0 = -1,267 \cdot 10^5 - 298 \cdot (-201,5) = -66653 \text{ J/mol} = -66,7 \text{ kJ/mol}$$

Puesto que el signo de la variación de energía libre es negativo la reacción será espontánea en condiciones estándar.

En este caso, puesto que el factor entálpico es negativo y el entrópico es positivo la reacción será espontánea a bajas temperaturas. Al aumentar la temperatura aumentará el término entrópico y llegará un momento en que la variación de la energía libre cambiará de signo indicando que la reacción no será espontánea.

Utilizando la relación " $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0$ " podemos determinar si una reacción será espontánea en condiciones estándar, es decir a 25°C, y también podemos hacer estimaciones sobre como va-

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

riará la espontaneidad con la temperatura. Además, en aquellas reacciones en las que tanto la variación de la entalpía como la variación de la entropía no se modifiquen de una forma sustancial con la temperatura, podremos calcular para qué valor de la temperatura la variación de la entropía será cero, es decir, la reacción se encontrará en equilibrio y no evolucionará hacia la formación de más productos, ni hacia la formación de más reactivos a costa de los productos.

**A.42.** Para la reacción de la actividad anterior, calculad a qué temperatura la variación de energía libre será nula

Para calcular la temperatura que se demanda en el enunciado, bastará con hacer 0 la variación de la energía libre de Gibbs, con lo que:

$$0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0 \rightarrow T = \frac{\Delta H^0}{\Delta S^0} \text{ (Temperatura aproximada de equilibrio)}$$

$$T = \frac{-1,267 \cdot 10^5}{-201,5} = 628,8 \text{ K}$$

A esta temperatura, aproximadamente 356 °C, el sistema se encontrará en equilibrio. De forma que a temperaturas superiores la reacción química dejará de ser espontánea y será espontánea la reacción inversa de descomposición del metanol.

Hay que recordar que la relación utilizada para el cálculo es válida para aquellos procesos que se realizan a presión y temperatura constantes y en condiciones estándar, es decir, presión de 1 atm para los gases que intervienen en la reacción, por eso la temperatura determinada de esta forma será estimativa.

**A.43.** En el punto de ebullición normal de un líquido, se encuentran en equilibrio el líquido y el vapor, siendo la presión parcial del vapor de 1 atm. La presión sobre el líquido es de 1 atm y tanto el líquido como el vapor se encuentran en estado estándar. A partir de los datos que se aportan en la tabla, obtened la temperatura de ebullición del etanol.

	$\Delta H_f^0$ (kJ/mol)	$S^0$ (J/mol·K)
CH <sub>3</sub> OH(l)	-238,67	127
CH <sub>3</sub> OH(g)	-201,20	238

La ecuación correspondiente a la vaporización del metanol es:



$$\Delta H_v^0 = \Delta H_f^0(g) - \Delta H_f^0(l) = -201,2 - (-238,67) = 37,47 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S_v^0 = S^0(g) - S^0(l) = 238 - 127 = 111 \text{ J/mol·K}$$

Como era previsible el valor de la entalpía es positivo, puesto que la vaporización es un proceso endotérmico; y el valor de la entropía es también positivo, porque al pasar de líquido a gas aumenta de forma muy apreciable el grado de desorden del sistema.

Suponiendo que ni la entalpía de vaporización ni la entropía cambian con la temperatura, la temperatura para la cual la variación de la energía libre será cero y por tanto el sistema estará en equilibrio será:

$$T = \frac{\Delta H_v^0}{\Delta S_v^0} = \frac{3,747 \cdot 10^4}{111} = 337,6 \text{ K} = 64,6 \text{ °C}$$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

Hemos visto que algunas reacciones son espontáneas a cualquier temperatura. Esto ocurre, por ejemplo, con la descomposición del agua oxigenada para formar oxígeno gas y agua líquida, lo que significa que el agua oxigenada se descompone de forma natural sin ninguna influencia continua. Afortunadamente, dicho proceso de descomposición es bastante lento (si no lo fuera, no podríamos almacenar, como lo hacemos, el agua oxigenada en una botella para utilizarla cuando sufrimos una herida). No obstante, existen algunas sustancias que actúan como catalizadoras de la descomposición del agua oxigenada, es decir, su presencia hace que aumente la velocidad de la reacción. En las células animales hay una enzima llamada peroxidasa que cataliza la reacción de descomposición del agua oxigenada, por eso cuando se coloca una disolución de agua oxigenada en una herida aparecen unas burbujas que corresponden a la liberación del oxígeno gas que aparece en la descomposición del agua oxigenada.

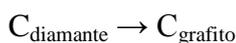
También son espontáneas a temperatura ambiente las reacciones de combustión de los hidrocarburos que forman la gasolina. De nuevo en este caso, la reacción es tan lenta que, afortunadamente, no se produce de forma observable (si no fuera así, la gasolina se encendería de forma espontánea en contacto con el aire) y para que suceda es necesario iniciar la reacción con un punto de ignición o llama.

Algunas reacciones espontáneas son muy rápidas, de tal forma que cuando entran en contacto los reactivos se produce, prácticamente de forma inmediata, su transformación en productos. Estas reacciones, si son fuertemente exotérmicas y rápidas, pueden producir explosiones muy peligrosas. Por ejemplo, los metales alcalinos (sobre todo los más pesados como rubidio y cesio), reaccionan de forma explosiva en contacto con el agua.

Por lo tanto, una reacción espontánea es una reacción posible termodinámicamente, aunque pueda ser tan lenta que no sea observable. La velocidad a la que se producen las reacciones químicas es estudiada por otra disciplina de la química conocida como **Cinética Química**. En general, la velocidad de las reacciones aumenta al aumentar la temperatura o con el uso de catalizadores. Pero para una reacción no espontánea no existe ningún catalizador que la convierta en espontánea.

**A.44.** *Calculad, a partir de los datos de las tablas termodinámicas, la energía libre de la reacción de transformación del carbono diamante en carbono grafito. ¿Por qué no se convierte el carbono diamante en carbono grafito?*

La ecuación correspondiente a la transformación del carbono es:



Calculamos la variación de la entalpía de la transformación aplicando la ley de Hess:

$$\Delta H_{\text{r}}^0 = \Delta H_{\text{f}}^0(C_{\text{grafito}}) - \Delta H_{\text{f}}^0(C_{\text{diamante}}) = 0 - 1,9 = -1,9 \text{ kJ/mol}$$

Calculamos la variación de la entropía para el proceso aprovechando que se trata de una función de estado:

$$\Delta S_{\text{r}}^0 = S^0(C_{\text{grafito}}) - S^0(C_{\text{diamante}}) = 5,7 - 2,4 = 3,3 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

Determinamos la energía libre de Gibbs a partir de los valores de la variación de la entalpía y de la entropía:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0 = -1900 - 298 \cdot 3,3 = -2883,4 \text{ J/mol} = -2,88 \text{ kJ/mol}$$

Como era previsible la variación de la energía libre es negativa puesto que la variación de la entalpía es negativa y la variación de la entropía positiva. La reacción es espontánea en condiciones estándar. Afortunadamente, esta reacción, en condiciones de presión y temperatura habituales, es tan lenta que no es observable en absoluto, lo que, entre otras cosas, hace posible el eslogan publicitario de “un diamante es para siempre”.

## 15. ¿CÓMO PODEMOS INTERPRETAR LA ENERGÍA LIBRE DE GIBBS?

¿Por qué se llama energía libre a la nueva función termodinámica “G”?

La magnitud definida para valorar de forma sencilla la variación de la entropía del universo designada como “G” o energía libre de Gibbs, es una función termodinámica que está relacionada con otras magnitudes termodinámicas según la expresión:

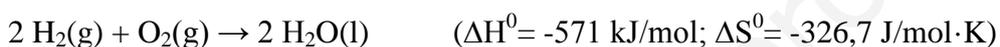
$$G = H - T \cdot S$$

La función G será una función de estado puesto que depende de otras dos funciones de estado (entalpía y entropía), y por otra parte, al igual que la entalpía o el producto de la temperatura por la entropía, tiene dimensiones de energía.

Para un proceso que se realice a presión y a temperatura constante, la variación de la función termodinámica G viene dada por:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Analicemos una reacción sencilla como la reacción de formación de agua líquida:



El valor negativo de la variación de entalpía nos indica que por cada dos moles de agua líquida formada, la energía de los productos (más la energía potencial del entorno) es 571 kJ menor que la de los reactivos. Esta energía podría ser transferida al entorno de la reacción. Puesto que se trata de la diferencia de entalpía, este valor de energía disponible ya tiene en consideración el trabajo de expansión del sistema asociado al cambio de volumen en la reacción.

Por otra parte, como la variación de la entropía del sistema es negativa, para que la reacción sea espontánea la variación de entropía del entorno ha de ser positiva de forma que la entropía del universo aumente, tal y como se establece en el segundo principio de la termodinámica. Este aumento de la entropía del entorno se produce gracias a la cesión de calor desde el sistema al entorno. La energía mínima que se ha de ceder mediante calor será la correspondiente a una desordenación del entorno equivalente a una ordenación del sistema.

$$\Delta S_{\text{ent}}^0 (\text{mínimo}) = \Delta S_{\text{sis}}^0 = -(-326,7) \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

$$Q_{\text{ent}} (\text{mínimo}) = T \cdot \Delta S_{\text{ent}}^0 (\text{mínimo}) = 298 \cdot 326,7 = 97356,6 \text{ J/mol} = 97,4 \text{ kJ/mol}$$

Por consiguiente, la diferencia entre la energía total que el sistema puede ceder y la que es imprescindible ceder mediante calor al entorno para que el proceso sea espontáneo, será la cantidad máxima de energía de la que se puede disponer en este sistema, es decir, lo que llamaremos trabajo útil. Por ejemplo, en este caso el máximo trabajo eléctrico que se puede conseguir construyendo una pila eléctrica con  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ .

Teniendo en cuenta que  $Q_{\text{sis}} = -Q_{\text{ent}}$

$$\Delta H^0 - Q_{\text{sis}}(\text{mínimo}) = -571 - (-97,4) = -473,6 \text{ kJ/mol} = \Delta G^0$$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

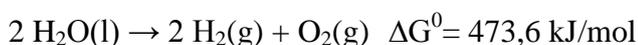
En conclusión: El valor de la variación de la energía libre de Gibbs es igual al del máximo trabajo útil que se puede conseguir a partir de la reacción química estudiada. Este resultado se puede generalizar para cualquier otra reacción y escribir:

$$\Delta G = W_{\text{útil}} (\text{máximo})$$

**A.45.** ¿Qué indica una variación de energía libre positiva para una reacción?

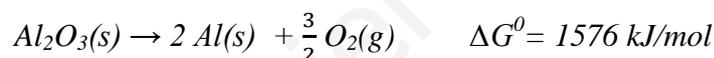
Evidentemente, indica que la entropía del universo asociada a esta reacción disminuiría, y, por tanto, este proceso no se dará de forma espontánea. Pero sí se podrá producir de forma forzada, es decir, aportando energía al sistema. La energía mínima que se debe aportar para que la reacción se produzca es  $\Delta G$ .

En el caso del ejemplo anterior, la reacción de formación del agua es una reacción espontánea en condiciones estándar. Por tanto, la reacción contraria de descomposición del agua será no espontánea. Puesto que la energía libre es una función de estado, la variación de la energía libre de la reacción inversa será igual a la de la reacción directa con signo contrario.



Se puede conseguir que se produzca esta reacción aportando energía, por ejemplo en forma de energía eléctrica en el proceso de la electrólisis. Para conseguir la electrólisis del agua en condiciones estándar se deberán de aportar como mínimo 473,6 kJ de energía eléctrica por cada dos moles de agua electrolizados.

**A.46.** La entalpía libre de la descomposición del óxido de aluminio es:



a) ¿Cuál es la energía eléctrica mínima que se deberá aportar para obtener electrolíticamente 1 kg de aluminio?

b) Sabiendo que la entalpía de fusión del aluminio es 10,67 kJ/mol, determinad la energía necesaria para obtener 1 kg de aluminio a partir de aluminio reciclado.

La reacción de descomposición del óxido de aluminio tiene un valor positivo de energía libre ( $\Delta G^0$ ); por tanto, se trata de una reacción no espontánea de la que no es posible obtener trabajo. Al contrario, el valor de la energía libre en este caso, indica la energía mínima que se ha de aportar (por ejemplo en forma de trabajo eléctrico), para que la reacción se produzca.

$$W_{\text{elec}} (\text{mínimo}) = \Delta G$$

En la reacción dada en el enunciado, tal y como está representada, se forman dos moles de aluminio por cada mol de óxido, por ello la cantidad de energía mínima que se deberá suministrar por mol de aluminio será la mitad de la entalpía libre de la reacción:

$$\Delta G_{\text{m}}^0 = 1576 \text{ kJ}/2 \text{ moles de Al} = 788 \text{ kJ/mol Al}$$

$$\Delta G_{\text{m}}^0 = \frac{\Delta G^0}{n} \rightarrow W_{\text{el}}(\text{mínimo}) = \Delta G^0 = n \cdot \Delta G_{\text{m}}^0 = \frac{m(\text{Al}) \cdot \Delta G_{\text{m}}^0}{M(\text{Al})}$$

$$W_{\text{elec}} (\text{mínimo}) = \frac{1000 \cdot 788}{27} = 29185,2 \text{ kJ}$$

Suponemos, de forma muy simplificada, que la energía requerida en el proceso de reciclado del aluminio es la correspondiente al proceso de fusión del metal para su posterior recuperación en forma metálica tras su solidificación.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

$$\Delta H_{\text{fus}}^0 = \frac{Q_P}{n} \rightarrow Q_P = n \cdot \Delta H_{\text{fus}}^0 = \frac{m(\text{Al}) \cdot \Delta H_{\text{fus}}^0}{M(\text{Al})}$$

$$Q_P = \frac{1000 \cdot 10,67}{27} = 395,2 \text{ kJ}$$

Comparando la energía requerida en los dos procesos:

$$\frac{Q_P}{W_{el}(\text{mínimo})} = \frac{29185,2}{395,2} \approx 74$$

La energía requerida en el proceso de fusión del aluminio es mucho menor que la energía necesaria para la obtención mediante electrólisis, de ahí la importancia de reciclar el aluminio. Además del sobrecoste económico correspondiente a la energía requerida en el proceso, hay que tener en cuenta el coste ambiental, ya que para obtener la energía necesaria se utilizan fundamentalmente combustibles fósiles que tienen una influencia fundamental en el aumento del efecto invernadero.

### RECAPITULACIÓN

La energía interna de una sustancia es la suma de energía térmica y la energía química, esta última, está asociada a los enlaces entre las partículas que forman las sustancias, de forma que cuando se produce una reacción química, los enlaces cambian y por tanto también lo hace la energía química del sistema.

Aplicando el Principio General de Conservación de la Energía se llega al Primer Principio de la Termodinámica, según el cual, la variación de la energía interna de un sistema será igual a la suma del trabajo realizado por el exterior sobre el sistema y el calor implicado en el proceso.

Calor y trabajo son magnitudes cuyo valor depende de cómo se realicen los cambios. En este tema hemos estudiado fundamentalmente aquellas transformaciones en las que las variaciones de la energía interna se realizan mediante calor y se llevan a cabo a presión o a volumen constante. Las transformaciones en las que el sistema cede energía al entorno mediante calor, se llaman exotérmicas y las que el sistema gana energía (del entorno) mediante calor, se denominan endotérmicas. Experimentalmente los calores de reacción se pueden determinar mediante calorímetros y bombas calorimétricas.

Hemos definido una función de estado llamada entalpía, que se puede expresar como la suma de la energía interna y de la energía potencial del entorno, y cuya variación se puede determinar experimentalmente con facilidad, puesto que su valor coincide con el del calor a presión constante.

La variación de la entalpía, por tratarse de una función de estado, solo depende de las entalpías de los productos y de los reactivos, de forma que en una reacción que se puede producir por etapas, la entalpía de la reacción global es igual a la suma de las entalpías de las etapas.

Arbitrariamente, se establece como entalpía cero la entalpía de un elemento en su estado estándar, es decir, en su forma más estable a 25°C y 1 atm. De esta forma se elaboran tablas de entalpía de formación estándar para gran cantidad de compuestos que corresponden a la reacción en la que se forma un mol de compuesto a partir de los elementos en condiciones estándar. Dichas tablas permiten calcular de forma muy sencilla las entalpías de las reacciones en estado estándar sin necesidad de determinarlas experimentalmente.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

La reacción química se puede describir como un proceso en el que se produce la ruptura y la formación de enlaces químicos. La ruptura de un enlace es un proceso endotérmico y la formación de un enlace es un proceso exotérmico; en consecuencia, la variación de la entalpía de una reacción en estado gaseoso se puede estimar restando de la entalpía de los enlaces rotos la entalpía de los enlaces formados, de forma que, cuando los enlaces de los productos sean más fuertes que los enlaces de los reactivos, la reacción será exotérmica y viceversa.

Los procesos espontáneos son aquellos que se producen de forma natural sin que sea necesaria una influencia exterior continua que los impulse. La espontaneidad de los procesos depende de la desordenación que se produce en la transformación. Para conocer el grado de desorden de los sistemas se define una magnitud termodinámica llamada entropía que mide el desorden a nivel espacial y energético.

Según lo que indica el Segundo Principio de la Termodinámica los procesos espontáneos son aquellos que producen un aumento de la entropía, es decir, del desorden del universo. La variación de la entropía del universo es la suma de la variación de la entropía del sistema y del entorno.

Puesto que la entropía es una función de estado que mide el grado de desorden, según el Tercer Principio de la Termodinámica, la entropía de un cristal perfecto para una sustancia a la temperatura de 0 K es cero. Conociendo los valores estándar de las entropías de las sustancias podemos, al igual que hacemos con las entalpías, calcular la variación de la entropía de una reacción. Para una reacción que se produzca de forma aislada, si la variación de la entropía es positiva la reacción será espontánea.

Para facilitar el procedimiento de determinación de la espontaneidad de los procesos se define la energía libre de Gibbs, una magnitud termodinámica, función de estado, cuya variación es igual al producto cambiado de signo de la variación de la entropía del universo por la temperatura absoluta, siempre que el proceso se realice a presión y a temperatura constante. Aquellos procesos cuya variación de la energía libre sea negativa serán espontáneos, si es positiva serán no espontáneos y cuando sea cero el sistema estará en equilibrio.

La variación de la energía libre depende de dos términos: el entálpico y el entrópico, de forma que aquellas reacciones exotérmicas que produzcan un aumento del desorden del sistema serán siempre espontáneas. Aquellas reacciones endotérmicas que produzcan un aumento de la ordenación del sistema serán siempre no espontáneas. En los otros casos, la espontaneidad dependerá de la temperatura, pudiéndose estimar aproximadamente a que temperatura el sistema alcanzará el equilibrio.

La variación de la energía libre de Gibbs en aquellas reacciones espontáneas nos indica cual es la cantidad de trabajo útil máximo, sin considerar el trabajo de expansión del sistema, que se puede obtener a partir de la reacción. En aquellas reacciones no espontáneas, que tengan valor positivo de la variación de la energía libre, nos indica la mínima cantidad de energía que se deberá de suministrar al sistema para que la reacción se produzca.

Que una reacción sea espontánea, quiere decir que es una reacción posible termodinámicamente, aunque puede ser tan lenta que no sea observable. La velocidad a la que se producen las reacciones químicas es estudiada por la Cinética Química.

**8. CUESTIONES, EJERCICIOS Y PROBLEMAS**

1. Considerando que los cambios de energía interna en los procesos químicos se pueden descomponer en dos (cambio de energía interna cinética y cambio de energía química), aplicad el primer principio de la termodinámica para justificar que en un sistema aislado la variación de energía química siempre ha de ser igual y de signo contrario que la variación de energía interna cinética.

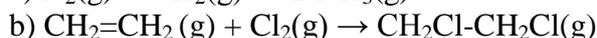
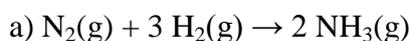
2. La cal viva (CaO), se prepara industrialmente calentando la piedra caliza (CaCO<sub>3</sub>) en hornos de cal, de acuerdo con la reacción:



Calculad la variación de la energía interna de esta reacción en condiciones estándar. ¿Qué calor es mayor, Q<sub>p</sub> o Q<sub>v</sub>? (R = 8'31 J/mol·K).

Rdo.  $\Delta U^\circ = 175'32 \text{ kJ}$ ;  $Q_p = 177'8 \text{ kJ} > Q_v = 175'32 \text{ kJ}$

3. Usad los valores de la tabla de energías de enlace para estimar la entalpia de las siguientes reacciones químicas que se producen en fase gaseosa:

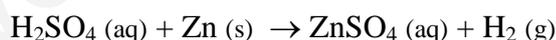


Rdo. a)  $\Delta H_r^\circ = -76 \text{ kJ/mol}$  b)  $\Delta H_r^\circ = 421 \text{ kJ/mol}$

4. Estimad el valor de la entalpia de reacción de combustión del acetileno mediante las energías de enlace y calculad, mediante las entalpias de formación, la entalpia de la misma reacción de combustión (para formar vapor de agua). Comparad los valores y reflexionad respecto del resultado obtenido.

Rdo. a)  $-997 \text{ kJ/mol}$ ;  $-1255,5 \text{ kJ/mol}$ . En este caso la diferencia es muy grande, el valor más correcto es el determinado a partir de las entalpias de formación. El valor de entalpia de combustión del acetileno es  $-1257 \text{ kJ/mol}$ .

5. Hacemos reaccionar totalmente 3,5 moles de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con el Zn necesario, según el proceso:



Determinad el trabajo exterior en los siguientes casos:

a) El proceso se realiza a volumen constante

b) El proceso transcurre en un recipiente abierto a la presión atmosférica normal y a una temperatura de 20°C.

Rdo. a) 0; b) 8518,3 J

6. Se queman 2,44 g de ácido benzoico (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COOH) en una bomba calorimétrica situada en un calorímetro y rodeada de 2 kg de agua; el calor generado en la combustión del ácido benzoico pasa al agua, que eleva su temperatura desde 25°C a 31,5 °C. ¿Cuál es el calor molar a volumen constante de combustión del ácido benzoico? (capacidad calorífica de la bomba calorimétrica 1568,3 J/K; c(H<sub>2</sub>O) = 4'18 kJ/kg·K).

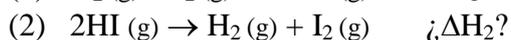
Rdo. Q<sub>v</sub> (molar) =  $-3226'7 \text{ kJ/mol}$ .

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

7. Escribid ajustada la reacción de combustión del ácido benzoico sólido para dar dióxido de carbono gaseoso y agua líquida y calculad la entalpía molar de combustión del ácido benzoico en condiciones estándar. Datos:  $\Delta U^{\circ}_{\text{comb}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = -32226,7 \text{ kJ/mol}$ ;  $R = 8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ .

Rdo.  $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}(s) + 15/2 \text{ O}_2(g) \rightarrow 7\text{CO}_2(g) + 3\text{H}_2\text{O}(l)$ ;  $\Delta H^{\circ} = -32227,9 \text{ kJ/mol}$

8. Supongamos que queremos saber la relación que existe entre la entalpía de la reacción de formación del HI(g) a partir del H<sub>2</sub>(g) y del I<sub>2</sub>(g) y la entalpía de la descomposición del HI(g) en sus elementos, que es su reacción inversa:



Utilizando el hecho de que la entalpía es una función de estado, calculad el valor de  $\Delta H_2$ . ¿Qué calor a presión constante se necesita suministrar para descomponer una mol de HI (g) en sus elementos?

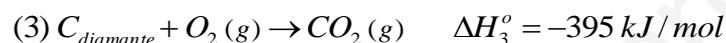
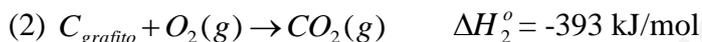
Rdo.  $\Delta H_2 = -\Delta H_1 = 23,6 \text{ kJ}$  ya que el proceso (1) + (2) es cíclico y se cumple  $\Delta H_2 + \Delta H_1 = 0$ ;

$Q_p = 11,8 \text{ kJ}$  pues al tratarse de una mol es la mitad que  $\Delta H_1$

9. El cambio de entalpía de la reacción de conversión del carbono en estado cristalino de grafito a carbono en estado cristalino de diamante es imposible de medir directamente:



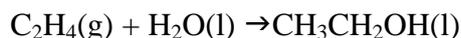
Sin embargo, conocemos las entalpías de combustión del carbono (grafito) y del carbono (diamante), que sí son accesibles a medidas experimentales en bombas calorimétricas:



Obtened el cambio de entalpía correspondiente a la reacción (1).

Rdo.  $\Delta H_1^{\circ} = 2 \text{ kJ/mol}$

10. El etanol se puede utilizar como combustible o incluso como aditivo en algunas gasolinas para mejorar su índice de octanaje. Una forma de obtener el etanol de uso industrial es mediante hidratación del eteno según la ecuación química:



Si sabemos que las entalpías de combustión del eteno y del etanol son respectivamente -1411 kJ/mol y -764 kJ/mol, calculad:

a) La entalpía de la reacción de obtención del etanol.

b) La cantidad de energía en forma de calor que es absorbida o cedida al sintetizar 100 gramos de etanol a presión constante.

Rdo.  $\Delta H_1 = -647 \text{ kJ/mol}$ ;  $Q_p = -1406,5 \text{ kJ}$

11. La primera síntesis del benceno fue realizada por Berthelot en 1868 y la consiguió haciendo pasar acetileno a través de un tubo de porcelana calentado al rojo. La ecuación correspondiente a esta reacción es:  $3 \text{C}_2\text{H}_2(g) \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6(l)$ . Determinad a partir de los valores de las entalpías de formación estándar de la tabla la variación de entalpía de esta reacción.

Rdo.  $-597,9 \text{ kJ/mol}$

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**12.** El vino se obtiene a partir de la fermentación alcohólica del mosto o zumo de la uva. La fermentación consiste en una reacción en la que los azúcares de la fruta, como la glucosa, se transforman en alcohol etílico y dióxido de carbono. La ecuación química correspondiente a la reacción de fermentación de la glucosa, es:



a) ¿Cuál será la variación de entalpía de dicha reacción? (Utilizad los valores de entalpía de formación de la tabla incluida en el tema).

b) ¿Cuánta energía mediante calor se liberará en la reacción de fermentación de la glucosa contenida en 1000 g de mosto que contiene un 15% de glucosa?

Rdo.  $\Delta H_r^\circ = -68,0 \text{ kJ/mol}$ ,  $Q_p = -56666,7 \text{ kJ}$

**13.** El ácido nítrico es un compuesto muy utilizado en la industria química para la fabricación de explosivos, fertilizantes o en el tratamiento de metales. Un método muy utilizado para obtener ácido nítrico se conoce como proceso de Ostwald en cuya primera fase se realiza la oxidación del amoníaco según la reacción en fase gaseosa:

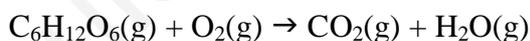


a) Calculad el calor de reacción estándar

b) Calculad el calor “absorbido” o “desprendido” cuando se mezclan 5 gramos de amoníaco con 5 gramos de oxígeno.

Rdo.  $\Delta H_r^\circ = -903,6 \text{ kJ/mol}$ ,  $Q_p = -28,2 \text{ kJ}$  (calor desprendido)

**14.** Los alimentos que ingerimos sufren un proceso de transformación en nuestro organismo por el que le proporcionan a éste la cantidad de energía necesaria para el crecimiento y las funciones vitales. La ecuación de combustión de la glucosa describe bien este proceso:



Suponiendo que la energía necesaria para una persona que mantiene una actividad ligera durante un día sea de 8200 kJ, calculad la masa de glucosa que deberá ingerir para conseguirla.

Datos:  $\Delta H_f^\circ(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = -1260,0 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \text{ kJ/mol}$

Rdo. 578,4 g

**15.** Un ciclista consume durante las carreras 20 kJ/min de energía por encima de sus necesidades normales. Calculad el volumen, de una bebida energética que contiene 50g/L de sacarosa ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), que ha de tomar para compensar las necesidades extra de energía al disputar una etapa de 6 horas.

Datos:  $\Delta H_f^\circ(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = -2225,0 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}) = -285,8 \text{ kJ/mol}$ .

Rdo. 8,73 L

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

16. Predecid de forma razonada cual será la sustancia que tendrá mayor entropía molar de cada una de las parejas propuestas:

- I<sub>2</sub>(s) y I<sub>2</sub>(g)
- Ne(g) y Ar(g)
- O<sub>2</sub>(g) y O<sub>3</sub>(g)
- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(g) y NO(g)

Rdo. I<sub>2</sub>(g); Ar(g), O<sub>3</sub>(g); C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(g)

17. Indicad razonadamente como variará la entropía en los siguientes procesos:

- a) Formación del tetracloruro de carbono: C<sub>grafito</sub> + 2 Cl<sub>2</sub>(g) → CCl<sub>4</sub>(l)
- b) Demolición de un edificio.
- c) Condensación del amoníaco gaseoso.
- d) Formación del cloruro de hidrogeno: H<sub>2</sub>(g) + Cl<sub>2</sub>(g) → 2 HCl(g)
- e) Disolución del cloruro de sodio: NaCl(s) → Na<sup>+</sup>(ac) + Cl<sup>-</sup>(ac)
- f) Enfriamiento del aire de una habitación

Rdo. ΔS>0: b,d,e.

18. Explicad, argumentando vuestras respuestas, si las siguientes reacciones son espontáneas:

- a) 2 CO(g) + O<sub>2</sub>(g) → 2 CO<sub>2</sub>(g)                      ΔH<sup>0</sup> = -566 kJ/mol
- b) 4 NH<sub>3</sub>(g) + 5 O<sub>2</sub>(g) → 4 NO(g) + 6 H<sub>2</sub>O(g)                      ΔH<sup>0</sup> = -1167 kJ/mol
- c) NH<sub>4</sub>Cl(s) → NH<sub>3</sub>(g) + HCl(g)                      ΔH<sup>0</sup> = 176 kJ/mol
- d) 3 O<sub>2</sub>(g) → 2 O<sub>3</sub>(g)                      ΔH<sup>0</sup> = 284 kJ/mol

Rdo. a) espontánea a baja temperatura; b) espontánea; c) espontánea a alta temperatura; d) no espontánea

19. Cuando el yoduro de sodio, NaI, se disuelve en agua a temperatura ambiente la mezcla se enfría espontáneamente. Explicad razonadamente qué conclusiones se pueden extraer respecto de los valores de la variación de la entalpía y de la entropía para este proceso.

Rdo. ΔH>0, ΔS>0, a temperatura ambiente |ΔH| < |T·ΔS|, cuanto mayor sea la temperatura más espontánea será la disolución del NaI.

20. La llamada “peste del estaño” es un fenómeno que se observa a bajas temperaturas consistente en que el estaño cambia su aspecto metálico, a un aspecto de sólido gris, que se desmenuza fácilmente. Esto es debido a que el estaño presenta dos formas alotrópicas<sup>8</sup>, el estaño blanco, metálico y el estaño gris semimetálico. A partir de los datos termodinámicos de la tabla determina por debajo de qué temperatura se produce la peste del estaño.

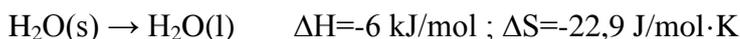
	ΔH <sup>0</sup> <sub>f</sub> (kJ/mol)	S <sup>0</sup> (J/mol·K)
Sn (blanco)	0	51,55
Sn (gris)	-2,09	44,14

Rdo. 9°C

<sup>8</sup> Formas alotrópicas, son diferentes formas de una misma sustancia que difieren en sus propiedades debido a que tienen diferentes disposiciones espaciales de las partículas.

## 8. Transferencia de energía y espontaneidad de las reacciones químicas

**21.** En la ecuación termoquímica correspondiente al proceso de congelación del agua se muestran los valores de la variación de entalpía y entropía a 0°C:

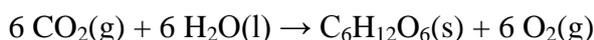


a) Explicad razonadamente por qué el agua no congela espontáneamente a 25°C y en cambio sí lo hace a -25°C.

b) Determinad la temperatura de fusión del agua.

Rdo. a)  $\Delta G(25^\circ\text{C}) = 824,2 \text{ J/mol}$ ;  $\Delta G(-25^\circ\text{C}) = -320,8 \text{ J/mol}$ . b)  $T = 273 \text{ K}$

**22.** Mediante la fotosíntesis las plantas verdes transforman el dióxido de carbono y el agua, en hidratos de carbono como la glucosa, obteniendo la energía necesaria para ello de la luz solar. La reacción se puede representar mediante la ecuación:



Utilizando los valores de entalpía y entropía necesarios (ved tablas en este mismo tema), determinad la energía mínima necesaria para la formación de 9 g de glucosa por fotosíntesis y razonad si el proceso de la fotosíntesis es un proceso espontáneo.

Rdo. 144,28 kJ; no espontáneo.

**23.** El carbonato de magnesio es un compuesto con múltiples usos (entre otras aplicaciones, es utilizado como laxante, como antiácido o como aditivo de la sal de mesa para hacerla más escuarrida). A altas temperaturas descompone según la reacción:



Sustancia	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol·K)
MgCO <sub>3</sub> (s)	-1096,2	65,7
MgO(s)	-601,6	26,8
CO <sub>2</sub> (g)	-393,5	213,7

Con los datos aportados en la tabla anterior, determinad a 298 K:

a) Calor necesario a presión constante para descomponer 140,5 g de carbonato de magnesio.

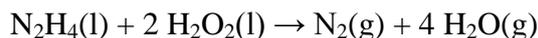
b) Ídem a volumen constante

c) Justifica si la reacción será espontánea en condiciones estándar

d) Temperatura a la cual la reacción alcanza el equilibrio.

Rdo. a)  $Q_P = 168,5 \text{ kJ}$ ; b)  $Q_V = 164,4 \text{ kJ}$ ; c) no espontánea; d) 305°C

**24.** La reacción entre la hidracina líquida N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(l) y el peróxido de hidrogeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(l) ha sido utilizada para la propulsión de cohetes. La ecuación química correspondiente a dicha reacción es:



Calculad a partir de los valores de las tablas:

a) El calor “cedido” a presión constante cuando reaccionan 100 g de hidracina con 212,5 g de peróxido de hidrogeno.

b) El máximo trabajo útil que se puede obtener por mol de hidracina de la reacción anterior.

Datos:  $\Delta H_f^\circ[\text{N}_2\text{H}_4(\text{l})] = 50,6 \text{ kJ/mol}$ ;  $S^\circ[\text{N}_2\text{H}_4(\text{l})] = 121,2 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

Rdo.  $Q_P = -158,12 \text{ kJ}$ ;  $W_{\text{útil}}(\text{máximo}) = 825,0 \text{ kJ}$

[www.yoquieroaprobar.es](http://www.yoquieroaprobar.es)

## TEMA 9. INTRODUCCIÓN A LA QUÍMICA DEL CARBONO

### INTRODUCCIÓN

A lo largo de este curso hemos estudiado con cierto detalle algunos cambios materiales (mecánicos, eléctricos y finalmente, químicos) tratando de investigar cómo ocurren unos y cómo podemos hacer que se produzcan otros que, por alguna razón, nos interesen. Para poder realizar dicho estudio hemos visto la utilidad que tiene disponer de relaciones lo más generales posible y de principios que puedan aplicarse a cualquier tipo de cambio como, por ejemplo, la conservación de la cantidad de movimiento, o la conservación de la energía de un sistema. Así mismo, nos hemos dado cuenta de la existencia de relaciones entre dominios científicos a los que durante mucho tiempo se les atribuía diferente naturaleza (como ocurrió con el calor y la energía) y hemos visto también cómo pudo superarse la barrera que durante mucho tiempo separaba a la Tierra del resto del Universo.

- ✓ ¿Por qué, para terminar el curso, vamos a plantearnos una introducción a lo que es la química del carbono?
- ✓ ¿Qué tiene de especial la química de éste elemento para merecer este estudio particular?

### 1. EL ORIGEN DE LA QUÍMICA DEL CARBONO

Las propiedades específicas de algunas sustancias orgánicas (es decir, sustancias presentes en los organismos, en la materia de la que están hechos todos los seres vivos como plantas o animales) son conocidas desde la antigüedad. A título de ejemplo, podemos mencionar el alcohol presente en el jugo de uva fermentado, el ácido acético en el vino agriado, la sacarosa, algunos colorantes naturales como el índigo, etc. Durante el siglo XVIII se aislaron también otras sustancias como el alcohol de madera (metílico), la glucosa, la lactosa, la urea (presente en la orina de los animales), el ácido úrico, etc. Sin embargo, estas sustancias siempre se habían obtenido en el laboratorio a partir de muestras procedentes de seres vivos y nunca a partir de sustancias inorgánicas.

Además de su origen distinto, los llamados compuestos orgánicos parecían ser más complejos que los inorgánicos. No es pues de extrañar que esta situación, junto a la existencia de algunas creencias religiosas, llevasen a admitir a los químicos de la época que, aunque todas las sustancias orgánicas estaban compuestas fundamentalmente por carbono e hidrógeno (elementos que también pueden encontrarse en la materia inorgánica), las leyes que regulaban su formación eran diferentes. Concretamente, se pensaba que era necesaria una “fuerza vital” para producir los compuestos orgánicos. Sólo los organismos como los animales y las plantas parecían disponer de esa fuerza vital que, de ningún modo, se hallaba presente en los tubos de ensayo ni en los demás instrumentos de un laboratorio por sofisticados que fuesen. Esta idea formó parte de una teoría llamada “Vitalismo”. De acuerdo con dicha teoría existía una **barrera infranqueable** entre las sustancias de origen mineral (inorgánicas) y las procedentes de seres vivos, por lo que cualquier intento de sintetizar en el laboratorio sustancias orgánicas a partir de otras inorgánicas estaba, condenado al fracaso.

Conviene notar que la teoría vitalista implicaba la imposibilidad de que a partir de materia inanimada (inorgánica) pudiera alguna vez haber surgido la vida (materia orgánica) de forma natural.

## 9. Introducción a la química del carbono

El vitalismo comenzó a tambalearse ya entrado el siglo XIX cuando en 1828 el químico alemán Wöhler, a los 28 años, sintetizó la urea a partir del calentamiento de un compuesto inorgánico. En una carta dirigida a su profesor Berzelius escribía al respecto:

“... Puedo producir urea sin necesidad de un riñón, sin un animal (sea una persona o un perro)...”

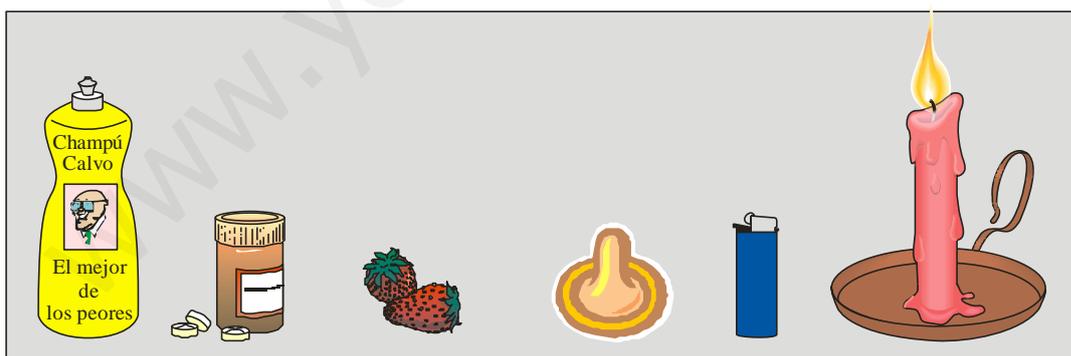
No por ello, sin embargo, se abandonó inmediatamente la teoría vitalista que persistió de una forma u otra durante unos 20 años más, mostrando así, una vez más, que no basta con que los resultados de un experimento contradigan una teoría para que ésta sea inmediatamente abandonada. Sin embargo, durante los años posteriores a la síntesis de la urea, se produjeron pronto nuevas síntesis de compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. Como, por ejemplo, la realizada por Kolbe (alumno de Wöhler) que obtuvo ácido acético a partir de los elementos constituyentes (carbono, hidrógeno y oxígeno) o las sustancias que sintetizó el químico francés Berthelot (alcohol metílico, alcohol etílico, metano, benceno, acetileno, etc.). Además, la existencia de una “fuerza vital” como explicación de un tipo de cambio, no resultaba compatible con el principio de conservación de la energía que, por aquella época, acababa de desarrollarse. Todo ello contribuyó decisivamente a que finalmente se abandonara la teoría vitalista por los científicos a la vez que comenzaba el desarrollo imparable de la química orgánica.

Superada pues la barrera que separaba la materia inorgánica de la orgánica ya no tenía sentido seguir distinguiendo entre química inorgánica y química orgánica. De hecho hoy en día se prefiere hablar de “química del carbono”, admitiéndose el término de química orgánica, aunque sin su sentido original.

*¿Por qué razón, entonces, se sigue estudiando de forma particular una química que gira en torno a un solo elemento? A continuación trataremos de dar respuesta a esta cuestión.*

## 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS COMPUESTOS DEL CARBONO

**A.1.** *¿Qué pueden tener en común una bolsa de plástico, una camisa, el colesterol, un champú, unas aspirinas, el aroma de las fresas, un preservativo, el gas de un encendedor y la cera?*



Todos los ejemplos anteriores podrían tener en común estar formados por compuestos de carbono. De hecho, desde que a mediados del siglo XIX comenzaron a sintetizarse en el laboratorio compuestos orgánicos, se han elaborado ya millones de compuestos de carbono. Muchos de ellos existen en la naturaleza donde son producidos por seres vivos (como por ejemplo vitaminas, acetona, colorantes, caucho, penicilina, etc.) pero se sintetizan en el laboratorio porque, por ejemplo, puede ser más barato que extraerlos de su fuente natural. Otros, sin embargo, no existen como tales en la naturaleza pero tienen propiedades que los hacen muy interesantes. Este es el caso, por

ejemplo, de los plásticos, con los que podemos fabricar objetos que permanecen inalterables durante mucho tiempo, son ligeros, etc., o de las fibras sintéticas con las que se fabrican muchas prendas de ropa que no precisan plancharse, etc. En la actualidad se conocen ya más de 10 millones de compuestos de carbono y cada año se obtienen miles de productos nuevos, con las más diversas aplicaciones, desde unas botas impermeables a base de gore-tex hasta píldoras anticonceptivas conteniendo hormonas sintéticas.

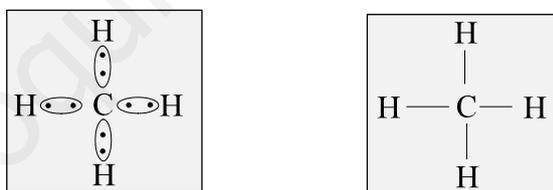
De acuerdo con lo anterior, una característica fundamental del átomo de carbono, que lo hace especial, frente a los restantes, es su extraordinaria capacidad para combinarse. La explicación de dicha capacidad se deberá, en parte, a su estructura electrónica.

### 2.1. Estructura electrónica del átomo de carbono

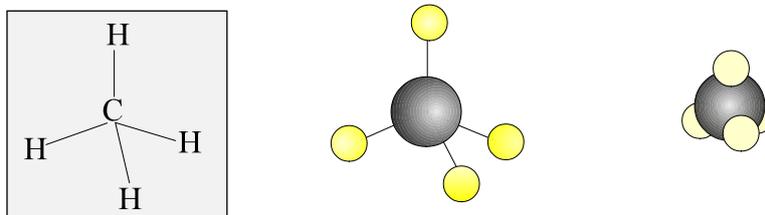
Como ya sabemos los seis electrones de que consta el átomo de carbono, están distribuidos de forma que hay sólo dos en un primer nivel de energía (electrones internos) y los cuatro restantes en un segundo nivel más externo (electrones de valencia). Por tanto le faltan cuatro electrones para completar su octeto. Ello, unido a la posición central que ocupa en el sistema periódico (alejada de los elementos más metálicos y más no metálicos) hace que este elemento se caracterice por la formación de enlaces covalentes por compartición de los electrones del carbono C con los de otros elementos, de los que difiere poco en electronegatividad, o incluso con el mismo.

*A.2. El carbono y el hidrógeno, por ejemplo, tienen electronegatividades casi idénticas por lo que el enlace entre ambos elementos será muy covalente. Predecir cómo se realizará dicho enlace en la molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ) y que direcciones cabe esperar que formen entre sí los pares de electrones enlazados (es decir, los enlaces C-H).*

De acuerdo con la fórmula del metano se darán cuatro enlaces covalentes simples entre el carbono y el hidrógeno. Podemos representar la molécula como:



No obstante, debido a la repulsión eléctrica existente entre los cuatro pares de electrones de enlace, cada par se situará lo más alejado posible de los restantes, lo que permite comprender la forma tetraédrica que realmente presenta la molécula de metano. En los esquemas siguientes se dan tres posibles representaciones espaciales de dicha molécula.



El carbono puede formar enlaces covalentes no sólo con el hidrógeno sino también con él mismo y con otros elementos formando así cadenas abiertas o cerradas que dan lugar a un gran número de compuestos distintos, que luego trataremos.

## 9. Introducción a la química del carbono

### 2.2. Estabilidad de los compuestos de carbono

Otro de los rasgos diferenciales de la química del carbono, es la gran estabilidad del enlace C-C, que resulta ser el segundo enlace más fuerte entre dos átomos iguales que comparten un par de electrones (sólo superado por el enlace H-H). Se trata de enlaces dirigidos, con los electrones de enlace muy localizados en una determinada zona y entre átomos de un tamaño muy pequeño que o no tienen electrones internos (caso del H) o tienen sólo 2 (caso del C). Todo ello explica que sea posible la existencia de compuestos de carbono estables con largas cadenas, de forma que algunas moléculas pueden contener 100 o más carbonos enlazados.

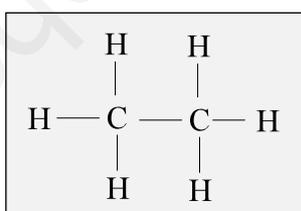
Conviene tener en cuenta que a pesar de la gran estabilidad de los enlaces C-C y C-H, en condiciones ambientales ordinarias las sustancias orgánicas tienen, generalmente, bajos puntos de fusión y de ebullición. A ello contribuye el hecho de que los enlaces anteriores son muy poco polares lo que causa que las débiles fuerzas de atracción entre moléculas (enlaces intermoleculares) sean fundamentalmente, fuerzas de London.

### 2.3. Capacidad de combinación del carbono con otros elementos y consigo mismo.

El carácter tan especial de la química del carbono proviene fundamentalmente de su enorme capacidad para la formación de compuestos. La presencia de un número tan grande de compuestos de carbono en la naturaleza hace posible que exista una variación muy gradual de propiedades al pasar de unas sustancias a otras, lo que puede hacer que las cantidades de energía que se ven implicadas en dichos cambios no sean muy grandes. No es pues de extrañar que la vida esté asociada al carbono.

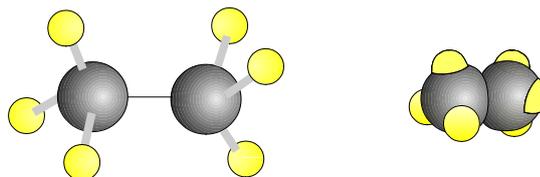
*A.3. Escribid la fórmula desarrollada de un posible compuesto de carbono e hidrógeno formado sólo por dos átomos de carbono.*

En este caso habría que enlazar entre sí a dos átomos de carbono y completar los enlaces restantes con átomos de hidrogeno, lo que nos conduciría a una representación como la siguiente:

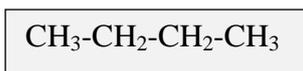


El compuesto anterior se conoce como etano. Para simplificar se suele dar de forma “semidesarrollada”, indicando únicamente los enlaces C-C, es decir:  $\text{CH}_3\text{-CH}_3$

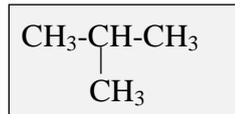
Recordando la distribución espacial de los cuatro enlaces covalentes del carbono, la molécula anterior se puede representar también como:



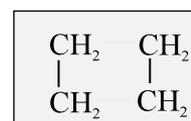
Cuando el número de carbonos aumenta, existe también la posibilidad de cadenas ramificadas o incluso cerradas (ciclos), como los dos ejemplos que se exponen a continuación utilizando las fórmulas semidesarrolladas correspondientes para varios compuestos con 4 átomos de carbono:



butano



metilpropano



ciclobutano

Tanto el butano como el metilpropano tienen la misma fórmula molecular ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), sin embargo se trata de dos compuestos distintos, con una estructura y propiedades diferentes. Se dice entonces que son **isómeros**.

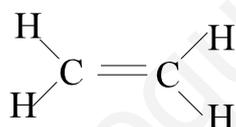
**A.4.** *Teniendo en cuenta la posibilidad de formar cadenas abiertas y cerradas (ciclos), ramificadas o no, escribid las fórmulas semidesarrolladas de todos los compuestos (de carbono e hidrógeno) con cinco átomos de carbono ligados por enlaces simples y decid cuáles son isómeros. (Ignorad el ciclo de tres carbonos ya que no es un compuesto estable).*

Rdo. Cuatro compuestos estables diferentes, de los cuales hay tres que son isómeros.

Como vemos, las posibilidades de combinación del carbono aumentan al elevar el número de átomos enlazados. No obstante no acaban ahí ya que también es posible la existencia de dobles y de triples enlaces.

**A.5.** *Construid las posibles fórmulas desarrolladas de los compuestos  $\text{C}_2\text{H}_4$  (etileno) y  $\text{C}_2\text{H}_2$  (etino) teniendo en cuenta que se trata de compuestos estables en los que se cumple la regla del octeto.*

Dado que no se dispone de bastantes hidrógenos para completar la tetravalencia del carbono, habrá que pensar en un doble enlace  $\text{-C=C-}$  para  $\text{C}_2\text{H}_4$  y uno triple  $\text{-C}\equiv\text{C-}$  para  $\text{C}_2\text{H}_2$

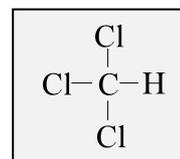


Las fórmulas semidesarrolladas para los compuestos anteriores serían respectivamente:

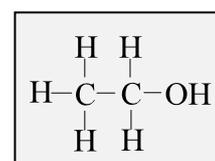
Eteno:  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  y Etino:  $\text{CH}\equiv\text{CH}$

Hasta ahora sólo hemos visto posibilidades de combinación del carbono consigo mismo y con el hidrógeno mediante unos pocos ejemplos. Sin embargo, también es posible la intervención de otros átomos o grupos de átomos con lo que dichas posibilidades se amplían todavía más.

Así, por ejemplo, es posible sustituir 3 hidrógenos del metano por átomos de cloro y obtener el compuesto llamado triclorometano (o cloroformo) usado hace años como anestésico.



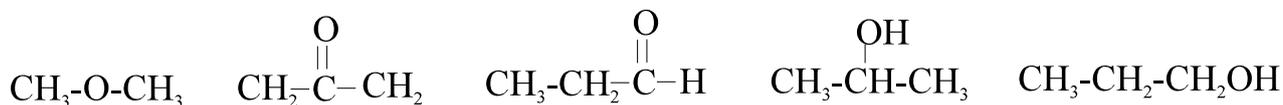
O bien sustituir un átomo de hidrógeno del etano por un grupo OH y obtener un alcohol (etanol), que forma parte de todas las bebidas alcohólicas y que se usa también como desinfectante:



## 9. Introducción a la química del carbono

**A.6.** Utilizando tres átomos de carbono, uno de oxígeno y los hidrógenos necesarios, escribid las fórmulas semidesarrolladas de todos los posibles compuestos distintos constituidos por estos tres elementos.

Recordad que el átomo de oxígeno tiene dos electrones en su último nivel de energía, los cuales puede compartir con electrones de un átomo de carbono formando así un enlace doble. También cabe la posibilidad de que se una mediante dos enlaces covalentes simples a dos átomos de carbono diferentes, o a un átomo de carbono y otro de hidrógeno. Todo ello nos lleva a proponer:



Una vez que hemos podido apreciar la especificidad del átomo de carbono y su extraordinaria capacidad de combinación para dar lugar a muchísimos compuestos, cabe plantearse:

- ✓ Si se conocen tantos compuestos del carbono ¿cómo proceder a realizar un estudio racional de los mismos?, ¿se podrán agrupar en unos pocos tipos según un comportamiento químico similar?, ¿cómo los distinguiremos y los nombraremos?
- ✓ Entre tanta variedad de compuestos habrá también un gran número de aplicaciones distintas ¿podremos ver algunas de ellas?
- ✓ ¿De dónde se extrae la materia prima para obtener los compuestos del carbono?
- ✓ Hemos visto algún ejemplo de compuestos que siendo distintos tienen la misma fórmula molecular (isómeros). ¿Está muy extendido este fenómeno? ¿Existen distintos tipos de isomería?
- ✓ ¿Qué efectos sobre el medio ambiente y la sociedad está teniendo el hecho de la fabricación y uso de tantos compuestos de carbono?

### 3. COMPUESTOS DE CARBONO E HIDRÓGENO (HIDROCARBUROS)

Los hidrocarburos son compuestos formados exclusivamente por carbono e hidrógeno. Sus moléculas pueden tener cadenas de átomos de carbono en forma lineal (abierta) o cíclica (cerrada) y enlazados a dichos carbonos se encuentran los átomos de hidrógeno.

**A.7.** Elaborad una lista con sustancias que sean hidrocarburos o mezclas de hidrocarburos.

Entre las sustancias que pueden citarse algunas son de enorme importancia, basta pensar, por ejemplo en combustibles como la gasolina, el gasoil, etc. y su utilización en la automoción; o en el butano, o el gas ciudad y su uso doméstico para cocinar o para calefacción; en el queroseno utilizado en los motores a reacción; en aceites lubricantes; plásticos como el polietileno, etc.

Dentro de los hidrocarburos de cadena abierta (es decir, no cíclicos), podemos clasificarlos según tengan sólo enlaces simples C-C (hidrocarburos **saturados**) o incluyan enlaces dobles o triples (hidrocarburos **insaturados**). Comenzaremos por los primeros.

#### 3.1. Hidrocarburos saturados de cadena abierta

En este tipo de hidrocarburos todos los átomos de carbono forman cuatro enlaces covalentes simples, bien sea con otros átomos de carbono de la cadena o con átomos de hidrógeno. Reciben el nombre de “alcanos” o “parafinas”.

En la tabla siguiente se dan las fórmulas semidesarrolladas, el nombre y los puntos de fusión y ebullición de los seis primeros elementos de la serie.

Fórmula	Nombre	T. fusión °C	T. ebullición °C
CH <sub>4</sub>	Metano	-182	-162
CH <sub>3</sub> -CH <sub>3</sub>	Etano	-183	-89
CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Propano	-188	-42
CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Butano	-138	-1
CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> -CH <sub>3</sub>	Pentano	-130	36
CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> -CH <sub>3</sub>	hexano	-95	69

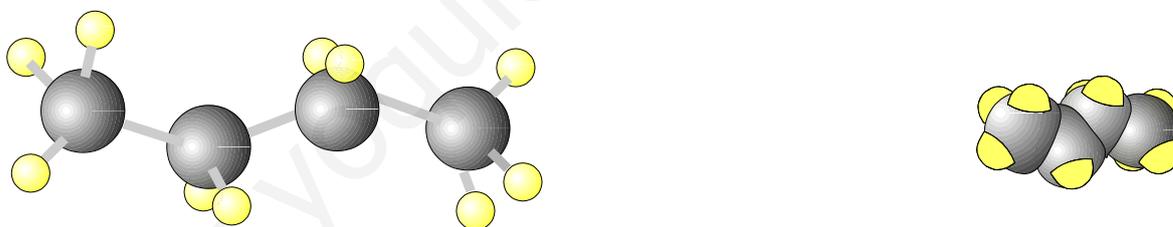
Como podéis comprobar, a partir del butano, los nombres se construyen mediante un prefijo indicativo del número de carbonos (*penta*, *hexa*, *hepta* ...) seguido del sufijo *-ano*.

**A.8.** A la vista de la serie anterior deducir cuál será la fórmula general de los alcanos

Analizando el número de carbonos y de hidrógenos presentes en cada una de las moléculas de los compuestos de la tabla, se puede ver que el número de hidrógenos presentes siempre es igual al de carbonos más dos, de forma que si llamamos *n* al número de carbonos, la fórmula general para los alcanos será: C<sub>*n*</sub>H<sub>2*n*+2</sub>

**A.9.** ¿Cuál será la fórmula molecular de un alcano con 29 átomos de carbono?

Por otra parte, no hay que confundir cadena **lineal** con cadena **recta**, ya que debido a la orientación tetraédrica de los enlaces de carbono, la cadena en realidad es zigzagueante, como se puede comprobar en las representaciones de la molécula de butano que se dan a continuación:



En cuanto a las propiedades de los alcanos, comenzaremos señalando que dado que el carbono y el hidrógeno tienen electronegatividades muy parecidas, las moléculas son poco polares y por tanto no son solubles en disolventes polares como el agua pero sí en disolventes apolares como el benceno, el tetracloruro de carbono, etc. De hecho, muchas plantas obtienen importantes ventajas de la insolubilidad de los alcanos en agua. En efecto, muchas veces hemos podido comprobar el

brillo que adquiere una manzana al ser frotada con un paño. Esto se debe a las ceras (alcanos C<sub>27</sub>H<sub>56</sub> y C<sub>29</sub>H<sub>60</sub>) que recubren su piel. Análogamente ocurre en otros muchos frutos y hojas. La función principal de esos alcanos es disminuir la pérdida de agua, formando una película impermeable.

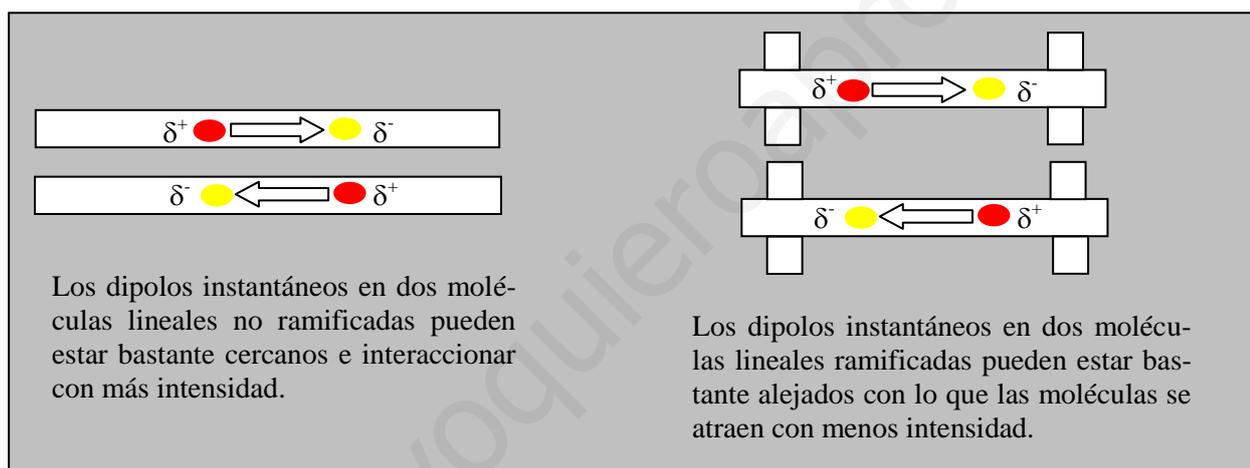
**A.10.** En la tabla anterior en la que se dan los puntos de fusión y ebullición de los seis primeros alcanos, se observa una tendencia general a que éstos vayan aumentando conforme vamos avanzando en la serie. ¿A qué puede ser debido este efecto?

## 9. Introducción a la química del carbono

Al ir avanzando en la serie vamos añadiendo grupos  $-\text{CH}_2-$  con lo que la cadena se alarga aumentando la masa molecular. Dada la poca polaridad que hay en las moléculas de estos compuestos, las fuerzas de London serán las dominantes. Recordemos que, tal y como se estudió en el capítulo sobre el enlace químico, dichas fuerzas se deben a la formación de dipolos instantáneos y su intensidad aumenta, en general, con la masa molecular. Todo ello permite explicar que los cuatro primeros alcanos sean gases en condiciones ordinarias de presión y temperatura, mientras que desde  $\text{C}_5$  hasta  $\text{C}_{18}$  son líquidos y cuando la cadena tiene más de 18 átomos de carbono, los compuestos son sólidos de bajo punto de fusión y aspecto ceroso (ceras de parafina). A partir de  $\text{C}_{35}$ , son sólidos blandos (asfalto).

Otra cuestión importante es la influencia de la existencia de ramificaciones en la cadena, en los puntos de fusión y ebullición. *¿Cómo pensáis que podría ser dicha influencia?*

Los alcanos de cadena no ramificada, tienden a tener mayores puntos de fusión y ebullición que **sus correspondientes isómeros** ramificados. Dicha diferencia se puede atribuir a que las fuerzas de London serán más intensas en las cadenas lineales porque los dipolos instantáneos que se formen estarán más cercanos y se atraerán más. Por el contrario, la existencia de radicales impide el acercamiento de todos los átomos por lo que las fuerzas de London serán menores. En la figura siguiente se intenta clarificar mediante esquemas el razonamiento anterior.



En general, dadas dos moléculas de la misma masa pero de diferente forma, será la más pequeña o compacta de las dos la que presentará fuerzas de London menos intensas, ya que los electrones tendrán menor libertad de movimiento. Así, el  $\text{SF}_6$  (cuyas moléculas son pequeñas, compactas y simétricas) hierve a  $-64\text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que el  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  (de la misma masa molecular pero de forma cilíndrica y con un volumen mucho mayor, hierve a  $174\text{ }^\circ\text{C}$ ).

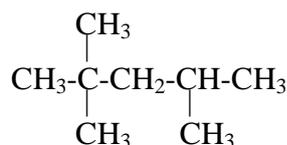
En cuanto a las propiedades químicas de los alcanos, éstos son poco reactivos debido precisamente al carácter saturado de sus enlaces intramoleculares y a la estabilidad de los mismos. Sin embargo, a temperaturas altas pueden reaccionar con el oxígeno (arder) dando siempre dióxido de carbono y agua. Esta reacción de **combustión** de los alcanos tiene una importancia extraordinaria y de hecho constituye su uso más generalizado (como combustibles) ya que mediante dichas reacciones de combustión es posible transferir grandes cantidades de energía interna química (existente en las moléculas de los alcanos) a otros sistemas (mediante trabajo y/o calor) y conseguir así mover vehículos, aumentar la temperatura ambiente en las casas, cocinar alimentos, etc.

**A.11.** *Escribid las ecuaciones química, debidamente ajustadas, correspondientes a las reacciones de combustión de los cuatro primeros hidrocarburos de la serie de los alcanos.*

La contestación de la cuestión planteada lleva a escribir:



En las reacciones de combustión de los alcanos, se requiere cierta energía para iniciar el proceso (energía de activación) que podemos conseguir mediante una llama o chispa, pero una vez comenzada, al ser la reacción muy exotérmica, prosigue espontáneamente. Experimentalmente se comprueba que si los hidrocarburos tienen ramificaciones se queman más suavemente en los motores de explosión que si no las tienen. En efecto, los hidrocarburos de cadena lineal, detonan prematuramente (antes de que la mezcla de hidrocarburos y aire haya alcanzado la compresión deseada y salte la chispa en la bujía para provocar la combustión) y producen un ruido característico llamado “detonación”. Esas explosiones a destiempo alteran el buen funcionamiento del motor. El hidrocarburo de mejor comportamiento antidetonante es el 2,2,4-trimetilpentano, llamado también isoctano. Por el contrario, el hidrocarburo con típico comportamiento detonante es un compuesto de cadena no ramificada llamado heptano.



2,2,4-trimetilpentano

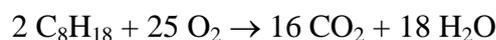


heptano

Como sabéis existen distintos tipos de gasolina (90, 96, octanos, etc.). La gasolina es una mezcla de hidrocarburos y ese número de octanos indica precisamente, el volumen de isoctano que debería de mezclarse con heptano para igualar las propiedades antidetonantes de dicho combustible. Así una gasolina de 96 octanos tiene las mismas características antidetonantes que una mezcla de isoctano y heptano con un 96% (en volumen) de isoctano y un 4% de heptano.

**A.12.** *La gasolina es una mezcla de hidrocarburos la mayor parte de ellos formados por moléculas que de 5 a 10 átomos de carbono cada una. Uno de los principales componentes de la gasolina es el isoctano ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ). Suponiendo que en un depósito existan 31'92 litros de este hidrocarburo (densidad  $0'7 \text{ g/cm}^3$ ), se pide: a) ¿Cuántos litros de aire en condiciones normales se precisan para quemarlo completamente? (en el aire hay aproximadamente un 20 % de oxígeno). b) ¿Cuántos kg de  $\text{CO}_2$  se emitirán a la atmósfera en el proceso anterior?*

En este problema nos piden, primeramente, cuántos litros de aire serán necesarios para quemar un cierto volumen de un hidrocarburo que se encuentra en fase líquida. Dado que todos los hidrocarburos cuando se queman dan dióxido de carbono y agua, lo primero que hemos de hacer es escribir la ecuación química ajustada correspondiente a dicho proceso:



## 9. Introducción a la química del carbono

Así pues, cada 2 moles de isooctano que reaccionen lo harán con 25 moles de moléculas de oxígeno para dar 16 moles de moléculas de dióxido de carbono y 18 moles de moléculas de agua.

El oxígeno necesario para la combustión se encuentra en el aire y todo el isooctano se quemará. Una forma de resolver el problema será hallar en primer lugar la cantidad de isooctano en moles que se va a quemar y, a continuación, utilizando la ecuación química ajustada, hallar los moles de oxígeno necesarios. Una vez que sepamos cuántos moles de oxígeno se han empleado será sencillo averiguar (con la ecuación de los gases) el volumen en litros que ocupan (en las condiciones de presión y temperatura especificadas) y de ahí el volumen de aire correspondiente.

Si llamamos  $n$  al número de moles de isooctano,  $m$  a su masa en gramos y  $M$  a su masa molar (gramos/mol),  $n = m/M$ , siendo  $M = 114$  g/mol.

La masa de isooctano no la conocemos directamente, pero podemos determinarla con facilidad ya que sabemos el volumen  $V$  y la densidad “ $d$ ” de modo que  $m = d \cdot V = 700 \cdot 31,92 = 31920$  g. (Hemos puesto la densidad en g/l para obtener el volumen en litros).

Sustituyendo en  $n = m/M$  obtenemos  $n = 31920/114 = 280$  moles de isooctano.

De acuerdo con la proporción en que se combinan los moles (según la ecuación química ajustada será:  $\frac{n_{O_2}}{n_{C_8H_{18}}} = \frac{25}{2} = 12,5$ ), para quemar 280 moles de isooctano se habrán empleado 12,5 veces más moles de oxígeno es decir:  $n_{O_2} = 12,5 \cdot n_{C_8H_{18}} = 12,5 \cdot 280 = 3500$  moles.

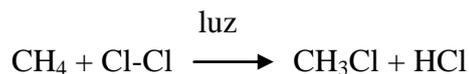
Dado que un mol de cualquier gas en condiciones normales, ocupa un volumen de 22,4 litros, el volumen de oxígeno en litros que se ha empleado será:  $V_{O_2} = 3500 \cdot 22,4 = 78400$  l de oxígeno.

Ahora bien, en el enunciado se nos pide volumen de aire. Como resulta que el aire contiene un 20 % de oxígeno, el volumen de oxígeno obtenido será precisamente el 20% del volumen de aire que queremos obtener, esto es:

$V_{O_2} = 0,20 \cdot V_{\text{aire}}$  de donde obtenemos finalmente que  $V_{\text{aire}} = V_{O_2}/0,20 = 78400/0,20 = 392000$  litros de aire en condiciones normales.

*Comprobad que se producirán 98,56 kg de CO<sub>2</sub> y estimad qué supone eso en un mundo con 1000 millones de automóviles circulando y sus consecuencias sobre la naturaleza.*

Los hidrocarburos saturados también pueden reaccionar con los halógenos (como el cloro o el bromo) en determinadas condiciones (**halogenación**). En efecto, si se mezcla un alcano con cloro gaseoso en un lugar oscuro no tiene lugar ningún cambio, pero si se hace en presencia de la luz solar se produce una reacción exotérmica en la que uno o más átomos de hidrógeno del alcano son sustituidos por átomos de cloro. Así, por ejemplo:



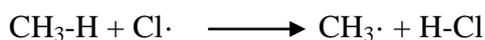
Si hay exceso de halógeno, la reacción puede continuar formándose productos cuyas moléculas contienen varios átomos de halógeno. Así si hacemos reaccionar metano con cloro en exceso puede dar moléculas con dos o más átomos de cloro.

La halogenación de los alcanos tiene lugar mediante un mecanismo de formación de radicales, iniciándose con la partición de la molécula de halógeno (por ejemplo  $\text{Cl}_2$ ) por medio de la luz, es decir:

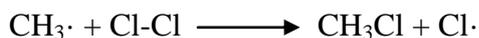


(En el esquema anterior, para representar a cada radical cloro, sólo hemos representado el electrón que se comparte. No hemos incluido los 6 electrones restantes de valencia que le acompañarían). El enlace Cl-Cl es más débil que el C-C y el de C-H, por lo que se rompe más fácilmente.

A continuación un radical cloro  $\text{Cl}\cdot$  ataca a la molécula de hidrocarburo (por ejemplo  $\text{CH}_4$ ) según:



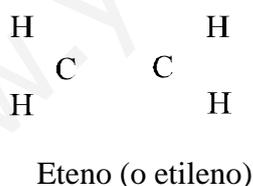
La reacción anterior es posible debido a que los radicales  $\text{Cl}\cdot$  son muy reactivos (tienen siete electrones en el último nivel de energía y sólo le falta uno para tener estructura electrónica estable de gas noble). Análogamente, el radical  $\text{CH}_3\cdot$  formado, también es muy reactivo y si choca con una molécula de cloro ocurrirá que:



El radical cloro formado puede atacar a otra molécula de metano, repitiéndose así el proceso.

### 3.2. Hidrocarburos insaturados de cadena abierta

En este tipo de hidrocarburos existen dobles y triples enlaces entre átomos de carbono de modo que habrá menos enlaces C-H que en los hidrocarburos saturados de igual número de átomos de carbono. En el caso de doble enlace el más sencillo es el eteno o etileno ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ). En el caso del triple enlace, el más sencillo es el etino o acetileno ( $\text{CH}\equiv\text{CH}$ ). Durante este curso nos limitaremos a estudiar aquellas moléculas en las que existe únicamente una insaturación (un solo doble enlace o un solo triple enlace). Las fórmulas moleculares desarrolladas serán:



Etino (o acetileno)

Los hidrocarburos que contienen un doble enlace  $-\text{C}=\text{C}-$  se denominan **alquenos** y los que contienen un triple enlace  $-\text{C}\equiv\text{C}-$  **alquinos**. El nombre de un hidrocarburo insaturado se obtiene cambiando la terminación -ano del alcano correspondiente por la de -eno (para los alquenos) y por la terminación -ino (para los alquinos).

#### A.13. Escribid las fórmulas semidesarrolladas correspondientes al propeno y al propino

En este caso hemos de colocar respectivamente un doble enlace y un triple enlace siendo indiferente colocarlo a la derecha o a la izquierda del carbono central (es la misma molécula vista desde delante o desde atrás).

## 9. Introducción a la química del carbono

Propeno:  $\text{CH}_3\text{-CH=CH}_2$

Propino:  $\text{CH}_3\text{-C}\equiv\text{CH}$

Para las moléculas con más de tres átomos de carbono la posición del doble o triple enlace puede variar dando lugar a diferentes compuestos (aunque con la misma fórmula molecular). Además también puede haber radicales. (Ved anexo sobre formulación y nomenclatura en química orgánica). Para nombrar un compuesto que tiene un doble o un triple enlace se numera la cadena carbonada comenzando por el extremo más cercano a la insaturación y luego se indica el carbono de menor numeración entre los que se encuentra la insaturación.

**A.14.** De los compuestos siguientes señalad cuál sería el 1-buteno y el 2-buteno. ¿Cuál sería la fórmula molecular en cada caso?

$\text{CH}_2=\text{CH-CH}_2\text{-CH}_3$

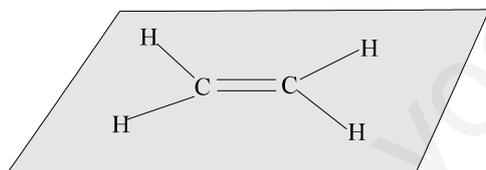
$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH}_3$

Rdo. El primero es el 1-buteno y el segundo el 2-buteno. La fórmula molecular es  $\text{C}_4\text{H}_8$  en ambos compuestos, por lo que se trata de dos isómeros.

**A.15.** Escribid las fórmulas semidesarrolladas del 1-penteno y 2-penteno. Razonad por qué no puede existir el 3-penteno. Comprobad que la fórmula molecular de dichos compuestos es la misma.

Rdo. El 3-penteno no puede existir porque su molécula sería la misma que 2-penteno pero vista desde el otro lado.

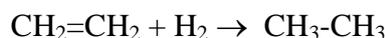
Los dobles y triples enlaces presentan algunas características especiales muy diferentes a las de un enlace simple. Para empezar, son mucho más rígidos, lo que hace que, a diferencia de lo que ocurre con un enlace simple, la rotación alrededor de ellos no sea posible. Esto, hace que, por ejemplo, la molécula de etileno no adopte ninguna otra forma que no sea la plana, mientras que la del acetileno será de forma lineal (como una especie de cilindro alargado).



Algunas propiedades de los hidrocarburos insaturados son parecidas a las de los saturados, así, por ejemplo, son poco polares con lo que tampoco son solubles en agua y sí lo son en disolventes orgánicos tipo benceno. Su combustión también produce  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Sin embargo, los hidrocarburos insaturados son más reactivos. Esto se debe fundamentalmente a la naturaleza de los dobles y triples enlaces que, en determinadas reacciones se pueden romper y formar enlaces simples.

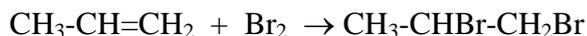
**A.16.** Escribid la reacción de adición de hidrógeno al etileno para obtener etano.

En presencia de un catalizador y a temperatura elevada, el hidrógeno puede añadirse a la molécula y ésta convertirse en un alcano:



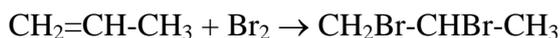
**A.17.** Si ponemos en un tubo de ensayo unos cuantos  $\text{cm}^3$  de gasolina y añadimos unas gotas de bromo disuelto en tetracloruro de carbono (disolución de color rojo) se observa cómo rápidamente las gotas de disolución que añadimos se decoloran ¿A qué cabe atribuir este efecto?

La explicación es que en la mezcla compleja de hidrocarburos que es la gasolina, existen hidrocarburos insaturados y que las moléculas de bromo se rompen de forma que los átomos de bromo se adicionan a las insaturaciones. Así, por ejemplo, en el caso del propeno, la reacción sería:



*A.18. Determinad el volumen de bromo de densidad 3'19 g/cm<sup>3</sup> necesario para saturar completamente 53 g de propeno.*

La ecuación química correspondiente a la reacción del propeno con el bromo viene dada por:



De acuerdo con ella cada mol de moléculas de propeno que reacciona lo hace con un mol de moléculas de bromo y se obtiene un mol de moléculas de 1,2-dibromopropano.

En el problema nos preguntan qué volumen de bromo se precisará para que reaccionen totalmente 53 g de propeno. Una forma de obtenerlo es averiguar en primer lugar cuántos moles de propeno hay en esos 53 g y después utilizar las relaciones molares de la ecuación química para obtener las moles de bromo necesarias. Finalmente, se trataría de averiguar la masa de bromo correspondiente a dicha cantidad de moles y con ella (y la densidad) el volumen pedido.

$$n^\circ \text{ de moles de C}_3\text{H}_6 = \text{masa(g)}/\text{masa molar (g/mol)} = 53/42 = 1'5 \text{ moles}$$

Como por cada mol de propeno que reacciona, se utiliza también una mol de bromo, concluimos que se habrán empleado 1'5 moles de bromo.

$$\text{La masa de bromo será: masa de bromo} = n^\circ \text{ moles} \cdot \text{masa molar} = 1'5 \cdot 159'8 = 239'7 \text{ g}$$

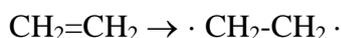
$$\text{Para obtener el volumen de bromo, aplicamos: } V = m/d = 239'7/3'19 = 75'1 \text{ cm}^3$$

En cuanto a la combustión, los hidrocarburos insaturados arden en el aire de forma similar a los saturados, produciendo también CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Particularmente interesante al respecto es el caso del acetileno que arde produciendo una llama que puede alcanzar los 3000 °C por lo que se emplea para trabajos de soldadura y corte de metales.

*A.19. Haciendo reaccionar carburo de calcio puro (CaC<sub>2</sub>) con agua en exceso, se obtuvo acetileno e hidróxido de calcio. El acetileno obtenido se quemó completamente recogiendo 841 cm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> medidos a 1 atmósfera y 20 °C. Con estos datos obtened la masa en gramos de carburo de calcio que se utilizó.*

Rdo. Se utilizaron 3'36 g de carburo de calcio

Una propiedad muy importante de los hidrocarburos insaturados es la **polimerización**. Un polímero es una sustancia cuyas moléculas se han formado por unión de muchas unidades menores idénticas entre sí, llamadas monómeros. Así, por ejemplo, una molécula de etileno, en determinadas condiciones, puede enlazarse con otra. En general este proceso comienza con la apertura de un doble enlace:

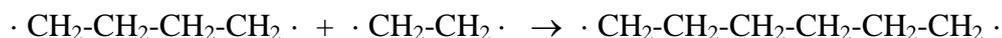


## 9. Introducción a la química del carbono

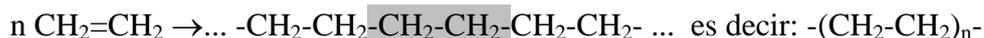
Si se encuentran dos moléculas podrán formar un enlace covalente:



Al producto resultante se le puede añadir otra molécula de etileno:



Y seguir así sucesivamente dando lugar a un polímero llamado polietileno formado por moléculas con un número “n” de monómeros. El proceso se puede resumir como:



donde para destacarlo hemos sombreado el monómero correspondiente.

El polietileno se emplea en la fabricación de tejidos sintéticos, juguetes, recubrimiento de alambres y cables, recipientes para embalaje, etc. Sus propiedades son muy distintas de las del monómero que lo forma (el etileno).

**A.20.** Otro ejemplo de polímero es el llamado policloruro de vinilo, vulgarmente conocido como PVC. En este caso el monómero es el cloruro de vinilo  $\text{ClCH}=\text{CH}_2$ . Escribid esquemáticamente la estructura del PVC.

Aquí, n de  $\text{CHCl}=\text{CH}_2$  darían  $\dots \text{-CHCl-CH}_2\text{-CHCl-CH}_2\text{-CHCl-CH}_2\text{-} \dots$  es decir:  $\text{-(CHCl-CH}_2\text{)}_n\text{-}$

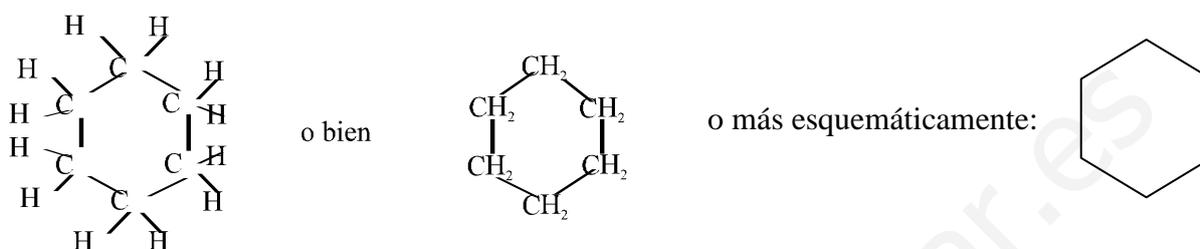
La fabricación a escala industrial de PVC es objeto de una viva polémica presente incluso en los medios de comunicación. Sus detractores afirman que su obtención conlleva la utilización de sustancias peligrosas para la salud y el medio ambiente, como es el propio cloruro de vinilo. Por otra parte, los cambios químicos necesarios requieren mucha energía ya que, entre otras cosas, se ha de separar el cloro del sodio al que se encuentra unido en el compuesto cloruro de sodio mediante fuertes enlaces de tipo iónico. Además, un producto hecho de PVC puede contener aditivos tóxicos, como el plomo o el cadmio. Los productos con PVC son muy numerosos: en la construcción se utiliza para fabricar persianas, marcos de ventanas y puertas, tuberías, revestimientos, muebles de jardín, etc. Cuando, pasado el tiempo, estos productos van a parar a escombreras o vertederos, liberan poco a poco los aditivos tóxicos que contienen, contaminando el suelo y el agua. Si se queman, el cloro que contienen puede reaccionar y dar lugar a cloruro de hidrógeno (corrosivo) y otras sustancias altamente tóxicas. Muchos envases (botellas de agua, aceite, vinagre, etc.), vasos, platos, etc., de plástico, son de PVC. Actualmente, muchas empresas embotelladoras de agua, han dejado de utilizar PVC en sus envases.

Existen multitud de polímeros de propiedades muy diversas que vienen determinadas por el tamaño inusualmente grande de sus moléculas así como por los átomos o grupos de átomos distintos al carbono e hidrógeno que puedan contener. Además del polietileno, existen otros polímeros de hidrocarburos como, por ejemplo, el caucho natural que es un polímero de un hidrocarburo insaturado. Por otra parte, además del PVC existen también otros muchos plásticos que también son polímeros y que tienen muchos tipos de uso. Pensemos, por ejemplo, en su utilización como bolsas, como parte de los vehículos, en la construcción de invernaderos para la agricultura, juguetes, material eléctrico, deportivo, etc. La mayor parte de la química orgánica que se realiza a escala industrial se dedica a la fabricación de polímeros.

### 3.3. Hidrocarburos cíclicos

Este grupo de hidrocarburos se caracteriza por tratarse de compuestos en cuyas moléculas existe al menos un anillo formado por la unión de 3 o más carbonos. Cuando se trata de un hidrocarburo saturado nos encontramos ante un cicloalcano.

Uno de los cicloalcanos más importantes es el ciclohexano ( $C_6H_{12}$ ) muy utilizado como disolvente de otras sustancias orgánicas. Los esquemas siguientes corresponden a distintas formas de representar la molécula de ciclohexano.



**A.21.** Representad lo más esquemáticamente posible las moléculas de los compuestos siguientes: Ciclopropano, ciclobutano, ciclopentano, cicloheptano y ciclooctano.

**A.22.** La fórmula general de los alcanos es, como ya hemos visto,  $C_nH_{2n+2}$  ¿Cuál es la fórmula general de los cicloalcanos? Rdo.  $C_nH_{2n}$

Las propiedades físicas de los cicloalcanos son similares a los de los alcanos de cadena abierta. (No son solubles en agua y sí en disolventes orgánicos, son poco reactivos, se combinan con el oxígeno dando reacciones exotérmicas (combustión), en presencia de la luz solar pueden experimentar reacciones de halogenación, etc.

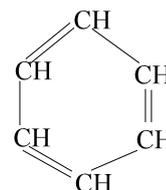
Un tipo de hidrocarburos cíclicos de especial importancia es el grupo de los hidrocarburos aromáticos. Durante la edad media y aún mucho después, se comerciaba con especias y se utilizaban muchas hierbas en medicina. No es pues de extrañar que estos productos se estudiaran por los químicos con el fin de extraer de ellos las esencias con las fragancias, sabores o propiedades curativa, ya que si se conseguía determinar su estructura podía pensarse en sintetizarlos en grandes cantidades y con un gasto mucho menor. A estas sustancias, se las comenzó a llamar aromáticas. Muchas de ellas tenían una unidad que estaba formada por seis átomos de carbono enlazados entre sí formando una cadena cerrada y que gozaba de gran estabilidad permaneciendo intacta en muchas reacciones.

Durante la primera mitad del siglo XIX se aisló por primera vez el benceno ( $C_6H_6$ ), que es el hidrocarburo base a partir del cual se han obtenido un gran número de compuestos a los que, por costumbre, se les siguió denominando aromáticos (aunque muchos de ellos no despiden ningún aroma). En la actualidad también se les conoce como “arenos”.

**A.23.** A partir de la fórmula molecular del benceno  $C_6H_6$  y sabiendo que se trata de una molécula hexagonal y plana, proponed una posible estructura (utilizando los dobles enlaces necesarios) que dé cuenta de la misma.

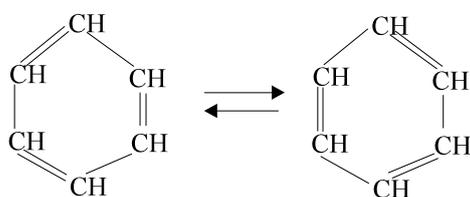
## 9. Introducción a la química del carbono

Una posible estructura sería la de un hexágono con tres dobles enlaces alternados y esto era lo que se les ocurrió a los químicos que por primera vez investigaron este compuesto. En ese caso el hexágono no sería regular (los dobles enlaces son más cortos que los simples) y además, el benceno, debido a la existencia de dobles enlaces debería ser tan reactivo como los alquenos y presentar reacciones de adición.



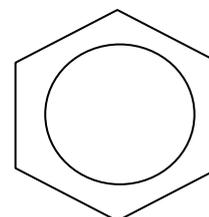
Sin embargo los resultados experimentales lo que mostraban era una estructura regular en la que todos los lados del hexágono eran de la misma longitud. Además el benceno no presenta reacciones típicas de la existencia de dobles enlaces. Por ejemplo, no decolora el agua de bromo.

El conocimiento de la estructura del benceno fue un problema para los químicos durante algún tiempo. Finalmente fue Kekulé quien en 1865 elaboró la primera estructura razonable para el benceno, proponiendo una estructura “cambiante” como la que se expone a continuación:



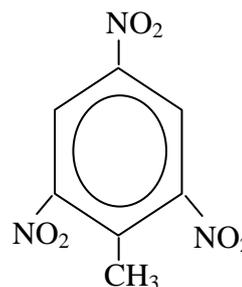
De acuerdo con el esquema anterior la estructura del benceno cambiaría oscilando entre las dos anteriores (estructura “resonante”). Para explicar la no decoloración del bromo, Kekulé sugería que los enlaces dobles y sencillos intercambiaban su posición tan rápido que no había tiempo de llevar a cabo las reacciones de adición correspondientes.

Una interpretación más actual de la estructura del benceno es la de 6 átomos de carbono enlazados entre sí, ocupando los vértices de un hexágono regular y los seis electrones restantes se distribuyen deslocalizados, de modo uniforme, dando lugar a una “nube electrónica compartida” por encima y debajo del plano de la molécula. De este modo, el anillo bencénico se suele representar esquemáticamente por medio de un hexágono regular con una circunferencia interior (indicativa de la nube electrónica a que nos referíamos).



El benceno es una sustancia tóxica muy peligrosa, por lo que conviene tomar muchas precauciones si se ha de manipular. Su inhalación puede producir mareos, irritación ocular y dolor de cabeza. Además se trata de un compuesto cancerígeno. Se trata de un líquido incoloro, poco viscoso y de un olor fuerte muy característico. Es muy poco soluble en agua y sí se disuelve en disolventes orgánicos (por ejemplo en alcohol o éter). Funde a 5'5 °C y hierve a 80'1 °C

Por sustitución de los hidrógenos puede dar distintos derivados por lo que se suele utilizar como producto de partida para la fabricación de un gran número de compuestos derivados del mismo (hidrocarburos aromáticos o arenos). Una de las reacciones más importantes es su nitración para dar trinitrotolueno o TNT (un explosivo de gran potencia), cuya estructura es:



### 3.4. Fuentes de los hidrocarburos

El petróleo y el gas natural son la principal fuente de los hidrocarburos saturados (hasta  $C_{40}$ ) y proporcionan la materia prima para la obtención de la mayoría de las sustancias orgánicas. El gas natural está compuesto fundamentalmente por metano (sobre el 80%) y etano (sobre el 10 %) y, en menor medida por propano, algo de butano y otros hidrocarburos superiores (de moléculas con mayor número de átomos de carbono).

La hulla es un producto natural que contiene alrededor de un 80 % de carbono. Cuando se procede a su calentamiento en ausencia de aire se obtiene una mezcla de metano e hidrógeno (gas del alumbrado), carbono casi puro y alquitrán de hulla. Este último producto es una sustancia negra y viscosa y constituye una fuente importante para la obtención de hidrocarburos aromáticos. (También se obtienen por deshidrogenación del ciclohexano y sus derivados).

## 4. COMPUESTOS DE CARBONO CON OTROS ELEMENTOS (GRUPOS FUNCIONALES)

En las cadenas de hidrocarburos se pueden incorporar otros átomos o grupos de átomos distintos al carbono e hidrógeno, que les proporcionan unas propiedades características perfectamente diferenciadas de las del hidrocarburo de igual cadena carbonada. Se les denomina **grupos funcionales**, y el resto de la molécula es un radical hidrocarbonado que en general se simboliza por R. En este curso, nos limitaremos a señalar algunos de los grupos funcionales más importantes sin entrar en detalles acerca de las propiedades específicas de cada uno y a estudiar su formulación y nomenclatura en el anexo correspondiente, al final del libro.

### 4.1. Derivados halogenados R-X

Son los hidrocarburos que en sus moléculas han sustituido al menos un átomo de hidrógeno por un halógeno. El número de compuestos de este tipo es enorme. Para nombrarlos se suele citar el nombre del halógeno seguido del hidrocarburo correspondiente.

*A.24. Escribid las fórmulas semidesarrolladas del clorometano y cloroetano.*

Se emplean principalmente como disolventes y desengrasantes (sobre todo los derivados clorados). Así mismo se utilizan como compuestos básicos para la síntesis de algunos polímeros y como **propelentes** en algunos aerosoles, también en **circuitos de refrigeración** (freones) y como **agentes extintores**, aunque actualmente su uso se ha restringido en muchos países ya que estos productos destruyen la capa de ozono. El triclorometano (o cloroformo) se ha empleado durante mucho tiempo como anestésico (ya no se utiliza debido a efectos tóxicos secundarios).

### 4.2. Alcoholes. R-OH

Son compuestos que tienen uno más grupos **hidroxilo** ( $\cdot OH$ ) unidos a un radical R $\cdot$ , es decir a un hidrocarburo que ha perdido uno o varios átomos de hidrógeno (los cuales han sido sustituidos por los grupos  $\cdot OH$ ). Se nombran como derivados del hidrocarburo del cual provienen, acabado en *-ol*.

*A.25. Escribid las fórmulas del metanol y del etanol*

## 9. Introducción a la química del carbono

Se utilizan principalmente como disolventes. El etanol (que forma parte de las bebidas alcohólicas) es uno de los de más importancia. Otro alcohol de gran importancia es el metanol (mucho más tóxico que el anterior) que es usado también como carburante.

### 4.3. Aldehídos $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{H}$

Se trata de compuestos que se caracterizan por tener un grupo carbonilo  $\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$  en un carbono terminal. R es un radical. Se nombran como derivados del hidrocarburo del cual provienen acabado en *-al*.

**A.26.** *Dad las fórmulas semidesarrolladas del metanal y del etanal*

Los aldehídos más simples son el metanal y el etanal. Los aldehídos desde  $\text{C}_8$  hasta  $\text{C}_{14}$  son perfumes. Al metanal también se le denomina formaldehído; es un gas de olor fuerte, que disuelto en agua se conoce como formol (utilizado como desinfectante y como conservante químico en hospitales).

### 4.4. Cetonas $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}'$

Se caracterizan por poseer uno o más grupos carbonilo cuyo átomo de carbono pertenece a la cadena carbonada y está unido a dos radicales (que son restos hidrocarbonados). Por tanto, en estos compuestos el grupo carbonilo no puede estar nunca al final de la cadena carbonada. Para nombrarlas se utiliza el nombre del hidrocarburo del que provienen acabado en *-ona*.

**A.27.** *Escribid la fórmula semidesarrollada de la propanona y explicad por qué no puede existir la etanona.*

La mayoría de las cetonas son líquidos transparentes e inflamables, con un olor característico. Las de mayor importancia industrial se emplean como disolventes de bajo costo para grasas, aceites, resinas y lacas. Es muy conocido el uso de la propanona (también llamada acetona) para disolver la laca o pintura de uñas. Por otra parte, la acetona es una sustancia que también está presente en la orina de las personas diabéticas.

### 4.5. Ácidos orgánicos $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$

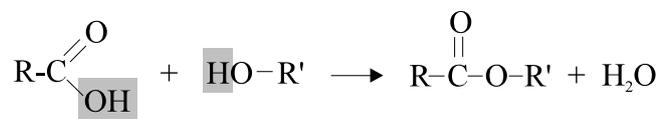
Los ácidos orgánicos se caracterizan por la presencia en sus moléculas del grupo carboxilo, en el que aparecen un grupo carbonilo y uno hidroxilo, ambos sobre el mismo átomo de carbono. Para nombrarlos se acaba en *-oico* el nombre del hidrocarburo del cual provienen.

**A.28.** *Escribid las fórmulas semidesarrolladas de los ácidos metanoico (o fórmico), etanoico (o acético) y propanoico.*

Muchos ácidos orgánicos se encuentran en productos naturales y se suelen designar mediante nombres comunes (diferentes a la nomenclatura internacional) como, por ejemplo, el ácido cítrico en naranjas y limones, el oxálico en los tomates, el málico en las manzanas, el acético en el vinagre, los llamados ácidos grasos (ácidos con un grupo carboxilo, saturados e insaturados, con longitudes de cadena entre  $\text{C}_4$  y  $\text{C}_{24}$ ) están presentes en aceites de origen vegetal y animal.

#### 4.6. Ésteres $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}'$

Se consideran como derivados de los ácidos a los que se les ha sustituido el grupo OH por un grupo OR'. En determinadas condiciones, al calentar un ácido carboxílico con un alcohol se obtiene éster más agua:



Los ésteres se pueden nombrar como si fueran sales derivadas del ácido carboxílico del cual provienen cambiando la terminación *-ico* de éste, por la terminación *-ato* y añadiendo el nombre del radical R' acabado en *-ilo*.

#### A.29. Escribid las fórmulas semidesarrolladas del metanoato de etilo y del acetato de metilo

Los ésteres de baja masa molecular son líquidos neutros e incoloros, a menudo de un olor agradable. Los de elevada masa molecular son sustancias grasas cerosas o cristalinas. Están presentes en la naturaleza como aromas y sabores en plantas y frutos. También se hallan en las grasas, ceras y aceites.

#### 4.7. Aminas $\text{R}-\overset{\text{R}''}{\text{N}}-\text{R}'$

Son compuestos en cuyas moléculas el átomo de nitrógeno está unido directamente a una, dos o tres cadenas carbonadas. Se pueden considerar, en principio, como derivados del amoníaco  $\text{NH}_3$  al que podemos ir sustituyendo cada uno de sus hidrógenos por radicales (restos carbonados), produciendo así aminas primarias  $\text{R}-\text{NH}_2$ , secundarias  $\text{R}-\text{NH}-\text{R}'$  y terciarias  $\text{R}-\text{NR}''-\text{R}'$

Se nombran en primer lugar los radicales en orden alfabético y se termina con la palabra amina.

#### A.30. Escribid las formulas semidesarrolladas de la etilmetilamina y de la propilamina

La importancia de estos compuestos radica, fundamentalmente en su utilización para fabricar fibras textiles y colorantes. También en bioquímica y medicina (anfetaminas, penicilina, morfina, nicotina, adrenalina, etc.). Los aminoácidos (constituyentes básicos de las proteínas) son compuestos que tienen un grupo amino y otro ácido.

### 5. COMPUESTOS DISTINTOS CON LA MISMA FÓRMULA MOLECULAR (ISOMERÍA)

Una fórmula inorgánica (por ejemplo  $\text{CO}_2$ ) corresponde unívocamente a un compuesto dado (en el ejemplo, dióxido de carbono). En cambio, en química orgánica no suele suceder esto y, con frecuencia, se dan casos en los que una misma fórmula molecular, incluso sencilla, como  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ , puede corresponder a distintos compuestos con propiedades muy diferentes. Se dice en este caso que se trata de compuestos isómeros.

Así, en el ejemplo propuesto, podría tratarse del etanol  $\text{CH}_3-\text{CH}_2\text{OH}$  (líquido incoloro que hierve a  $78,5^\circ\text{C}$ ) pero también podría ser el metoximetano  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  que a temperatura ambiente es un gas incoloro y hierve a  $-23,6^\circ\text{C}$ .

## 9. Introducción a la química del carbono

En general se llama isómeros a compuestos que tienen igual fórmula molecular pero distinta estructura y, como consecuencia, diferentes propiedades. Como veremos a continuación existen distintas clases de isomería.

### 5.1. Cuando los grupos funcionales son distintos. (Isomería funcional)

Es el caso, por ejemplo, de la propanona y el propanal. Ambos responden a la misma fórmula molecular  $C_3H_6O$  pero son compuestos con propiedades muy diferentes y cuyas fórmulas semi-desarrolladas son:

Propanona:  $CH_3-CO-CH_3$                       Propanal:  $CH_3-CH_2-CHO$

### 5.2. Mismo grupo funcional pero distinta estructura. (Isomería de cadena)

Este es el caso, por ejemplo, del ácido butanoico y del ácido metilpropanoico. Ambos compuestos responden a la misma fórmula  $C_4H_8O_2$ , tienen el mismo grupo funcional (carboxilo) pero el esqueleto de la molécula es diferente, lo que da lugar a dos compuestos distintos:

Ácido butanoico:  $CH_3-CH_2-CH_2-COOH$                       Ácido metilpropanoico:  $CH_3-\underset{\substack{| \\ CH_3}}{CH}-COOH$

### 5.3. Mismo grupo funcional pero colocado en diferente lugar. (Isomería de posición)

Son compuestos que presentan el mismo grupo funcional pero colocado en distintas posiciones de una misma cadena hidrocarbonada. Así ocurre, por ejemplo, con los alcoholes 1-propanol y con el 2-propanol, cuyas respectivas fórmulas semidesarrolladas se dan a continuación:

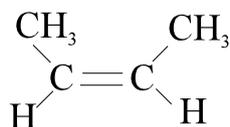
1-propanol:  $CH_2OH-CH_2-CH_3$                       2-propanol:  $CH_3-CHOH-CH_3$

*A.31. Escribid la fórmula semidesarrollada de dos pentanonas que sean isómeros de posición*

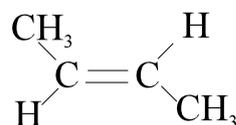
### 5.4. Variación de la distancia entre átomos no enlazados entre sí. (Isomería geométrica)

Se suele presentar en los alquenos debido al hecho de que el doble enlace  $C=C$  es rígido, por lo que no existe la posibilidad, como ocurre con el enlace simple  $C-C$ , de giro alrededor del mismo.

Así, por ejemplo en el 2-buteno se dan dos isómeros geométricos, según los dos grupos metilo estén del mismo lado (cis-2-buteno) o en distinto lado (trans-2-buteno), según se indica a continuación:



cis-2-buteno



trans-2-buteno

Como puede comprobarse en las fórmulas anteriores, la distancia entre los grupos metilo no es la misma en un caso que en el otro, lo que hace que estos compuestos no presenten idénticas propiedades.

**A.32.** *Escribid las fórmulas desarrolladas correspondientes a los dos isómeros geométricos del dicloroetileno y explicad por qué no existen este tipo de isómeros en el dicloroetano.*

Existe también otro tipo de isomería, llamada isomería óptica, en la que las distancias entre los átomos o grupos de átomos no enlazados directamente es la misma y tan solo cambia su distribución espacial y que, debido a su mayor complejidad, será tratada en el curso próximo.

## 6. EL PETRÓLEO. APLICACIONES MATERIALES Y ENERGÉTICAS

El petróleo es una sustancia que tiene multitud de aplicaciones. Además de constituir una fuente de energía fundamental en el transporte (automóviles, aviones, camiones, barcos y la mayoría de los vehículos), en la industria y en el hogar (calefacción, cocinar alimentos, etc.), sirve para obtener a partir del mismo multitud de productos de gran importancia. Para explotarlo, grandes compañías internacionales han perforado la Tierra y han abierto muchos pozos en el desierto y en el mar, han asegurado el suministro con una flota de grandes barcos (petroleros) y han creado grandes industrias para obtener toda una serie de sustancias y materiales derivados del mismo. De hecho, la vida sería muy distinta sin la existencia del petróleo. Si en estos momentos, por cualquier causa, se agotase de repente esta fuente de recursos, se produciría un colapso total en el transporte, la industria y el comercio.

**A.33.** *¿Qué preguntas podemos plantearnos acerca del petróleo?*

Entre otras podemos plantearnos las siguientes cuestiones: ¿Cómo comenzó a utilizarse? ¿Cómo se originó? ¿Va a durar siempre? ¿Cómo se extrae? ¿Cómo se lleva desde los yacimientos a las ciudades? ¿Cómo se transforma en los productos derivados del mismo? ¿Qué productos son esos? ¿Qué riesgos entraña el consumo creciente de petróleo?

### 6.1. Origen e historia del petróleo

La teoría más aceptada en la actualidad es que el petróleo tiene un origen orgánico. Se piensa que se formó hace millones de años en un proceso de **muy larga duración**, según el cual muchos organismos vivos que formaban el plancton marino y vegetales, cuando morían, se iban depositando en zonas costeras siendo recubiertos por sucesivas capas de arena, arcilla y barro que iban endureciéndose. Esa especie de "papilla" de materia orgánica era descompuesta por bacterias anaerobias que actuando durante mucho tiempo y con unas determinadas condiciones de presión y temperatura, dio lugar a la formación del petróleo crudo, el cual está constituido fundamentalmente por una mezcla compleja de hidrocarburos, formando un líquido viscoso cuyo color suele ser negro o amarillento. Contrariamente a lo que muchos creen, no se encuentra formando lagos subterráneos sino que impregna a la "roca madre" de forma parecida a como lo hace el café en un terrón de azúcar o el agua que queda embebida en una esponja.

La existencia del petróleo se conoce desde la antigüedad debido, principalmente, a las filtraciones del mismo que, de forma natural, se producían en algunos lugares (petróleo significa aceite de roca). Sin embargo no se comenzó a pensar en su aprovechamiento hasta mediado el siglo XIX, cuando ante la escasez de "aceite de ballena" se comenzó a buscar sustancias alternativas para la iluminación. Los primeros intentos serios se llevaron a cabo en los Estados Unidos. Al principio, descubrir la existencia de petróleo era algo que se hacía con una varita, tirando un sombrero al aire o siguiendo los consejos de un descubridor afortunado; en cambio, hoy en día se recurre a técnicas muy sofisticadas: estudio del terreno desde el aire, análisis de los fósiles, estudio de variaciones locales en la intensidad del campo magnético y del campo gravitatorio terrestre, análisis

## 9. Introducción a la química del carbono

de ondas sísmicas provocadas en el terreno, etc. La búsqueda de nuevos yacimientos que permitan cubrir la creciente demanda está haciendo que se realicen prospecciones en lugares cada vez más lejanos y salvajes.

### 6.2 ¿Cómo se extrae el petróleo?

Una vez detectado un posible yacimiento es necesario perforar pozos para llegar hasta donde se encuentre. La profundidad de un pozo petrolífero puede ser de 2000 a 3000 m, aunque en algunos casos han llegado a superarse los 7000 m. El diámetro varía entre 45 y 50 cm en la boca y unos 15 cm en el fondo. Para atravesar las distintas capas de la superficie terrestre se utiliza una broca de materiales muy duros (que ha de reponerse varias veces durante el sondeo). Al ir atravesando las capas de materiales puede ir encontrándose aguas subterráneas o grietas que dificultan el sondeo por lo que se procede a recubrir las paredes del pozo con tubos de acero protectores formando un encamisado. Para evitar holguras se suele inyectar cemento entre las paredes exteriores del tubo y la tierra o roca.

Normalmente la bolsa de petróleo contiene en su parte superior una bolsa de gas y en la inferior agua salada. Al quebrarse el techo impermeable que aprisiona a la bolsa de petróleo se "liberan" algunas fuerzas como, por ejemplo, la ejercida a causa de la presión del gas, que hacen que el petróleo (al haberse roto el techo) pueda ascender de forma natural.

Al petróleo extraído se le libera del agua salada, gas y sólidos que le suelen acompañar y una vez limpio se almacena en grandes tanques a la espera de su traslado.

### 6.3. ¿Cómo se hace llegar el petróleo desde los yacimientos a las refinerías?

Con excepción de Rusia y de Estados Unidos, el resto de países más desarrollados y, por tanto, más consumidores de petróleo, son los más deficitarios en yacimientos y se ven forzados a importarlo de los países productores, ya que el petróleo constituye, entre otras cosas, su principal fuente de energía en la actualidad. Ello obliga a su transporte desde los yacimientos hasta los centros en los que se procede a su tratamiento y transformación (refinerías), que pueden estar muy alejados. Para eso se procede, fundamentalmente, a construir oleoductos y a utilizar grandes barcos provistos de enormes tanques (petroleros).

*¿Qué riesgos pensáis que entraña el transporte de grandes cantidades de petróleo cubriendo distancias tan largas?*

Uno de los riesgos más importantes son los vertidos al mar que se suelen producir cuando algún petrolero sufre un accidente. Conviene tener en cuenta que los llamados "superpetroleros" son a veces viejos barcos con bandera de conveniencia (normalmente de países con bajas restricciones en cuanto a seguridad) y con tripulaciones inexpertas y mal pagadas. De esta forma en los últimos 25 años se han vertido ya al mar más de un millón de toneladas de crudo en accidentes conocidos. En España, por ejemplo, en diciembre de 1992 encalló en La Coruña el petrolero "Mar Egeo" vertiendo al mar más de 100000 toneladas y en diciembre del 2000 el "Prestige". También son posibles accidentes en plataformas petrolíferas marinas como, por ejemplo, el ocurrido en la plataforma que British Petroleum tenía frente a las costas de Luisiana en Estados Unidos, cuya explosión y hundimiento en abril de 2010, originó (además del fallecimiento de 11 trabajadores), un desastre medioambiental extraordinario (la costa del Golfo de México y sus pantanales son hogar de cientos de especies salvajes, incluidos manatí, tortugas marinas, delfines, marsopas, ballenas, nutrias, pelícanos y otras aves). El riesgo de tales accidentes, como es lógico, se incrementa conforme aumenta el número de petroleros y plataformas de extracción.

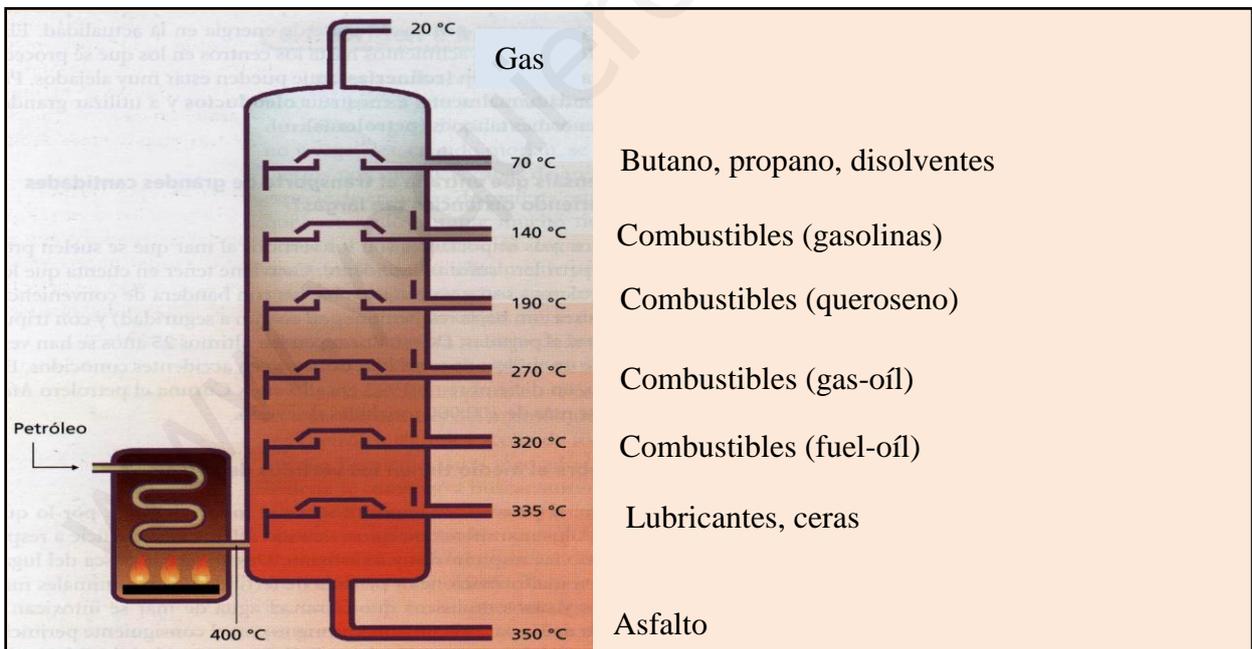
*¿Qué efectos más importantes sobre el medio tienen los vertidos de petróleo?*

Pasado el tiempo, el petróleo se deposita sobre el fondo del mar por lo que mueren las plantas. Los mamíferos marinos cuando salen a la superficie a respirar se les taponan las vías respiratorias y se asfixian. Desaparece la pesca del lugar afectado. Se producen malformaciones y pérdida de fertilidad en los animales marinos. Los mejillones y otros moluscos que filtran el agua de mar se intoxican y mueren o resultan no aptos para el consumo humano con el consiguiente perjuicio económico. Las aves acuáticas mueren porque pierden su capacidad de aislarse del agua y porque se intoxican al tratar de limpiarse las plumas, etc.

**6.4. ¿Qué es lo que se le hace al petróleo en las refinerías?**

El llamado petróleo crudo (lo que se transporta desde los yacimientos), no tiene ninguna aplicación práctica. Es necesario su tratamiento en las refinerías para obtener del mismo una serie de productos determinados que, fundamentalmente, van desde los hidrocarburos más ligeros como el butano y propano hasta los más pesados como el fuel y el asfalto, pasando por los intermedios como la gasolina, el gasoil y los aceites lubricantes. A todo ese proceso se le llama **refino**.

El primer paso para el refino del petróleo es la destilación. Para ello el petróleo crudo se calienta a unos 400 °C y los vapores ascienden por una larga columna de hasta 60 m de altura (llamada columna fraccionadora porque separa las distintas partes o “fracciones” que constituyen el petróleo). Las columna tiene muchos pisos o niveles, de forma que las fracciones que poseen un punto de ebullición más bajo ascienden más rápido y llegan a los pisos más altos antes de condensar como líquidos, mientras que las de puntos de ebullición más altos quedan más abajo.



La fracción que forma la gasolina constituye aproximadamente el 25% del petróleo crudo. No obstante es la más valiosa ya que se utiliza como combustible y como materia prima para fabricar muchos otros productos derivados de gran utilidad. Por esta razón se han desarrollado otras técnicas para poder transformar las fracciones más pesadas del petróleo en otras más ligeras y aumentar así el rendimiento en la obtención de gasolina. Una de dichas técnicas es el “craqueo” que

## 9. Introducción a la química del carbono

consiste esencialmente en la ruptura de moléculas de hidrocarburos pesados a elevada presión y temperatura. Otra técnica es el “reformado” mediante la cual se persigue el cambio de estructura de la molécula de manera que sus átomos o grupos determinados de átomos queden dispuestos de forma diferente (estructuras más ramificadas) con el propósito de mejorar el rendimiento y calidad de la gasolina.

### 6.5. ¿Para qué sirve el petróleo? ¿Qué productos se obtienen a partir del mismo?

El 90% del petróleo crudo se destina a la fabricación de combustibles. El resto se reparte entre productos especiales (aceites, asfaltos y distintos hidrocarburos) y una gran cantidad de productos químicos derivados que integran todo lo que se denomina industria petroquímica, entre los que podemos citar: Las fibras sintéticas, el caucho sintético, los plásticos, detergentes, abonos, insecticidas, herbicidas, perfumes, medicinas, etc. La enorme importancia de estos últimos productos, obliga a reflexionar sobre el hecho de que el principal destino del petróleo sea quemarlo en forma de combustibles para el transporte y la industria, ya que se trata de una fuente no renovable, es decir, los recursos existentes se agotarán en un plazo determinado.

### 6.6. ¿Qué riesgos entraña el consumo creciente de petróleo?

Uno de los países que más petróleo consume por año y habitante es los Estados Unidos. Vale la pena tener en cuenta que si el estilo consumista de los norteamericanos se acomodase al de Francia o Japón se podría ahorrar al año una cantidad de petróleo prácticamente igual a la consumida por casi la mitad del resto de habitantes del planeta. Al contrario, si todos los habitantes consumiésemos el mismo petróleo que se consume en Estados Unidos por habitante y año, en poco más de una década se agotarían todos los recursos conocidos.

El problema fundamental (dejando de lado la contaminación por vertidos y el agotamiento de los recursos) es que si seguimos quemando petróleo al ritmo que lo hacemos se pueden generar pronto conflictos entre distintos países por controlar los escasos recursos que vayan quedando (recordar al respecto las guerras en Irak). Además, antes de que acabemos con las reservas de petróleo existentes, el CO<sub>2</sub> producido fundamentalmente al quemar derivados del petróleo, va a ocasionar un serio cambio climático a escala planetaria de gravísimas consecuencias para todos los seres vivos. Es necesario que todos tomemos conciencia de este problema y adoptemos todas las medidas necesarias (educativas, científico-tecnológicas y políticas) para evitarlo.

(Ved al respecto el tema 1 de 4º de ESO).

**9. CUESTIONES Y PROBLEMAS COMPLEMENTARIOS DE QUIMICA DEL CARBONO**

1. Explicad por qué la teoría vitalista apoyaba la creencia de que a partir de la materia inorgánica (o inanimada) pudiera alguna vez haber surgido la vida de forma natural.

2. De las siguientes sustancias subrayad únicamente aquellos que en vuestra opinión no se encuentren como tales en la naturaleza: metano, teflón, acetona, plástico, caucho.

3. Dad alguna razón por la que el punto de fusión del cloruro de sodio (compuesto típicamente iónico cuya masa molar es de 58,5 g/mol) es de más de 808 °C mientras que el del butano (compuesto típicamente covalente) es tan solo de -135°C

4. La fórmula general de los alcanos de cadena lineal es  $C_nH_{2n+2}$ . ¿Cuál sería la de los alquenos de cadena lineal con un solo doble enlace? Rdo.  $C_nH_{2n}$

5. ¿Cuál es la fórmula molecular de un alcano con 16 átomos de carbono? Rdo.  $C_{16}H_{34}$

6. Utilizando 4 átomos de carbono, uno de oxígeno y los hidrógenos necesarios, escribid la fórmula semidesarrollada de, al menos, 6 compuestos distintos.

7. Una botella de butano comercial contiene 11,6 kg de dicho compuesto. Se pide:

a) La masa en kg de  $CO_2$  que se producirá al quemar totalmente ese butano

b) ¿Qué volumen de oxígeno (medido en condiciones normales) se habrá utilizado en la combustión anterior?

Rdo. a) 35,2 kg de  $CO_2$ ; b) 33 600 litros de  $O_2$

8. El teflón es un material muy resistente a las temperaturas elevadas y a la acción de los agentes químicos. Además es incombustible, muy poco conductor de la electricidad y presenta escasa adherencia. Todo ello hace que resulte muy útil para recubrir ciertos utensilios de cocina tales como sartenes y ollas. Químicamente se trata de un polímero cuyo monómero es el tetrafluoretileno. Escribid esquemáticamente la estructura molecular del teflón.

9. En las siguientes tablas se comparan puntos de ebullición de tres hidrocarburos (etano, propano y butano) y tres alcoholes (metanol, propanol y butanol) de masa molecular muy parecida.

Hidrocarburo	M. molecular	T. eb. °C
$C_2H_6$	30	-89
$C_3H_8$	44	-42
$C_4H_{10}$	58	-0,5

Alcohol	M. molecular	T. eb. °C
$CH_3OH$	32	65
$CH_3CH_2OH$	46	78
$CH_3CH_2CH_2OH$	60	97

Dad alguna justificación de por qué los puntos de ebullición son tan diferentes.

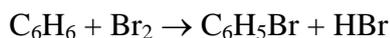
10. Sin consultar tablas colocar los siguientes hidrocarburos según punto de ebullición decreciente, explicando los criterios utilizados para ello:

a) heptano, b) 3,3-dimetilpentano, c) 2-metilhexano

Rdo. Puntos de ebullición decrecientes: heptano > 2-metilhexano > 3,3-dimetilpentano. Disminuye conforme aumenta el número de radicales (dipolos instantáneos más alejados).

## 9. Introducción a la química del carbono

11. Para obtener bromobenceno se hacen reaccionar  $28,5 \text{ cm}^3$  de benceno (densidad  $0,88 \text{ g/cm}^3$ ) con bromo en exceso. La reacción química entre ambos se representa mediante la ecuación:



Determinad la masa de bromobenceno que se podrá obtener

Rdo. Se podrán obtener  $50,24 \text{ g}$  de bromobenceno

12. Escribid las fórmulas semidesarrolladas de tres de los posibles isómeros del hexano ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )

13. Explicad por qué no existen isómeros *cis-trans* para el 1-buteno y sí para el 2-buteno

Rdo. En el 2-buteno existen dos radicales metilo que pueden estar en distintas posiciones relativas, mientras que en el 1-buteno sólo hay un radical etilo y tres átomos de hidrógeno de forma que las posibles posiciones del etilo son equivalentes dando lugar a un único compuesto.

14. Escribid las fórmulas desarrolladas de los dos isómeros geométricos del ácido butenodioico

15. Escribid la fórmula desarrollada correspondiente a cada uno de los cuatro isómeros distintos que corresponden al compuesto  $\text{C}_4\text{H}_9\text{Cl}$  y a los cinco isómeros de  $\text{C}_3\text{H}_6\text{BrCl}$

16. Escribid las fórmulas de dos isómeros cuya fórmula molecular sea  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$

17. Escribid las fórmulas de dos isómeros cuya fórmula molecular sea  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$

18. Escribid la fórmula de los isómeros que pueden existir como resultado de sustituir dos hidrógenos del benceno por radicales metilo

19. Quemamos  $300 \text{ cm}^3$  de metanol (densidad  $0,78 \text{ g/cm}^3$ ). Determinad el volumen de oxígeno, medido en condiciones normales, que habrá sido necesario. ¿Qué masa de agua se obtendrá?

Rdo. Se habrán empleado  $246,4 \text{ litros}$  de oxígeno y se obtendrán  $263,16 \text{ gramos}$  de agua

20. La fórmula empírica del acetileno es  $\text{CH}$ . Determinad su fórmula molecular sabiendo que  $6 \text{ g}$  de dicho compuesto, en condiciones normales de presión y temperatura, ocupan un volumen de  $5,6 \text{ litros}$ . Rdo.  $\text{C}_2\text{H}_2$

21. La ingestión de vitamina C, se dice que previene de los catarros. Dicha vitamina tiene una composición en masa de  $40,92\%$  de carbono,  $4,58\%$  de hidrógeno y  $54,5\%$  de oxígeno. Sabiendo que su masa molecular relativa es de  $176$ , determinad su fórmula molecular.

Rdo.  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$

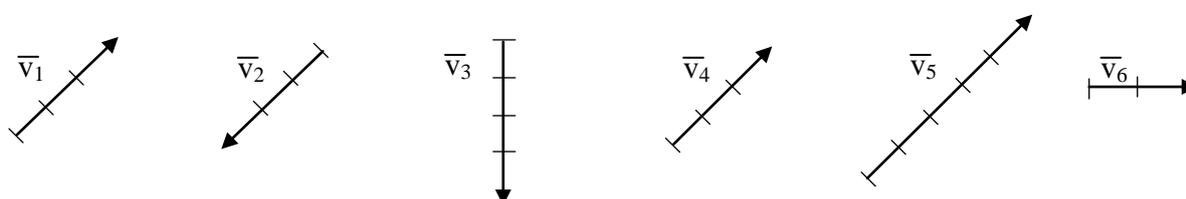
### 1. MAGNITUDES ESCALARES Y MAGNITUDES VECTORIALES

En física existen magnitudes como, el tiempo, la temperatura, la masa, el volumen, la energía, la carga eléctrica, etc., que quedan perfectamente definidas mediante un valor numérico acompañado de la unidad de medida utilizada. Así por ejemplo, podemos hablar de un tiempo de 3 s, una temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$ , una masa de 60 kg, un volumen de 5 l, una energía de 15000 J, una carga de  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C, etc. Este tipo de magnitudes se llaman **escalares**. En cambio, para tener una idea precisa de otras magnitudes no basta con conocer su valor numérico, sino que es necesario especificar también su dirección y su sentido. Este es el caso, por ejemplo, de la fuerza. Se comprende que al aplicar una fuerza de 400 N a un cuerpo, su efecto puede ser bien distinto dependiendo de la dirección y sentido en el que actúe. En efecto, si queremos coger un libro del suelo y ponerlo en un estante elevado, sabemos que hemos de hacer una cierta fuerza sobre él, pero no se nos ocurre hacerla de lado o hacia abajo. Análogamente, tampoco es suficiente decir que un automóvil se mueve a 100 km/h, ya que si, por ejemplo, se aleja de nosotros no será lo mismo que si se dirige directamente hacia el punto en el que nos encontramos. Este otro tipo de magnitudes se denominan magnitudes **vectoriales**.

Como podéis imaginar, las operaciones habituales de sumar, restar, etc., no pueden hacerse de la misma forma con magnitudes escalares que con vectoriales. La suma de una masa de 6 kg con otra de 4 kg siempre dará una masa total de 10 kg. En cambio, la suma de una fuerza de 15 N con otra de 10 N dependerá de la dirección y sentido de cada una de ellas. Puesto que las magnitudes vectoriales son muy importantes en la Física –y serán muy utilizadas en este curso- hubo que inventar formas de representarlas, de sumarlas y restarlas, etc., que tuvieran en cuenta además de su valor numérico, su dirección y sentido. Estas operaciones han sido aceptadas porque conducen a resultados que concuerdan con nuestra interpretación física de la Naturaleza y se han mostrado imprescindibles para avanzar en su comprensión. La familiarización con estas magnitudes y con el modo de operar con ellas es, pues, un requisito necesario para el desarrollo del curso.

La forma que se inventó (hace siglos) para expresar magnitudes vectoriales de manera que fuera posible operar teniendo en cuenta su dirección y sentido, consistió en utilizar segmentos rectilíneos orientados, a los que se llamó **vectores**, cuya longitud indica el valor numérico (positivo) de la magnitud o **módulo**, la recta que contiene al segmento (y todas sus paralelas) la **dirección**, y la punta de la flecha que se coloca en uno de los extremos del segmento el **sentido** (el otro extremo se llama “origen”). Por convenio, una magnitud vectorial, o un vector, se simboliza con una letra con una flecha encima (por ejemplo  $\vec{F}$ ) o con negrilla (por ejemplo  $\mathbf{F}$ ) y el módulo de un vector con el mismo símbolo entre dos barras verticales (por ejemplo  $|\vec{F}|$ ) o simplemente mediante una letra sin flecha arriba (por ejemplo F).

*A.1. Analizad los vectores velocidad representados comparando módulo, dirección y sentido.*

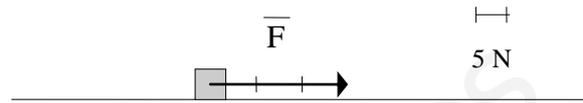


## Anexo1. Cálculo vectorial

Considerando que las magnitudes físicas vectoriales, como la fuerza o la velocidad, se conocen realmente cuando sabemos su valor numérico, su dirección y su sentido, podemos utilizar los vectores para representarlas de forma que:

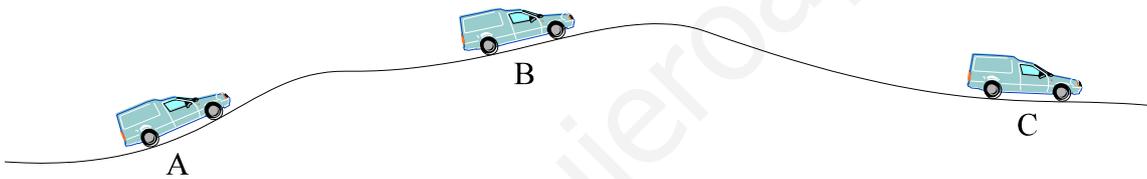
- El módulo del vector represente el valor numérico (absoluto) de la magnitud.
- La dirección del vector y su sentido coincidan con las de la magnitud representada.

Así, por ejemplo, si queremos representar una fuerza de 15 N actuando sobre un cuerpo que se encuentra sobre un plano horizontal y que se ejerce paralelamente al plano y hacia la derecha, podemos hacerlo mediante el vector  $\vec{F}$  que se muestra en la figura siguiente:

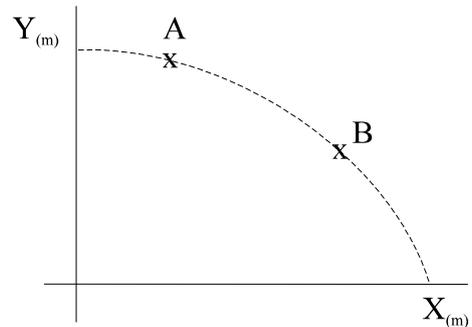


De acuerdo con lo anterior habrá que tener en cuenta que todo vector presenta tres características: **módulo** o longitud, **dirección** y **sentido**. Para que dos vectores sean distintos basta con que se diferencien en una sola de esas características.

**A.2.** Un vehículo circula por la trayectoria representada en la figura. Al pasar por los puntos A, B y C, el conductor mira el velocímetro y anota 60 km/h, 90 km/h y 120 km/h respectivamente. Representad mediante los vectores apropiados la velocidad del vehículo en cada posición.



**A.3.** Desde una pequeña altura se dispara un proyectil horizontalmente. En la figura adjunta se ha representado la trayectoria seguida por dicho proyectil tomando como sistema de referencia los ejes de coordenadas especificados. Sabiendo que en el punto A se movía a 30 m/s y en el punto B a 90 m/s dibujad un vector representativo de la velocidad del proyectil y otro de su peso en cada uno de dichos puntos.



**A.4.** Una persona afirma que dos fuerzas de 50 N cada una deben ser iguales. Explicad en qué se equivoca.

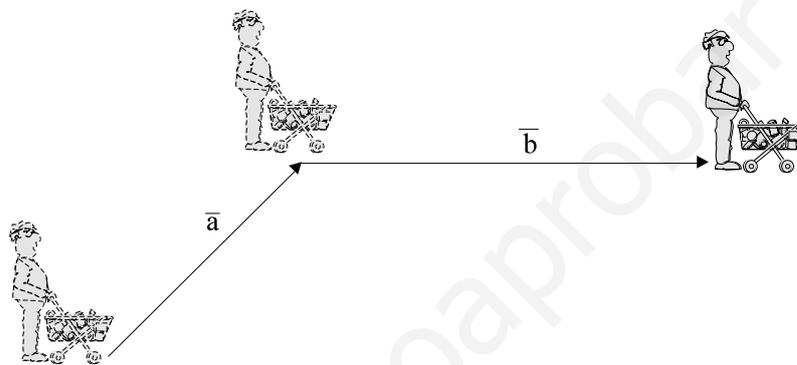
Si, por ejemplo, pensamos en dos fuerzas de 50 N cada una actuando sobre un mismo cuerpo (considerado puntual), no se obtiene el mismo resultado si ambas fuerzas tienen el mismo sentido que si van en sentido contrario, en el primer caso la fuerza resultante es de 100 N mientras que en el segundo vale 0. No basta pues que dos fuerzas o dos magnitudes vectoriales cualesquiera tengan el mismo módulo para que se pueda afirmar que son iguales, es necesario que además tengan

la misma dirección y sentido. En resumen: una magnitud vectorial queda definida por su módulo, su dirección y su sentido y en las operaciones con este tipo de magnitudes habrá que tener en cuenta, como veremos, esas tres características.

## 2. ÁLGEBRA ELEMENTAL DE VECTORES

### 2.1. Obtención del vector suma de otros dos

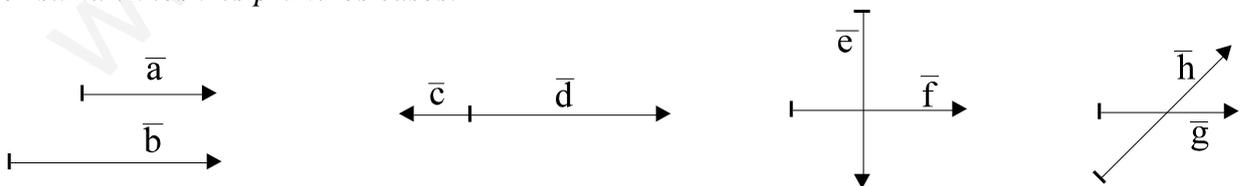
A.5. Una persona realiza un desplazamiento dado por el vector  $\vec{a}$ . Después hace otro desplazamiento dado por el vector  $\vec{b}$ . Dibujad un vector que represente el desplazamiento resultante o suma de los desplazamientos anteriores:  $\vec{s} = \vec{a} + \vec{b}$ . A continuación haced una propuesta general para sumar gráficamente dos vectores cualesquiera detallando los pasos a seguir.



De la realización de la actividad anterior debe haber quedado claro que un procedimiento general para dibujar el vector suma de otros dos vectores cualesquiera puede ser:

- 1º) Poner un vector a continuación del otro sin cambiar **en nada** a ninguno de los dos. (Ello supone que el extremo de uno, el primero, esté en contacto con el origen del otro, el segundo).
- 2º) Dibujar el vector que va desde el origen del primero hasta el extremo del segundo. Dicho vector será el vector suma.

A.6. Aplicad lo aprendido en la actividad anterior para sumar gráficamente los vectores que se dan a continuación. Finalmente obtened la expresión apropiada para calcular el módulo del vector suma en los tres primeros casos.

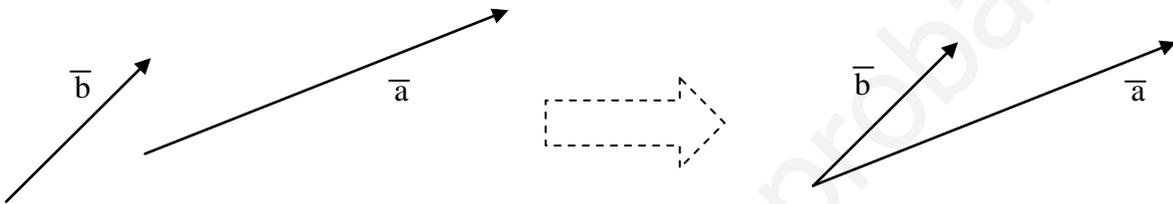


Analizando los dos últimos casos propuestos en la actividad anterior es fácil darse cuenta de que otro método para dibujar el vector suma de otros dos que tengan distinta dirección, consiste en disponer primero ambos vectores con un origen común (siempre sin cambiar ninguna de sus características) y luego trazar la diagonal del paralelogramo que forman. Por otra parte, en todos los ejemplos utilizados podemos ver que se cumple la propiedad conmutativa y que da igual en qué orden se realice la suma.

## 2.2. Obtención del vector diferencia de otros dos

Como veremos en los primeros temas de física de este curso, existen muchas situaciones de interés en las que necesitamos restar dos vectores. (Por ejemplo cuando queremos determinar el cambio experimentado en la velocidad con que se mueve un cuerpo). Para hacerlo podemos pensar que el vector diferencia de otros dos  $\vec{a} - \vec{b}$  es el vector  $\vec{d}$  que le falta a  $\vec{b}$  para ser igual que  $\vec{a}$ . Es decir, el vector  $\vec{d}$  será aquél que sumado con el sustraendo (en este caso  $\vec{b}$ ) nos dé el minuendo (en este caso  $\vec{a}$ ), ya que de  $\vec{a} - \vec{b} = \vec{d}$  se deduce que  $\vec{a} = \vec{d} + \vec{b}$ . Esto hace que si se sabe sumar vectores, se sepa también restar pues sólo hay que colocar los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  (teniendo cuidado de no cambiar ninguna de sus características) de forma que sea fácil hallar el vector que sumado al sustraendo nos dé el minuendo.

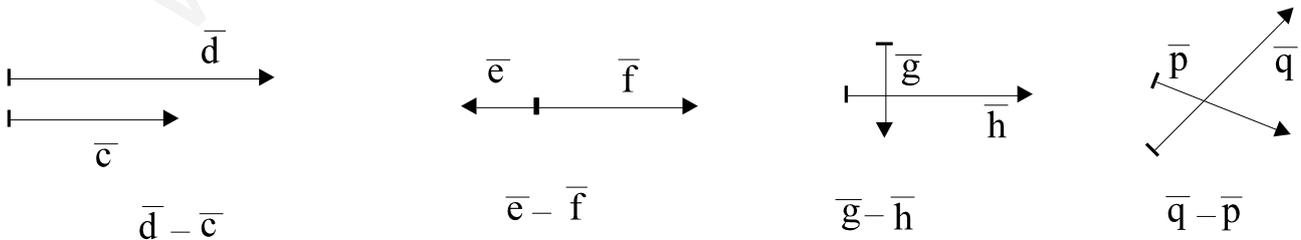
A.7. Dados los dos vectores de la figura adjunta dibujad el vector diferencia  $\vec{d} = \vec{a} - \vec{b}$ . A continuación haced una propuesta general para restar gráficamente dos vectores cualesquiera detallando los pasos a seguir.



La actividad anterior permite comprender que para dibujar el vector resta o diferencia de otros dos, se pueden seguir los siguientes pasos:

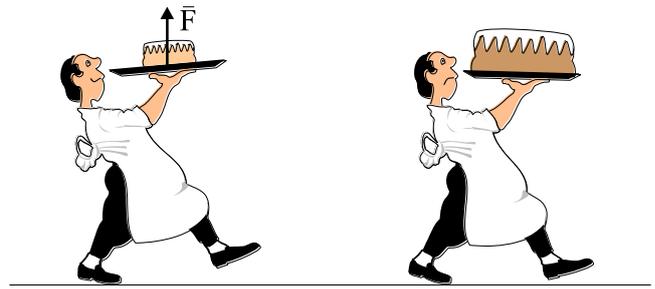
- 1º) Poner los dos vectores con origen común sin cambiar nada ninguna de sus características.
- 2º) Dibujar el vector resta mediante una flecha que vaya desde el extremo del sustraendo hasta el extremo del minuendo. (La punta de la flecha ha de coincidir así con el extremo del minuendo).
- 3º) Comprobar que, efectivamente, si se suma el vector  $\vec{d}$  al sustraendo se obtiene el minuendo.

A.8. Aplicad lo aprendido en la actividad anterior para restar gráficamente los vectores que se dan a continuación dibujando en cada caso el vector resta que se pide. Finalmente obtened la expresión apropiada para calcular el módulo del vector resta en los tres primeros casos.



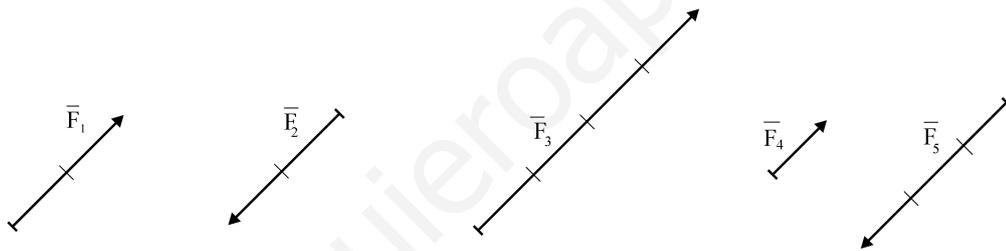
### 2.3. Producto de un vector por un número

**A.9.** Sobre la bandeja de la izquierda el cocinero hace una fuerza hacia arriba de 10 N. Sin embargo para transportar la tarta de la derecha ha de triplicar la fuerza. Dibujad en este último caso un vector representativo de dicha fuerza y, a continuación, razonad qué es lo que ocurre cuando un vector se multiplica por un número positivo. ¿Y si éste fuese negativo?



Mediante la actividad anterior podemos darnos cuenta de que siempre que un vector se multiplica por un número, se obtiene otro vector cuyo módulo es igual al del primero multiplicado por el valor absoluto de ese número, y cuyo sentido es el mismo que el del primero si el número es positivo pero opuesto al del primero cuando el número es negativo. Análogamente ocurre cuando un vector se divide por un número (ya que dividir por un número  $n$  equivale a multiplicar por  $1/n$ ).

**A.10.** Aplicad las conclusiones anteriores para razonar qué relación guardan los vectores fuerzas representados en los cuatro últimos casos de la figura con el vector fuerza del primero.



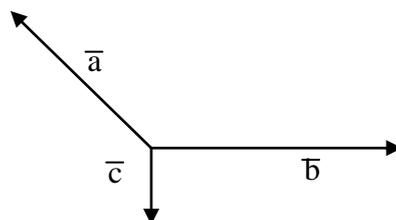
Comparando el módulo, la dirección y sentido del primer vector con las de los posteriores, podemos ver que, por ejemplo, la relación con el último puede expresarse como:  $\vec{F}_5 = -1'5 \cdot \vec{F}_1$

**A.11.** Razonad qué podemos hacer para obtener un vector unitario (de módulo igual a 1) que tenga la misma dirección y sentido que otro vector dado.

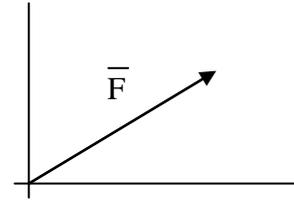
De acuerdo con lo anterior, bastará dividir el vector por un número igual al valor de su módulo para obtener un vector unitario en la misma dirección y sentido.

Para terminar este apartado proponemos un par actividades en las que se manejan algunas de las operaciones introducidas.

**A.12.** Dibujad el vector suma de los tres vectores representados en la figura siguiente.



**A.13.** Dado el vector fuerza  $\vec{F}$  de la figura adjunta, encontrad otros dos vectores perpendiculares entre sí (y que estén en los ejes indicados) que sumados nos den el vector  $\vec{F}$ . A continuación suponiendo que  $|\vec{F}| = 5$  y que el módulo de uno de los componentes valga 4, determinad cuánto valdrá el módulo del otro vector componente.



Mediante las actividades anteriores hemos aprendido a sumar y restar vectores gráficamente, a determinar el módulo del vector suma y del vector diferencia en algunos casos sencillos, y a multiplicar (y dividir) un vector por un número. Sería muy útil, no obstante, **conocer algún procedimiento general** que nos permita determinar el vector suma o resta de otros vectores (dos o más) de forma que podamos conocer fácilmente **todas** sus características (módulo, dirección y sentido) en todos los casos. Esto es lo que nos vamos a plantear a continuación.

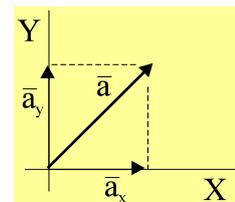
Antes de comenzar, conviene reflexionar sobre el hecho de que es muy fácil conocer el vector suma o resta de otros dos cuando ambos se encuentran en la misma dirección (tengan o no el mismo sentido). Sería pues muy interesante disponer de un procedimiento tal que cuando se presenta una situación en la que varios vectores no se encuentran en la misma dirección pudiéramos descomponerlos en otros vectores que sí lo estuvieran y operar con estos últimos.

### 3. EXPRESIÓN ANALÍTICA DE UN VECTOR EN COMPONENTES CARTESIANAS

Anteriormente hemos visto cómo se puede dibujar el vector suma de otros. En cuanto a la determinación de su módulo, una posibilidad sería tener en cuenta que los módulos de los vectores han de ser directamente proporcionales a sus longitudes. Ello permitiría obtener el módulo del vector suma comparando su longitud con la de cualquiera de los otros vectores (de módulo conocido). Sin embargo la exactitud de este procedimiento dependerá del cuidado que hayamos tenido tanto al dibujar los vectores como al medir su longitud, lo que puede hacer que los resultados obtenidos resulten diferentes. Cabe plantearse, pues, si *existirá alguna forma de representar las magnitudes vectoriales que facilite las operaciones y permita hallar con precisión todas las características de los mismos.*

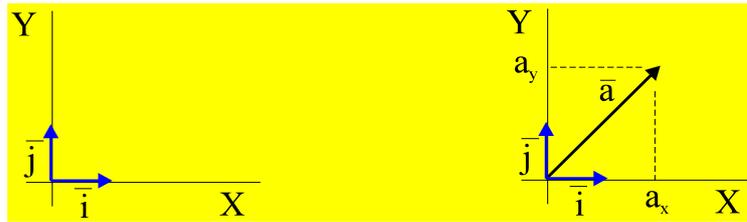
Hemos visto que sumar y restar vectores que tengan la misma dirección es fácil y que un vector puede siempre sustituirse por dos vectores perpendiculares entre sí, cuya suma nos da el vector inicial (vectores componentes). Si tenemos que sumar o restar vectores, ¿no sería posible, pues, descomponer cada vector en sus vectores componentes respecto a los mismos ejes o direcciones perpendiculares, sumar o restar estos vectores componentes en cada uno de los ejes, y, por último, volver a “recomponer” el vector resultante?. Mostrar que esto es posible requiere desarrollar esta idea matemáticamente y después comprobar que los resultados a los que conduce se confirman en la realidad.

Desde el punto de vista matemático, se trataría de elegir unos ejes cartesianos, X e Y, perpendiculares, y encontrar los vectores componentes cartesianos de cualquier vector  $\vec{a}$ . Como se ve en la figura  $\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$ .



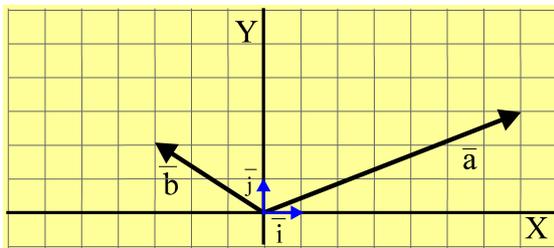
A los vectores anteriores se les llama **vectores componentes cartesianos** del vector  $\vec{a}$ . Cuando se trabaja de esta forma es habitual utilizar unos vectores unitarios designados como  $\vec{i}$  y  $\vec{j}$ .

El vector  $\vec{i}$  **siempre** se halla sobre el eje X en sentido positivo mientras que el vector  $\vec{j}$  **siempre** se encuentra sobre el eje Y en sentido positivo, tal y como se indica en la figura adjunta.



De acuerdo con lo anterior los vectores componentes cartesianos se podrán expresar también como  $\vec{a}_x = a_x \cdot \vec{i}$  y como  $\vec{a}_y = a_y \cdot \vec{j}$  y por lo tanto:  $\vec{a} = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j}$ . A las cantidades  $a_x$  y  $a_y$  se las llama **componentes escalares cartesianas** del vector. Dichas cantidades pueden ser positivas o negativas (según la situación del vector respecto de los ejes de coordenadas cartesianas).

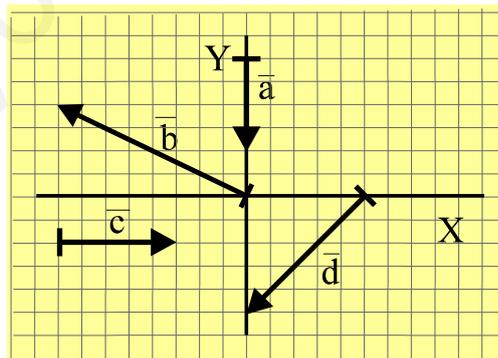
**A.14.** Expresad los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  siguientes en función de sus componentes.



Rdos:  $\vec{a} = 7\vec{i} + 3\vec{j}$ ;  $\vec{b} = -3\vec{i} + 2\vec{j}$

Otra forma que se suele utilizar para expresar un vector es en función de sus componentes escalares. Así, para el caso de un vector  $\vec{a}$  en el plano XY se escribiría:  $\vec{a} = (a_x, a_y)$ .

**A.15.** Expresad en componentes escalares cartesianas los vectores representados en la figura.



Si analizamos con cuidado los casos representados podemos ver, por ejemplo, que el vector  $\vec{d}$  tiene sus dos componentes escalares negativas y conocer el valor de cada una de ellas, lo que conduce a expresar dicho vector como  $\vec{d} = (-5, -5)$ . Análogamente, el vector  $\vec{c}$  tan sólo tiene una componente y esta es positiva, de modo que  $\vec{c} = (5, 0)$ .

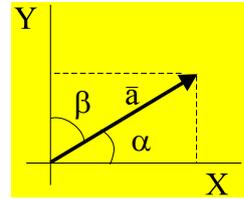
En resumen pues, conocemos dos formas de expresar un vector: una, especificando su módulo, dirección y sentido, por ejemplo, una velocidad de modulo igual a 4 m/s y dirigida verticalmente

Anexo1. Cálculo vectorial

y hacia abajo; la otra, dando sus componentes cartesianas (bien en forma de vectores componentes, bien en forma de componentes escalares), por ejemplo, una velocidad  $\vec{v} = (0, -4)$  m/s.

Podemos ahora plantearnos el problema de cómo hemos de proceder en general para que, conociendo un vector en una de esas formas, podamos conocerlo en la otra.

Cuando se expresa un vector indicando su módulo, dirección y sentido, lo que conocemos es su longitud y los ángulos que dicho vector forma con los ejes. En general se designa como  $\alpha$  el ángulo que el vector forma con el semieje  $X^+$  por el camino más corto y análogamente por  $\beta$  el que forma con el semieje  $Y^+$  siempre por el camino más corto. A dichos ángulos se les denomina **ángulos directores** (porque sirven para dar la dirección y sentido de un vector).



Para pasar a expresar el vector de la figura anterior (del que conocemos su módulo y los ángulos directores) en función de sus componentes escalares, basta con tener en cuenta que:

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{|\vec{a}|} \quad \text{y que} \quad \cos \beta = \frac{a_y}{|\vec{a}|} \quad \text{con lo que obtenemos: } a_x = |\vec{a}| \cdot \cos \alpha \quad \text{y} \quad a_y = |\vec{a}| \cdot \cos \beta$$

De igual forma, si lo que conociésemos fuesen las componentes  $a_x$  y  $a_y$ , podríamos obtener el valor del módulo y de los cosenos directores. Para ello bastaría con aplicar el teorema de Pitágoras y obtener:

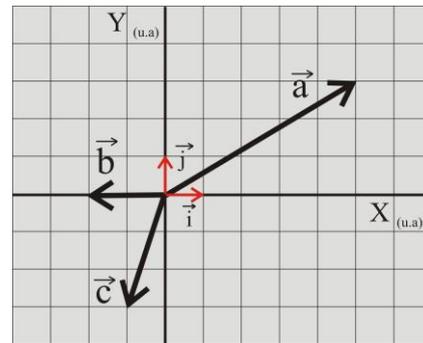
$$|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

A continuación se pueden obtener los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  a partir de los cosenos correspondientes según las expresiones ya conocidas:  $\cos \alpha = \frac{a_x}{|\vec{a}|}$  y  $\cos \beta = \frac{a_y}{|\vec{a}|}$

**A.16.** En la figura adjunta se conocen las componentes escalares de los vectores (en unidades arbitrarias). A partir de ellas obtened el módulo y los ángulos directores de cada uno.

Rdos:  $|\vec{a}| = 5$ ;  $|\vec{b}| = 2$ ;  $|\vec{c}| = \sqrt{10}$ .

El vector  $\vec{a}$  forma un ángulo de  $36.9^\circ$  con el semieje  $OX^+$  y el  $\vec{c}$  de  $108.4^\circ$  con el semieje  $OX^+$

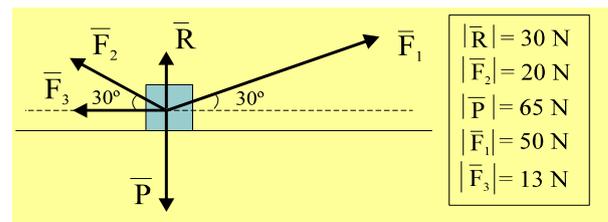


**A.17.** Sobre el cuerpo de la figura actúan una serie de fuerzas. A partir de los datos que se incluyen en la misma elegid un sistema de coordenadas cartesianas apropiado y expresad en componentes cada uno de los vectores fuerza representados.

Rdos:  $\vec{F}_1 = (43.3, 25)$  N;  $\vec{R} = (0, 30)$  N;  $\vec{P} = (0, -65)$  N;

$\vec{F}_2 = (-17.3, 10)$  N;  $\vec{F}_3 = (-13, 0)$  N.

(Tomando origen de coordenadas centrado en el cuerpo y como eje Y el que contiene a los vectores  $\vec{R}$  y  $\vec{P}$ ).



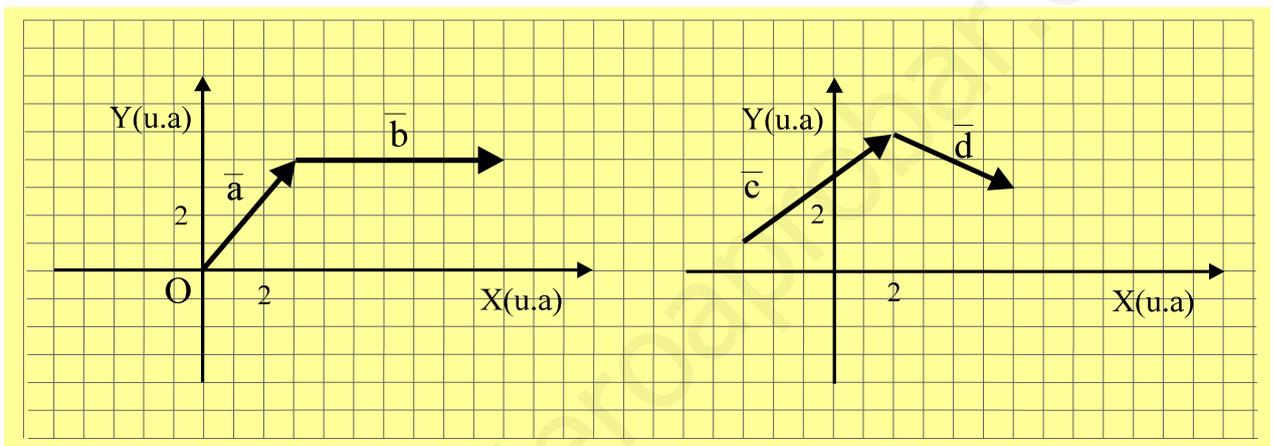
#### 4. OPERACIONES CON VECTORES EXPRESADOS ANALÍTICAMENTE

Como ya hemos indicado, una ventaja de expresar analíticamente los vectores es que facilita operaciones como la determinación del vector suma de otros varios sean cuales sean los ángulos que formen entre ellos, tal y como veremos a continuación.

**A.18.** Revisad A.14 y dibujad el vector suma de  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$ . A continuación expresadlo en componentes y analizad el resultado obtenido.

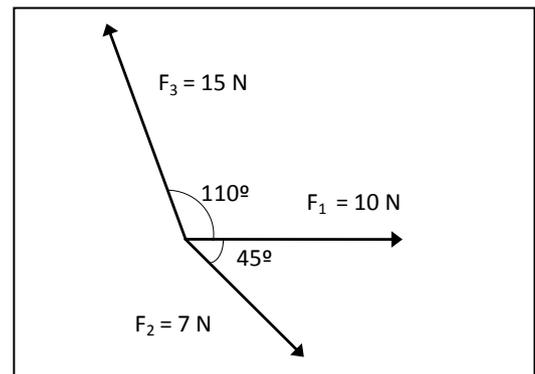
**A.19.** En cada uno de los dos casos de la figura siguiente, se pide:

- Expresad analíticamente (según sistema de referencia indicado) los vectores presentes.
- Dibujad el vector suma en cada caso, expresándolo después analíticamente.
- Analizad los resultados con el fin de establecer cómo sumar vectores analíticamente.



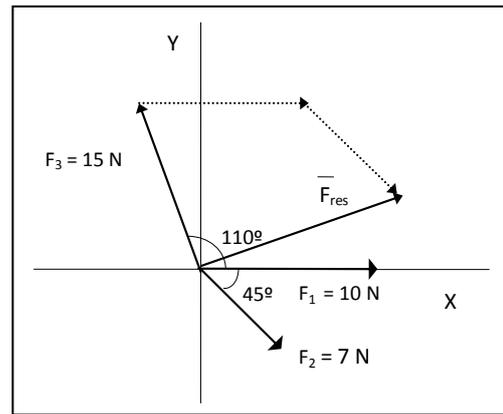
De acuerdo con los resultados de la actividad anterior, para sumar vectores analíticamente **basta con sumar sus componentes**. Como es lógico, de forma análoga se puede proceder para la resta o para multiplicar un vector por un número (restar sus componentes o multiplicar cada una por ese número, respectivamente).

**A.20.** Calculad la fuerza resultante del conjunto de fuerzas representadas en la figura siguiente, expresando el resultado analíticamente. Hallad también el módulo y la dirección de dicho vector fuerza resultante y, finalmente dibujadlo sumando gráficamente los vectores de la figura:



En este problema, nos dan una serie de vectores expresados en módulo y dirección y nos piden que calculemos el vector suma  $\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ . Para sumar los vectores *analíticamente* es necesario expresar, previamente, los vectores en componentes.

Si no nos dan un sistema de coordenadas cartesianas al que podamos referirnos, será conveniente escoger uno tal que el cálculo de las componentes de los vectores sea lo más sencillo posible (lo que se puede lograr haciendo que sus ejes coincidan con el mayor número posible de vectores). Así en este caso podríamos hacer:



Ahora, fijándonos en los ángulos que cada vector forma con los semiejes positivos (ángulos directores), podemos expresar fácilmente cada uno de los tres vectores de forma analítica, en componentes cartesianas:

$$\vec{F}_1 = F_{1x} \vec{i} + F_{1y} \vec{j} = |\vec{F}_1| \cos 0^\circ \vec{i} + |\vec{F}_1| \cos 90^\circ \vec{j}$$

$$\vec{F}_2 = F_{2x} \vec{i} + F_{2y} \vec{j} = |\vec{F}_2| \cos 45^\circ \vec{i} + |\vec{F}_2| \cos 135^\circ \vec{j}$$

$$\vec{F}_3 = F_{3x} \vec{i} + F_{3y} \vec{j} = |\vec{F}_3| \cos 110^\circ \vec{i} + |\vec{F}_3| \cos 20^\circ \vec{j}$$

Sustituyendo y operando nos queda que:

$$\vec{F}_1 = 10 \vec{i} \text{ N}; \quad \vec{F}_2 = 4'95 \vec{i} - 4'95 \vec{j} \text{ N}; \quad \vec{F}_3 = -5'13 \vec{i} + 14'10 \vec{j} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 9'82 \vec{i} + 9'15 \vec{j} \text{ N} \text{ o bien en componentes escalares } \vec{F}_{res} = (9'82, 9'15) \text{ N.}$$

Conviene tener en cuenta que para expresar analíticamente el vector  $\vec{F}_1$ , en realidad, no nos hacía falta ningún cálculo ya que al encontrarse sobre un eje, resulta inmediato conocer cuáles son sus componentes. Cuando esto no es así (como ocurre, por ejemplo, con los otros dos vectores) hay que determinar las componentes escalares haciendo uso de las funciones trigonométricas. A este respecto, hemos de resaltar que, por encontrarnos en un plano, sería posible también haber trabajado con el seno y el coseno de un único ángulo, por ejemplo  $45^\circ$  en el caso de  $\vec{F}_2$ , y escribir:

$$\vec{F}_2 = |\vec{F}_2| \cos 45^\circ \vec{i} - |\vec{F}_2| \sin 45^\circ \vec{j} \text{ N} \text{ (lo que suele hacerse a menudo).}$$

¿Cómo deberíamos proceder para expresar el vector resultante en módulo, dirección y sentido?

Para obtener el módulo:  $F_{res} = \sqrt{F_{res\ x}^2 + F_{res\ y}^2}$ , es decir:

$$F_{res} = \sqrt{9'82^2 + 9'15^2} = \sqrt{180'15} = 13'42 \text{ N. En cuanto a la dirección y sentido:}$$

$$\cos \alpha = \frac{F_{res\ x}}{F_{res}} = \frac{9'82}{13'42} = 0'73 \rightarrow \alpha = \arccos 0'73 = 43^\circ$$

$$\cos \beta = \frac{F_{resy}}{F_{res}} = 0'68; \beta = \arccos 0'68 = 47^\circ$$

Así pues:

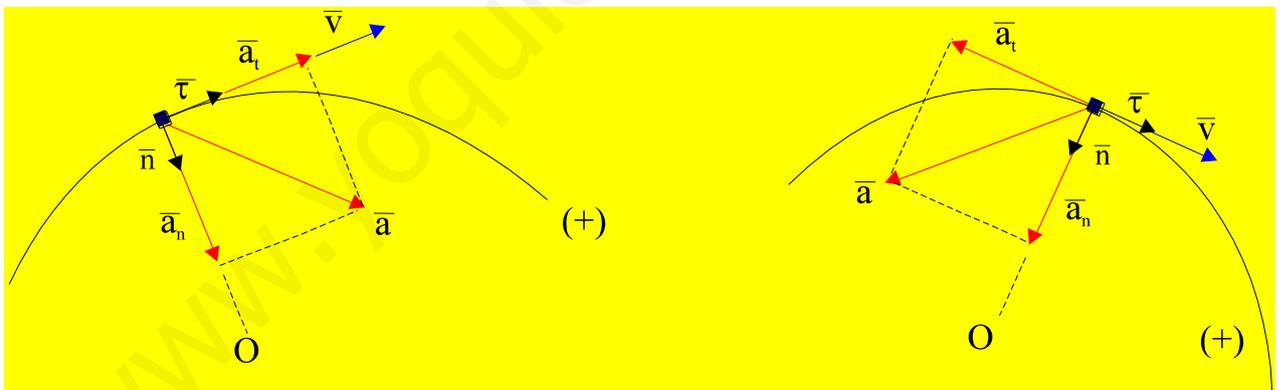
La resultante de las tres fuerzas representadas viene expresada por medio del vector:

$\vec{F}_{res} = 9'82\vec{i} + 9'15\vec{j}$  N, su módulo vale 13'42 N y el vector se halla situado en el plano XOY, formando un ángulo de  $43^\circ$  con  $Ox^+$  y de  $47^\circ$  con  $Oy^+$

## 5. EXPRESIÓN DE UN VECTOR EN COMPONENTES INTRÍNSECAS

En el caso de objetos que se mueven siguiendo una trayectoria previamente conocida como, por ejemplo, un coche por una carretera o el movimiento circular de un satélite alrededor de la Tierra, puede interesarnos expresar los vectores en función de dos nuevos vectores básicos unitarios: uno tangencial, que designaremos por  $\vec{\tau}$  y que **siempre** es tangente a la trayectoria y en el sentido positivo (valores de “e” crecientes), y otro perpendicular, que designaremos por  $\vec{n}$  y que **siempre** es perpendicular a la trayectoria y en el sentido escogido como positivo. En el caso de que la trayectoria sea curva, se conviene que el sentido positivo de  $\vec{n}$  sea, precisamente, señalando hacia el centro de la curva (si es una recta es arbitrario).

En los dos ejemplos siguientes se representa el caso de dos cuerpos que están moviéndose según una trayectoria curva. El de la izquierda va cada vez más aprisa, mientras que el de la derecha va cada vez más despacio. En cada uno de los esquemas se ha escogido (arbitrariamente) como sentido positivo de la trayectoria el del movimiento y se han dibujado los vectores unitarios  $\vec{\tau}$  y  $\vec{n}$ , junto con el vector  $\vec{v}$  (velocidad) y el vector  $\vec{a}$  (aceleración) en cada caso.

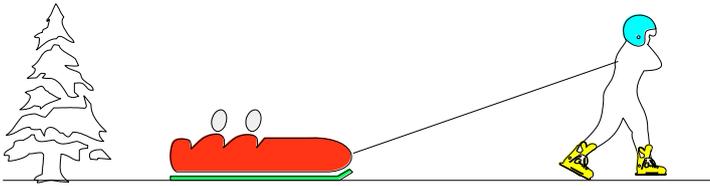


Si nos damos cuenta, el vector aceleración puede ser expresado en los dos casos en función de sus componentes intrínsecas (aceleración tangencial y aceleración normal)  $\vec{a} = a_t \vec{\tau} + a_n \vec{n}$  en donde las componentes  $a_t$  y  $a_n$  son cantidades escalares.

De acuerdo con los esquemas utilizados el módulo del vector aceleración se puede calcular como

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$

**A.21.** Una persona arrastra por el suelo un trineo de 500 kg mediante una cuerda que forma un ángulo de  $30^\circ$  con la horizontal. Sabiendo que el trineo se desplaza con movimiento rectilíneo y uniforme y que la fuerza de rozamiento vale 897 N, determinad las fuerzas actuantes sobre el mismo en componentes intrínsecas.



La fuerza peso ejercida por la Tierra, la fuerza que hace la cuerda  $\vec{T}$ , la fuerza de rozamiento  $\vec{F}_r$  y la fuerza normal  $\vec{R}$  que ejerce el plano. Estas son pues las fuerzas que hemos de determinar. Para ello hemos de tener en cuenta que:

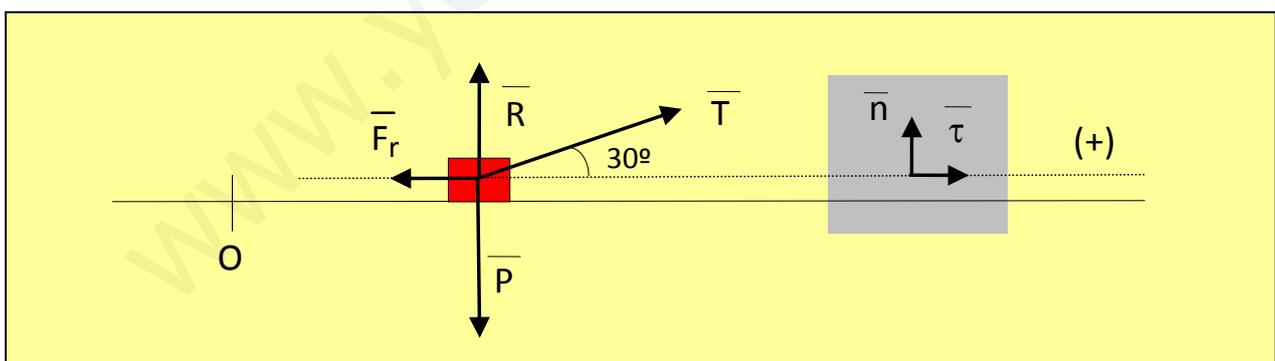
El trineo se desplaza con movimiento rectilíneo y uniforme y, en consecuencia no habrá aceleración (vector) por lo que la fuerza resultante sobre el trineo será nula:

$$\vec{F}_{res} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_r + \vec{R} = 0$$

Para expresar en componentes intrínsecas las fuerzas anteriores haremos lo siguiente:

- Tomar sobre la trayectoria un origen de espacios y escoger un sentido como positivo.
- Establecer los vectores  $\vec{\tau}$  y  $\vec{n}$ . Recordemos que  $\vec{\tau}$  es un vector unitario tangente a la trayectoria y **siempre** en el sentido escogido como positivo mientras que  $\vec{n}$  se define como un vector unitario **siempre** perpendicular a la trayectoria y en el sentido positivo de esa dirección.
- Expresar las fuerzas actuantes en componentes intrínsecas, según los vectores unitarios correspondientes.

Si representamos las fuerzas y tomamos sentido positivo el del movimiento, tenemos:



Como puede verse se han dibujado los vectores unitarios desplazados a la derecha para no complicar la figura. De acuerdo con el enunciado el móvil se desplazará hacia la derecha (sentido que hemos escogido como positivo). Si denominamos  $\alpha$  al ángulo que forma un vector con el vector unitario  $\vec{\tau}$  por el camino más corto y  $\beta$  al que forma con el vector unitario  $\vec{n}$  (también por el camino más corto), podemos escribir que:

$$\begin{aligned}\vec{P} &= |\vec{P}| \cos \alpha \cdot \vec{\tau} + |\vec{P}| \cos \beta \cdot \vec{n} = |\vec{P}| \cos 90^\circ \cdot \vec{\tau} + |\vec{P}| \cos 180^\circ \cdot \vec{n} = -5000 \cdot \vec{n} \\ \vec{T} &= |\vec{T}| \cos \alpha \cdot \vec{\tau} + |\vec{T}| \cos \beta \cdot \vec{n} = |\vec{T}| \cos 30^\circ \cdot \vec{\tau} + |\vec{T}| \cos 60^\circ \cdot \vec{n} = 0'87 |\vec{T}| \cdot \vec{\tau} + 0'5 |\vec{T}| \cdot \vec{n} \\ \vec{R} &= |\vec{R}| \cos \alpha \cdot \vec{\tau} + |\vec{R}| \cos \beta \cdot \vec{n} = |\vec{R}| \cos 90^\circ \cdot \vec{\tau} + |\vec{R}| \cos 0^\circ \cdot \vec{n} = |\vec{R}| \cdot \vec{n} \\ \vec{F}_r &= |\vec{F}_r| \cos \alpha \cdot \vec{\tau} + |\vec{F}_r| \cos \beta \cdot \vec{n} = |\vec{F}_r| \cos 180^\circ \cdot \vec{\tau} + |\vec{F}_r| \cos 90^\circ \cdot \vec{n} = -897 \cdot \vec{\tau}\end{aligned}$$

Sumando obtenemos la expresión:

$$\vec{F}_{\text{res}} = (0'87|\vec{T}| - 897) \cdot \vec{\tau} + (|\vec{R}| + 0'5 |\vec{T}| - 5000) \vec{n} = 0 \quad \text{y descomponiendo esta ecuación:}$$

$$0'87 |\vec{T}| - 897 = 0$$

$$|\vec{R}| + 0'5 |\vec{T}| - 5000 = 0$$

Resolviendo el sistema anterior obtenemos que:  $|\vec{T}| = 1030'8 \text{ N}$  y  $|\vec{R}| = 4484'6 \text{ N}$ .

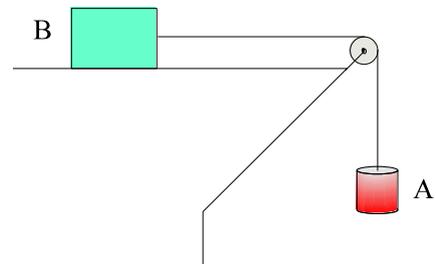
Así pues, las fuerzas (en newtons) que actúan sobre el trineo en componentes intrínsecas serán:

$$\vec{P} = -5000 \cdot \vec{n}; \quad \vec{T} = 897 \cdot \vec{\tau} + 515'4 \cdot \vec{n}; \quad \vec{R} = 4484'6 \cdot \vec{n}; \quad \vec{F}_r = -897 \cdot \vec{\tau} \quad . \text{ También es posible:}$$

$$\vec{P} = (0, -5000) \text{ N}; \quad \vec{T} = (897, 515'4) \text{ N}; \quad \vec{R} = (0, 4484'6) \text{ N}; \quad \vec{F}_r = (-897, 0) \text{ N}$$

Conviene tener en cuenta que las componentes anteriores no son cartesianas sino intrínsecas. Una de las ventajas de trabajar con este tipo de componentes es que pueden utilizarse también en trayectorias no rectilíneas, como vamos a ver a continuación.

**A.22.** Un bloque de masa  $m_A$  se halla unido a otro de masa  $m_B$  mediante una cuerda que pasa por la garganta de una polea tal y como se observa en el sistema de la figura adjunta, de forma que el bloque B se mueve hacia la derecha y el A descende. Sabiendo que entre el bloque B y el plano existe rozamiento y considerando la masa de la polea despreciable, se pide:

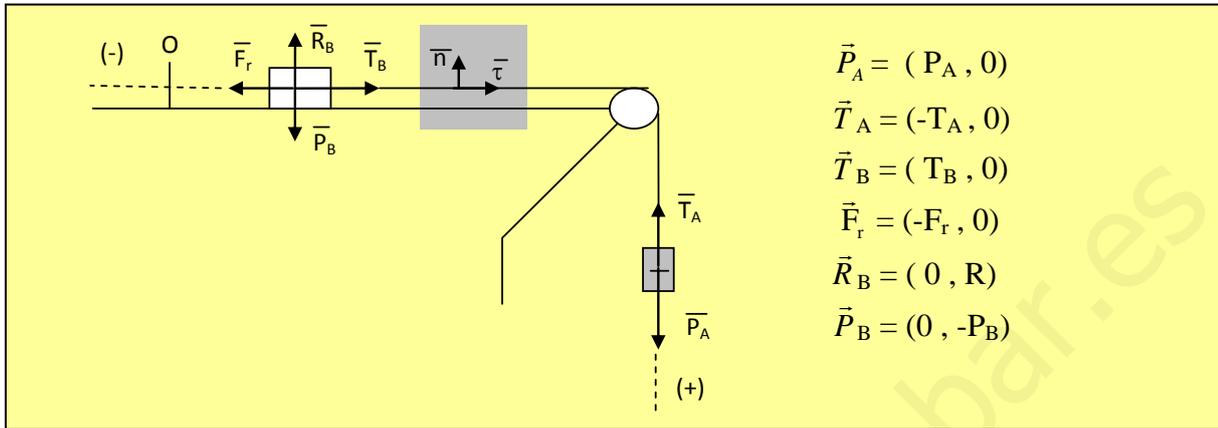


- Dibujad todas las fuerzas que actúan sobre cada uno de los bloques.
- Expresad cada una de dichas fuerzas en componentes intrínsecas.
- Obtened la expresión analítica de la fuerza resultante que actúa sobre el sistema formado por ambos bloques.

Analizando la figura vemos que podemos considerar que existe **una sola trayectoria** y que está previamente determinada, siendo independiente de las características del movimiento de cada uno de los bloques. Es decir, el bloque A descenderá y el B se moverá sobre la mesa, ambos en el mismo sentido y siguiendo la trayectoria que contiene a la cuerda. De acuerdo pues con lo que sabemos, será posible abordar el problema escalarmente. Para ello vamos a escoger como sentido positivo el del movimiento.

Anexo1. Cálculo vectorial

En el esquema siguiente hemos dibujado todos los vectores fuerza que intervienen en el problema. Por comodidad hemos situado los vectores unitarios  $\vec{\tau}$  y  $\vec{n}$  desplazados de los bloques (aunque ya sabemos que ambos vectores se sitúan en cada instante o punto de la trayectoria en el centro de cada bloque). Para contestar la cuestión que se plantea en el enunciado, podemos considerar todo el sistema en su conjunto (bloques y cuerda), expresar cada una de las fuerzas en componentes intrínsecas y sumar.

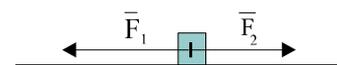


En los vectores anteriores se dan las componentes escalares de cada uno ya con el signo correspondiente (según el criterio de signos especificado en la figura). Conviene darse cuenta que, por ejemplo, los vectores  $\vec{P}_A$  y  $\vec{T}_B$  tienen sólo componente tangencial y en ambos casos es positiva. Sumando todos los vectores anteriores obtenemos la expresión de la fuerza resultante sobre el sistema en componentes intrínsecas:

$$\vec{F}_{res} = (P_A - T_A + T_B - F_r, R - P_B)$$

En ocasiones, al utilizar la notación vectorial se cometen determinadas equivocaciones típicas. Mediante la siguiente actividad, se intenta salir al paso de este inconveniente.

**A.23.** A unos estudiantes se les propuso que sumaran las fuerzas representadas en la figura adjunta, cuyos módulos son  $|\vec{F}_1| = 4\text{ N}$  y  $|\vec{F}_2| = 3\text{ N}$ . A continuación se han seleccionado algunas respuestas erróneas. Analizad cada una explicando en qué consiste la equivocación.



- a)  $\vec{F}_{res} = 4+3 = 7\text{ N}$ ; b)  $\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 = 4-3 = 1\text{ N}$ ; c)  $|\vec{F}_{res}| = |\vec{F}_2| - |\vec{F}_1| = 1-4 = -3\text{ N}$

En los dos primeros casos se comete una equivocación común para ambos y que se da con cierta frecuencia: Se expresa un vector como un solo número. De acuerdo con lo que hemos estudiado, la expresión analítica de un vector en función de sus componentes escalares siempre es un conjunto ordenado de números (llamados componentes del vector) uno de los cuales, al menos, no es 0. En el caso b) además se comete la equivocación de expresar el vector fuerza resultante como la resta de dos vectores. Es preciso tener en cuenta que el vector fuerza resultante **siempre** es la suma de las fuerzas, independientemente de la dirección y sentido que puedan tener dichas fuerzas entre sí. En el caso representando en la actividad, aunque las fuerzas tienen sentido contrario debemos escribir que:

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Naturalmente, debido precisamente a que las dos fuerzas tienen aquí la misma dirección y sentido contrario, el módulo de la fuerza resultante (suma de esas dos) podrá obtenerse restando al módulo mayor el menor, lo que conduce a  $|\vec{F}_{res}| = 3 \text{ N}$ .

Dado que el módulo de un vector está directamente relacionado con el tamaño (longitud) del mismo, su valor nunca puede ser un número negativo como se propone en la tercera respuesta.

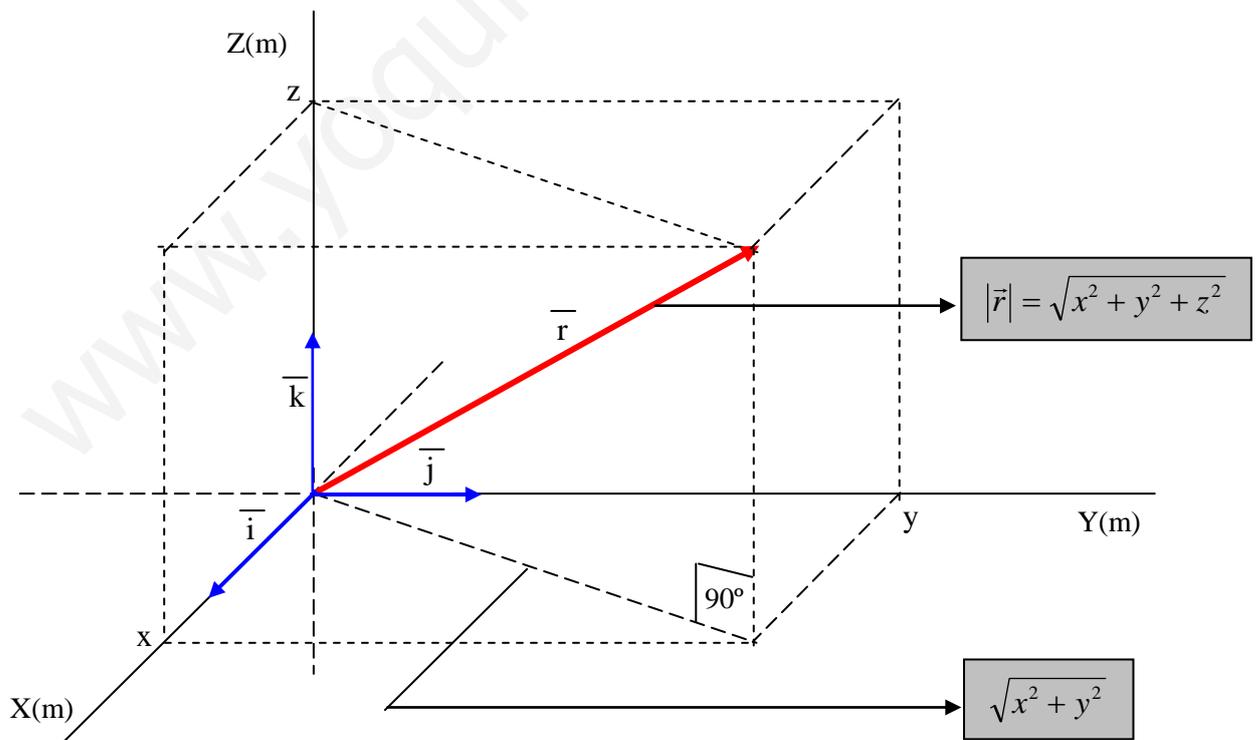
También hubiera sido posible (si la trayectoria fuese conocida de antemano) escoger un origen y un sentido positivo (por ejemplo hacia la derecha) y trabajar con las componentes escalares intrínsecas de las fuerzas implicadas. En ese caso podríamos escribir:

$$\vec{F}_{res} = (F_{res_t}, F_{res_n}) = (-F_1, 0) + (F_2, 0) = (-4, 0) + (3, 0) = (-1, 0) \text{ N o bien directamente:}$$

$F_{res_t} = -F_1 + F_2 = -4 + 3 = -1 \text{ N}$  ya que basta la simple observación de la figura para darse cuenta de que ninguna de las dos fuerzas tiene componente normal.

## 6. REPRESENTACIÓN DE VECTORES EN EL ESPACIO TRIDIMENSIONAL

Hasta aquí nos hemos limitado a manejar vectores en un plano. Hablamos de vectores con dos componentes. Sin embargo, en la realidad hay situaciones que precisan la utilización de vectores con más de dos componentes. Éste es el caso, por ejemplo, del movimiento de un objeto en el espacio (pensemos en un avión). Podemos dar la posición del objeto mediante un vector de posición  $\vec{r}$  cuyas componentes escalares cartesianas van cambiando con el tiempo. Dicho vector es el mismo que manejamos anteriormente al que se añade una tercera componente según el eje Z. La representación gráfica es la siguiente:



## Anexo1. Cálculo vectorial

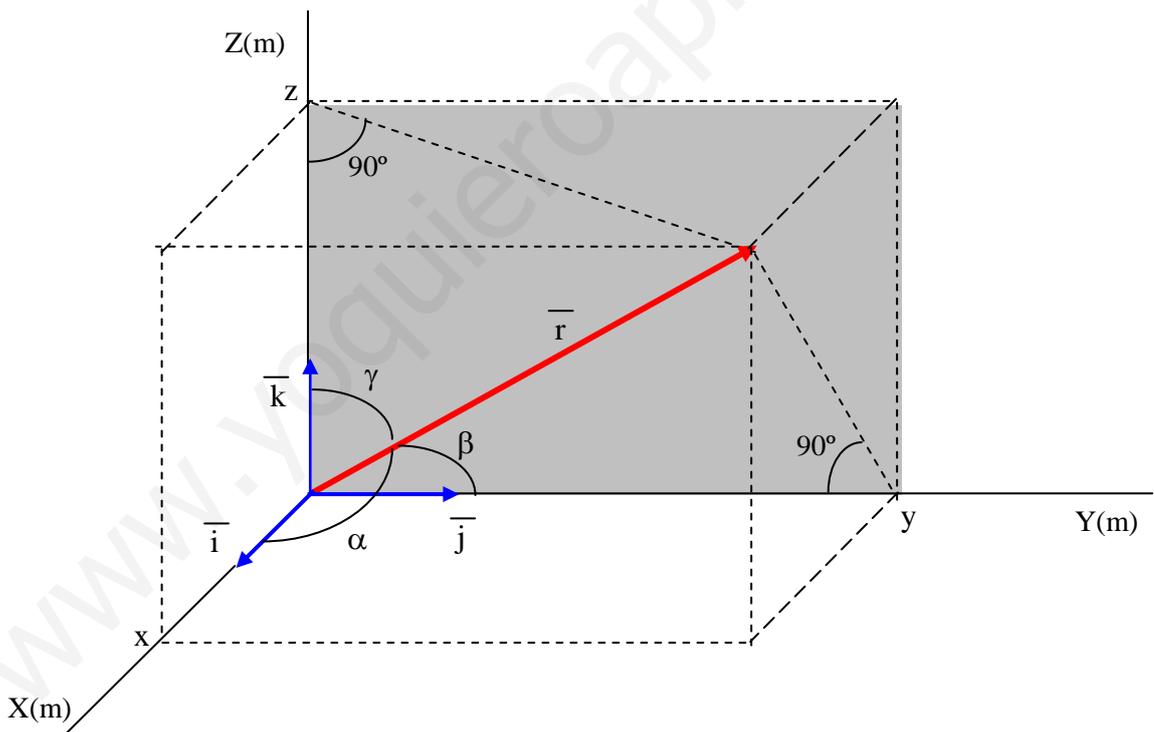
En la figura de arriba se ha representado el vector de posición de un móvil en un instante dado, en los ejes de coordenadas cartesianas X, Y, Z. También se han representado los vectores unitarios  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ . Dichos vectores tienen de módulo 1, su origen coincide con el origen de coordenadas y siempre tienen la dirección de los ejes X, Y, Z respectivamente (y sentido positivo).

El análisis de la figura anterior permite comprender fácilmente (basta aplicar el teorema de Pitágoras) que  $|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ .

Por otra parte, el vector  $\vec{r}$  se puede expresar en función de sus componentes escalares cartesianas (que pueden ser positivas o negativas), simplemente como:  $\vec{r} = (x, y, z)$ .

También se puede expresar en función de sus vectores componentes como:  $\vec{r} = \vec{x} + \vec{y} + \vec{z}$  o bien (lo que es equivalente) en función de los vectores unitarios como:  $\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$  (siempre acompañado de la unidad utilizada).

En cuanto a la dirección del vector, ésta (al igual que ocurría cuando nos limitábamos a representar los vectores en el plano XY), se expresa mediante los ángulos directores, solo que ahora se añade un tercer ángulo que se simboliza como  $\gamma$  (léase gamma) y que corresponde al ángulo existente entre el vector y el eje Z. En la figura siguiente hemos representado tales ángulos:



De la figura anterior queda claro que:  $\cos \alpha = \frac{x}{|\vec{r}|}$ ;  $\cos \beta = \frac{y}{|\vec{r}|}$ ;  $\cos \gamma = \frac{z}{|\vec{r}|}$

O lo que es equivalente, que:  $x = |\vec{r}| \cos \alpha$ ;  $y = |\vec{r}| \cos \beta$ ;  $z = |\vec{r}| \cos \gamma$

Naturalmente, todo lo que hemos dicho aquí respecto al vector de posición  $\vec{r}$ , es también válido para cualquier otro vector que se represente en los ejes cartesianos.

## 7. PRODUCTOS DE VECTORES

Como vamos a ver a continuación, dos vectores pueden multiplicarse de formas diferentes y con resultados muy distintos. Para comprender mejor en que consisten estas formas, vale la pena que comencemos el estudio de cada una considerando un problema concreto.

### 7.1. Producto escalar de dos vectores

**A.24.** Supongamos que el vector  $\vec{C} = (3, 1, 2)$  kg representa las cantidades de tres productos que deseamos comprar (por ejemplo: peras, manzanas y patatas), lo podemos llamar “vector compra” mientras que el vector  $\vec{P} = (80, 100, 90)$  o “vector precios” representa los precios por kg de cada uno de dichos productos. ¿De qué forma habría que multiplicar ambos vectores para obtener el coste total de la compra? ¿Cuánto valdría dicho coste?

La realización de la actividad anterior conduce a obtener como coste total 520. Para obtenerlo hemos tenido que multiplicar los componentes correspondientes de cada vector y sumar los productos, lo que en general, puede representarse como:

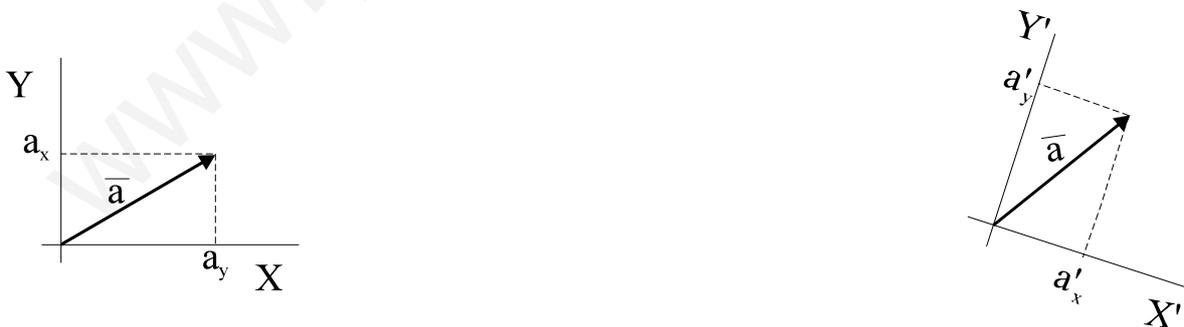
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = (a_x, a_y, a_z) \cdot (b_x, b_y, b_z) = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

**A.25.** Calculad el producto escalar  $\vec{a} \cdot \vec{b}$ ,  $\vec{a} \cdot \vec{c}$  y  $\vec{a} \cdot \vec{d}$  siendo:

$$\vec{a} = (5, 3, 0); \quad \vec{b} = (6, -4, 1); \quad \vec{c} = (0, 0, 8); \quad \vec{d} = (-5, -3, 0)$$

La operación anterior se denomina producto escalar de dos vectores porque lo que se obtiene es un solo número (un escalar) y no un vector. Conviene darse cuenta que, de acuerdo con la definición dada, el módulo elevado al cuadrado de cualquier vector se puede considerar ahora como el producto escalar de ese vector por él mismo ya que:  $|\vec{a}|^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = \vec{a} \cdot \vec{a}$

Por otra parte, parece evidente que por el hecho de que tomemos otro sistema de coordenadas cartesianas ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ) para representar un vector cualquiera  $\vec{a}$ , cambiarán sus componentes (ahora serán:  $a'_x, a'_y, a'_z$ ) pero su módulo (su tamaño) seguirá siendo el mismo, es decir:



En ambos sistemas de referencia se cumplirá que:  $\vec{a} \cdot \vec{a} = |\vec{a}|^2 = a_x^2 + a_y^2 = a'^2_x + a'^2_y$

Así pues, el producto escalar de un vector por él mismo  $\vec{a} \cdot \vec{a}$  tiene igual valor sea cual sea el sistema de referencia utilizado. Se dice que es “invariante”. Es fácil demostrar que se trata de una propiedad general del producto escalar, es decir, que se cumple también para el producto escalar de dos vectores cualesquiera.

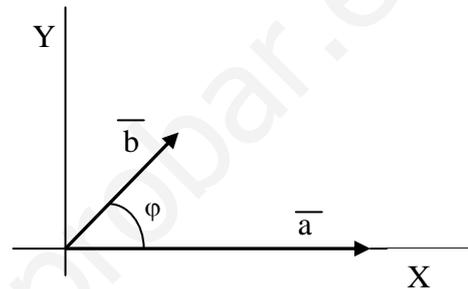
En efecto, si suponemos un vector cualquiera  $\vec{c}$  tal que  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$  se cumplirá que:  $\vec{c} \cdot \vec{c} = (\vec{a} + \vec{b}) \cdot (\vec{a} + \vec{b}) = \vec{a} \cdot \vec{a} + \vec{b} \cdot \vec{b} + 2\vec{a} \cdot \vec{b}$  y dado que  $\vec{c} \cdot \vec{c}$ ,  $\vec{a} \cdot \vec{a}$ , y  $\vec{b} \cdot \vec{b}$  son invariantes (por tratarse en cada caso del mismo vector), de acuerdo con la igualdad anterior hemos de concluir que el producto escalar de dos vectores cualesquiera  $\vec{a} \cdot \vec{b}$  también ha de serlo y, en consecuencia, dará igual el sistema de referencia que escojamos para representar dichos vectores.

La propiedad que acabamos de justificar, permite comprender que el producto escalar de dos vectores cualesquiera se pueda obtener también en función de sus módulos y del ángulo que forman según la expresión:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \varphi$$

Para probar esto, dado que el producto escalar es invariante, obtendremos su expresión en un sistema de coordenadas particularmente sencillo, tal y como se propone en la siguiente actividad:

**A.26.** *Determinad la expresión del producto escalar  $\vec{a} \cdot \vec{b}$  en un sistema de coordenadas en el que el vector  $\vec{a}$  coincida con el eje X y ambos vectores se encuentren en el plano XY como se indica en la figura adjunta. (Obtened previamente las componentes escalares cartesianas de cada vector en el sistema considerado).*



A continuación se proponen algunos ejercicios de manejo:

**A.27.** *Si se tienen dos vectores expresados en componentes escalares:*

- ¿Cómo podríamos averiguar el ángulo que forman dichos vectores?*
- Aplicadlo al caso de los vectores  $\vec{a} = (5, 3, -2)$  y  $\vec{b} = (4, -2, 0)$*

**A.28.** *Demostrad que los vectores  $\vec{a} = (2, 4, -1)$  y  $\vec{b} = (8, -5, -4)$  son perpendiculares.*

**A.29.** *Hallad los productos escalares de los vectores unitarios cartesianos ( $\vec{i} \cdot \vec{i}$ ,  $\vec{i} \cdot \vec{j}$ , etc.) y realizar el producto  $\vec{a} \cdot \vec{b}$  en la forma  $\vec{a} \cdot \vec{b} = (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \cdot (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k})$  analizando el resultado que se obtenga.*

## 7.2. Momento de una fuerza: Producto vectorial

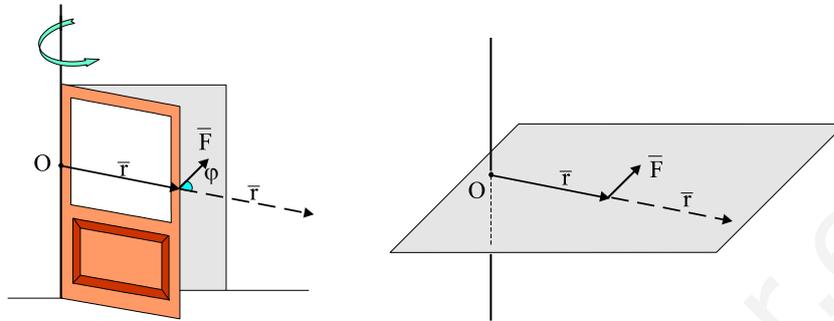
Vamos a tratar ahora otro producto entre vectores, denominado producto vectorial, que también tiene un gran importancia en el manejo de ciertas magnitudes físicas, como el momento de una fuerza, la cantidad de movimiento angular, etc. Comenzaremos analizando un ejemplo concreto en el que podremos ver el interés de esta operación.

**A.30.** *Realizad algunas observaciones experimentales de modificación del estado de rotación de un cuerpo dado alrededor de un eje de giro (por ejemplo una puerta o ventana) con objeto de establecer a modo de hipótesis de qué factores dependerá el “efecto de giro” conseguido.*

Si experimentamos con una puerta es fácil darse cuenta de que el “efecto de giro” o aceleración angular que experimenta la misma, no sólo depende del valor de la fuerza que hagamos sobre ella, sino también de otros factores.

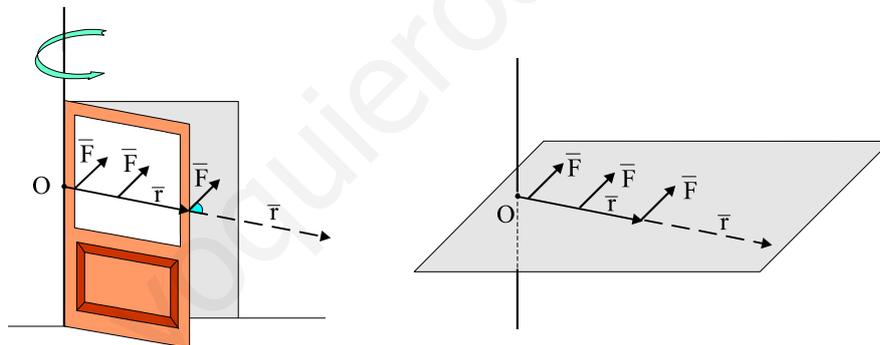
¿Cuáles son esos factores?

Cabe pensar que en el giro, además del valor de la fuerza ejercida, influyen también la distancia desde el punto de aplicación de la misma al eje de giro y la dirección en la que actúe, es decir:  $\alpha = \alpha(|\vec{F}|, |\vec{r}|, \varphi)$  siendo  $|\vec{F}|$  el módulo de la fuerza ejercida,  $|\vec{r}|$  la distancia de su punto de aplicación al eje y  $\varphi$  el ángulo que forma el vector fuerza con el vector  $\vec{r}$ .

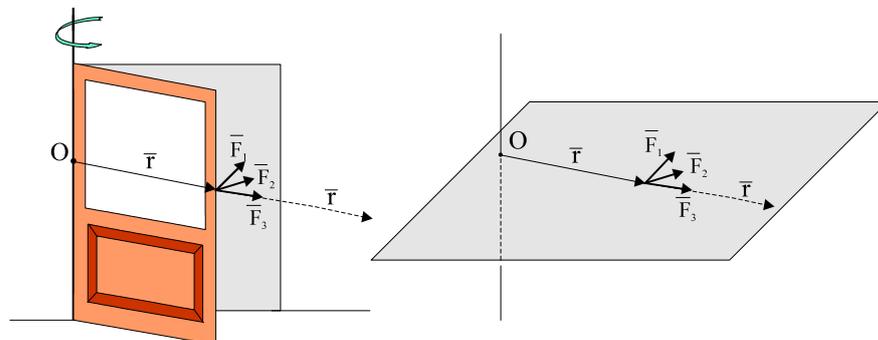


¿Cómo influirá cada uno de los factores anteriores?

Consideremos el caso de una puerta a la que apliquemos la misma fuerza pero a diferentes distancias del eje de giro. Podemos comprobar que la puerta cierra o abre tanto más fácilmente (la aceleración angular es mayor) cuanto mayor sea la distancia  $|\vec{r}|$  existente entre el punto de aplicación y el eje de giro y también cuanto mayor sea el valor  $|\vec{F}|$  de la fuerza aplicada.



No obstante es necesario matizar la apreciación anterior ya que el efecto de giro que se puede conseguir con fuerzas de igual valor y aplicadas en el mismo punto pero que se ejercen en direcciones distintas, puede ser muy diferente.



## Anexo1. Cálculo vectorial

Así en el esquema anterior podemos pensar que, a igualdad de los restantes factores, la aceleración angular que se conseguirá con  $\vec{F}_1$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) será máxima, mientras que con  $\vec{F}_2$  será menor y con  $\vec{F}_3$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) será nula (también lo sería si  $\varphi$  valiese  $180^\circ$ ). Esta dependencia lleva a pensar que la aceleración angular dependerá del ángulo mediante la función  $\text{sen } \varphi$ , ya que el valor de dicha función va aumentando desde 0 (para  $\varphi = 0$ ) hasta su valor máximo 1 (para  $\varphi = 90^\circ$ ), para luego ir disminuyendo hasta valer 0 de nuevo cuando  $\varphi = 180^\circ$ .

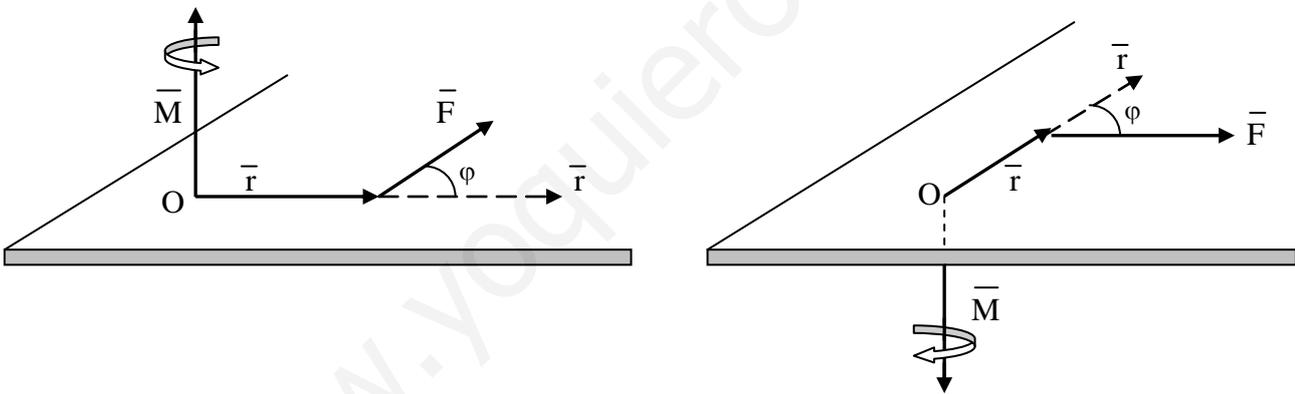
La comprobación experimental de las hipótesis anteriores nos permite justificar la introducción de una nueva magnitud llamada “momento de una fuerza” definida como:

$$|\vec{M}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \cdot \text{sen } \varphi$$

Se trata de una magnitud vectorial puesto que el giro que provoca (en un sentido o en otro), depende de la dirección de los vectores  $\vec{r}$  y  $\vec{F}$ .

Dado que el giro de la puerta o de cualquier otro objeto sobre el que actúa un momento resultante, tiene lugar en un eje perpendicular al plano formado por los vectores  $\vec{r}$  y  $\vec{F}$ , se conviene que el vector  $\vec{M}$  es un vector perpendicular al plano formado por  $\vec{r}$  y  $\vec{F}$  y su sentido viene dado por el del avance de un tornillo que rosca de  $\vec{r}$  a  $\vec{F}$  por el camino más corto cuando se hace coincidir el origen de ambos vectores (sin cambiarlos).

En las figuras siguientes se muestran dos ejemplos característicos:



La determinación del vector momento de una fuerza es un caso particular de una operación entre vectores denominada “producto vectorial”. En general, el producto vectorial de dos vectores cualesquiera  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  se representa como  $\vec{a} \times \vec{b}$ . El resultado de dicha operación es otro vector  $\vec{c}$  que tiene las siguientes características:

- ✓ Es perpendicular al plano formado por los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$
- ✓ Su sentido coincide con el del avance de un tornillo que girese del primero hacia el segundo
- ✓ Su módulo viene dado por  $|\vec{c}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \text{sen } \varphi$

Al igual que ocurre con el producto escalar, el producto vectorial de dos vectores cualesquiera  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  también puede obtenerse a partir de las componentes de dichos vectores.

**A.31.** Teniendo en cuenta los ángulos que forman entre sí los vectores unitarios cartesianos, calcular los productos vectoriales  $\vec{i} \times \vec{i}$ ,  $\vec{i} \times \vec{j}$  etc. y a continuación determinad el vector  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$  en la forma:  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b} = (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \times (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k})$

**A.32.** Comprobad que la operación anterior se puede facilitar utilizando determinantes.

**A.33.** Obtened el producto vectorial  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$  siendo  $\vec{a} = (3, 2, -1)$  y  $\vec{b} = (2, 0, 2)$ . Calculad el módulo del vector  $\vec{c}$  y comprobad que  $\vec{c}$  es perpendicular a cualquiera de los otros dos.

**A.34.** Calculad un vector unitario que sea perpendicular al plano definido por los vectores concurrentes:  $\vec{a} = \vec{i} - \vec{j} + \vec{k}$  y  $\vec{b} = \vec{i} + 2\vec{j} + 3\vec{k}$ .

Hemos de obtener un vector que cumpla dos condiciones: que sea perpendicular al plano formado por otros dos y que tenga de módulo 1. Para que cumpla la primera, basta con efectuar el producto vectorial de los dos vectores que figuran en el enunciado,  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$  ya que siempre que se realiza este tipo de producto entre dos vectores se obtiene un vector perpendicular al plano en el que están contenidos ambos. En cuanto a la segunda condición, sólo hay que dividir el vector  $\vec{c}$  por su propio módulo.

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} = (-3 - 2)\vec{i} - (3 - 1)\vec{j} + (2 + 1)\vec{k} = -5\vec{i} - 2\vec{j} + 3\vec{k}$$

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2} = \sqrt{25 + 4 + 9} = \sqrt{38}$$

$$\vec{u} = \frac{\vec{c}}{c} = \frac{-5\vec{i} - 2\vec{j} + 3\vec{k}}{\sqrt{38}} = -\frac{5}{\sqrt{38}}\vec{i} - \frac{2}{\sqrt{38}}\vec{j} + \frac{3}{\sqrt{38}}\vec{k}$$

¿Cómo podríamos analizar el resultado para comprobar que el vector obtenido es efectivamente perpendicular a los otros dos?

Podemos utilizar el producto escalar entre el vector  $\vec{u}$  y los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$ . Como  $\vec{u} \cdot \vec{a} = u \cdot a \cdot \cos \varphi$  ( $\varphi$  es el ángulo que forman  $\vec{u}$  y  $\vec{a}$ ) si  $\vec{u}$  y  $\vec{a}$  son perpendiculares su producto escalar tendría que ser 0 (y análogamente con el vector  $\vec{b}$ ).

$$\text{En efecto: } \vec{u} \cdot \vec{a} = \left(-5/\sqrt{38}, -2/\sqrt{38}, 3/\sqrt{38}\right) \cdot (1, -1, 1) = -5/\sqrt{38} + 2/\sqrt{38} + 3/\sqrt{38} = 0$$

Análogamente ocurrirá si efectuamos el producto escalar  $\vec{u} \cdot \vec{b}$

[www.yoquieroaprobar.es](http://www.yoquieroaprobar.es)

## ANEXO 2. FORMULACIÓN Y NOMENCLATURA DE QUÍMICA INORGÁNICA

### INTRODUCCION

En la naturaleza existen millones de sustancias y éstas en la mayor parte de los casos se encuentran más o menos mezcladas unas con otras. Desde muy antiguo los científicos han intentado separar de las mezclas naturales algunas sustancias que interesaban por un motivo u otro (extracción de minerales, obtención de algún principio activo con propiedades curativas a partir de ciertas plantas, etc.). En otros casos el proceso ha sido distinto y a partir de unas sustancias, mediante las reacciones químicas apropiadas, se han obtenido otras sustancias nuevas de propiedades diferentes a las que tenían las de partida.

De una u otra forma, estos procesos de separaciones y de síntesis, se han venido repitiendo a lo largo del tiempo y han permitido aislar ya varios **millones de compuestos químicos**. Sin embargo todos los compuestos existentes, están formados por distintas combinaciones de menos de un centenar de elementos químicos. Así, el agua pura está formada únicamente por hidrógeno y oxígeno; el butano, por carbono e hidrógeno; el yeso (deshidratado) por azufre, oxígeno y calcio, etc.

A medida que el número de compuestos aislados (naturales o artificiales) se fue incrementando, los químicos pronto se vieron en la **necesidad de inventar un sistema** para poder entenderse y evitar que un mismo compuesto fuese "bautizado" de formas distintas dependiendo del gusto de cada uno. Las normas para nombrar y formular compuestos, han sido establecidas por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), que son las que fundamentalmente seguiremos aquí. Para ello resulta especialmente útil el siguiente sistema periódico:

### 1. TABLA PERIÓDICA

Tabla 1. Elementos más comunes del sistema periódico

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>											3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>
H <sup>+</sup>																H <sup>-</sup>	He
Li <sup>+</sup>	Be <sup>+2</sup>											B <sup>-3</sup>	C <sup>-4</sup>	N <sup>-3</sup>	O <sup>-2</sup>	F <sup>-</sup>	Ne
Na <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>											Al <sup>+3</sup>	Si <sup>-4</sup>	P <sup>-3</sup>	S <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ar
K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>		Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn <sup>+2</sup>		Ge <sup>-4</sup>	As <sup>-3</sup>	Se <sup>-2</sup>	Br <sup>-</sup>	Kr
Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>+2</sup>									Ag <sup>+</sup>	Cd <sup>+2</sup>		Sn	Sb <sup>-3</sup>	Te <sup>-2</sup>	I <sup>-</sup>	Xe
Cs <sup>+</sup>	Ba <sup>+2</sup>								Pt	Au	Hg		Pb	Bi <sup>+3</sup>			

Metales
  Semimetales
  No metales
  Gases nobles

En la segunda fila de la tabla anterior aparece la numeración de las columnas correspondientes al sistema periódico corto que corresponde a los elementos representativos. Los elementos que aparecen en los grupos 3 al 12 son los metales de transición.

Los electrones de un átomo están organizados en capas o niveles de energía de forma que el número de electrones de la última capa coincide con el número de la columna del sistema periódico donde se encuentra cada elemento (**casillas sombreadas en amarillo**). El hidrógeno también ha sido

situado en la séptima columna por las razones que se explicarán más adelante. La estructura electrónica de los gases nobles consiste en una estructura estable y todos ellos (menos el He) tienen 8 electrones en el último nivel de energía.

*A.1. Dad el nombre y memorizad la posición de cada uno de los elementos de que consta la tabla periódica anterior.*

*A.2. Predecid, a partir de la columna en donde está situado cada uno, qué iones pueden formar más fácilmente los siguientes elementos: Li, Mg, O, Cl, Ca.*

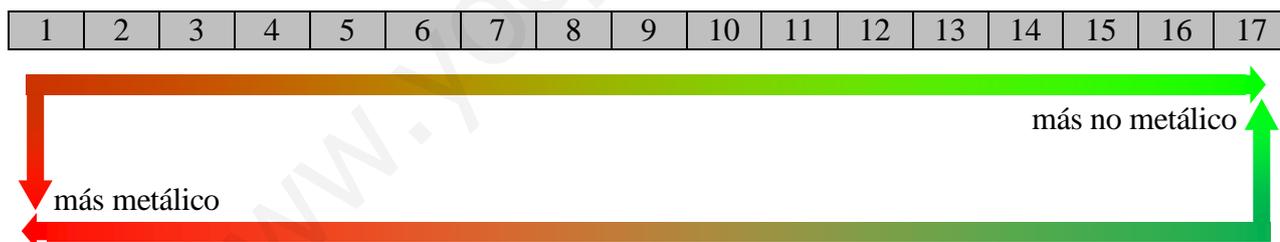
## 2. CARÁCTER METÁLICO Y NO METÁLICO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS.

Sabemos que un elemento es tanto más **metálico**, cuanto más fácil es arrancarle electrones (menos energía cuesta). Por el contrario se dice que es más **no metálico**, cuanto más energía cuesta quitarle electrones. Los elementos más no metálicos son los que les faltan menos electrones para tener la misma estructura electrónica que un gas noble (estructura estable). Los más metálicos son los que les sobran menos electrones para adquirir dicha estructura.

Para entenderse mejor, a veces se habla de "tendencia" de los átomos a ganar y perder electrones, señalando que los más metálicos son aquellos que más tendencia tienen a perder electrones y viceversa.

El carácter no metálico de los elementos en general aumenta hacia la derecha del **sistema periódico** y hacia arriba mientras que el carácter más metálico aumenta hacia la izquierda y hacia abajo, así en la tabla anterior el elemento más no metálico es el flúor y el más metálico el Cs. Esta tendencia se explica, en parte, porque la energía necesaria para arrancar un electrón exterior a un átomo neutro es tanto menor cuanto más grande sea el "radio atómico" (más alejado esté el electrón del núcleo) el cual, en general, aumenta conforme se desciende en una familia y disminuye según nos desplazamos hacia la derecha en un periodo.

Evolución del carácter metálico y no metálico en el sistema periódico



Algunos elementos situados entre los grupos 13 y 16 tienen un carácter intermedio entre metal y no metal y se denominan semimetales (B, Si, Ge, As, Sb, Te).

Cuando dos átomos diferentes se enlazan, siempre hay uno más metálico que el otro. El número de electrones sobre los que un átomo gana o pierde dominio, cuando se enlaza con otro, se llama **índice de oxidación** (positivo si se pierde dominio, negativo si se gana).

A los átomos que, cuando se enlazan con otro, más fuertemente atraen a los electrones del enlace, se les denomina más **electronegativos** y se dice de ellos que tienen más "apetencia" por electrones<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Es importante aclarar que estas expresiones no son sino una forma, frecuente, de hablar y que sería absurdo pensar que los átomos tienen realmente "apetencias" o cosas por el estilo.

Cuando tengamos que escribir la fórmula de un compuesto formado por dos elementos, siempre escribiremos a la derecha el símbolo del elemento que aparece primero en la serie siguiente:

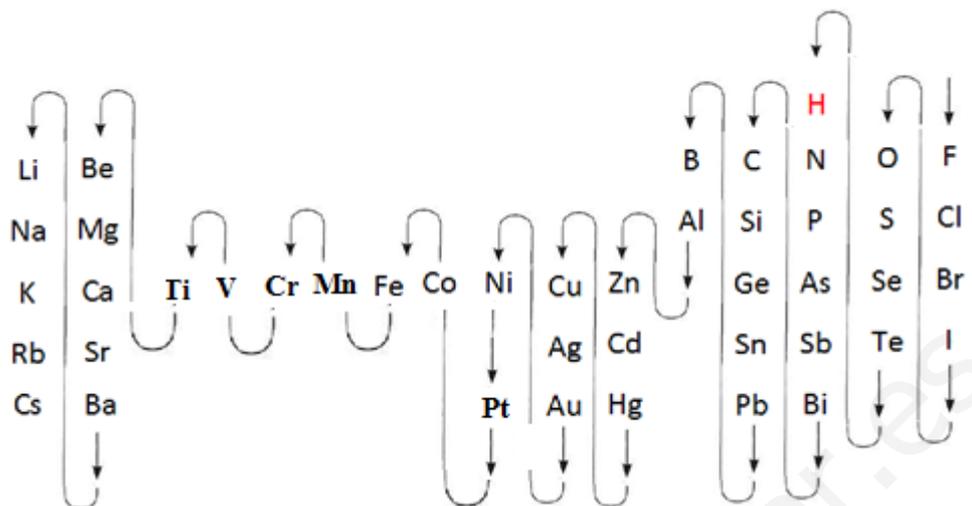


Figura 1. Secuencia de elementos según su electronegatividad

En la figura anterior, la flecha indica, con alguna excepción, el orden en que va disminuyendo la electronegatividad. En efecto, la electronegatividad va decreciendo, en general, desde el flúor (el más electronegativo) hasta el cesio (el menos electronegativo) con la excepción del oxígeno que es, en realidad, más electronegativo que el cloro pero que, por convenio, se pone antes del azufre. Como puede verse, la figura es un calco del sistema periódico, aunque se ha alterado la posición del hidrógeno, que en lugar de aparecer en la 1ª columna se encuentra el primero de los elementos correspondientes a la 5ª columna del sistema periódico corto.

**A.3. Razonad cuál sería el índice de oxidación que tendrían los elementos de cada grupo de los elementos representativos (sistema periódico corto) en función de la regla del octeto (índice de oxidación principal).**

Los de los grupos 1, 2 y 13 tendrían como índice de oxidación **I**, **II** y **III** ya que han de perder 1, 2 y 3 electrones respectivamente para adquirir estructura electrónica de gas noble. Los del grupo 14, actuarán con índice de oxidación **IV**. Finalmente, los de los grupos 15, 16 y 17, tendrían como índices de oxidación principal, **(-III)**, **(-II)** y **(-I)** (negativos todos ellos) ya que esos son precisamente los electrones que respectivamente han de ganar para completar el octeto. (Resulta más fácil energéticamente que, el cloro, por ejemplo, gane un electrón y adquiera la misma estructura electrónica que el gas noble Ar, que arrancarle siete para que se quede con la misma estructura que el gas noble Ne). En el grupo 13 el boro, es un elemento excepcional (semimetal), que por su pequeño tamaño se comporta como un no metal aceptando 3 electrones por tanto con índice de oxidación **(-III)**.

Si cada elemento químico tuviese un sólo índice de oxidación, la formulación sería más sencilla. Sin embargo un mismo elemento puede actuar con varios índices de oxidación, dependiendo no sólo del número de electrones que le falten o le sobren para alcanzar la estructura electrónica de gas noble (índice de oxidación principal), sino **también de otros factores** que se irán analizando en cursos superiores. Pero esto no es un gran inconveniente puesto que para formular correctamente solo hemos de memorizar los índices de oxidación que aparecen en la tabla 1 (que corresponden a la tendencia de los elementos a cumplir la regla del octeto). En el caso de los no metales, grupos 13 a 17,

## Anexo 2. Formulación y nomenclatura de química inorgánica

el índice de oxidación (negativo) corresponde a los compuestos en los que es el elemento más electronegativo, pero hay que tener en cuenta que también pueden actuar con números de oxidación positivos, cuando se combina con otro más electronegativo que él. Al igual que en los metales, esto no es un problema puesto que nos indicarán de alguna forma su índice de oxidación.

### 3. SUSTANCIAS SIMPLES

Son sustancias formadas por uno o varios átomos de un mismo elemento. Para nombrarlas utilizamos prefijos multiplicadores que indican el número de átomos que forman la molécula. En la tabla siguiente aparecen los prefijos numerales utilizados para indicar la cantidad de átomos.

Tabla 3. Prefijos numerales

Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prefijo	mono	di	tri	tetra	penta	hexa	hepta	octa	enea	deca

**Nomenclatura de sustancias simples:** Se nombra el prefijo multiplicador seguido del nombre del elemento.

Ejemplo:  $N_2$  = Dinitrógeno.

**Formulación de las sustancias simples:** Se escribe el símbolo del elemento seguido del número como subíndice que indica el prefijo.

Ejemplo: Trioxígeno =  $O_3$  (también denominado ozono).

A.4. Formulas: a) Dicloro, b) Tetrafósforo, c) Octaazufre

A.5. Nombrar: a)  $H_2$  b) Ar c)  $As_4$

### 4. COMBINACIONES ENTRE METALES Y NO METALES (SALES BINARIAS)

A continuación trataremos acerca de los compuestos que se forman cuando se combinan dos elementos (uno metálico y el otro no metálico). Nos centraremos en el caso de que ninguno de los dos sea el hidrógeno ni el oxígeno (sales binarias neutras).

En este tipo de compuestos (fundamentalmente iónicos) el no metal, **suele** presentarse en un único estado de oxidación (negativo, por supuesto) que, en valor absoluto, coincide con el número de electrones que le faltan para tener estructura electrónica estable de gas noble.

1	2		13	14	15	16	17
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
I	II		III	-IV	-III	-II	-I

#### 4.1. Nomenclatura con el número de oxidación

**Nomenclatura de las sales binarias:** El nombre del no metal acabado en **uro**, seguido del nombre del metal, con indicación del índice de oxidación de **este último** en números romanos y entre paréntesis (sólo en el caso de que tenga más de uno).

Ejemplo:  $FeCl_3$  Cloruro de hierro(III).

### ¿Cómo determinar el número de oxidación del metal?

Se asigna el número de oxidación al no metal y se multiplica por su subíndice, lo cual nos proporciona la cantidad de electrones ganados por el no metal. Estos electrones serán precisamente los que ha "perdido" el metal. Para saber el índice de oxidación del metal, bastará con dividir dicho número entre la cantidad de átomos de metal presente en la fórmula.

Veamos un ejemplo: En el  $\text{Fe}_2\text{S}_3$ , el azufre tiene índice de oxidación -II y como hay 3 átomos de azufre, interpretamos que se han ganado 6 electrones que deberán provenir de los átomos de hierro. Para saber el índice de oxidación del hierro basta ahora con dividir estos 6 electrones entre los dos átomos de hierro de la fórmula, lo que nos lleva a concluir que cada átomo de hierro pierde 3 electrones y que el índice de oxidación del hierro es, por tanto, III (positivo).

**Formulación de las sales binarias:** Basta con escribir los símbolos de los elementos uno a continuación del otro, colocando siempre el menos electronegativo (el metal) a la izquierda. A continuación se procede a intercambiar sus índices de oxidación respectivos, colocándolos en forma de subíndices. En caso de ser posible se simplifica dividiendo por un número entero.

Ejemplo: Cloruro de calcio

-Escribimos los símbolos uno a continuación del otro, con el calcio a la izquierda:  $\text{CaCl}$

-El índice de oxidación del calcio es II y el del cloro -I

-Intercambiamos los correspondientes índices de oxidación (sin signo y con numeración decimal), lo que nos conduce a:  $\text{CaCl}_2$  (como ya sabemos, el 1 no se pone).

Conviene darse cuenta de que en el cloruro de calcio, cada átomo de calcio pierde dos electrones, mientras que cada cloro solo puede ganar uno, por eso necesitamos que haya el doble de átomos de cloro que de calcio. Así pues, en el cloruro de calcio, por cada ion  $\text{Ca}^{2+}$  hay 2 iones  $\text{Cl}^-$ , de este modo el compuesto es eléctricamente neutro.

**A.6. Formulad:** a) Sulfuro de titanio(IV), b) Nitruro de litio, c) Cloruro de platino(II)

**A.7. Nombrad los siguientes compuestos:** a)  $\text{Al}_4\text{C}_3$  b)  $\text{Na}_2\text{S}$  c)  $\text{AgI}$

### 4.2. Nomenclatura con prefijos multiplicadores

**Nomenclatura de las sales binarias:** Se escribe el **prefijo** multiplicador del no metal (subíndice del elemento que aparece a la derecha), a continuación **la raíz del nombre del no metal terminado en "uro"**, la palabra "de", y el **prefijo multiplicador del metal (subíndice del elemento que aparece a la izquierda)** seguido del **nombre del metal**.

Ejemplo:  $\text{Zn}_3\text{P}_2 = \text{Difosfuro de trizinc}$

**Formulación de las sales binarias:** Escribimos el símbolo del metal con el subíndice indicado por su prefijo multiplicador y después el símbolo del no metal con su subíndice correspondiente (en caso de que sea distinto de 1).

Ejemplo: Seleniuro de dipotasio, se escribe como:  $\text{K}_2\text{Se}$

**A.8. Formulad:** a) Dicloruro de mercurio, b) Fosfuro de tricobre, c) Arseniuro de cobalto(II)

**A.9. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas, completando la tabla.**

Fórmula	Nomenclatura con	
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores
AgF		
Ni <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		
Ba <sub>3</sub> N <sub>2</sub>		

Los compuestos anteriores se caracterizan principalmente por la elevada diferencia de electronegatividad entre los átomos de los elementos correspondientes, lo que hace que sus fórmulas se puedan justificar suponiendo una transferencia de electrones desde el metal al no metal, es decir, que el metal pierde electrones y el no metal los gana (enlace iónico). También se suele decir una pérdida de dominio total (o casi total) de electrones y una ganancia de dominio total (o casi total) de electrones.

No obstante, sabemos que el número de compuestos iónicos es comparativamente muy pequeño frente al total de sustancias conocidas. Así, por ejemplo, hay sustancias que están formadas por moléculas diatómicas (donde al ser átomos iguales la diferencia de electronegatividad es nula), y muchos compuestos en los que se combinan elementos no metálicos entre sí, como por ejemplo el agua, el amoníaco, el dióxido de carbono, etc., en donde la diferencia de electronegatividad no es muy grande y no permite suponer que un elemento pierde total o casi totalmente, el dominio sobre sus electrones de valencia. Seguidamente, veremos estos casos.

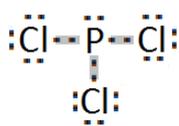
## 5. COMBINACIONES BINARIAS ENTRE NO METALES

A continuación trataremos acerca de los compuestos que se forman cuando se combinan dos elementos **no** metálicos. Seguiremos considerando que ninguno de los dos sea el hidrógeno ni el oxígeno. En este caso, el enlace no puede justificarse, como antes, mediante el intercambio de electrones (enlace iónico) ya que ambos elementos necesitan ganar electrones para adquirir la misma estructura electrónica que el gas noble más próximo. Lo que ocurre es una "compartición" de electrones (enlace covalente).

**Las reglas en cuanto a nombrar y formular estos compuestos, siguen siendo las mismas** que anteriormente, solo que en lugar de referirnos a metal y no metal, como ambos son no metales, hablaremos de menos electronegativo y más electronegativo (respectivamente). Además, ahora se comparten electrones pero, debido a la diferencia de electronegatividad, esta compartición no es por igual y hablamos de que el más electronegativo gana dominio sobre los electrones del enlace mientras que el menos electronegativo pierde dominio sobre esos mismos electrones, aunque se trate de una ganancia y pérdida de dominio parciales.

El átomo más electronegativo es el que se escribe más a la derecha (consultar figura 1) y actúa con número de oxidación negativo (el correspondiente a su posición en la tabla periódica), en cambio, para el átomo menos electronegativo que aparece a la izquierda, hay que calcular su número de oxidación a partir de la fórmula e indicarlo al nombrar el compuesto, de forma similar a como se hacía en el apartado anterior.

Ejemplo: PCl<sub>3</sub>. Ambos comparten electrones hasta completar el octeto. El P (grupo 15 del sistema periódico) ha de ganar tres electrones mientras que el cloro (grupo 17) ha de ganar un solo electrón. Por tanto, hacen falta tres cloros por cada átomo de fósforo, formándose los tres enlaces covalentes simples que se indican en el diagrama de Lewis siguiente:



Como vemos se comparten tres pares de electrones. Sin embargo, dado que el cloro es más electronegativo, en una primera aproximación, podemos pensar que tira de ellos con más fuerza y están más cerca del cloro que del fósforo, es decir, el P pierde dominio (parcial) sobre tres electrones y cada uno de los tres Cl gana dominio (parcial) sobre un electrón. Como solo hay un átomo de fósforo, está claro que su índice de oxidación es aquí III (positivo) y el compuesto deberá nombrarse como: Cloruro de fósforo(III).

**A.10.** Formulad: a) Bromuro de fósforo(III), b) Disulfuro de carbono, c) Seleniuro de plomo(II)

**A.11.** Nombrad según las nomenclaturas estudiadas, completando la siguiente tabla:

Fórmula	Nomenclatura con	
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores
PI <sub>5</sub>		
Si <sub>3</sub> P <sub>4</sub>		
NF <sub>3</sub>		

## 6. COMBINACIONES BINARIAS DEL HIDROGENO

Dado que el átomo de hidrógeno sólo tiene un electrón, en sus combinaciones puede cederlo, compartirlo o ganar otro, para adquirir la estructura electrónica del He, por lo que su índice de oxidación **siempre** será **I** o **-I**. Para formular los compuestos binarios del hidrógeno hay que situar este a la izquierda o a la derecha según actúe como metal (perdiendo dominio sobre su único electrón) o no metal (ganando dominio sobre un electrón del otro átomo). Esta es la razón por lo que en el sistema periódico figura a la vez en el grupo 1 o en el grupo 17 (puesto que, en algunos casos, actúa como alcalino o como halógeno).

### 6.1. Combinaciones binarias del hidrógeno con un metal (Hidruros)

La combinación del H con los elementos de las dos primeras columnas del sistema periódico forma los hidruros salinos. En estos casos la diferencia de electronegatividad es grande y a favor del hidrógeno, por lo que en estos compuestos el índice de oxidación del H siempre será **-I** y el metal actuará con el que le corresponda. Se denominan "Hidruros". Lo mismo sucede con algunos metales de los grupos 13 y 14.

1	2		13	14		17
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>		H
I	II		III	II y IV		-I

#### Nomenclatura de los Hidruros

Con número de oxidación: Se escriben las palabras: **hidruro de** y, a continuación, se añade el nombre del metal. Si se trata de un metal que puede actuar con más de un índice de oxidación, se especifica cuál es, indicándolo entre paréntesis.

Ejemplos:

MgH<sub>2</sub> = Hidruro de magnesio,      CuH = Hidruro de cobre(I),      PbH<sub>2</sub> = Hidruro de plomo(II)

Con prefijos multiplicadores: Se escribe el prefijo que indica la cantidad de hidrógenos seguido de las palabras **hidruro de**, y finalmente el nombre del metal.

Ejemplo:  $\text{SnH}_2$  = Dihidruro de estaño

### Formulación de los Hidruros

**Con número de oxidación:** Se escribe el símbolo del metal seguido del hidrógeno y se coloca, como subíndice del hidrógeno, el número (en valor absoluto) que indica el índice de oxidación del metal (sólo si es distinto de 1).

Ejemplo: Hidruro de hierro(III) =  $\text{FeH}_3$

**Con prefijos multiplicadores:** Se coloca el símbolo del metal y después el del hidrógeno con el subíndice correspondiente al prefijo del hidrógeno.

Ejemplo: Tetrahidruro de plomo =  $\text{PbH}_4$

**A.12. Formulad:** a) Hidruro de sodio, b) Hidruro de cinc, c) Hidruro de oro(III), d) Trihidruro de cromo

**A.13. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas, completando la tabla siguiente:**

Fórmula	Nomenclatura con	
	Número de oxidación	Prefijos multipladores
$\text{CoH}_3$		
$\text{BeH}_2$		
$\text{CuH}_2$		

### 6.2. Combinaciones binarias del hidrógeno con no metales de los grupos 16 y 17.

Las combinaciones del H con los no metales del grupo 17 se denominan "**Haluros de hidrógeno**" y las combinaciones del H con los no metales del grupo 16 se llaman "**Anfígenuros de hidrogeno**". Cuando ambas se disuelven en agua forman disoluciones acuosas ácidas y entonces se denominan "**Hidrácidos**".

Tanto el hidrógeno como el no metal, tienen "apetencia" por los electrones, por lo que los enlaces en estos compuestos serán, fundamentalmente, covalentes (compartirán electrones). Como el no metal que acompaña el H es más electronegativo que él, se forman enlaces covalentes polares, y en consecuencia, el H actúa con índice de oxidación I, mientras el no metal, actúa con el índice de oxidación principal (negativo) "tratando" de adquirir la configuración electrónica del gas noble más cercano.

1
H
I

16	17
6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
-II	-I

**Nomenclatura de los haluros de hidrógeno:** Se indica el nombre del no metal acabado en **uro** seguido de la expresión: **de hidrógeno**.

Ejemplo: Sulfuro de hidrógeno =  $\text{H}_2\text{S}$ . Al S le faltan dos electrones para completar su octeto, por lo que, por cada S, deberá haber dos H. El resultado es equivalente a escribir HS y a continuación intercambiar los respectivos índices de oxidación (con lo que queda  $\text{H}_2\text{S}$ ).

**Nomenclatura de los hidrácidos:** Se escribe la palabra **ácido** seguida del nombre del no metal acabado en **hídrico**.

Ejemplos: HCl = Cloruro de hidrógeno  
 HCl(ac) = Ácido clorhídrico (ac significa "en disolución acuosa")  
 H<sub>2</sub>S = Sulfuro de hidrógeno  
 H<sub>2</sub>S(ac) = Ácido sulfhídrico

Explicación: El no metal debe ganar electrones (uno o dos, según sea del grupo 17 o del grupo 16 respectivamente), mientras el hidrógeno tiene un único electrón y le falta otro para adquirir estructura electrónica estable de gas noble. Esto hace que se unan mediante un enlace covalente. Así, en el caso del H<sub>2</sub>S, por ejemplo, el átomo de S (sexta columna) le faltan dos electrones, por lo que compartirá dos de los electrones de valencia con otros tantos átomos de hidrógeno, según el esquema siguiente:



En el compuesto anterior, cada hidrógeno pierde dominio sobre su único electrón, mientras que el azufre gana dominio sobre dos electrones (uno de cada hidrógeno). Insistimos en que se trata de una ganancia y pérdida de dominio parciales, ya que los electrones se comparten sin llegar a transferirse, pero se puede decir que están más próximos al S (que tira de ellos con más fuerza al ser más electronegativo).

### Formulación de los haluros y anfígenos de hidrógeno

En primer lugar se coloca el símbolo del hidrógeno, seguido del correspondiente al no metal. Se intercambian los números de oxidación colocando como subíndice del hidrógeno el índice de oxidación principal correspondiente al no metal (el del H es I y no se escribe).

Ejemplo: Seleniuro de hidrógeno. Primero se escribe: HSe. A continuación, se coloca un 2 al H como subíndice, porque el índice de oxidación principal del selenio (sexta columna del sistema periódico) es II. La fórmula del seleniuro de hidrógeno es H<sub>2</sub>Se.

### Regla práctica para la formulación de los hidrácidos

Se formula el haluro o anfígeno de hidrógeno del cual proviene el hidrácido y a continuación se añade detrás de la fórmula "(ac)" o bien "(aq)" que significa "en disolución acuosa"

Ejemplo: Ácido bromhídrico. Primero se escribe la fórmula del haluro de hidrógeno del cual proviene el hidrácido, en este caso bromuro de hidrógeno (HBr). Detrás de la fórmula se coloca entre paréntesis "ac" que quiere decir acuoso (o en disolución con agua). La fórmula del ácido bromhídrico es: HBr(ac).

**A.14. Formulad:** a) Fluoruro de hidrógeno, b) Ácido yodhídrico, c) Ácido clorhídrico

**A.15. Nombrad:** a) HF(ac), b) HCl, c) H<sub>2</sub>S(ac)

### 6.3. Combinaciones binarias del hidrógeno con no metales de los grupos 13, 14 y 15

Como ocurría con los elementos de las columnas 6<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup>, tanto el hidrógeno como el otro elemento tienen "apetencia" por los electrones, pero en este caso el hidrógeno es más electronegativo que los no metales y por ello actuará con número de oxidación negativo (-I), mientras que el no metal actua-

## Anexo 2. Formulación y nomenclatura de química inorgánica

rá con número de oxidación positivo "tendiendo" a adquirir la configuración electrónica del gas noble más cercano.

	13	14	15		17
	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>		H
	III	IV	III		-I

**Nomenclatura de los compuestos de los elementos de los grupos 13, 14 y 15 con el hidrógeno:** Se indica la palabra **hidruro** seguida de **de** y finalmente se añade el nombre del no metal.

Ejemplos:  $\text{BH}_3$  (Hidruro de boro);  $\text{SiH}_4$  (Hidruro de silicio);  $\text{SbH}_3$  (Hidruro de antimonio)

Explicación: El no metal debe ganar electrones (cuatro o tres, según sea del grupo 14 o 15 respectivamente), el hidrógeno también necesita un electrón para adquirir configuración electrónica de gas noble. Como ambos elementos tienen tendencia a ganar electrones se unen compartiendo electrones (formando enlaces covalentes).

En el caso del  $\text{SiH}_4$ , como el silicio está en la 4<sup>a</sup> columna tiene cuatro electrones de valencia que tendrá que compartir con cuatro hidrógenos, según la primera figura del esquema de Lewis siguiente:



El caso del boro es excepcional, como se muestra en la segunda figura anterior, ya que pertenece al grupo 13 y por lo tanto sólo tiene 3 electrones en la última capa, por ello sólo puede compartir estos tres electrones con otros tres hidrógenos formando tres enlaces covalentes. El boro en este compuesto no alcanza la configuración electrónica de gas noble (necesitaría compartir 5 electrones).

Algunos de estos compuestos reciben nombres especiales, que han de conocerse porque se utilizan frecuentemente. En la tabla siguiente se muestran los más comunes:

Fórmula	Nombre	Nombre propio o tradicional
$\text{BH}_3$	Hidruro de boro	Borano
$\text{CH}_4$	Hidruro de carbono	Metano
$\text{SiH}_4$	Hidruro de silicio	Silano
$\text{NH}_3$	Hidruro de nitrógeno	Amoniaco o Azano
$\text{PH}_3$	Hidruro de fósforo	Fosfano
$\text{AsH}_3$	Hidruro de arsénio	Arsano
$\text{SbH}_3$	Hidruro de antimonio	Estibano
$\text{BiH}_3$	Hidruro de bismuto	Bismutano

### Formulación de los compuestos de los elementos de los grupos 13, 14 y 15 con el hidrógeno.

En primer lugar se coloca el símbolo del no metal, a continuación el del hidrógeno y se intercambian los números de oxidación colocando como subíndice del hidrógeno el número de oxidación principal del no metal.

Ejemplo: Hidruro de bismuto. Primero se escribe Bi H. A continuación se coloca un 3 al hidrógeno como subíndice, porque el índice de oxidación principal del bismuto es (III). Al Bi no se le coloca ningún subíndice ya que el índice de oxidación del hidrógeno es (-I). La fórmula del Hidruro de bismuto es  $\text{BiH}_3$ .

**A.16. Formulad:** a) Hidruro de arsénico, b) Amoniaco, c) Metano

**A.17. Nombrad:** a)  $\text{SiH}_4$  b)  $\text{BH}_3$  c)  $\text{PH}_3$

## 7. COMBINACIONES BINARIAS DEL OXIGENO: ÓXIDOS Y PERÓXIDOS

A continuación veremos los casos en los que el oxígeno se combina con otro elemento, distinguiendo entre tres situaciones diferentes:

1ª) El oxígeno se combina con número de oxidación (-II) con cualquier elemento que no pertenezca al grupo 17 de la tabla periódica (halógenos). Los compuestos formados se llaman: **óxidos**.

2ª) Se combina, también con número de oxidación (-II), con cualquier elemento del grupo 17. Los compuestos formados se llaman: **haluros de oxígeno**.

3ª) Se combina con metales de los grupos 1 y 2, hidrogeno (H), cobre (Cu) o zinc (Zn) en forma de ión peróxido ( $\text{O}_2^{2-}$ ) con número de oxidación (-I).

A continuación nos detendremos en analizar cada una de las tres situaciones anteriores:

### 7.1. Óxidos

En estos compuestos, el oxígeno (que es muy no metálico y muy electronegativo) siempre actúa con índice de oxidación -II, "tratando" de ganar los 2 electrones que le faltan para adquirir configuración electrónica estable de gas noble. El otro elemento en cambio, si es metal perderá electrones y si es no metal, compartirá electrones (formando enlaces covalentes polares).

1	2		13	14	15	16	
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	O
I	II		III	variable	variable	variable	-II

### Nomenclatura de los óxidos:

Con números de oxidación: En la palabra óxido se añade el nombre del otro elemento. En caso de que presente más de un índice de oxidación, se especifica de cuál de ellos se trata, poniéndolo entre paréntesis (y en numeración romana) al final.

Ejemplos:  $\text{CuO}$  = Óxido de cobre(II);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = Óxido de aluminio;  $\text{SO}_2$  = Óxido de azufre(IV)

### ¿Cómo determinar el número de oxidación del elemento que se combina con el oxígeno?

El número de oxidación del oxígeno es -II, cada átomo de oxígeno, por ser más electronegativo, tiende a ganar dos electrones. Por ello, multiplicando el número de oxígenos por (-2) obtendremos los electrones sobre los que el oxígeno gana dominio. Como ya sabemos, dicho número ha de coincidir con los electrones sobre los cuales pierde dominio el otro elemento enlazado con el oxígeno. Dividiendo este valor en positivo para el número de átomos obtendremos su número de oxidación.



En la fórmula anterior cada átomo de oxígeno gana dominio sobre 2 electrones. Como hay dos átomos de oxígeno, se gana dominio sobre un total de 4 electrones. Por tanto, el átomo de azufre ha perdido dominio sobre 4 de sus electrones de valencia y su índice de oxidación será IV (aunque, como ya sabemos, al tratarse de un no metal, no hay transferencia de electrones sino compartición)

**Con prefijos multiplicadores:** Se escribe el **prefijo** que indica la cantidad de oxígenos seguido de las palabras **óxido de**, y luego se escribe el **prefijo** correspondiente a la cantidad de átomos del otro elemento seguido del **nombre** de ese otro elemento.

Ejemplos:  $\text{B}_2\text{O}_3 = \text{Trióxido de diboro}$ ;  $\text{FeO} = \text{Monóxido de hierro}$

### Reglas prácticas para la formulación de los óxidos:

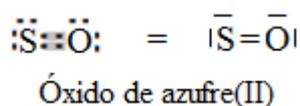
**Con números de oxidación:** Se escribe el símbolo del elemento seguido del oxígeno se intercambian, como subíndice, los respectivos números de oxidación (en valor absoluto y numeración decimal). Si se puede, se simplifica dividiendo por un número entero.

Ejemplos: Óxido de potasio =  $\text{K}_2\text{O}$ ; Óxido de azufre(VI) =  $\text{SO}_3$

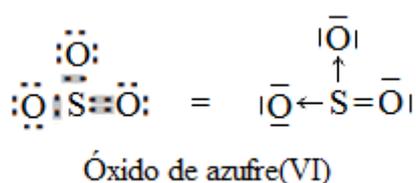
Explicación: En el primer ejemplo anterior, el K tiene que perder un electrón para conseguir una estructura más estable, mientras que el O debe ganar dos. Por tanto, la fórmula empírica del compuesto será  $\text{K}_2\text{O}$ , indicando que, por cada dos iones  $\text{K}^+$  hay un  $\text{O}^{2-}$  de forma que el compuesto es neutro. Siguiendo las indicaciones habríamos escrito  $\text{K}_2\text{O}$ .

En el caso del óxido de azufre, como el azufre también es un no metal como el oxígeno, la explicación es diferente, porque se forma una molécula con enlaces covalentes por compartición de electrones, pero la regla práctica para la formulación del óxido es igualmente válida. Siguiendo las indicaciones habríamos escrito  $\text{S}_2\text{O}_6$  y luego simplificando, obtendríamos  $\text{SO}_3$ .

### ¿Cómo se puede justificar que un mismo no metal forme óxidos con diferentes números de oxidación, por ejemplo, el caso del azufre con los óxidos: $\text{SO}$ , $\text{SO}_2$ y $\text{SO}_3$ ?



Para el  $\text{SO}$  la explicación es muy sencilla puesto que ambos elementos tienen 6 electrones en la última capa y puesto que son no metales tendrán tendencia a compartir dos electrones cada uno para cumplir la regla del octeto formando así un enlace covalente doble.



En la molécula de  $\text{SO}_3$  se forman un enlace covalente doble, compartiéndose 4 electrones. Pero en la molécula hay dos enlaces S-O más, que se explican por compartición de dos electrones pertenecientes ambos al átomo de azufre, es decir, mediante enlaces covalentes dativos.

**A.18.** Justificar mediante un diagrama de Lewis la estructura electrónica de la molécula óxido de azufre(IV)

Con prefijos multiplicadores: Se escribe el símbolo del elemento con un subíndice correspondiente a su prefijo y seguidamente el símbolo del oxígeno con el subíndice correspondiente a su prefijo.

Ejemplo: Pentaóxido de dinitrogeno =  $N_2O_5$

**A.19.** Formulad: a) Óxido de litio, b) Óxido de vanadio(V), c) Óxido de bismuto, d) Dióxido de titanio

**A.20.** Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:

Fórmula	Nomenclatura con	
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores
$K_2O$		
$Cr_2O_3$		
$NO_2$		

## 7.2. Haluros de oxígeno

Son combinaciones binarias de un halógeno (cualquier elemento del grupo 17 de la tabla periódica) con el oxígeno. En este caso, de acuerdo con el orden establecido en la serie de la figura 1, el oxígeno siempre se escribe a la izquierda de la fórmula y el halógeno a la derecha.

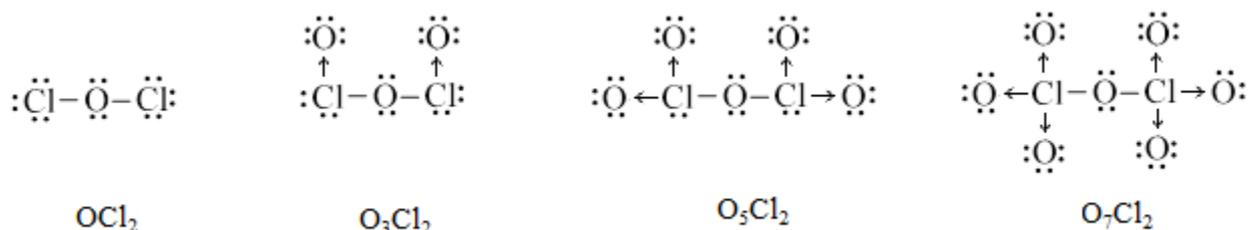
**Nomenclatura de los haluros de oxígeno:** Se utiliza sólo la nomenclatura con prefijos multiplicadores. Se escribe el prefijo del halógeno (siempre será **di**) seguido de la **raíz del nombre del halógeno** terminada en **uro** y luego se añade **de**, seguido del **prefijo** correspondiente al número de oxígenos y la palabra **oxígeno**.

Ejemplo:  $O_3Cl_2$  = **Dicloruro** de **trioxígeno**

**Regla práctica para la formulación de los haluros de oxígeno:** Se escribe el símbolo del oxígeno con el subíndice del prefijo correspondiente y luego el símbolo del halógeno con su subíndice (siempre 2).

Ejemplo: Diyoduro de heptaoxígeno =  $O_7I_2$

De igual forma que en el caso de los óxidos de azufre justificamos la variabilidad de los índices de oxidación de los no metales en algunos óxidos, se puede explicar los diferentes haluros de oxígeno mediante estructuras de Lewis como las que se muestran a continuación, en las que se proponen enlaces covalentes sencillos normales y enlaces covalentes sencillos dativos.

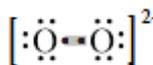


**A.21.** Explicar, mediante una estructura de Lewis como podría ser la molécula de dibromuro de pentaóxígeno.

Los ejemplos expuestos constituyen tan solo una forma sencilla de comprender que un mismo elemento pueda actuar con distintos índices de oxidación. En modo alguno pretenden informar sobre la forma en que se hallan dispuestos los átomos, ni tampoco ser la única explicación a la diversidad de índices de oxidación con que unos elementos pueden actuar en sus combinaciones con otros.

### 7.3. Peróxidos

Se pueden considerar combinaciones binarias del ión peróxido ( $O_2^{2-}$ ) con metales alcalinos o alcalinotérreos (grupos 1 o 2) o hidrogeno (H), cobre (Cu) o zinc (Zn). El ión peróxido está formado por dos átomos de oxígeno con 6 electrones de valencia cada uno, más dos electrones correspondientes a la carga del ión que habrán arrancado a otro elemento o especie menos electronegativa. Por tanto como se observa en su diagrama de Lewis, este ión está formado por dos átomos de oxígeno unidos por un enlace covalente sencillo formado por compartición de dos electrones. Puesto que para formarse este enlace se han ganado un total de 2 electrones (uno cada átomo de O), el índice de oxidación del ión peróxido, como el de todos los iones, coincide con su carga y, por tanto, será: (-II).



#### Nomenclatura de los peróxidos:

Con números de oxidación: A las palabras **peróxido de** se añade el nombre del otro elemento. Solo en el caso del cobre, que presenta más de un índice de oxidación, se especifica de cuál de ellos se trata (I o II), poniéndolo entre paréntesis al final.

Ejemplos:  $Li_2O_2$  = Peróxido de litio;  $CuO_2$  = Peróxido de cobre(II)

#### Reglas prácticas para la formulación de los peróxidos:

Con números de oxidación: Se escribe el símbolo del ión peróxido sin su carga ( $O_2$ ) y a continuación se añaden a la izquierda los átomos del metal necesarios para que el compuesto sea neutro (dos si es de la primera columna y uno si es de la segunda).

Ejemplos: Peróxido de sodio =  $Na_2O_2$ ; Peróxido de berilio =  $BeO_2$

Explicación: Los dos oxígenos tienen que ganar dos electrones para conseguir formar el ión peróxido ( $O_2^{2-}$ ), cada sodio (Na) tiene que perder solo un electrón para conseguir una estructura más estable, por tanto se formaran dos iones  $Na^+$  por cada ión peróxido ( $O_2^{2-}$ ) y por eso, la fórmula empírica del compuesto será  $Na_2O_2$ .

En el caso del berilio, como este tiene tendencia a perder dos electrones, estos serán los mismos que aceptaran los oxígenos para formar el ión peróxido. Por tanto, por cada ión  $Be^{2+}$  se formará un ión peróxido ( $O_2^{2-}$ ) y por eso la fórmula empírica será  $BeO_2$ .

A efectos prácticos, también se suele proceder de la siguiente forma:

- Escribimos el símbolo del metal y a continuación el del peróxido:  $NaO_2$  y  $BeO_2$
- Intercambiamos los correspondientes índices de oxidación (sin signo):  $Na_2(O_2)_1$  y  $Be_2(O_2)_2$ .
- Simplificamos, si se puede, los subíndices del metal y del ión peróxido (no del O): =  $Na_2O_2$  y  $BeO_2$

Insistimos que, en el caso de los peróxidos, jamás se modifica el subíndice de O. El ión peróxido ( $O_2^{2-}$ ), actúa como un todo. Por eso no se puede simplificar  $Na_2O_2$  a  $NaO$ .

**A.22.** *Formulad: a) Peróxido de cobre(I), b) Peróxido de zinc, c) Peróxido de potasio*

**A.23.** *Nombrad los siguientes peróxidos:*

Fórmula	Nomenclatura con número de oxidación	Nombre tradicional
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
CuO <sub>2</sub>		

Los óxidos y los peróxidos son combinaciones binarias de oxígeno con otro elemento y existen algunos elementos que forman tanto óxidos como peróxidos. Este hecho podría provocar confusiones puesto que al ver una fórmula de un compuesto podríamos confundir un óxido con un peróxido o viceversa. Por ejemplo en el caso del berilio se conoce un óxido y un peróxido ¿Cómo podríamos diferenciar a partir de la fórmula si se trata de un óxido o un peróxido de berilio?

**A.24.** *Explicad detalladamente como podríais determinar, sin lugar a dudas, si un compuesto es un óxido o un peróxido*

Podemos encontrarnos con dos tipos de peróxidos:

Los correspondientes a metales con número de oxidación (I) con los que no habrá ningún tipo de duda para identificarlos puesto que tienen como fórmula M<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ya que el 2 del oxígeno no se puede simplificar como sí ocurre en los óxidos.

Los correspondientes a metales con números de oxidación (II) que tienen fórmula general MO<sub>2</sub>. En este caso, deberemos de comprobar si se trata de elementos que no puedan presentar número de oxidación (IV) en cuyo caso se trataría de un óxido. Por ejemplo los alcalinotérreos (Be, Mg, Ca, Sr, Ba), el cobre (Cu solo puede tener número de oxidación I o II) y el zinc (solo forma compuestos con número de oxidación II). Si se trata de los elementos anteriores, con fórmula MO<sub>2</sub>, serán peróxidos.

**A.25.** *De los siguientes compuestos de oxígeno, identificad si se trata de óxidos o peróxidos y nombradlos según la nomenclatura con número de oxidación:*

Fórmula	Nomenclatura con número de oxidación	Fórmula	Nomenclatura con número de oxidación
CaO		ZnO	
Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		TiO <sub>2</sub>	
Li <sub>2</sub> O		Cu <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
BaO <sub>2</sub>		CuO	
ZnO <sub>2</sub>		Cu <sub>2</sub> O	

Como recapitulación de todo lo que se ha tratado hasta aquí, se proponen dos actividades:

**A.26.** *Formulad los siguientes compuestos: cloruro de litio, óxido de zinc, metano, sulfuro de hierro(III), bromuro de mercurio(II), yoduro de plomo(II), ácido bromhídrico, trióxido de azufre, dióxido de carbono, sulfuro de zinc, tricloruro de fósforo, sulfuro de hidrógeno, dicloruro de heptaoxígeno, tetrayoduro de plomo, fluoruro de hidrógeno, nitruro de magnesio, hidruro de cromo(II), amoníaco, peróxido de bario, estibano, pentaóxido de divanadio.*

A.27. Nombrad los siguientes compuestos según las nomenclaturas estudiadas

Fórmula	Nomenclatura con		
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores	Nombre tradicional
Cu <sub>2</sub> O			
O <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>			
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
SnCl <sub>2</sub>			
NO <sub>2</sub>			
MnO <sub>2</sub>			
O <sub>5</sub> Br <sub>2</sub>			
FeS			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
CuH <sub>2</sub>			
HBr			
CaO <sub>2</sub>			
PH <sub>3</sub>			
HCl(aq)			
H <sub>2</sub> Se			
I <sub>2</sub>			
ZnS			
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

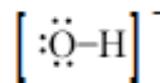
Hasta aquí, hemos aprendido a formular compuestos binarios (algunas sales binarias, hidrácidos, Hidruros, óxidos, haluros de oxígeno y peróxidos). En la segunda parte, que ahora comienza, abordaremos la formulación de compuestos con tres o más elementos como son los hidróxidos, los ácidos que contienen oxígeno (oxoácidos) y las sales que contienen oxígeno (oxosales).

### 8. COMBINACIÓN ENTRE UN METAL Y EL GRUPO OH<sup>-</sup> (HIDROXIDOS)

Se trata de compuestos iónicos en los que el ion negativo o anión es el OH<sup>-</sup> y el ion positivo o catión corresponde a un metal. En estos compuestos, **el índice de oxidación del grupo hidróxido será siempre negativo y valdrá (-I)**, mientras que el del metal será positivo. El número de iones OH<sup>-</sup> tendrá que ser el necesario para compensar la carga positiva del metal.

El anión OH<sup>-</sup> se puede justificar mediante la siguiente estructura de puntos:

En la estructura anterior, vemos que el átomo de oxígeno ha ganado un electrón, lo que hace que la agrupación (ion hidróxido) tenga una carga negativa.



#### Nomenclatura de los hidróxidos:

Con el número de oxidación: Para nombrarlos se añade a las palabras **hidróxido de** el nombre del elemento que le acompaña. En el caso de que este último tenga más de un índice de oxidación se indicará, como siempre, en números romanos y entre paréntesis.

Ejemplos: Fe(OH)<sub>2</sub> = Hidróxido de hierro(II); Al(OH)<sub>3</sub> = Hidróxido de aluminio.

**Con prefijos multiplicadores:** Se escribe el prefijo numeral que indica la cantidad de iones hidróxido y luego las palabras hidróxido de y el nombre del metal.

Ejemplos:  $\text{Pt}(\text{OH})_4$  = Tetrahidróxido de platino;  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  = Dihidróxido de estroncio

**Formulación de los hidróxidos:**

**Con el número de oxidación:** El número de iones  $\text{OH}^-$  ha de ser el suficiente para compensar la carga del catión que les acompaña.

Ejemplo: Hidróxido de cobre(II) =  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ya que se utiliza el  $\text{Cu}^{2+}$  y por tanto necesitamos 2 de  $\text{OH}^-$  para compensar la carga.

**Con prefijos multiplicadores:** Se escribe el símbolo del metal seguido de (OH) y como subíndice el número que indica el prefijo que precede a la palabra hidróxido.

Ejemplo: Trihidróxido de cromo =  $\text{Cr}(\text{OH})_3$

**A.28. Formulad:** a) Hidróxido de plomo(II), b) Hidróxido de bario, c) Hidróxido de sodio

**A.29. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:**

Fórmula	Nomenclatura con	
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores
$\text{Ca}(\text{OH})_2$		
$\text{Ag}(\text{OH})$		
$\text{Hg}(\text{OH})_2$		

**6. ÁCIDOS QUE CONTIENEN OXIGENO (OXOÁCIDOS)**

Las propiedades de los ácidos, se deben a que en disolución acuosa ceden iones  $\text{H}^+$  (hidrógeno(1+)). Son compuestos cuyas moléculas contienen átomos de H, unidos a O, que pueden ser fácilmente arrancados o sustituidos (sin su electrón, es decir, como  $\text{H}^+$ ). Así pues, en los oxoácidos. El H siempre actúa con índice de oxidación I y el oxígeno, por supuesto, con (-II).

Anteriormente vimos un tipo de ácidos (los hidrácidos) de fórmula general  $\text{H}_a\text{X}(\text{ac})$ . Aquí trataremos la formulación de otro tipo de ácidos, caracterizados por contener átomos de oxígeno en sus moléculas. Se trata de los oxoácidos, cuya expresión general es  $\text{H}_a\text{X}_b\text{O}_c$  en donde X normalmente es un no metal (aunque a veces puede ser un metal de transición como Mn, Cr, etc.).

**¿Cómo se determina el número de oxidación del no metal o átomo central en el oxoácido?**

En los oxoácidos, el oxígeno es el elemento más electronegativo de forma que cada átomo de O tiende a ganar dominio sobre dos electrones, por lo que su número de oxidación es (-II), mientras que el hidrógeno comparte su electrón perdiendo dominio sobre el mismo, el otro elemento (X) también comparte sus electrones perdiendo dominio, es decir, actúa con número de oxidación positivo. Como la molécula de oxoácido es neutra, al final la cantidad de electrones sobre los que gana dominio el oxígeno debe coincidir con los electrones sobre los que pierden dominio el hidrógeno y el otro elemento (X). Como siempre, la suma algebraica de ganancia de dominio total (dada por un número negativo) y las pérdidas de dominio (dadas por números positivos) ha de dar 0.

## Anexo 2. Formulación y nomenclatura de química inorgánica

Ejemplo: Determina el número de oxidación del azufre en los dos oxoácidos:  $\text{H}_2\text{SO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .



Como podemos ver en ambas expresiones, la suma de ganancia de dominio (en azul) y pérdida de dominio (en rojo) da 0, lo cual es lógico ya que los electrones sobre los que el oxígeno gana dominio son justamente los electrones sobre los que el H y el S pierden dominio<sup>2</sup>.

### 9.1. Oxoácidos de los halógenos

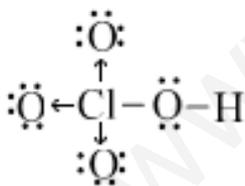
La mayor parte de ellos contienen un sólo átomo de H en cada molécula. En general su expresión es del tipo:  $\text{HXO}_c$  teniendo que determinar el subíndice c.

#### **Nomenclatura:**

**Tradicional:** Dado que en este grupo de elementos son posibles varios índices de oxidación (**I**, **III**, **V**, **VII**), se utilizan los prefijos y sufijos del recuadro siguiente para distinguir a cuál de ellos nos estamos refiriendo:

HIPO ...	OSO	para el 1°
...	OSO	para el 2°
...	ICO	para el 3°
PER ...	ICO	para el 4°

Ejemplos: Nombrad el compuesto  $\text{HClO}_3$ . Dado que hay tres átomos de O, se gana dominio sobre un total de 6 electrones y, por tanto, entre el H y el Cl han de perder dominio también sobre 6 electrones, como el H sólo tiene un electrón, nos queda que el Cl ha de perder dominio sobre 5, es decir, que en este caso actúa con índice de oxidación V (el tercero de los cuatro considerados), por lo que será: ácido **clórico**. Si nos hubiesen pedido nombrar a  $\text{HClO}_4$ , mediante los mismos razonamientos se llega a comprobar que, en este caso, el índice de oxidación con que actúa el cloro es VII (el cuarto de los considerados) y, por tanto, se trata del ácido **perclórico**.



A título de ejemplo se propone una justificación elemental, mediante una estructura de Lewis, de la molécula de ácido perclórico. Se observa como el átomo de cloro (central) comparte un electrón con un oxígeno formando un enlace covalente sencillo. El resto de los electrones del cloro están compartidos con otros tres átomos de oxígeno formando enlaces covalentes dativos.

Estos mismos razonamientos, utilizados para la nomenclatura de los oxoácidos del cloro, pueden aplicarse a los oxoácidos con el Br y con el I. Así, el  $\text{HBrO}$  es el ácido hipobromoso y el  $\text{HIO}_2$  el ácido yodoso.

**A.30.** Explicad, mediante una estructura de Lewis, como podría ser la molécula de ácido hipoyodoso.

<sup>2</sup> Atención: No confundir estos superíndices coloreados con cargas eléctricas reales (en las que el signo matemático va siempre después del número). Insistimos en que, en casos como estos, se trata de ganancias y pérdidas de dominio "parciales" donde los electrones de enlace se comparten en distinto grado.

**Con prefijos multiplicadores:** Se pone, sin espacios de separación la palabra **hidrógeno**, seguida entre paréntesis del **prefijo** que indica la cantidad de oxígenos, la palabra **óxido** y finalmente **la raíz del otro elemento (X)** terminada en **ato**.

Ejemplo:  $\text{HBrO}_2 = \text{Hidrógeno}(\text{dióxido})\text{bromato}$

### Formulación:

**Tradicional:** Se deben memorizar las fórmulas (en este caso  $\text{HXO}_c$ , donde  $c = \text{sin subíndice}, 2, 3, 4$ ) o bien los posibles números de oxidación del átomo X central (I, III, V, VII).

Ejemplo: dada la fórmula del ácido perclórico. Al decirnos **perclórico**, hemos de pensar en el cuarto índice de oxidación para el Cl, es decir, VII. A continuación escribir  $\text{HClO}$  y finalmente, añadir el número de O necesario para que la molécula cumpla la condición de que el número de electrones sobre los que se pierde dominio sea el mismo que sobre los que se gana, es decir:  $\text{HClO}_4$ . De este modo, el oxígeno gana dominio sobre 8 electrones (7 del cloro y 1 del hidrógeno).

Estos mismos razonamientos son válidos para el Br y el I. Así, el ácido yódico nos hace pensar en el tercer índice de oxidación, es decir, el de número de oxidación V. Escribimos  $\text{HIO}$  y a continuación razonamos que debe haber un total de tres oxígenos para que el número de electrones sobre los que se pierde dominio (5 por parte del I y 1 por parte del H) sea el mismo que sobre los que se gana. Por tanto:  $\text{HIO}_3$ .

**Con prefijos multiplicadores:** Basta con escribir en primer lugar  $\text{HXO}$  y a continuación el subíndice correspondiente al oxígeno, de acuerdo con el prefijo que acompañe a la palabra **óxido**.

Ejemplo: Hidrógeno(tetraóxido)yodato). Escribimos  $\text{HIO}$  y luego, como el prefijo delante de óxido es tetra, optamos por colocar un 4 como subíndice del oxígeno y nos queda:  $\text{HIO}_4$ .

## 9.2. Oxoácidos de los elementos del grupo 16 de la tabla periódica (anfígenos)

La mayor parte de estos ácidos contienen dos átomos de H en sus moléculas. En general, su fórmula viene dada por:  $\text{H}_2\text{XO}_c$ . La siguiente información hace referencia al azufre y al selenio, pero los oxoácidos más importantes de este grupo son, sin duda, los de azufre.

### Nomenclatura y formulación

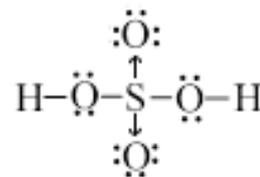
**Tradicional:** Dado que en este grupo de elementos son posibles dos índices de oxidación (IV y VI), se utilizan los sufijos del recuadro siguiente para distinguir a cuál de ellos nos estamos refiriendo:

...OSO	para el 1°
...ICO	para el 2°

Ejemplos: se siguen los mismos criterios que antes, sólo que teniendo en cuenta que ahora, de entrada, hay que poner dos átomos de H. Así si nos dicen, por ejemplo, que formulemos el ácido sulfúrico, hemos de pensar en que el S actúa con un índice de oxidación de VI, a continuación escribir  $\text{H}_2\text{SO}$  y finalmente, pensar cuántos átomos de oxígeno ha de haber para que el número de electrones sobre los que se pierde dominio (en este caso 8: dos de los H y seis del S) coincida con el número de electrones sobre los que se gana dominio, lo que conduce a poner 4 átomos de oxígeno (cada O gana dominio sobre 2 electrones) y escribir finalmente:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para la molécula de ácido sulfúrico.

El siguiente esquema justifica, de forma elemental, la fórmula anterior y permite comprender por qué hay 2 H en los oxoácidos de esta familia.

El átomo de azufre forma dos enlaces covalentes sencillos por compartición de dos electrones con dos oxígenos que, a su vez, se enlazan con otro enlace covalente sencillo a ambos hidrógenos. La estructura se completa con dos enlaces covalentes dativos  $S \rightarrow O$



**A.31.** Explicad, mediante una estructura de Lewis, como podría ser la molécula de ácido selenioso.

En cambio, si nos piden que nombremos el siguiente compuesto:  $\text{H}_2\text{SO}_3$ . Siguiendo las indicaciones anteriores, es fácil averiguar ahora que el índice de oxidación del S es de IV, con lo que, de acuerdo con el cuadro anterior, le corresponde el primer sufijo y habrá que nombrarlo como ácido sulfuroso.

Con prefijos multiplicadores, también seguiremos los mismos criterios que anteriormente (solo que teniendo en cuenta que ahora hay dos H).

Ejemplos:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  será Dihidrógeno(tetraoxidosulfato), Dihidrógeno(trioxidoseleniato) =  $\text{H}_2\text{SeO}_3$

### 9.3. Oxoácidos de los elementos del grupo 15 de la tabla periódica

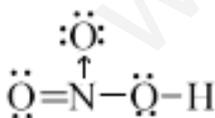
Los oxoácidos más importantes de esta familia son los del **nitrógeno**. Su fórmula general viene dada por  $\text{HNO}_c$  donde los índices de oxidación más frecuentes del nitrógeno son (III y V).

#### Nomenclatura y formulación

Tradicional: Dado que en este grupo de elementos son posibles dos índices de oxidación (III y V), se utilizan los sufijos “oso” e “ico” respectivamente, de igual forma que en los oxoácidos del grupo 16.

Para formular se siguen los mismos criterios que antes, sólo que teniendo en cuenta que ahora de entrada hay que colocar sólo un átomo de H en la molécula.

Así si nos dicen que formulemos el ácido nítrico, hemos de pensar en que el N actúa con un índice de oxidación de V, a continuación escribir  $\text{HNO}$  y finalmente, pensar cuántos átomos de oxígeno ha de haber para que el número de electrones sobre los que se pierde dominio (en este caso 6: uno del H y 5 del N) coincida con el número de electrones sobre los que se gana dominio, lo que conduce a poner 3 átomos de oxígeno (cada O gana dominio sobre 2 electrones) y escribir finalmente  $\text{HNO}_3$  para la molécula de ácido nítrico.



El esquema explica de forma elemental la fórmula anterior y permite comprender por qué hay 1H en el ácido nítrico. En este caso, el átomo de N forma un enlace covalente sencillo con un oxígeno, un enlace covalente doble (por compartición de cuatro electrones) con otro y un enlace covalente dativo con el tercer oxígeno.

Nombrad:  $\text{HNO}_2$ . Siguiendo las mismas indicaciones que en apartados anteriores, es fácil averiguar ahora que el índice de oxidación del N es (III), con lo que habrá que nombrarlo como ácido nitroso.

**A.32.** Explicar, mediante una estructura de Lewis, como podría ser la molécula de ácido nitroso.

**Con prefijos multiplicadores:** Se siguen los criterios habituales.

Ejemplos:  $\text{HNO}_3$  se nombra como Hidrógeno(trioxidonitrato), Hidrógeno(dioxidonitrato) se formula como  $\text{HNO}_2$

A continuación estudiaremos los oxoácidos más importantes del **fósforo** y del **arsénico**. Su fórmula general viene dada por  $\text{H}_3\text{PO}_c$  donde los índices de oxidación más frecuentes vuelven a ser (**III** y **V**).

### Nomenclatura y formulación

**Tradicional:** Dado que en este grupo de elementos son posibles dos índices de oxidación (**III** y **V**), se utilizan los sufijos “oso” y “ico” respectivamente.

Para formular se siguen los mismos criterios que antes, sólo que teniendo en cuenta que ahora de entrada hay que colocar tres átomos de H en la molécula.

*A.33. Explicar, mediante estructuras de Lewis, como podrían ser las moléculas de ácido fosforoso y de ácido arsénico.*

**Con prefijos multiplicadores:** Se siguen los criterios habituales.

Ejemplos:  $\text{H}_3\text{PO}_3$ = Trihidrógeno(trioxidofosfato); Trihidrógeno(tetraoxidoarseniato) =  $\text{H}_3\text{AsO}_4$

### 9.4. Oxoácidos de los elementos del grupo 14 de la tabla periódica

El carbono puede formar parte de infinidad de oxoácidos, pero casi todos ellos son compuestos orgánicos y no los vamos a tratar aquí (los veremos en el anexo 3 de formulación y nomenclatura de química orgánica). En química inorgánica, el más importante es el ácido carbónico, en donde el C actúa con índice de oxidación IV y la molécula contiene 2 átomos de H.

### Nomenclatura y formulación

**Tradicional:** se siguen los mismos criterios que antes, pero teniendo en cuenta que ahora de entrada hay que colocar 2 átomos de H en la molécula. También hay que tener en cuenta que en nomenclatura tradicional para aquellos casos en los que, como este, solo hay un oxoácido, se utiliza para nombrarlo el sufijo “**ico**” sin ningún prefijo.

Para formular, pues, el ácido carbónico, hay que escribir inicialmente  $\text{H}_2\text{CO}$  y después, teniendo en cuenta el índice de oxidación del carbono (IV) y el del hidrógeno (I), seguir el razonamiento habitual y concluir que debe haber 3 átomos de oxígeno y, por tanto, la fórmula buscada es:  $\text{H}_2\text{CO}_3$ .

Si el proceso hubiese sido el contrario y nos hubiesen preguntado el nombre a partir de la fórmula, la respuesta es inmediata ya que, como hemos dicho, al actuar aquí el carbono con solo un índice de oxidación, solo se utiliza el sufijo “ico” y, por tanto, se trata de ácido carbónico.

**Con prefijos multiplicadores:** Se siguen los criterios habituales.

Ejemplos:  $\text{H}_2\text{CO}_3$  se nombra como: Dihidrógeno(trioxidocarbonato).

También el silicio forma oxoácidos de los que estudiaremos los más importantes: el ácido metasilícico, de fórmula igual a la del ácido carbónico  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  y el ácido silícico de fórmula  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . En ambos compuestos el índice de oxidación del silicio es IV por lo que se utiliza para diferenciarlos en

nomenclatura tradicional, el prefijo "meta" para el oxoácido con menor cantidad de hidrógenos.

**Con prefijos multiplicadores:** Se siguen los criterios habituales.

Ejemplos:  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  se nombra como: Dihidrógeno(trioxidosilicato).  
 $\text{H}_4\text{SiO}_4$  se nombra como: Tetrahidrogeno(tetraoxidosilicato)

**A.34.** Explicad, mediante estructuras de Lewis, como podrían ser las moléculas de ácido carbónico y de ácido silícico.

### 9.5. Otros oxoácidos

Existen ciertos oxoácidos en donde X es un metal de transición. Algunos de los más importantes son: ácido crómico (dónde el Cr actúa con índice de oxidación VI y en la molécula hay 2 H) y ácido dicrómico (dónde el Cr actúa con índice de oxidación IV y en la molécula hay dos cromos y 2 H), ácido mangánico y ácido permangánico (donde el Mn actúa con índice de oxidación VI y VII respectivamente y en la molécula hay 2 H y 1 H respectivamente).

Al igual que ocurre en otros casos, muchos de los oxoácidos donde X es un metal, son inestables y otros no se han aislado en estado puro. Su importancia radica principalmente en los compuestos que se pueden considerar como derivados de ellos.

La formulación, por ejemplo, del ácido crómico, consistiría en escribir primeramente  $\text{H}_2\text{CrO}$  y luego razonar que, dado que se pierde dominio sobre un total de 8 electrones (2 de los H y 6 del Cr) el principio de que ese número ha de coincidir con los electrones sobre los que se gana dominio, exige colocar en la molécula un total de 4 átomos de oxígeno (cada O gana dominio sobre 2 electrones), lo que conduce finalmente a la fórmula:  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ .

La formulación del ácido dicrómico, consistiría en escribir primero  $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}$  y luego razonar que, dado que se pierde dominio sobre un total de 14 electrones (2 del H y 12 de los dos Cr) deberemos colocar 7 átomos de oxígeno para que coincidan los electrones sobre los que se gana dominio con los que se pierde. Por tanto la fórmula será:  $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ .

La formulación y nomenclatura mediante prefijos multiplicadores es mucho más sencilla así, por ejemplo, el ácido dicrómico ( $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) se nombraría como: Dihidrógeno(heptaóxidodicromato).

**A.35.** Formulad los ácidos: mangánico y permangánico.

A modo de recapitulación de este apartado, se presenta una tabla con los oxoácidos más comunes según la nomenclatura tradicional y con prefijos multiplicadores.

Fórmula	Nomenclatura		Extensible a
	Tradicional	Con prefijos multiplicadores	
HClO	Ácido hipocloroso	Hidrogeno(oxidoclorato)	Br y I
HClO <sub>2</sub>	Ácido cloroso	Hidrogeno(dioxidoclorato)	
HClO <sub>3</sub>	Ácido clórico	Hidrogeno(trioxidoclorato)	
HClO <sub>4</sub>	Ácido perclórico	Hidrogeno(tetraoxidoclorato)	
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Ácido sulfuroso	Dihidrogeno(trioxidosulfato)	Se
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico	Dihidrogeno(tetraoxidosulfato)	
HNO <sub>2</sub>	Ácido nitroso	Hidrogeno(dioxidonitrato)	
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico	Hidrogeno(trioxidonitrato)	
H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	Ácido fosforoso	Trihidrogeno(trioxidofosfato)	As
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido fosfórico	Trihidrogeno(tetraoxidofosfato)	
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ácido carbónico	Dihidrogeno(trioxidocarbonato)	
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Ácido metasilícico	Dihidrogeno(trioxidosilicato)	
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Ácido silícico	Tetrahidrogeno(tetraoxosilicato)	
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico	Trihidrogeno(trioxoborato)	
H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Ácido crómico	Dihidrogeno(tetraoxidocromato)	
H <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Ácido dicrómico	Dihidrogeno(heptaoxidodicromato)	
H <sub>2</sub> MnO <sub>4</sub>	Ácido mangánico	Dihidrogeno(tetraoxidomanganato)	
HMnO <sub>4</sub>	Ácido permangánico	Hidrogeno(tetraoxidomanganato)	

**A.36.** *Formulad los siguientes oxoácidos: ácido yodoso, ácido arsénico, ácidonitroso, ácido bórico, ácido brómico, ácido dicrómico, trihidrógeno(tetraoxidofosfato), dihidrógeno(trioxidosulfato), hidrógeno(tetraoxidobromato), dihidrogeno(tetraoxidomanganato), dihidrogeno(trioxidosilicato).*

**A37.** *Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:*

Fórmula	Nomenclatura	
	Tradicional	Con prefijos multiplicadores
HBrO <sub>3</sub>		
H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>		
HNO <sub>2</sub>		
H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>		
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		
HClO		
HMnO <sub>4</sub>		
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>		

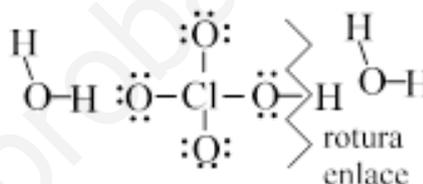
## 10. OXOSALES

Las sales se pueden considerar como el resultado de la unión de un catión con un anión (que no sea el  $\text{OH}^-$ , ni el  $\text{H}^-$ , ni tampoco el  $\text{O}^{2-}$ ). Anteriormente ya estudiamos algunas sales (sales binarias), que podían considerarse como la combinación de un metal con un no metal. Este es el caso, por ejemplo, del cloruro de sodio o "sal común" que está compuesta por aniones  $\text{Cl}^-$  (cloruro) y cationes  $\text{Na}^+$  (cationes sodio). No obstante, cuando el anión no es un no metal, sino que proviene de un oxoácido, se pueden formar otro tipo de sales más complejas (**oxosales**), que son las que vamos a considerar a continuación.

OXOSAL = CATION + ANIÓN DE UN OXOÁCIDO

Así pues, antes de plantear la formulación de estas sales, tenemos que estudiar los aniones de los que provienen. Ya hemos dicho que los ácidos se caracterizan porque en disolución acuosa pueden perder iones hidrógeno(1+) o  $\text{H}^+$  (también llamados **hidrónes**). Veamos la explicación analizando el ejemplo del ácido perclórico:

El O es muy electronegativo. Las moléculas de agua (polares), rodean a moléculas del ácido (en el esquema adjunto sólo hemos dibujado dos de ellas para no complicar la figura) y pueden romper el enlace entre el O y el H. Sin embargo, debido a la gran electronegatividad del O, cuando se rompe el enlace este se queda con el electrón del H, por lo que resulta:



Análogamente puede justificarse la existencia de otros aniones como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_3^{3-}$ , en los que aparecen tantos hidrónes como átomos de hidrógeno contenía el oxoácido, a la vez, el oxoanión adquiere la misma cantidad de cargas negativas.



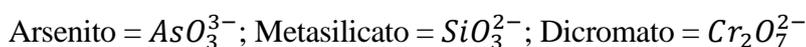
### 10.1 Nomenclatura y formulación de oxoaniones

**Tradicional:** para nombrar el oxoanión, basta enunciar el nombre del ácido del cual procede acabado en **ito** (si el ácido terminaba en oso) o en **ato** (si el ácido terminaba en ico).

Ejemplos:  $\text{NO}_3^-$  = **nitrato**, puesto que proviene del ácido **nítrico**  
 $\text{SO}_4^{2-}$  = **sulfato**, puesto que proviene del ácido **sulfúrico**  
 $\text{PO}_3^{3-}$  = **fosfito**, puesto que proviene del ácido **fosforoso**  
 $\text{ClO}^-$  = **hipoclorito**, puesto que proviene del ácido **hipocloroso** ( $\text{HClO}$ )

Para formular, escribiremos la fórmula del ácido del que proviene el oxoanión, le quitaremos los hidrógenos y le asignaremos tantas cargas negativas al anión como hidrógenos haya perdido.

Ejemplos: perbromato =  $\text{BrO}_4^-$ . Puesto que el sufijo **ato** del oxoanión corresponde con el sufijo **ico** del ácido, provendrá del ácido **perbrómico** de fórmula  $\text{HBrO}_4$  que al perder el único hidrogeno que contiene se convertirá en el oxoanión  $\text{BrO}_4^-$  con una única carga negativa).



**Con prefijos multiplicadores:** Se pone, sin espacios de separación, el **prefijo** que indica la cantidad de oxígenos, la palabra **óxido** y finalmente **la raíz del otro elemento (X)** terminada en **ato** seguida (sin espacio y entre paréntesis) de la carga del anión.

Ejemplos:  $IO_2^-$  se nombra como: **Dioxidoyodato(1-)**  
 $CrO_4^{2-}$  se nombra como: **Tetraoxidocromato(2-)**

Formular a partir del nombre con prefijos multiplicadores es muy sencillo, pues consiste únicamente en colocar el símbolo del elemento X y a continuación el del oxígeno, el prefijo de la raíz del elemento nos indicará su subíndice al igual que el prefijo de la palabra óxido. Y para finalizar se pondrá como superíndice la carga que se indica en el final del nombre entre paréntesis.

Ejemplos: Heptaoxidodicromato(2-) se formulará como:  $Cr_2O_7^{2-}$   
 Trioxidoborato(3-) se formulará como:  $BO_3^{3-}$

**A.38. Formulad:** a) Sulfito, b) Nitrato, c) Tetraoxidomanganato(2-)

**A.39. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:**

Fórmula	Nomenclatura con	
	Nombre tradicional	Prefijos multiplicadores
$BrO_3^-$		
$PO_4^{3-}$		
$CO_3^{2-}$		

## 10.2 Nomenclatura y formulación de oxosales

En las oxosales existen pues dos grupos: el oxoanión y el catión. Cada uno de estos grupos actúa con un índice de oxidación igual a la carga que le corresponde, por lo que podemos formular las oxosales como hacíamos con las sales binarias

### Formulación de las oxosales:

**Tradicional:** Se escribe primero el símbolo del metal y a continuación el símbolo del oxoanión (sin carga), y puesto que la sal ha de ser neutra deberá de contener igual cantidad de cargas positivas que negativas, esto se consigue intercambiando las cargas del catión y del oxoanión en forma de subíndices. En caso de ser posible se simplifica dividiendo por un número entero.

Ejemplo: Sulfato de calcio

- Escribimos los símbolos uno a continuación del otro, con el calcio a la izquierda:  $Ca(SO_4)$
- El índice de oxidación del calcio es II y la carga del sulfato (2-)
- Intercambiamos los correspondientes índices de oxidación y carga (sin signo y con numeración decimal), lo que nos conduce a:  $Ca_2(SO_4)_2$
- Finalmente los subíndices pueden simplificarse dividiendo por el máximo común divisor “2”, quedando la fórmula definitiva:  **$CaSO_4$**

Con prefijos multiplicadores: En nomenclatura con prefijos multiplicadores, se utilizan diferentes prefijos para indicar la cantidad de oxoaniones que intervienen en la oxosal:

- 1 → no se indica
- 2 → bis
- 3 → tris
- 4 → tetrakis
- 5 → pentakis

Para formular, se escribe primero el símbolo del **metal** y a continuación el del **oxoanión** y se ponen como subíndices los números indicados en los **prefijos** correspondientes.

Ejemplo: **Tris(trioxidocarbonato)** de **dihierro**, se formula como: **Fe<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>**

### Nomenclatura de las oxosales:

Tradicional: En primer lugar, se nombra el oxoanión y a continuación se añade el nombre del catión que le acompaña. Si este último posee varios índices de oxidación, se indicará aquel con el que actúa poniéndolo en números romanos y entre paréntesis.

Ejemplos: BaCO<sub>3</sub>. Se puede considerar como una sal formada por los iones: Ba<sup>2+</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. El oxoanión es el carbonato (puesto que proviene del ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y podemos nombrar el compuesto como **carbonato de bario**. El índice de oxidación del bario no se indica, puesto que solo tiene uno posible (II).

Au(ClO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>. En este caso la sal estará formada por los iones Au<sup>3+</sup> + 3 ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>. El oxoanión es el clorito (puesto que proviene del ácido cloroso HClO<sub>2</sub>), pero en este caso necesitamos saber la carga del catión puesto que el oro puede actuar con diferentes índices de oxidación. En este caso es evidente que para que la sal sea neutra es necesario que la carga del catión sea (3+). Por lo tanto el nombre del compuesto es **clorito de oro(III)**.

Con prefijos multiplicadores: Se pone el **prefijo** que indica la cantidad de oxoaniones y a continuación entre paréntesis el **prefijo** que indica la cantidad de oxígenos, la palabra **oxido** y finalmente **la raíz del otro elemento (X)** terminada en **ato** (un espacio) seguida de la palabra "de" (espacio) **prefijo** que indica la cantidad de átomos del metal y nombre del **metal**. (Recordad que cuando las cantidades son 1 se omite el prefijo).

Ejemplos:

- Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> = **Bis(trioxidonitrato)** de **cobre**
- Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> = **Heptaoxidodicromato** de **disodio**
- Fe(ClO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> = **Tris(trioxidoclorato)** de **hierro**

**A.40.** *Formulad: a) Fosfato de aluminio, b) Clorato de potasio, c) Seleniato de níquel(III)*

**A.41.** *Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:*

Fórmula	Nomenclatura con	
	Nombre tradicional	Prefijos multiplicadores
NaNO <sub>3</sub>		
Mg(BrO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		
Co <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		
Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		
AuIO		

**A.42.** *Los aniones monoatómicos Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, S<sup>2-</sup> etc., procedentes de las especies: HCl, HBr, H<sub>2</sub>S etc., se conocen con el nombre de ión cloruro, bromuro, sulfuro, etc. Los aniones procedentes de los otros ácidos reciben el nombre del ácido con el sufijo **ato** o **ito** según termine en **ico** u **oso**. Construid una tabla como la siguiente según se indica en el primer ejemplo:*

Ácido	Fórmula	Anión	Nombre del anión
sulfuroso	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	sulfito
sulfúrico			
nítrico			
carbónico			
hipoyodoso			
clórico			
perclórico			
nitroso			
crómico			
permangánico			

**A.43.** *Los nombres de las sales se forman a partir de los iones constituyentes. Así: KClO<sub>3</sub> es el clorato de potasio y CaCl<sub>2</sub> es el cloruro de calcio. Nombrad las siguientes sales según las nomenclaturas estudiadas: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; KNO<sub>2</sub>; SnCl<sub>4</sub>; Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>; Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; CuSO<sub>4</sub>; Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.*

**A.44.** *Formulad las siguientes sales: perclorato de sodio, carbonato de sodio, nitrito de potasio, sulfato de plata, nitrito de plata, sulfato de hierro(III), sulfato de estaño(II), sulfuro de hierro(III), permanganato de potasio, tetraoxidofosfato de trisodio, Tris(heptaoxidodicromato) de dicobalto.*

## ACTIVIDADES DE RECAPITULACIÓN

1. Completad la tabla con las fórmulas correspondientes:

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Óxido de plata		Sulfuro de sodio	
Hidruro de aluminio		Óxido de carbono(IV)	
Sulfuro de hierro(II)		Hidruro de magnesio	
Óxido de manganeso(VII)		Yoduro de hidrógeno	
Fluoruro de hidrógeno		Metano	
Nitruro de magnesio		Cloruro de hidrógeno	
Hidruro de silicio		Ácido fluorhídrico	
Ácido selenhídrico		Óxido de cobalto(III)	
Óxido de potasio		Dióxido de estaño	
Azuro		Tetrafluoruro de azufre	
Dicloruro de pentaoxígeno		Hidruro de cobre(II)	
Óxido de azufre(VI)		Óxido de calcio	
Peróxido de rubidio		Seleniuro de potasio	
Arseniuro de zinc		Dióxido de nitrógeno	

2. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:

Fórmula	Nomenclatura con		
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores	Nombre propio (si tiene)
SiO <sub>2</sub>			
CoCl <sub>3</sub>			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
Na <sub>2</sub> S			
PbI <sub>2</sub>			
HF			
O <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>			
AgH			
H <sub>2</sub> Se(aq)			
NH <sub>3</sub>			
S <sub>8</sub>			
OF <sub>2</sub>			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
O <sub>7</sub> Br <sub>2</sub>			
TiO <sub>2</sub>			

3. Completad la tabla con las fórmulas correspondientes:

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Hidróxido de oro(III)		Ácido carbónico	
Dihidróxido de mercurio		Hidróxido de cromo(III)	
Ácido perclórico		Hidrogeno(oxidobromato)	
Ácido nitroso		Hidróxido de bario	
Hidróxido de hierro(III)		Ácido arsénico	

4. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:

Fórmula	Nomenclatura con		
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores	Nombre propio (si tiene)
Pb(OH) <sub>2</sub>			
HIO <sub>3</sub>			
Na(OH)			
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>			
H <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>			
H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>			
HMnO <sub>4</sub>			

5. Determinad el número de oxidación del azufre en las siguientes sustancias: BaS, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, S<sub>8</sub>, H<sub>2</sub>S(aq), SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, SO, Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>, Li<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, NiSO<sub>3</sub>.

6. Completad la tabla con las fórmulas correspondientes:

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Ácido fluorhídrico		Ácido clórico	
Ácido peryódico		Ácido selenhídrico	
Ácido selenioso		Ácido clorhídrico	
Ácido perbrómico		Ácido hipoyodoso	
Ácido sulfhídrico		Ácido bromoso	
Ácido bórico		Ácido crómico	
Ácido yodhídrico		Ácido sulfúrico	
Ácido dicrómico		Ácido arsenioso	

Anexo 2. Formulación y nomenclatura de química inorgánica

7. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:

Fórmula	Nomenclatura con	
	Nombre tradicional	Prefijos multiplicadores
HCl(ac)		
HClO <sub>3</sub>		
H <sub>2</sub> Se(ac)		
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
HIO <sub>2</sub>		
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>		
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		
BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>		
HF(ac)		
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>		

8. Completad la tabla con las fórmulas correspondientes:

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Nitruro de potasio		Ácido sulfhídrico	
Hidruro de cobre(I)		Hidróxido de calcio	
Bromuro de hidrógeno		Trioxidoarseniato(3-)	
Ácido yodhídrico		Dibromuro de trioxígeno	
Cloruro de platino(IV)		Óxido de zinc	
Óxido de manganeso(II)		Hidruro de boro	
Dicloruro de oxígeno		Sulfuro de carbono(IV)	
Hidróxido de aluminio		Diyoduro de pentaoxígeno	
Trioxidoclorato(1-)		Peróxido de magnesio	
Hidruro de níquel(II)		Hidróxido de mercurio(II)	
Seleniuro de hidrógeno		Bis(trioxidonitrato) de cobre	
Bis(trioxidoclorato) de hierro		Tetracloruro de silicio	
Ácido nítrico		Dihidrogeno(tetraoxidoseleniato)	
Trihidrogeno(tetraoxidoarseniato)		Ácido bromoso	
Fosfano		Dihidrogeno(tetraoxidomanganato)	
Tris(tetraoxidosilicato) de tetraníquel		Óxido de plata	
Seleniuro de hierro(III)		Hidruro de berilio	
Hidruro de carbono		Estibano	

9. Nombrad según las nomenclaturas estudiadas:

Fórmula	Nomenclatura con		
	Número de oxidación	Prefijos multiplicadores	Nombre propio (si tiene)
P <sub>4</sub>			
HNO <sub>2</sub>			
Co(OH) <sub>3</sub>			
OF <sub>2</sub>			
SiO <sub>2</sub>			
Na <sub>2</sub> O			
NH <sub>3</sub>			
HBr(ac)			
H <sub>2</sub> S			
HF			
FeH <sub>2</sub>			
PbS			
CO			
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>			
Al(OH) <sub>3</sub>			
H <sub>2</sub> S(ac)			
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
IO <sup>-</sup>			
NaH			
Sr(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>			
HgO			
Pt(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>			
MnCl <sub>2</sub>			
O <sub>7</sub> Br <sub>2</sub>			
FeCO <sub>3</sub>			
NaF			
P <sub>4</sub>			
SO <sub>3</sub>			
PH <sub>3</sub>			
CuO <sub>2</sub>			
HClO <sub>3</sub>			

10. Completad la tabla con las fórmulas correspondientes:

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Hidruro de arsénico		Hidruro de carbono	
Tris(trioxidoclorato) de hierro		Ácido dicrómico	
Óxido de magnesio		Trióxido de dicromo	
Ácido hipobromoso		Hidróxido de bario	
Silano		Sulfuro de plomo(IV)	
Ácido yodhídrico		Dibromuro de oxígeno	
Dihidrogeno(trioxidocarbonato)		Fosfano	
Peróxido de cobre(II)		Dicarburo de calcio	
Hidróxido de vanadio(III)		Seleniuro de hidrogeno	
Bromuro de plata		Octaazufre	
Tetraoxidocromato de dirubidio		Sulfato de cobalto(II)	
Monóxido de cobre		Hipobromito	
Heptaoxidodicromato de dipotasio		Hidruro de níquel(II)	
Sulfuro de cesio		Dihidrogeno(heptaoxidodicromato)	
Permanganato de potasio		Peróxido de calcio	
Yoduro de hidrogeno		Metasilicato	
Carbonato de plata		Dicloruro de pentaoxígeno	
Hidruro de berilio		Óxido de boro(III)	
Óxido de carbono(II)		Tetracloruro de carbono	
Fosfato		Oxidoclorato(1-)	
Perclorato de magnesio		Sulfato de cobre(II)	
Carbonato de calcio		Sulfuro de bario	
Dioxidobromato de sodio		Borato de potasio	
Ácido bórico		Óxido de nitrógeno(III)	
Peróxido de zinc		Tetraoxidofosfato(3-)	
Dibromo		Hidruro de sodio	
Óxido de dinitrógeno		Hidróxido de magnesio	
Hidróxido de bismuto		Sulfuro de platino(IV)	
Dioxidobromato(1-)		Trioxidoseleniato(2-)	
Dioxidobromato de litio		Tetraoxidocromato de disodio	

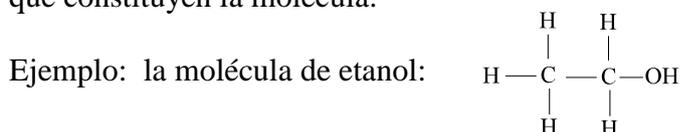
## ANEXO3. FORMULACIÓN Y NOMENCLATURA DE QUÍMICA ORGÁNICA

### INTRODUCCION

En química orgánica a cada compuesto se le solía dar inicialmente un nombre que, por lo general, hacía referencia a su procedencia, como, por ejemplo: geraniol (presente en los geranios), ácido fórmico (presente en las hormigas), ácido láctico (en la leche), ácido cítrico (en los cítricos), etc. Sin embargo, debido al enorme número de compuestos del carbono, pronto se vio la necesidad de proceder a nombrarlos de una forma más sistemática. Para ello una comisión de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) desarrolló un sistema de formulación y nomenclatura que es el que, fundamentalmente, vamos a seguir aquí.

En la formulación de química orgánica se utilizan diversas formas de representar esquemáticamente una molécula que conviene conocer:

Fórmula desarrollada, en la que se expresa detalladamente como están unidos entre sí los átomos que constituyen la molécula.



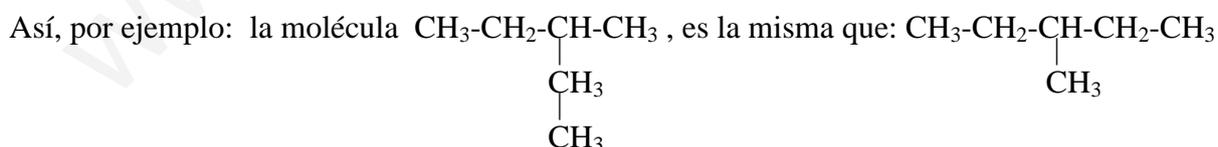
Fórmula semidesarrollada, en la que aparecen agrupados los átomos que están unidos a un mismo carbono. Tan sólo se especifican los enlaces entre los carbonos.



En lo que sigue haremos uso fundamentalmente de las fórmulas semidesarrolladas, aunque en ocasiones pueda usarse una combinación de ambas, simplificando algunas partes y desarrollando otras para resaltarlas. Así, si se quiere resaltar el grupo OH, la molécula anterior podría escribirse también como:



Conviene tener en cuenta que el hecho de poder escribir una misma fórmula de maneras distintas puede generar confusiones y llevar a pensar que estamos ante compuestos diferentes.



### 1. HIDROCARBUROS

Son compuestos de carbono e hidrógeno

#### 1.1. Hidrocarburos saturados (o alcanos) de cadena lineal

En estos hidrocarburos sólo hay una única cadena de átomos de carbono y no está cerrada. Se nombran con la terminación *-ano* y un prefijo que indica el número de átomos de carbono.

$\text{CH}_4$	metano
$\text{CH}_3\text{-CH}_3$	etano
$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	propano
$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	butano
$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	pentano

$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CH}_3$	hexano
$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_5\text{-CH}_3$	heptano
$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_6\text{-CH}_3$	octano
$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH}_3$	nonano
$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_8\text{-CH}_3$	decano

### 1.1. Hidrocarburos saturados (o alcanos) de cadena ramificada

Se llaman “radicales” a los agregados de átomos que resulten de la pérdida de un átomo de hidrógeno en un hidrocarburo. En el caso de un hidrocarburo saturado se nombran cambiando la terminación *-ano* del mismo por la terminación *-ilo*.

Ejemplo: el radical  $\text{-CH}_3$  proviene del metano y se llama metilo

**A.1.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$ ; c)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$

Los alcanos de cadena ramificada se nombran del siguiente modo: Se busca cuál es la cadena más larga, se numera dicha cadena comenzando por el extremo más próximo a algún radical, se escribe y se nombra el número correspondiente a la posición del radical (“localizador”) delante del nombre (excepto en el metilpropano donde es innecesario).

Ejemplo:  $\text{CH}_3\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$  se nombra como 2-metilpentano

**A.2.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_3$ ; c)  $\text{CH}_3\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_3$

d)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ ; e)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ ; f)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_2\text{-CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_3$

En el caso de que haya varios radicales el nombre del radical va precedido de un prefijo que indica el número de radicales (di, tri, tetra, penta, etc.). Los radicales distintos se nombran en orden alfabético comenzando a numerar por el extremo más próximo a una ramificación. En caso de haber dos cadenas continuas de la misma longitud se selecciona aquella que presente más ramificaciones. Si hay una ramificación a la misma distancia de cada extremo empezar la numeración por el extremo más cercano a una tercera ramificación. Los localizadores de las ramificaciones han de ser siempre los más bajos posibles.

Así:  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_2\text{-}\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{-CH}_3$  se nombra como 2,4-dimetilhexano (y no 3,5-dimetilhexano)

**A.3.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_3$

c)  $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ ; d)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$

e)  $\text{CH}_3\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$ ; f)  $\text{CH}_3\text{-C}(\text{CH}_3)(\text{CH}_2\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-C}(\text{CH}_3)(\text{CH}_2\text{CH}_3)\text{-CH}_3$ ; g)  $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_2\text{CH}_3)\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$

**A.4.** Formular: a) 2-metilheptano; b) 3,5-dimetilheptano; c) 5-propilnonano; d) metilpropano; e) 2,2-dimetilbutano; f) 3-etil-2-metilpentano.

## 1.2. Hidrocarburos saturados de cadena cerrada (cicloalcanos)

Se nombran anteponiendo el prefijo ciclo al nombre del alcano correspondiente de cadena abierta.

Ejemplo:  $\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH}_2 \\ | \quad | \\ \text{CH}_2\text{-CH}_2 \end{array}$  se nombra ciclobutano

**A.5.** Nombrar: a)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_2\text{-CH}_2 \end{array}$  b)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \backslash \quad / \\ \text{CH}_2\text{-CH}_2 \end{array}$  c)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ | \quad | \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \backslash \quad / \\ \text{CH}_2 \end{array}$

**A.6.** Formular: a) cicloheptano; b) etilciclopentano; c) metilciclopropano.

## 1.3. Hidrocarburos insaturados con doble enlace (alquenos)

En aquellos alquenos que sólo tienen un doble enlace se nombran cambiando la terminación *-ano* por *-eno*; indicando la posición del doble enlace con un localizador y comenzando a contar por el extremo más próximo al doble enlace (excepto en el eteno y propeno por no ser necesario).

Ejemplo:  $\text{CH}_2=\text{CH-CH}_2\text{-CH}_3$  se nombra como 1-buteno

**A.7.** Nombrar: a)  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ; b)  $\text{CH}_2=\text{CH-CH}_3$ ; c)  $\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH-CH}_3$ ; d)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}=\text{CH}_2$

Si hay ramificaciones se toma como cadena principal (se numera) la cadena más larga de las que contienen al doble enlace y se comienza a numerar por el extremo más próximo al doble enlace

**A.8.** Nombrar: a)  $\text{CH-CH}=\text{C}(\text{CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}=\text{CH-CH}_2\text{-CH}_3$

### Anexo 3. Formulación y nomenclatura de química orgánica

Cuando existe más de un doble enlace, la terminación es *-adieno*, *-atrieno*, etc., tomándose como cadena principal la más insaturada.

Ejemplo:  $\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$  se nombra 1,2-pentadieno

**A.9.** Nombrar: a)  $\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}_2$ ; b)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ ; c)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$

**A.10.** Formular: a) 3-etil-6-metil-2-hepteno; b) 1,3-pentadieno; c) propeno; d) 6-metil-6-pentil-2,4,7-nonatrieno.

#### 1.4. Hidrocarburos insaturados con triple enlace (alquinos)

Los alquinos con un solo triple enlace se nombran con la terminación *-ino* en lugar de *-ano*, con los localizadores correspondientes (siguiendo las mismas pautas que en los alquenos).

Ejemplo:  $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_3$  se nombra 2-butino

**A.11.** Nombrar: a)  $\text{CH}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ ; b)  $\text{CH}\equiv\text{CH}$ ; c)  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_3$

Si hay ramificaciones y/o más de un triple enlace la nomenclatura es análoga a la de los alquenos. La cadena se nombra, de forma que los localizadores de las insaturaciones sean los más bajos posibles.

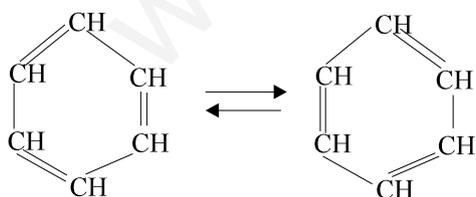
Ejemplo:  $\text{CH}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{C}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$  se nombra 6-metil-1,4-heptadidino

**A.12.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{C}\equiv\text{CH}$ ; b)  $\text{CH}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{C}-\underset{\text{H}_3\text{C}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{C}\equiv\text{CH}$

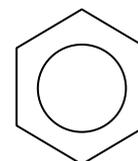
c)  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\underset{\text{C}\equiv\text{CH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

#### 1.5. Hidrocarburos aromáticos (arenos)

El benceno es la base de estos compuestos. Como se puede ver en el tema sobre la química del carbono, la estructura de la molécula de benceno puede representarse mediante:



O bien, esquemáticamente como:



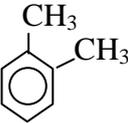
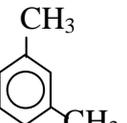
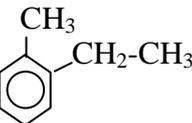
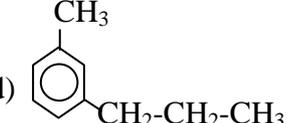
Los sustituyentes que puede haber en un anillo bencénico se nombran como radicales anteponiéndolos a la palabra "benceno".

Ejemplo:  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5$  se denomina etilbenceno

**A.13.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3$ - (tolueno); b)  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2$ - c)  $\text{CH}_2=\text{CH}$ - (estireno)

Si hay dos sustituyentes, su posición relativa se puede indicar mediante localizadores 1-2, 1-3, o 1-4 o bien mediante los prefijos o- (orto), m- (meta) y p- (para) respectivamente, en orden alfabético.

Ejemplo:  $\text{CH}_3$ -- $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_3$  se nombra 1-etil-4-metilbenceno o bien p-etilmetilbenceno

**A.14.** Nombrar: a)  b)  c)  d) 

## 2. GRUPOS FUNCIONALES

Un conjunto de propiedades químicas ligadas a la presencia de una agrupación particular de átomos recibe el nombre de “función” y el grupo atómico correspondiente se denomina “grupo funcional”

### 2.1. Alcoholes R-OH

Para nombrar los alcoholes se considera que se ha sustituido un H de un hidrocarburo por un OH. Como cadena principal se escoge aquella que contenga a los grupos OH. Cuando sólo hay un OH, el alcohol se nombra añadiendo la terminación *-ol* al hidrocarburo de referencia. Si hay más de un grupo OH, se utilizan las terminaciones *-diol*, *-triol*, etc. La cadena se numera de forma que los localizadores de los grupos OH sean lo más bajos posibles

Ejemplo:  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2\text{OH}$  se nombra 1-propanol

**A.15.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; b)  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2\text{OH}$ ; c)  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2\text{OH}$   
d)  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CHOH}$ - $\text{CH}_3$ ; e)  $\text{CH}_3$ - $\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{COH}}$ - $\text{CH}_3$ ; f)  $\text{CH}_3$ - $\text{CHOH}$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2\text{OH}$

Para los alcoholes insaturados se da prioridad, a la hora de numerar, a la cadena más larga que contenga los grupos OH y se utilizan dos terminaciones: una para el doble o triple enlace y otra para el grupo OH. La terminación *-ol* se pone al final.

Ejemplo:  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}=\text{CH}$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2\text{OH}$  se nombra 3-penten-1-ol

**A.16.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3$ - $\text{CH}=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$ - $\text{CH}$ - $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_2\text{OH}$ ; b)  $\text{COH}=\text{COH}$ - $\text{CH}_2\text{OH}$

### 2.2. Éteres R-O-R

Una forma de nombrar los éteres consiste en nombrar los radicales unidos al oxígeno en orden alfabético y después añadir la palabra éter. Si se repite el radical, se antepone el prefijo *di*.

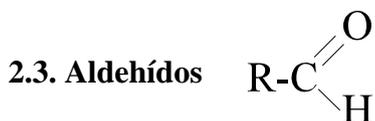
Ejemplo:  $\text{CH}_3$ -O- $\text{CH}_2$ - $\text{CH}_3$  se nombra etil metil éter

**A.17.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$

Otra forma de nombrar los éteres es como derivados del radical con mayor número de átomos de carbono anteponiendo como prefijo el nombre del otro hidrocarburo acabado en  $-\text{oxi}$ .

Ejemplo:  $\text{CH}_3\text{-O-CH}_2\text{-CH}_3$  es metoxietano

**A.18.** Nombrar de esta nueva forma a los éteres de la actividad anterior.



Los aldehídos tienen por lo menos un átomo de hidrógeno unido al grupo carbonilo  $-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$ . El grupo restante puede ser otro átomo de hidrógeno o cualquier otro grupo orgánico. Según el sistema de la IUPAC, la terminación característica de los aldehídos es  $-\text{al}$ . Como es lógico, el grupo carbonilo en los aldehídos siempre se halla en un carbono terminal de la cadena (para que pueda estar unido a un H). En el caso de aldehídos con ramificaciones, se toma como cadena principal la que contiene al carbono aldehídico y se numera siempre comenzando por dicho carbono. Si hay insaturaciones se indica su posición mediante el localizador correspondiente.

Ejemplo:  $\text{CH}_2=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{H}$  se nombra 3-metil-4-pental

**A.19.** Nombrar: a)  $\text{HCHO}$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CHO}$ ; c)  $\text{CHO-CH}_2\text{-CHO}$ ; d)  $\text{CH}=\underset{\text{CH}_2\text{-CH}_3}{\text{C}}-\overset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CHO}$



En las cetonas el átomo de carbono está unido a otros dos átomos de carbono, por tanto nunca el grupo carbonilo puede encontrarse en un carbono terminal de la cadena. Para nombrarlas se utiliza la terminación  $-\text{ona}$ . Se toma como cadena principal la cadena más larga que contenga al grupo carbonilo y se numera comenzando por el extremo más cercano a dicho grupo. Si hay varios grupos carbonilo se utilizan las terminaciones, *diona*, *triona*, etc. Para el resto de los casos (existencia de ramificaciones y/o presencia de insaturaciones) se siguen las normas habituales ya especificadas en otros grupos anteriores.

Ejemplo:  $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$  es propanona (ya que el grupo carbonilo no puede estar en otro lugar)

**A.20.** Nombrar: a)  $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_2\text{-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CO-CH}_3$ ; c)  $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_2\text{-CO-CH}_3$

d)  $\text{CH}_2=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CO-CH}_3$ ; e)  $\text{CH}_2=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}-\text{CO-CH}_3$ ; f)  $\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_2\text{CH}_3}{\text{CH}}=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CO-CH}_3$

**A.21.** Formular: a) 3-pentin-2-ona; b) 5-etil-5-hexen-2,4-diona; c) 2,4-dimetil-3-pentanona

## 2.5. Ácidos carboxílicos

$$\text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \text{=O} \\ \text{OH} \end{array}$$

La fórmula del grupo funcional se suele escribir de forma abreviada como RCOOH. Para nombrarlos se reemplaza la “o” final del alcano correspondiente por la terminación *-oico* y se antepone la palabra *ácido*. Por razones obvias este grupo funcional se encuentra siempre situado en un extremo de la cadena carbonada. Las indicaciones para su nomenclatura son similares a las de las funciones anteriores.

Ejemplo: CH<sub>3</sub>COOH se nombra ácido etanoico (también ácido acético)

**A.22.** Nombrar: a) HCOOH; b) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-COOH; c) COOH-COOH (oxálico); d) CH≡C-COOH

e) CH<sub>3</sub>-CH-COOH; f) CH<sub>3</sub>-CH-CH<sub>2</sub>-COOH; g) CH<sub>2</sub>=CH-COOH; h) CH<sub>3</sub>-CH=CH-CH-COOH

$$\begin{array}{cccc} \text{CH}_3 & & & \text{CH}_3 \\ | & & & | \\ \text{CH}_3 & & & \text{CH}_3 \end{array}$$

## 2.6. Ésteres

$$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}'$$

Se pueden considerar como el resultado de reemplazar el grupo OH de los ácidos por un grupo OR'. Se nombran como si fuesen sales, sustituyendo la terminación *-oico* del ácido del cual derivan por la terminación *-ato*, seguido por la palabra “de” y el nombre de la parte R' (correspondiente al grupo OR') acabado en *-ilo*.

Ejemplo: CH<sub>3</sub>-COO-CH<sub>3</sub> se nombra etanoato de metilo (también acetato de metilo).

**A.23.** Nombrar: a) HCOO-CH<sub>3</sub>; b) CH<sub>3</sub>-COO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>; c) CH<sub>3</sub>-COO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>

d) CH<sub>3</sub>-CH-COO-CH<sub>3</sub>; e) CH<sub>2</sub>=CH-CH<sub>2</sub>-COO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>; f) CH=CH-CH-COO-CH<sub>3</sub>

$$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH} \end{array}$$

**A.24.** Formular: a) Metanoato de propilo; b) acetato de propilo; 3-metilbutanoato de etilo

## 2.7. Aminas

$$\text{R}-\overset{\text{R}''}{\text{N}}-\text{R}'$$

Por conveniencia las aminas se clasifican en primarias, secundarias y terciarias según presenten uno, dos o tres grupos orgánicos (radicales distintos al átomo de hidrógeno) unidos al átomo de nitrógeno. Los grupos R, R' y R'' pueden ser iguales o diferentes. En general las aminas sencillas (que son las que veremos aquí) se nombran especificando los grupos orgánicos unidos al nitrógeno (en orden alfabético) y añadiendo el sufijo *-amina*.

Ejemplo: CH<sub>3</sub>-NH-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub> se nombra etilmetilamina

**A.25.** Nombrar: a) CH<sub>3</sub>-NH<sub>2</sub>; b) CH<sub>3</sub>-NH-CH<sub>3</sub>; c) CH<sub>3</sub>-N-CH<sub>3</sub>; d) CH<sub>3</sub>-N-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>

$$\begin{array}{cc} \text{CH}_3 & \text{CH}_3 \\ | & | \\ \text{N} & \text{N} \end{array}$$

e) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>; f) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-NH-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>

## 2-8. Nitrilos R-C≡N

Una forma de nombrar los nitrilos consiste en añadir la terminación **-nitrilo** al nombre del hidrocarburo correspondiente. Si es preciso numerar la cadena, se comienza por el grupo funcional.

Ejemplo: CH<sub>3</sub>-C≡N se nombra etanonitrilo

A.26. Nombrar: a) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-C≡N; b) CH<sub>3</sub>-CH(CH<sub>3</sub>)-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-C≡N; c) HC≡N (ácido cianhídrico)  
d) N≡C-CH<sub>2</sub>-C≡N

## 2.9. Amidas $\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}_2$

Se nombran cambiando la terminación *-ano* del hidrocarburo correspondiente por la terminación *-anamida*. En el caso de insaturaciones y/o radicales se procede como ya hemos visto en los casos anteriores.

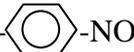
Ejemplo: CH<sub>3</sub>-CO-NH<sub>2</sub> se nombra etanamida

A.27. Nombrar: a) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CO-NH<sub>2</sub>; b) CH<sub>3</sub>-CH(CH<sub>3</sub>)-CO-NH<sub>2</sub>; c) CH<sub>2</sub>=CH-CH<sub>2</sub>-CO-NH<sub>2</sub>

## 2.10. Nitroderivados $\text{R}-\text{N} \begin{array}{l} \diagup \text{O} \\ \diagdown \text{O} \end{array}$

Se designan mediante el prefijo *-nitro* seguido del nombre del hidrocarburo.

Ejemplo: a) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub> se nombra nitropropano

A.28. Nombrar: a) CH<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>; b) -NO<sub>2</sub>; c) CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH(NO<sub>2</sub>)-CH<sub>3</sub>; d) NO<sub>2</sub>--NO<sub>2</sub>

## 2.11. Derivados halogenados R-X

Son los hidrocarburos que contienen en su molécula átomos de halógeno. Una forma de nombrarlos consiste en dar el nombre del halógeno precediendo al del hidrocarburo correspondiente. La posición del átomo de halógeno se indica mediante localizadores. Se comienza a numerar por el extremo más próximo al halógeno. Si existen insaturaciones se numera la cadena principal (que contiene al halógeno) de modo que a las insaturaciones les correspondan los números más bajos posibles. En el caso de cadenas ramificadas, los halógenos se consideran como radicales y se citan en el lugar que les corresponde según el orden alfabético.

Ejemplo: CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>Cl se nombra 1-cloropropano

A.29. Nombrar: a) CH<sub>3</sub>-CHCl-CHCl-CH<sub>3</sub>; b) CH<sub>2</sub>Br-CH<sub>2</sub>Br; c) CH<sub>3</sub>- $\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}$ -Cl; d) CHCl<sub>3</sub> (cloroformo)  
e) CH<sub>3</sub>-CH=CH-CHCl-CH<sub>3</sub>; f) CH<sub>3</sub>- $\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$ - $\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$ -C≡CH

**SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES PROPUESTAS**

**A.1.** a) etilo; b) propilo; c) butilo

**A.2.** a) 2-metilhexano; b) 2-metilhexano; c) metilpropano; d) 3-metilhexano;  
e) 3-metilpentano; f) 3-metilpentano.

**A.3.** a) 2,3,6-trimetilheptano; b) 3-etil-5-metilheptano; c) 3-etil-2-metilhexano;  
d) 3-etil-5-propilnonano; e) 2,2,4-trimetilpentano; f) 3,3,5,5-tetrametilheptano;  
g) 3,3,5-trimetilheptano.

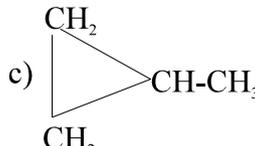
**A.4.** a)  $\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

c)  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$  d)  $\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$  e)  $\text{CH}_3-\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

f)  $\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

**A.5.** a) ciclopropano; b) ciclopentano; c) ciclohexano

**A.7.** a) eteno; b) propeno; c) 2-buteno; d) 1-buteno

**A.6.** a)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \\ | \quad \quad \quad \diagdown \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \end{array}$  b)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}_2 \\ | \quad \quad \quad \diagdown \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2 \quad \text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$  c) 

**A.8.** a) 3-etil-6-metil-2-hepteno; b) 5,6-dimetil-3-hepteno

**A.9.** a) propadieno; b) 1,3-butadieno; c) 1,3-pentadieno

**A.10.** a)  $\text{CH}_3-\text{CH}=\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$  b)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$  c)  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$

d)  $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\underset{\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$

**A.11.** a) 1-butino; b) etino; c) 2-pentino

**A.12.** a) 3-propil-1,5-heptadieno; b) 10-etil-9,9-dimetil-1,4,7,11-dodecatetraeno

Anexo 3. Formulación y nomenclatura de química orgánica

- A.13.** a) metilbenceno; b) propilbenceno; c) etenilbenceno (vinilbenceno)
- A.14.** a) 1,2-dimetilbenceno (también o-dimetilbenceno); b) 1,3-dimetilbenceno (también m-dimetilbenceno); c) 1-etil-2-metilbenceno (también o-etilmetilbenceno)  
d) 1-metil-3-propilbenceno (también m-metilpropilbenceno)
- A.15.** a) metanol; b) etanol; c) 1-butanol; d) 2-butanol; e) 2-metil-2-butanol; f) 1,3-butanodiol
- A.16.** a) 4-metil-4-hexen-1-ol; b) 1,2,3-propenotriol
- A.17.** a) dimetil eter; b) etil propil eter
- A.18.** a) metoximetano; b) etoxipropano
- A.19.** a) metanal; b) propanal; c) propanodial; d) 3-etil-2-metil-4-pentinal
- A.20.** a) butanona; b) 2-pentanona; c) 2,4-pentanodiona; d) butenona;  
e) 3-metil-4-pentenona; f) 5-etil-3-metil-6-octen-2-ona
- A.21.** a)  $\text{CH}_3\text{-C}\equiv\text{C-CO-CH}_3$     b)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH-CO-C-CO-CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_2\text{-CH}_3 \end{array}$     c)  $\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH-CO-CH-CH}_3 \\ | \quad | \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$
- A.22.** a) ácido metanoico; b) propanoico; c) etanodioico; d) propinoico; e) metilpropinoico  
f) 3-metilbutanoico; g) propenoico; h) 2-metil-3-pentenoico
- A.23.** a) metanoato de metilo; b) etanoato de etilo; c) etanoato de butilo;  
d) propanoato de metilo; e) 3-butenato de etilo; f) 2-metil-3-butenato de metilo
- A.24.** a)  $\text{HCOO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ ; b)  $\text{CH}_3\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ ; c)  $\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{-CH-CH}_2\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array}$
- A.25.** a) metilamina; b) dimetilamina; c) trimetilamina; d) etildimetilamina; e) etilamina  
f) etilpropilamina
- A.26.** a) propanonitrilo; b) 5-metil-hexanonitrilo; c) metanonitrilo; d) propanodinitrilo
- A.27.** a) butanamida; b) metilpropanamida; c) 3-butenamida
- A.28.** a) nitrometano; b) nitrobenceno; c) 1-metilnitropropano; d) 1,4-dinitrobenceno
- A.29.** a) 2,3-diclorobutano; b) 1,2-dibromoetano; c) 2-cloro-metilpropano;  
d) triclorometano; e) 4-cloro-2-penteno; f) 3,4-dicloro-1-pentino