

1. La energía y los portadores de energía

1.1 La energía

Los automóviles necesitan bencina, las locomotoras diesel necesitan aceite diesel, las locomotoras eléctricas, electricidad. Cada vehículo necesita un carburante o algo que lo impulse, pero no solamente los vehículos; también al andar a pie o en bicicleta necesitamos algo que nos impulse: el hombre que camina o anda en bicicleta necesita el carburante “alimento”. Todos estos carburantes tienen algo en común: Con ellos el vehículo o el hombre recibe *energía*. La energía es lo realmente necesario para impulsar o transportar algo.

Energía tiene algo que ver con el esfuerzo. Al tirar un carrito hacemos un esfuerzo, para tirar el carrito necesitamos energía. Al tirar, trasladamos esta energía al carrito.

Para mover algo se necesita energía.

Pero la energía no se ocupa sólo para el movimiento. Hay muchos otros procesos que se realizan únicamente con la entrega constante de energía.

Así, para hacer funcionar la calefacción, se necesita siempre algún combustible: leña, carbón, parafina, gas. También podría utilizarse la electricidad. Nuevamente, lo verdaderamente importante, la energía, se suministra junto con el combustible.

Para calefaccionar necesitamos energía.

Todos estos carburantes o combustibles con que la energía llega a un motor o a una estufa se llaman *portadores de energía*. La leña, el carbón, el aceite diesel, la parafina, el gas y también la electricidad son portadores de energía.

Cuando queremos mover o calefaccionar algo, lo único que realmente cuenta es la energía. Muchas veces, el tipo de portador de energía utilizado no es tan importante. ¿No se podría ocupar, entonces, energía “pura”, sin portador? A lo mejor sería mucho más cómodo. Pero, desgraciadamente, esto es imposible, porque no existe la energía sin portador.

Combustibles, carburantes, alimentos y electricidad son portadores de energía. Energía sin portador no existe.

La energía es una magnitud física. ¿Qué significa esto? Tal como a una longitud, a un tiempo o a una temperatura, se le puede asignar un número y tal

como la longitud, el tiempo o la temperatura, la energía tiene una unidad de medición o medida. La medida para la energía es el Joule (J).

De esta manera, podemos decir que 1 kg de algún combustible contiene un cierto número de Joules (tabla 1.1). El contenido energético de los alimentos aparece, a menudo, en el envase correspondiente. Una pila de 4,5 Volt cargada contiene unos 10 kJ (kilojoules), una batería de auto cargada unos 2000 kJ, aproximadamente la misma cantidad de energía que una barra de chocolate. La locomotora de un tren de carga gasta en cada hora unos 10 000 MJ (Megajoules), un reloj pulsera digital 0,1 J.

El método utilizado para medir la cantidad de energía depende de su portador: para medir el gasto energético de un automóvil se mide la cantidad de bencina utilizada (en kg) y se multiplica por el valor indicado en la tabla 1.1. La energía eléctrica que llega a nuestra casa se mide con el llamado “medidor de electricidad”.

1.2 Fuentes y receptores de energía

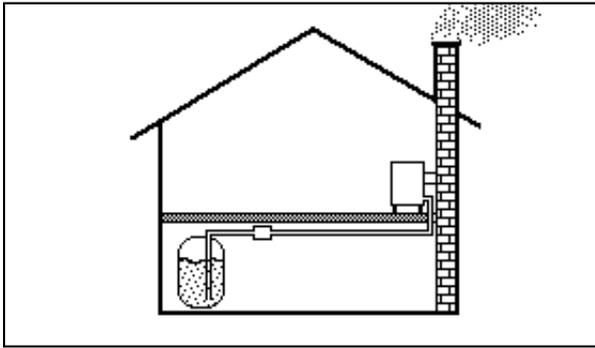
La figura 1.1 muestra una estufa con el suministro energético correspondiente. A través de una cañería, el combustible parafina es bombeado desde el estanque ubicado en el sótano, hacia la estufa. El estanque se llama *fuerza de energía* y la estufa es el *receptor de energía*.

El motor del automóvil de la figura 1.2 obtiene su energía con el portador bencina que sale del estanque. En este caso, el estanque de bencina es la fuente de energía y el motor el receptor.

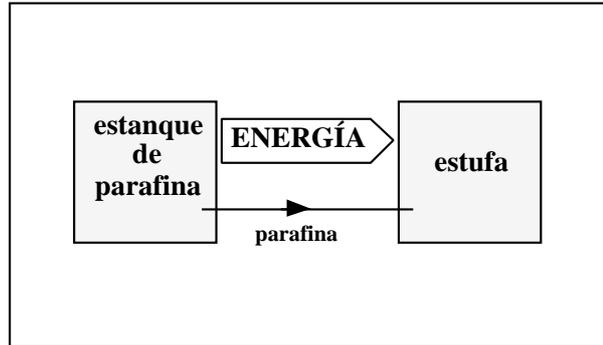
En la figura 1.3, la energía que gasta la ampollita viaja con la electricidad desde una planta eléctrica.

Tabla 1.1. Contenido energético de algunos combustibles

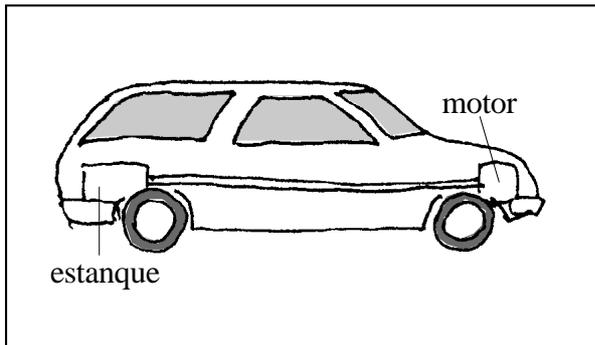
1 kg de carbón de piedra	30 000 kJ
1 kg de leña recién cortada	8 000 kJ
1 kg de gas licuado	46 000 kJ
1 kg de bencina	43 000 kJ
1 kg de parafina	42 000 kJ



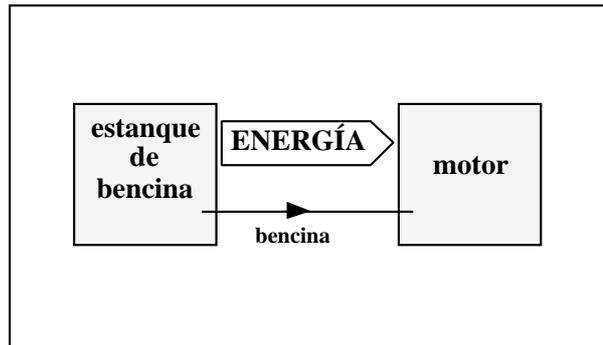
1.1. Con el portador parafina, la energía llega del estanco a la estufa.



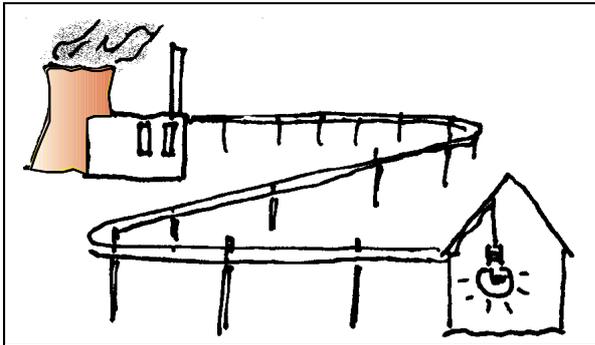
1.4. Diagrama de flujo correspondiente a 1.1



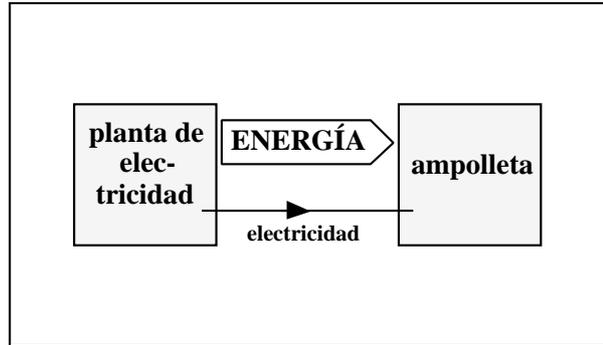
1.2. Con el portador bencina, la energía llega del estanco al motor.



1.5. Diagrama de flujo correspondiente a 1.2



1.3. Con el portador electricidad, la energía llega de la planta a la ampollita.



1.6. Diagrama de flujo correspondiente a 1.3

Esta planta es la fuente de energía y la ampollita es el receptor.

Cada vez que fluye la energía (por supuesto siempre junto con su portador), podemos indicar cuál es su fuente y cuál es su receptor. Al seguir hacia atrás el camino recorrido por el portador de energía, llegaremos a la fuente de energía; si lo seguimos hacia adelante, hasta su término, llegaremos al receptor de energía.

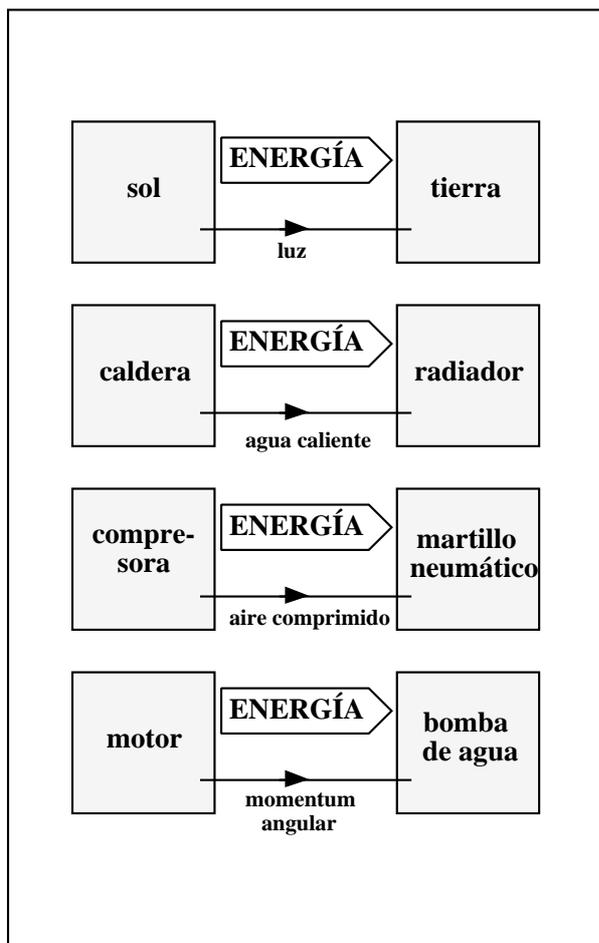
Los procesos representados en las figuras 1.1, 1.2 y 1.3 tienen algo en común: en cada caso, la energía fluye, junto con su portador, desde una fuente hacia un receptor. Prescindiendo de todos los detalles y haciendo resaltar las similitudes, conviene representar estos procesos en forma simbólica, tal como lo muestran las figuras 1.4, 1.5 y 1.6.

La fuente y el receptor de energía se representan por medio de rectángulos unidos entre sí por medio de una flecha gruesa que simboliza la energía y otra flecha delgada para el portador de energía. Este tipo esquema lo llamamos *diagrama de flujo*.

Aún no hemos mencionado el portador de energía luz. Con él llega, por ejemplo, la energía del sol a la tierra (figura 1.7).

Otro portador de energía importante es el agua caliente de la calefacción central, que lleva la energía desde la caldera a los diferentes radiadores. También existen sistemas de calefacción en que se utiliza el aire caliente para transportar la energía.

Para que pueda funcionar un martillo neumático, tiene que conectarse a una compresora. Esta compresora es la fuente de energía, el aire comprimido



1.7. Algunos diagramas de flujo representando transportes de energía

es el portador de energía y el martillo neumático es el receptor.

Líquidos a alta presión también son utilizados como portadores de energía: una turbina recibe la energía mediante agua a alta presión. La pala de una excavadora obtiene la energía mediante aceite hidráulico a alta presión.

Sin embargo, el aire y el agua también son utilizados como portadores de energía sin que estén a alta presión o alta temperatura. Es suficiente que se muevan con rapidez. Un molino de viento, por ejemplo, obtiene la energía mediante el portador “aire en movimiento”.

Si un motor impulsa alguna máquina, por ejemplo una bomba de agua, mediante un árbol o eje de transmisión, la energía se desplaza a través del árbol desde el motor a la bomba. En este caso, el portador de energía que lleva la energía a través del árbol se llama *momentum angular*.

En la tabla 1.2 se representa un resumen de los diferentes portadores de energía mencionados.

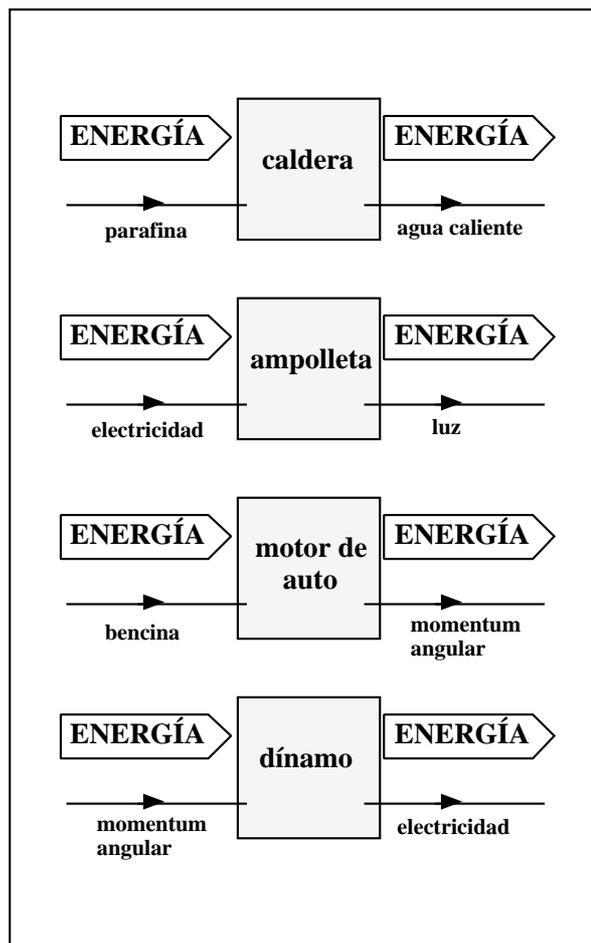
Tabla 1.2. Portadores de energía

Combustibles, carburantes, alimentos
Electricidad
Luz
Momentum angular
Agua caliente, aire caliente
Agua y aire a presión
Agua y aire en movimiento

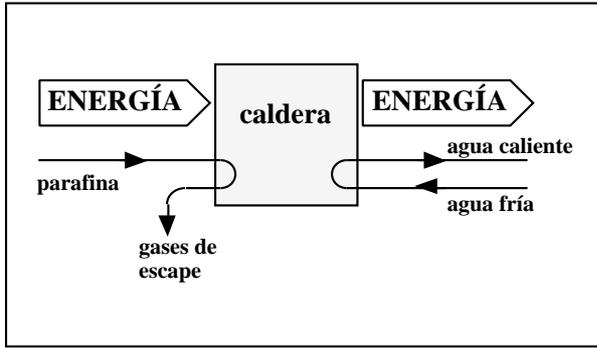
1.3 Transbordadores de energía

Algunas de las fuentes de energía mencionadas tienen la particularidad de que no pueden quedar vacías. Constantemente reciben el suministro de nueva energía, pero, unida a otro portador. Son, de esta manera, fuente de energía con un portador X y, al mismo tiempo, receptor de energía con un portador Y.

La caldera de la calefacción central, por ejemplo, recibe energía con el portador “parafina” y la va entregando con el portador “agua caliente”. Decimos que en la caldera, la energía es trasladada o



1.8. Representación simbólica de algunos transbordadores de energía



1.9. Diagrama de flujo de la caldera, completado

transbordada desde el portador parafina al portador agua caliente; la caldera es, entonces, un *transbordador de energía*.

De la misma manera, el motor de un automóvil transborda la energía de la bencina al momentum angular y la ampollita lo hace de la electricidad a la luz. La figura 1.8 representa, simbólicamente, algunos transbordadores de energía y la tabla 1.3 contiene una larga lista de transbordadores de energía con sus respectivos portadores de entrada y de salida.

Pero, en realidad, los dibujos simbólicos de los transbordadores de la figura 1.8 han quedado incompletos. El balance energético es correcto: una flecha gruesa para la energía que entra y otra igual para la que sale. Sin embargo, el balance de los portadores no resulta totalmente claro. Consideremos nuevamente el ejemplo de la caldera de la figura 1.8: ¿Qué pasa con la parafina después de haber entregado su energía y de dónde viene el agua que se lleva la energía de la caldera? La respuesta correcta está en la figura 1.9: al entregar su energía, la parafina se transforma en gases de escape que abandonan la caldera y, por otro lado, a ésta le llega agua fría que, al ser cargada con la energía, se calienta.

Algo similar ocurre con todos los demás transbordadores. Para cada portador existe una entrada y una salida. El camino correcto que recorre cada uno de los portadores indicados en la tabla 1.2 se estudiará, de a poco, en tus clases de física.

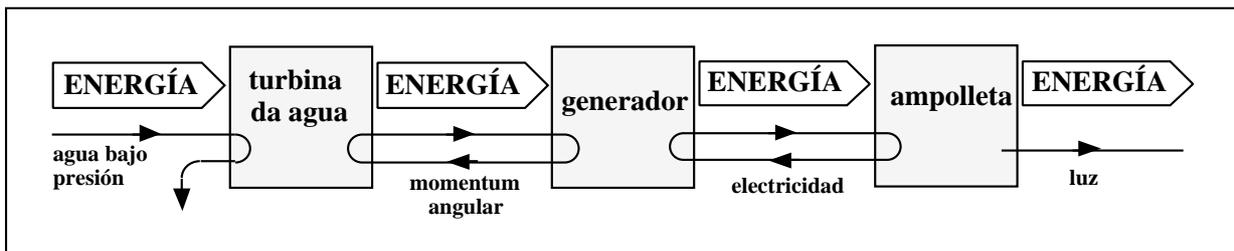
Para cada artefacto que transborda energía de un portador A a uno B, se puede encontrar otro artefacto que hace exactamente lo contrario, es decir, transborda energía de B a A. De esta manera,

Tabla 1.3. Transbordadores de energía con sus correspondientes portadores de entrada y de salida

Transbordador	entrada	salida
Motor eléctrico	Electricidad	Momentum angular
Ampolleta	"	Luz
Horno eléctrico	"	Aire caliente
Calífont eléctrico	"	Agua caliente
Bomba eléctrica	"	Agua bajo presión
Ventilador	"	Aire en movimiento
Compresora a diesel	Carburante	Aire comprimido
Planta termoeléctrica	"	Electricidad
Motor a bencina	"	Momentum angular
Lámpara a parafina	"	Aire caliente
Caldera	"	Agua caliente
Célula fotoeléctrica	Luz	Electricidad
Molino solar	"	Momentum angular
Colector solar	"	Agua caliente
Bosque	"	Leña (combustible)
Compresora	Mom. angular	Aire comprimido
Bomba de agua	"	Agua bajo presión
Generador, dínamo	"	Electricidad
Hélice	"	Aire en movimiento
Turbina de agua	Agua a presión	Momentum angular
Molino de viento	Aire en movim.	Momentum angular

el motor eléctrico transborda energía del portador electricidad al portador momentum angular, y el generador o dínamo la traslada del momentum angular a la electricidad. En la misma forma, se pueden asociar la ampolleta con la célula fotoeléctrica y, también, la turbina de agua con la bomba de agua.

A menudo la energía es transbordada varias veces a lo largo de una secuencia de diferentes portadores. La figura 1.10 muestra una ampolleta abastecida por una planta hidroeléctrica. Acoplando, de esta manera, dos transbordadores de energía, el portador de salida del primero tiene que ser idéntico al portador de entrada del segundo, o sea, la regla para unir transbordadores de energía es la misma que rige en el juego del dómينو.



1.10 Transporte de energía con tres transbordos

1.4 La intensidad del flujo energético

Para averiguar el gasto energético de algún artefacto, es preciso conocer la cantidad de energía que entra al artefacto en un tiempo determinado. (Por supuesto esta energía también tiene que salir del artefacto.) Un artefacto al que entran 1000 J en cada segundo “gasta” más energía que otro al que llegan sólo 500 J por segundo. El número de Joules que fluye en cada segundo a través de un conductor de energía, es decir, la cantidad de energía dividida por el tiempo, se llama *intensidad del flujo energético* o, brevemente, *flujo energético*.

$$\text{Intensidad del flujo energético} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}}$$

Usando los símbolos E para la energía, t para el tiempo y P para la intensidad del flujo energético, tenemos que

$$P = \frac{E}{t}$$

Para designar P se utiliza, junto con el concepto de “flujo energético”, también la palabra “potencia”.

La medida del flujo energético es Joule por Segundo, o J/s, y este cociente se define como Watt (W). Tenemos entonces

$$W = \frac{J}{s}$$

A una ampolleta común llega un flujo energético de 60 W (junto con el portador electricidad). En el automóvil fluyen, desde el motor a las ruedas y junto con el portador momentum angular, unos 50 kW. Una gran planta eléctrica produce un flujo energético de unos 1000 MW. La parte del flujo energético del sol que llega a la tierra se calcula en $1,7 \cdot 10^{11}$ MW, lo que corresponde a la energía entregada por 170 millones de grandes plantas eléctricas. Al comer, el hombre absorbe energía; el promedio del flujo energético correspondiente se estima en unos 100 W.

Existen fuentes de energía que pueden vaciarse totalmente, como, por ejemplo, la batería del automóvil, las pilas de una linterna o el estanque de bencina. En estos artefactos podemos almacenar energía y los llamamos, por lo tanto, *acumuladores de energía*. Otros acumuladores de energía son el motor a cuerda, el estanque de parafina, la pintura fluorescente, el volante, el termo eléctrico y el sol.

Ejercicios

1. Menciona tres receptores de energía diferentes que reciben la energía con el portador electricidad.

2. Nombra tres fuentes de energía diferentes que entregan energía con el portador momentum angular.

3. En la figura 1.11 faltan los nombres de los portadores de energía.

4. Indica, en la figura 1.12, los nombres de los transbordadores de energía.

5. Dibuja una cadena de transbordadores que contenga un mínimo de tres transbordadores energéticos.

6. Algunos artefactos pueden ser representados como transbordadores de energía de diferente manera: la aspiradora, por ejemplo, puede representarse como un único transbordador, usando un único símbolo, o mediante dos transbordadores acoplados. Indica y dibuja las dos posibilidades.

7. Para poder hacer una ampolleta con la ayuda de un molino de viento, se necesita un artefacto adicional. ¿Cuál? Dibuja el diagrama de flujo.

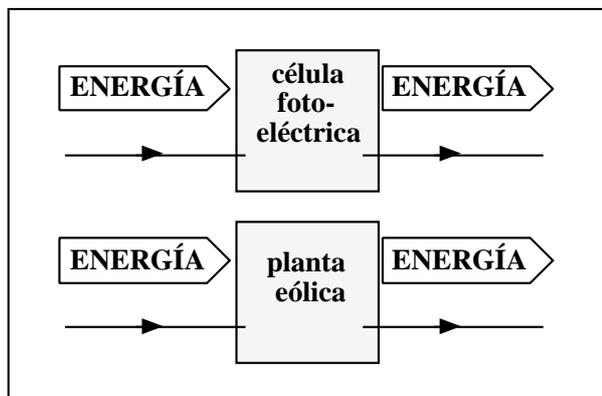
8. Artefacto 1 transborda energía del portador A al portador B. Artefacto 2 hace todo lo contrario: transborda energía del portador B al A. Indica tres pares de transbordadores que estén relacionados en esta forma.

9. En un secador de pelo aparece la siguiente inscripción:

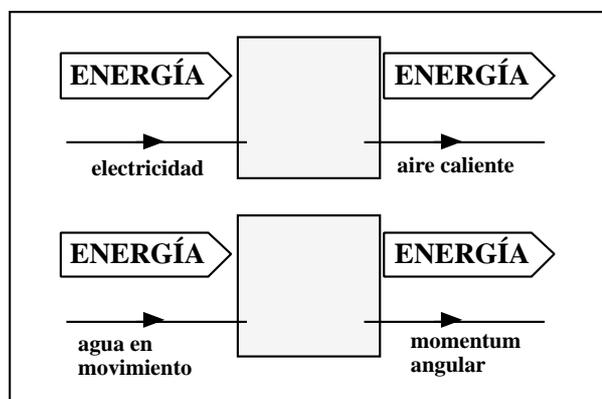
Fase 1: 500 W

Fase 2: 1000 W

¿Qué significa esta inscripción?



1.11. ¿Cuáles son los portadores de energía de entrada y de salida?



1.12. ¿Cómo se llaman los transbordadores de energía?

2. Datos y portadores de datos

2.1 Transmisión de datos

Cada casa está unida al mundo exterior mediante diversas conexiones y aberturas. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran una casa con tales conexiones y aberturas. Para que la representación no resulte demasiado compleja, mostramos una parte de las conexiones en la figura 2.1 y la otra, en la figura 2.2. Además, se han ordenado las conexiones de acuerdo a un determinado criterio: Todas las conexiones de la figura 2.1 tienen una finalidad común y las de la figura 2.2 tienen otra finalidad común. La figura 2.1 muestra las conexiones a través de las cuales la casa es abastecida con energía:

- Las conexiones eléctricas que pasan a través del “medidor de corriente”;
- la abertura para llenar el estanque de combustible para la calefacción;
- la cañería de gas.

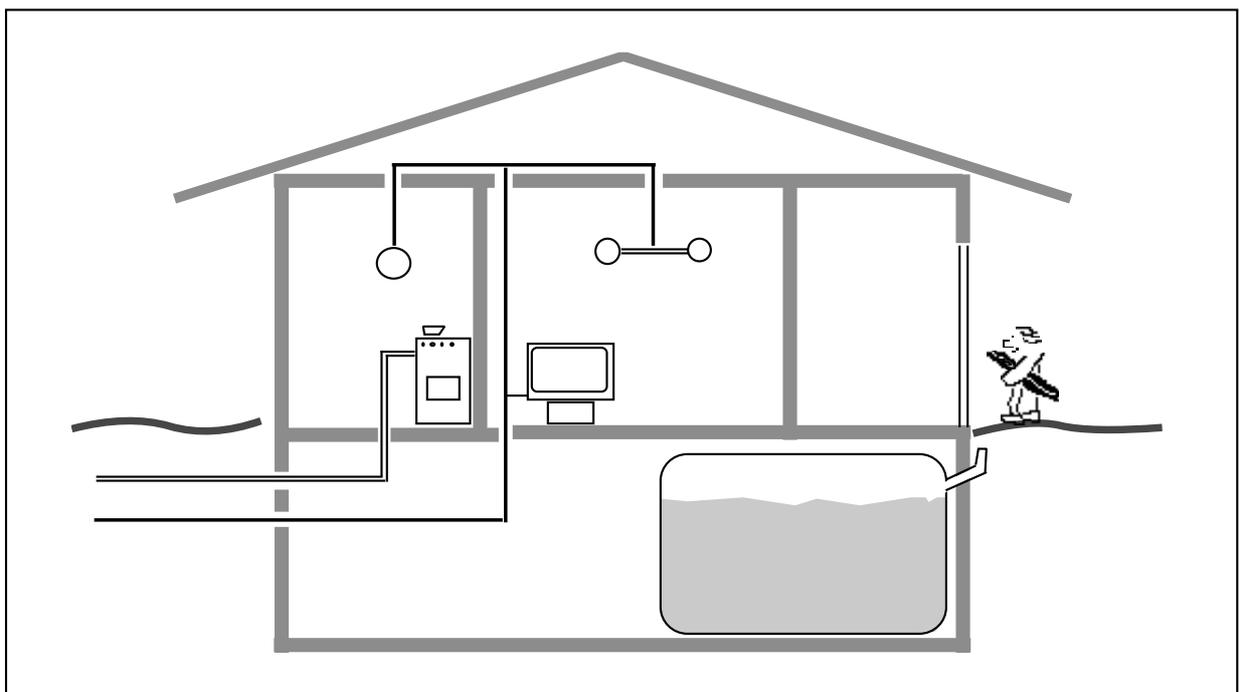
Un hombre trae leña para la chimenea. De esta manera, a veces, la energía es llevada a la casa a través de la misma puerta. Algunas casas tienen otras conexiones o conductos para la energía:

- La abertura del sótano, para almacenar leña o carbón;
- una conexión para la calefacción a distancia;
- una cañería para el agua caliente proveniente del colector solar.

También las conexiones de la figura 2.2 tienen un objetivo común: Entregan, a los moradores de la casa, noticias, informaciones, imágenes y música. Decimos que a través de estas conexiones llegan *datos* a la casa. Estos datos pueden llegar a través de

- el cable telefónico;
- el cable de la antena de televisión;
- el buzón, en forma de diarios y cartas;
- las ondas electromagnéticas u ondas de radio que atraviesan las paredes y el techo y son captadas por la antena de la radio a transistor;
- la ventana abierta, por donde nos llama el vecino.

Los datos también pueden llegar a la casa a través de la puerta: La señora lleva en su bolso un CD y un casete de video. Otras conexiones para datos que llegan a la casa y que no aparecen en el dibujo son:



2.1. Conexiones para el suministro de energía

Tabla 2.1

Fuente de datos	Portador de datos	Receptor de datos
Antena emisora Antena receptora Aparato de fonación	Ondas electromagnéticas Electricidad Sonido	Antena receptora Televisor Micrófono

- El cable del timbre;
- la conexión de la televisión por cable.

Ya hemos visto, anteriormente, que para el transporte de la energía se necesita un portador de energía. De la misma manera, necesitamos un portador de datos para transportar los datos. Al interior de la casa de la figura 2.2 los datos llegan con los portadores

- electricidad;
- sonido;
- ondas de radio;
- cartas, diarios, etc.

También la luz actúa como portador de datos. Cuando miramos la televisión, los datos pasan de la pantalla a nuestros ojos con el portador luz. Igualmente, ya se está utilizando la luz para el transporte de las conversaciones telefónicas. En este caso, se usan las *fibras ópticas* en vez de los conocidos alambres de cobre.

Para el transporte de datos se necesita un portador. Portadores de datos pueden ser la electricidad, el sonido, las ondas de radio y la luz.

Por supuesto cada información puede ser transmitida mediante un portador cualquiera. En la figura 2.3,

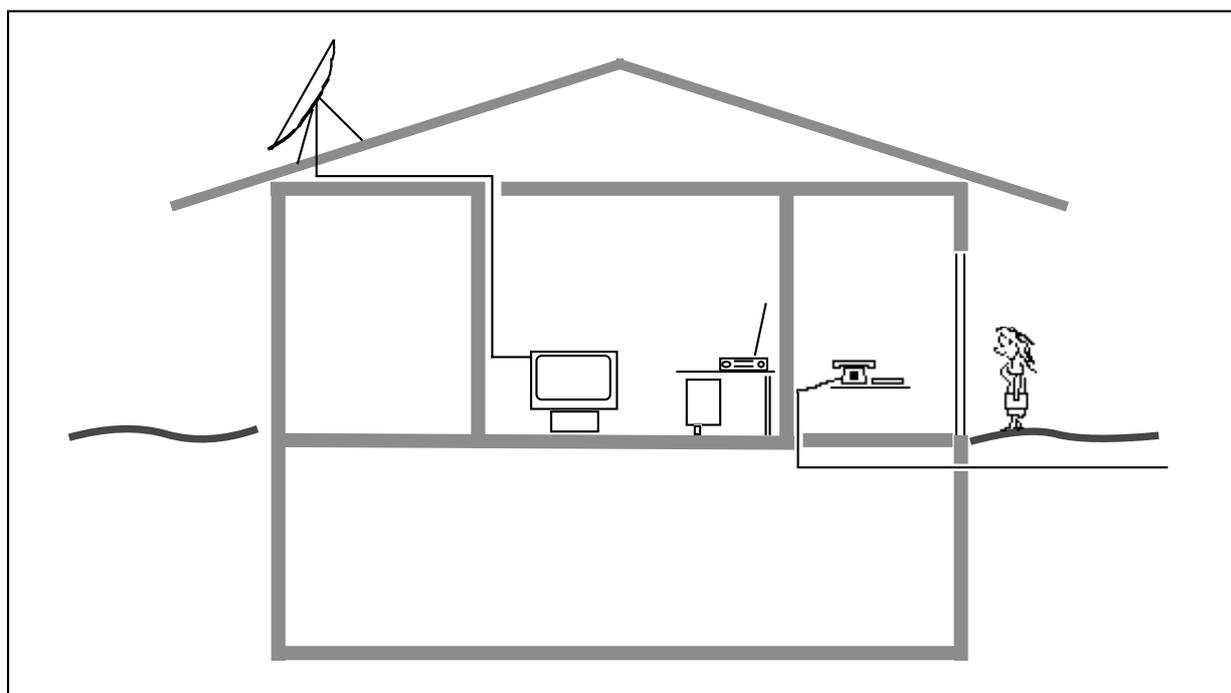
la información “llámame” se transmite a través de cuatro portadores diferentes.

En cada transmisión de datos tenemos un comienzo y un fin: la *fuentes de datos* y el *receptor de datos*. Si una persona A le dice algo a otra persona B, A (es decir su aparato de fonación) es la fuente de datos y B (es decir su oído) es el receptor de datos.

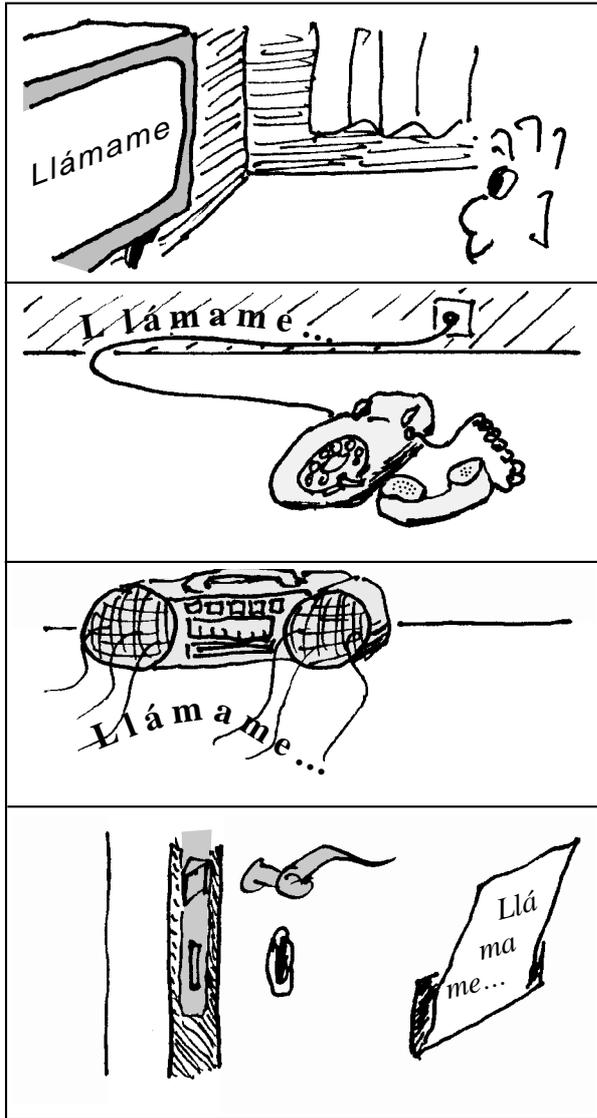
Sin embargo, el nombre “fuente” no significa, necesariamente, que en ella se generen los datos; sólo significa que allí comienza el transporte con un determinado portador. De la misma manera, la palabra “receptor” no significa, necesariamente, que en él termine en forma definitiva el transporte de los datos. Sólo dice que en este punto termina el transporte con el portador que acabamos de considerar. Por lo tanto, los conceptos de fuente y receptor siempre se refieren al transporte con un determinado portador.

De esta manera, los datos que son transmitidos a través del cable telefónico, provienen del micrófono de uno de los teléfonos. Este micrófono es la fuente de datos para su transporte a través del cable (con el portador electricidad). El audífono del otro teléfono es el receptor de datos correspondiente.

Tal como lo hemos hecho en el caso del transporte de energía, el transporte de datos lo podemos representar mediante un diagrama de flujo. Representamos, simbólicamente, la fuente y el receptor de da-



2.2. Conexiones para el suministro de datos

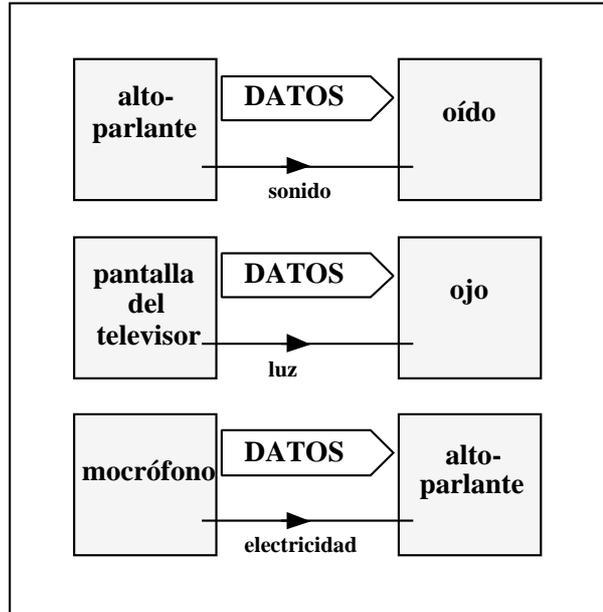


2.3. La misma noticia es transmitida mediante diferentes portadores.

tos mediante rectángulos; los datos mediante una flecha gruesa y el portador de datos mediante una flecha delgada. La figura 2.4 muestra tres ejemplos para diagramas de flujo de datos.

En la tabla 2.1 se indican otros pares fuente-receptor con sus portadores respectivos.

En el transporte de la energía, muchas veces participan aparatos destinados a transbordar la energía de



2.4. Representación simbólica de algunas transmisiones de datos

un portador a otro. Lo mismo ocurre en el transporte de datos: en él participan, muchas veces, aparatos con los que se transbordán datos de un portador a otro.

Estos aparatos cumplen, por lo tanto, la función común de fuente y receptor de datos.

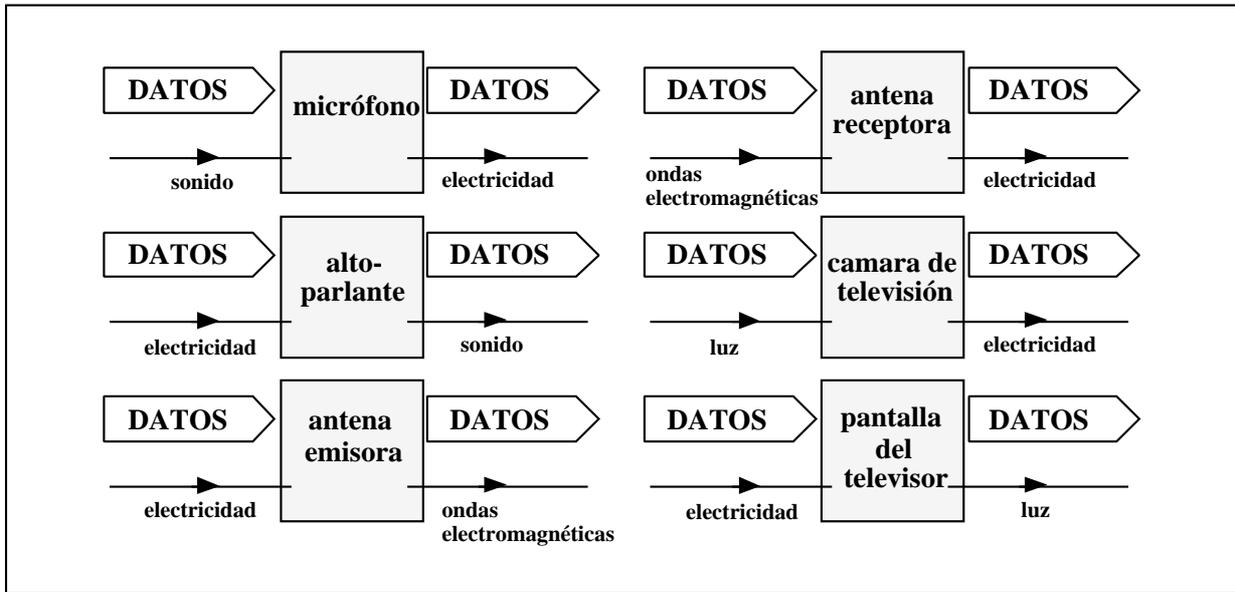
De esta manera, en un parlante, se transbordán datos de la electricidad al sonido. El parlante es, por lo tanto, receptor para un transporte de datos con el portador electricidad y fuente para un transporte con el portador sonido. Entonces, la representación simbólica de un transbordador de datos es obvia. La figura 2.5 muestra algunos ejemplos y, en la tabla 2.2, se indican otros transbordadores de datos junto con los portadores respectivos de entrada y salida.

Vemos también que, junto con cada artefacto que transborda datos de un portador A a otro B, existe otro artefacto opuesto que transborda los datos de B a A. De esta manera, el micrófono es lo opuesto del parlante y la cámara de video hace lo contrario que la pantalla de televisión.

Para que funcionen algunos de los aparatos indicados en la figura 2.5, tenemos que enchufarlos, es decir reciben energía a través del enchufe de electrici-

Tabla 2.2

Transbordador de datos	Portador de datos	
	de entrada	de salida
Indicador de cristal líquido	Electricidad	Luz
Fotodiodo	Luz	Electricidad
Bocina, sirena	Electricidad	Sonido
Radio	Ondas electromagnéticas	Sonido



2.5. Representación simbólica de algunos transbordadores de datos

dad. Sin embargo, no debemos confundir esta entrada de energía con una entrada de datos. Las noticias y las imágenes llegan al televisor a través de la antena y el cable de televisión y no a través del enchufe de electricidad.

De la misma manera que los transbordadores de energía, también los transbordadores de datos pueden ser unidos entre si de manera que formen una cadena. En muchas situaciones técnicas de transporte de datos participan varios transbordadores. La figura 2.6 muestra, en forma simplificada, la transmisión en vivo por televisión de un partido de futbol desde México a Alemania.

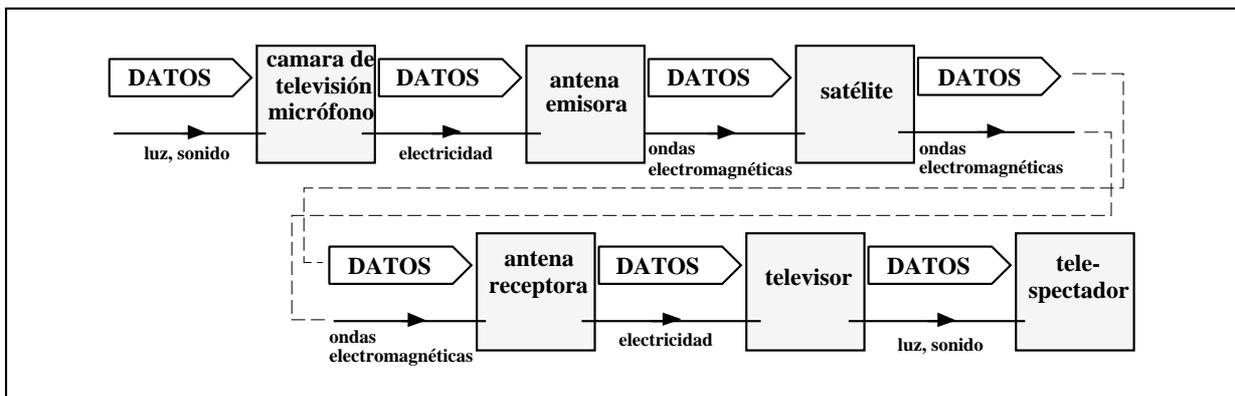
De acuerdo a los ejemplos indicados hasta ahora, se podría sacar la conclusión de que siempre el último eslabón de una cadena de transbordadores de datos debería ser el hombre. Pero esta conclusión es errónea. Existen transportes de datos en que el hombre no aparece ni al inicio ni al final. Un ejemplo lo constituyen los mecanismos de regulación. Para la regulación de la temperatura de la casa, por ejemplo, existe, en una de las piezas, un sensor de temperatura, la fuente de datos. Este artefacto informa a la caldera si tiene que quemar más o menos combustible.

La válvula que regula la inyección del petróleo es, entonces, el receptor de datos. El portador de datos sería, en este caso, la electricidad.

Si al final de la cadena de transbordadores de datos se ubica un ser humano o, mejor dicho, sus ojos o su oído, utilizamos, por lo general y en vez del concepto datos, palabras como “información”, “noticias”, “texto”, “música”, “imágenes”, “ruido”, etc. Sin embargo, para el proceso de transmisión propiamente tal carece de importancia quién sea el receptor y cuál sea el significado que puedan tener para él los datos transportados. Utilizaremos, por lo tanto, en todos los casos la palabra “datos”.

Dijimos que “luz, electricidad, sonido y ondas de radio pueden ser usados como portadores de datos” y no que “luz, ..., etc. son portadores de datos”. Sólo el uso que damos a estas magnitudes o sustancias determinará su designación como portador de datos o de energía.

De esta manera, designaremos a la luz que incide en un colector solar como portador de energía, igualmente a la luz del laser que se utiliza para efectuar una finísima perforación. En cambio, la luz que fluye a través de un conductor de luz y que es utilizada



2.6. Transmisión de datos en que los datos son transbordados cinco veces

para la transmisión de un programa de televisión hará el papel de un portador de datos. También en este segundo caso, la luz, naturalmente, transporta energía, pero este fenómeno no tiene importancia en esta aplicación.

Algo similar ocurre con la electricidad. La electricidad que llega a la casa a través del cable de la figura 2.1 (mejor dicho: fluye a través de la casa) sirve para el transporte de energía: hace el papel de un transportador de energía. La función técnica del cable telefónico y de la antena de la figura 2.2. es, sin embargo, la de un portador de datos.

Otro ejemplo lo constituyen las microondas. En el horno de microondas se las utiliza como portador de energía, en el radar, en cambio, como portador de datos.

La onda de expansión que hace volar las piedras en una detonación es un ejemplo de onda de sonido utilizada como portadora de energía, pero estamos más acostumbrados a considerar el sonido como portador de datos.

Incluso el diario que compramos como portador de datos, termina, muchas veces, siendo portador de energía, es decir, un combustible para prender fuego.

¿Por qué utilizamos tantos portadores de datos diferentes? Mientras que el hombre sirva de fuente o de receptor de datos, esta pregunta carece de mucho sentido, porque el ser humano recurre, fundamentalmente, al sonido y a la luz como portadores de datos naturales. Distinto es el caso en el transporte de datos esencialmente técnicos, es decir, cuando tanto fuente como receptor de datos son aparatos. En estas situaciones, podemos escoger, realmente, entre varias opciones. Los diferentes portadores de datos se diferencian a través de varias propiedades, y, para una determinada aplicación práctica, uno de ellos será el más indicado, mientras que, en otro caso, otro portador representará la opción óptima. De un sistema de transmisión eficiente esperamos, esencialmente, que los datos lleguen en el tiempo más breve posible desde la fuente al receptor.

En tiempos remotos, la utilización de mensajeros garantizaba la transmisión más rápida posible de los datos. Durante una cierta época, entre los años 1800 y 1850, aproximadamente, se utilizaban los telégra-

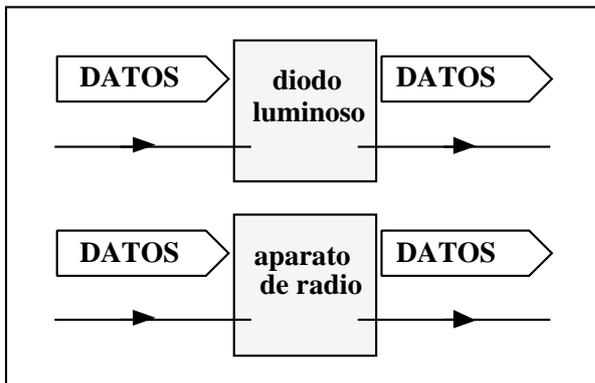
fos ópticos. Entre dos ciudades y a distancia de unos 10 kilómetros, se ubicaban estaciones telegráficas con una señal en forma de bandera en el techo. De acuerdo a un sistema especialmente elaborado, se podían representar las diferentes letras del alfabeto que, a su vez, podían ser “leídas” desde la estación vecina mediante un telescopio. Después se transmitían de la misma forma a la próxima estación. Con tiempo atmosférico bueno, se podían transmitir noticias desde Berlín a Koblenz en sólo 15 minutos, es decir, muchísimo más rápido que con un mensajero.

Desde la invención de la telegrafía (con hilos) y, más tarde, de la telegrafía inalámbrica, la transmisión es aún mucho más rápida, ya que viaja a la velocidad de la luz, es decir, 300 000 km/s. Con esto, el tiempo requerido para la transmisión de una noticia se ha hecho despreciable, por lo menos para dimensiones terrestres. Los datos enviados por la sonda espacial voyager 2, que investigaba de cerca el planeta Urano, también viajaban con la velocidad de la luz, pero se demoraban casi 3 horas.

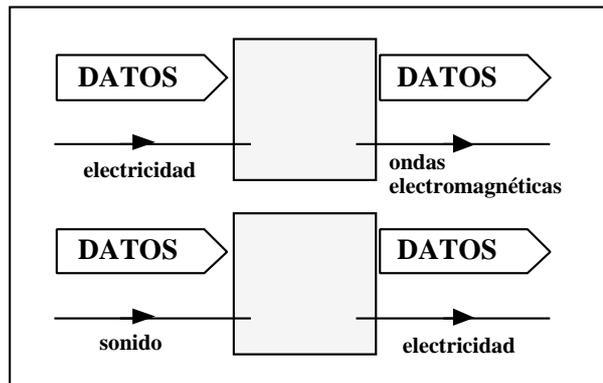
Otro criterio importante en la elección del portador de datos más apropiado es la facilidad con que puede ser perturbada la transmisión. El telégrafo óptico no funciona con neblina y también la recepción de las señales de radio y televisión a través de ondas electromagnéticas puede ser perturbada fácilmente, por ejemplo, durante las tempestades eléctricas. La transmisión mediante cables de cobre (portador electricidad) y conductores de luz (portador luz) es mucho más resistente a las diferentes posibilidades de perturbación. El criterio más importante en la elección del portador de datos lo constituye, seguramente, la cantidad de datos transmisibles en cada segundo. De esta manera, el número de conversaciones telefónicas que se pueden transmitir con un conductor de luz es mucho mayor que si se usa un tradicional cable de cobre. Volveremos a este punto posteriormente, después de haber conocido una medida para la cantidad de datos.

Ejercicios

1. Dibuja tres diagramas de flujo de datos con fuente y receptor correspondiente. (Busca ejemplos diferentes a los de la fig. 2.4).
2. Indica tres artefactos diferentes que entreguen datos usando el portador sonido.



2.7. ¿Cuáles son los portadores de datos de entrada y de salida?



2.8. ¿Cuáles son los transbordadores de datos respectivos?

3. Indica tres artefactos diferentes que reciban datos usando el portador luz.
4. Los televisores utilizan un control remoto. ¿Cuál es el portador que transmite los datos entre el control y el televisor?
5. En la figura 2.7 se han omitido los nombres de los portadores de datos en las entradas y salidas de los transbordadores. Completa el esquema.
6. En la figura 2.8 debes indicar los nombres de los transbordadores de datos respectivos.
7. Dibuja una cadena de transbordadores en que participen por lo menos 4 transbordadores de datos diferentes. (Busca un ejemplo distinto al de la figura 2.6).

2.2 La cantidad de datos

A conversa con B y C con D. A y B hablan rápidamente, C y D lentamente. Por lo tanto, y en el mismo intervalo de tiempo, entre A y B se intercambian más datos que entre C y D.

Esta afirmación la podemos hacer, a pesar de que A y B estén hablando de cosas totalmente diferentes que C y D. No estamos comparando el significado de lo hablado, sino únicamente la cantidad, es decir, la *cantidad de datos* intercambiada. En el caso mencionado, esta comparación es muy fácil de hacer, pero, en otras situaciones, el problema es bastante difícil de resolver:

- Un telegrama de una página de extensión, ¿contiene más o menos datos que una conversación telefónica que dura un minuto?
- ¿Es mayor o menor la cantidad de datos que imprime una computadora determinada durante una hora que la que se transmite en una conversación telefónica en un mismo lapso?

Para poder contestar estas preguntas, debemos ser capaces de medir la cantidad de datos. A continuación conoceremos una unidad de medición para la cantidad de datos. Esta magnitud nueva *cantidad de datos* se expresa mediante el símbolo H y su unidad de medición es el bit.

Por medio de esta magnitud, podremos indicar, por ejemplo, cuántos bit son transmitidos cuando conversamos por teléfono durante un minuto, miramos televisión durante una hora o producimos señales de humo durante cinco minutos.

Veremos más tarde que esta medida también tiene un gran significado práctico: transmitir y acumular datos es costoso y el precio correspondiente siempre depende de la cantidad de datos involucrados, es decir, del número de bit.

Para comprender, cabalmente, el significado de 1 bit, consideremos un ejemplo muy sencillo de transmisión de datos. Luis y Lola están planificando un paseo en bicicleta para el próximo domingo. Necesitan, sin embargo, la autorización de sus padres. Luis ya la tiene, pero los papás de Lola recién llegan el sábado en la noche y a esa hora, Lola ya no podrá

salir de su casa. Además, sus papás no tienen teléfono. ¿Cómo podrá informar a Luis el mismo sábado en la noche si tiene permiso o no?

Los niños tienen una buena idea. Sus casas están a unos 300 metros de distancia y ellos pueden ver, mutuamente, las ventanas de sus piezas. Por lo tanto, quedan de acuerdo en comunicarse mediante una linterna que tiene luz verde y roja. A las 22.00 horas en punto, Lola enviará una señal verde para indicar que sí tiene permiso o una señal roja en el caso contrario.

Este sistema de comunicación resulta bastante bien, y Luis y Lola vuelven a utilizarlo en otras oportunidades. El domingo siguiente en la tarde, por ejemplo, Luis informa a Lola acerca del resultado de una importante final de tenis, transmitida por televisión, pero que a Lola no la dejan ver.

De esta manera, Luis y Lola siguen comunicándose los más diversos asuntos y, en un momento dado, Manolito, quien vive en otra casa, se da cuenta de esta transmisión de noticias entre Luis y Lola. Pero, ¿qué puede decir Manolito al respecto? Evidentemente, no puede decir nada acerca del contenido de las noticias transmitidas, pero sí puede afirmar que cada transmisión permite la elección entre dos noticias posibles, ya que son dos los símbolos utilizados.

La cantidad de datos transmitida en cada comunicación entre Luis y Lola es siempre la misma y su valor es de 1 bit.

Podemos describir esta situación de otra manera: entre la fuente y el receptor de datos se acuerda una pregunta que sólo permite las respuestas “sí” o “no”. Por ejemplo:

“¿Tienes permiso para hacer el paseo en bicicleta?”
 “¿Ganó Boris Becker la final?”

Estas preguntas las podemos llamar *preguntas sí o no*. Resumimos:

1 bit es la cantidad de datos transmitida con la respuesta a una pregunta sí o no.

Evidentemente, el tipo de señales usadas al responder la pregunta no tiene ninguna importancia. Podemos usar, simplemente, las palabras “sí” y “no”. De la misma manera, se puede usar una señal luminosa verde y roja, una azul y blanca o una larga y corta. La información también puede transmitirse eléctricamente, mediante una línea de dos conductores y usando las señales “corriente conectada” y “corriente desconectada”.

Es absolutamente fundamental que tengamos claro que la cantidad de datos no tiene ninguna relación con el contenido de la pregunta sí o no. Si la pregunta es de vital importancia o se refiere a una pura tontería, la respuesta siempre transmitirá 1 bit.

Volvamos ahora a Luis y Lola. La transmisión de datos entre los dos niños se hace cada vez más intensa y, finalmente, resulta que Luis tiene que contestar

varias preguntas sí o no en una misma tarde. Los dos quedan de acuerdo, entonces, que la señal luminosa correspondiente a la primera pregunta será enviada a las 22.00 horas, la segunda a las 22.05 h y la tercera a las 22.10 h. Ya que mediante cada señal se transmite 1 bit, el total de toda la tarde será de 3 bit. Ahora veremos de qué manera podemos transmitir varios bit utilizando una sola señal.

No podemos interpretar cada noticia como respuesta a una sola pregunta sí o no. Al contrario, la mayoría de las preguntas admite más de dos respuestas. Luis y Lola también tienen que hacer esta experiencia.

Durante dos días seguidos, se transmite por televisión una interesante novela policial. Después de la primera parte, queda claro que una de las siguientes cuatro personas ha cometido un asesinato:

- la empleada;
- el cartero;
- la hermana de la persona asesinada;
- el marido de la víctima.

Luis y Lola están muy interesados en saber quién es el verdadero culpable, pero Lola recibe la noticia que, a la tarde siguiente, tendrán la visita de una tía y no podrá ver televisión. De alguna manera, Luis tendrá que transmitirle el desenlace de la historia.

Pero ahora surge un gran problema, ya que la pregunta “¿quién es el asesino?” admite no solamente dos sino cuatro respuestas. La solución se encuentra rápidamente y Luis propone lo siguiente: se conseguirá un papel transparente de color azul, de manera que dispondrá de señales luminosas de 4 colores, rojo, verde, azul y blanco. Ahora acuerdan la siguiente correlación:

Empleada: verde
 Cartero: rojo
 Hermana: blanco
 Marido: azul

Este tipo de correlación se llama *código*. El sistema de Luis funciona sin problemas, pero Lola tiene una idea diferente: “Dos colores son suficientes, pero tienes que transmitirme dos señales sucesivas. Con la primera, me indicas si es hombre o mujer y con la segunda si el asesino es pariente de la víctima o no.” El código de Lola es el siguiente:

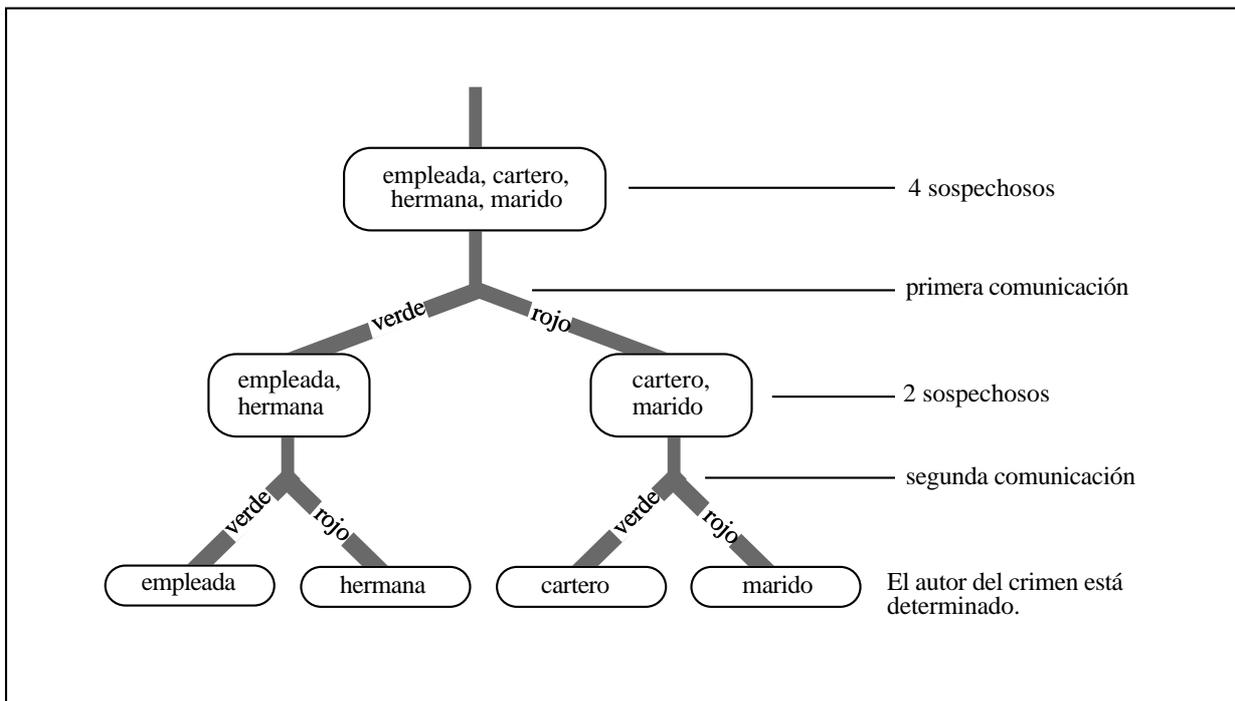
Empleada: verde - verde
 Cartero: rojo - verde
 Hermana: verde - rojo
 Marido: rojo - rojo

Este tipo de código que utiliza sólo dos símbolos diferentes, se llama *código binario*.

Luis y Lola acaban de descubrir un teorema importante de la técnica de transmisión de datos. A continuación expresaremos este teorema en su forma general, pero antes hagamos una representación gráfica del método usado, dibujando un llamado “árbol de decisiones”, figura 2.9.

La pregunta “¿quién es el asesino?” que tiene 4 respuestas posibles se reduce a dos preguntas con 2 respuestas cada una, es decir a dos preguntas sí o no. Cada respuesta a una de las dos preguntas sí o no corresponde a 1 bit. La cantidad total de datos transmitidos equivale, por lo tanto, a $H = 2$ bit.

Sin embargo, acabamos de constatar que la información sobre la persona culpable también puede ser transmitida con una sola señal, siempre que dispongamos, en vez de 2, de 4 señales luminosas diferentes. Podemos concluir entonces:



2.9. El “árbol de decisiones” muestra que la pregunta por el asesino puede ser reducida a dos preguntas sí o no.

Una fuente que dispone de 4 símbolos diferentes, transmite al receptor con cada señal la cantidad de datos $H = 2$ bit.

El conjunto de señales diferentes de que dispone la fuente para transmitir los datos, se llama *reserva de símbolos*, y su cantidad es el *número de símbolos*.

Hasta aquí, nuestras reflexiones nos indican que el número de bit transmitidos con cada señal depende del número de símbolos que posee la fuente. Si el número de símbolos es 2, con cada señal se transmite 1 bit. Si el número de símbolos es 4, tenemos 2 bit por cada señal.

Ya no es difícil averiguar cuántos bit por señal son transmitidos si la reserva de símbolos es aún mayor, es decir, si utilizamos en la transmisión más símbolos diferentes: hacemos una codificación binaria, o sea descomponemos la transmisión en preguntas sí o no sucesivas.

La figura 2.10 nos indica la manera de transmitir una respuesta determinada entre 8 respuestas posibles mediante 3 respuestas a preguntas sí o no. Existen 8 secuencias posibles de señales verdes o rojas y a cada respuesta le corresponde una secuencia determinada. En total, se transmiten, entonces, 3 bit.

Si disponemos de 8 símbolos diferentes, los 3 bit pueden ser transmitidos también mediante una única señal. Ahora podemos generalizar esta regla: si la fuente dispone de 16 símbolos, cada señal transmitirá 4 bit; si el número de símbolos es 32, tenemos 5 bit por señal, etc.

Si el número de símbolos es 2^n , se transmiten n bit por cada señal.

Si el número de símbolos corresponde a una potencia de 2, podemos indicar fácilmente cuántos bit por señal se transmiten. Sin embargo, el número de bit por señal también puede calcularse para los casos en que el número de símbolos no sea potencia de 2, pero necesitamos un método matemático que estudiarás más adelante. Por el momento, nos conformaremos con una aproximación.

Sea el número de símbolos 25. Este número se sitúa entre las potencias de $16 = 2^4$ y $32 = 2^5$. En este caso, se transmitirán, por lo tanto, entre 4 y 5 bit.

Tabla 2.3

número de símbolos	bit/símbolo	número de símbolos	bit/símbolo
2	1	4 096	12
4	2	8 192	13
8	3	16 384	14
16	4	32 768	15
32	5	65 536	16
64	6	131 072	17
128	7	262 144	18
256	8	524 288	19
512	9	1 048 576	20
1 024	10	2 097 152	21
2 048	11	4 194 304	22

La tabla 2.3 nos permite obtener el número de bit por señal aproximado para cada número de símbolos. Esta tabla la podemos confeccionar fácilmente usando la calculadora.

De una potencia de 2 determinada, se puede obtener la superior inmediata a través de una multiplicación por dos. En efecto

$$2 \cdot 2^3 = 2^4 \text{ o sea}$$

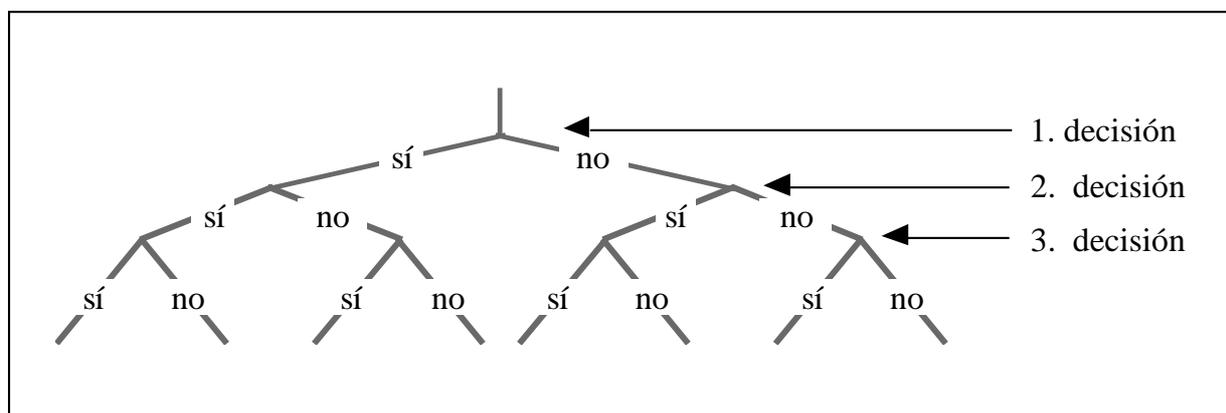
$$2 \cdot 8 = 16.$$

De la misma manera, se obtiene la potencia de 2 inmediatamente inferior a través de una división por 2:

$$2^4 : 2 = 2^3 \text{ o sea}$$

$$16 : 2 = 8.$$

Así, también se puede elevar un número a la potencia 0. Cualquier número elevado a 0 es igual a 1 (la única excepción es el 0 mismo, la expresión 0^0 no está definida). Sobre todo, también 2^0 es igual a 1 y, de esta manera, podemos completar la tabla 2.3. Si el número de señales es igual a 1, con cada señal se transmiten 0 bit. ¿Nos sorprende esta afirmación? En realidad no. Si Luis y Lola quedan de acuerdo en que Luis envíe, hoy a las 22.00 horas, un determinado símbolo, Lola, al recibirlo, no obtendrá ninguna información especial.



2.10. Árbol de decisiones para tres preguntas sí o no sucesivas

Pero, ¿cómo será en el caso siguiente? Luis se compromete a enviarle a Lola, a las 22.00 horas, una señal luminosa blanca en el caso de que su equipo preferido haya ganado un importante partido de futbol. Si no gana, no enviará ninguna señal. En este caso se transmite, claramente, una noticia determinada pero, aparentemente, se utiliza un solo símbolo. Sin embargo son, en realidad, dos símbolos, ya que, a las 22.00 horas, la linterna puede estar prendida o apagada. Los símbolos son, entonces, “luz” y “oscuridad”.

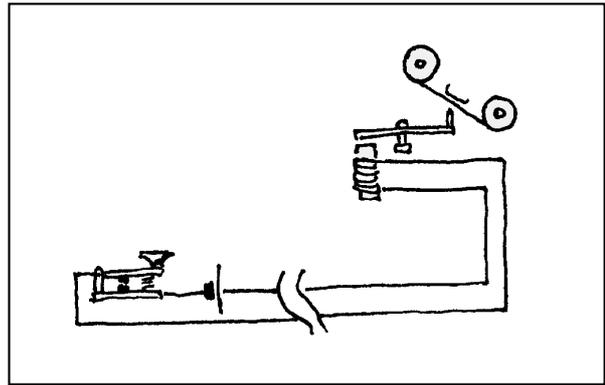
Una situación similar existe en los casos de la campanilla del colegio, el timbre de la casa, la bocina, la sirena, la luz de advertencia en un paso de la línea de ferrocarril sin barrera, etc. En todos estos casos existen dos símbolos, por ejemplo “campanilla suena” y “campanilla no suena” o “luz de advertencia prendida” o “luz apagada”.

Transbordar datos y cambiar la codificación de los datos son procesos muy parecidos y su diferenciación es bastante subjetiva. Consideremos, una vez más, los dos códigos de Luis y Lola. Las noticias que llegan con la codificación usada por Luis, es decir, con luces de 4 colores diferentes, las podemos transcribir sin problema al código de Lola, con luces de dos colores. Este proceso de cambio de codificación se representa gráficamente de la misma manera que un transbordador de datos, figura 2.11.

2.3 Ejemplos de transmisión de datos

El código Morse

La figura 2.12 muestra de qué manera se transmitieron los telegramas en los tiempos pasados. Fuente y receptor forman, en esta instalación, parte de un circuito eléctrico y están unidos mediante dos cables. La fuente es, simplemente, un interruptor con el cual se puede cerrar el circuito eléctrico. Al conectarse la corriente, el electroimán del receptor presiona una punta de lapiz contra una cinta de papel que va pasando. Para la transmisión de los datos se usaba el código Morse, figura 2.13. Este código utiliza 4 señales: “punto” (= se cierra el circuito durante un tiempo corto), “raya” (= el circuito se cierra durante un tiempo más prolongado), “pausa corta” (dentro

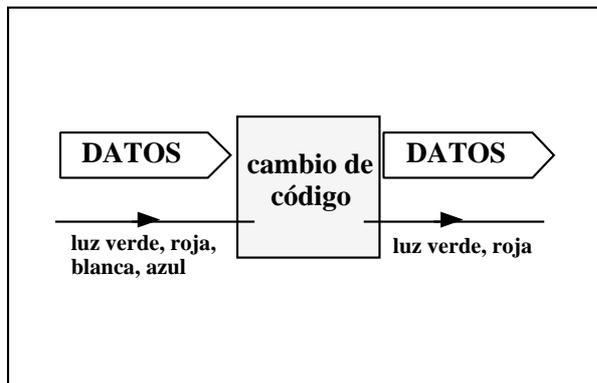


2.12. Transmisión de Morse

de la transmisión de una misma letra) y “pausa larga” (entre dos letras). Con estas 4 señales se transmiten, entonces, 2 bit por cada señal. Actualmente, se sigue usando el código Morse en la navegación y entre los radioaficionados.

La escritura

La escritura es uno de los métodos más importantes usados para acumular y transmitir datos. ¿Cuántos bit contiene cada signo? Tenemos que determinar, en primer término, el número total de signos usados: letras mayúsculas y minúsculas, cifras, signos de puntuación y de cálculo y otros signos especiales. El espacio entre dos letras también representa, evidentemente, un signo. Suponemos que sólo se pueden usar los signos representados en las teclas de una máquina de escribir. Una máquina de escribir típica tiene unas 45 teclas. Con cada tecla se pueden generar dos signos diferentes, según se utilice o no la tecla de cambio. En las teclas correspondientes a las letras serían las mayúsculas y minúsculas. En total, la máquina de escribir puede generar, entonces, unos 90 signos, es decir entre 2^6 y 2^7 signos. Cada signo lleva, por lo tanto, un poco menos de 7 bit. En muchas aplicaciones modernas de la técnica de procesamiento de datos, los datos se codifican en forma binaria. La computadora trabaja con signos binarios y también las calculadoras, el compactdisc y la red de telex. Los datos entregados a estos sistemas tienen que ser codificados, entonces, en forma binaria.



2.11. El cambio de codificación se representa, gráficamente, igual que un transbordador de datos.

a .-	l .-.-	w -.-.-	:
b -.-	m -.-	x -.-.-	1 -.-.-.-
c -.-.-	n -	y -.-.-	2 -.-.-.-
d -.-	o -.-.-	z -.-.-	3 -.-.-.-
e -	p -.-.-	ä -.-.-	4 -.-.-.-
f -.-.-	q -.-.-	ö -.-.-	5 -.-.-.-
g -.-	r -	ü -.-.-	6 -
h -.-.-	s -.-	ch -.-.-	7 -.-.-.-
i -.-	t -	punto -.-.-.-	8 -.-.-.-
j -.-.-	u -.-	coma -.-.-.-	9 -.-.-.-
k -.-	v -.-.-	? -.-.-.-	0 -.-.-.-

2.13. El código Morse

El computador recibe, generalmente, sus datos a través de un teclado. Si cada tecla lleva unos 7 bit, se necesitan, para su codificación, 7 signos binarios. En este caso se habla de un código de 7 bit.

Imágenes

La computadora genera una imagen en la pantalla del monitor. ¿Qué cantidad de datos envía, en este caso, el computador al monitor? En las computadoras personales, la imagen consta, generalmente, de $512 \cdot 384 = 196\,608$ puntos luminosos, los llamados "pixel". Suponiendo que el monitor sea blanco y negro, cada punto puede ser o blanco o negro. Para cada pixel la computadora tiene que enviar, entonces, 1 bit, y para todos los puntos juntos 196 608 bit. Sin embargo, muchas computadoras pueden generar, en el monitor, una imagen de color, en que cada punto luminoso puede aparecer en 256 colores diferentes. Como $256 = 2^8$, la computadora tiene que transmitir, para cada punto, 8 bit y, en total,

$$8 \cdot 196\,608 \text{ bit} = 1\,572\,864 \text{ bit.}$$

En el caso del televisor la cantidad de datos de una imagen es aún más grande: cada punto puede aparecer en unas 2000 tonalidades de color y de luminosidad diferentes. Para generar un único punto luminoso, se requieren, por lo tanto, 11 bit. La imagen del televisor se compone de unos 360 000 puntos; para formar una imagen, la estación transmisora tiene que generar, entonces,

$$360\,000 \cdot 11 \text{ bit} \approx 4 \text{ Mbit.}$$

La cantidad de datos de una imagen de televisión es de unos 4 Mbit.

Las llaves como portadoras de datos

Una llave puede ser interpretada como un portador de datos. El mensaje que lleva, corresponde a la información de cómo se puede abrir una cerradura determinada. Para cualquier ladrón, obtener la misma llave es tan valioso como descubrir de qué manera se han labrado sus perfiles.

Las llaves más corrientes de las casas tienen un número determinado de formas diferentes. Mirándola del lado, se puede ver que la llave tiene 5 muescas de profundidad variable. Para cada una de estas muescas, existen 16 grados de profundidad diferentes. Por lo tanto, cada muesca tiene 4 bit, las 5 muescas juntas, entonces, $5 \cdot 4 = 20$ bit. Además, las llaves tienen también diferentes perfiles en dirección longitudinal. Podemos verlos si observamos la llave en dirección longitudinal desde adelante. Existen unos 500 tipos de perfiles longitudinales diferentes, lo que aporta otros 9 bit. Junto con las muescas, toda la llave tiene, entonces, 29 bit. En tiempos pasados, las llaves eran mucho más sencillas: tenían menos bit. Mientras más bit tenga una llave, más seguridad nos da. En algunos tipos de cerraduras, ya ni se utilizan las llaves: son las cerraduras de seguridad en base a un código de cifras. Para poder abrir la cerradura,

es preciso conocer la correcta combinación de cifras. Este número contiene una determinada cantidad de datos. En una cerradura de bicicleta con 3 cifras (de 0 a 9 en cada caso), el número de señales es de 1000. Al contarle a alguien cómo abrir la cerradura, le estamos transmitiendo una cantidad de datos de 10 bit. Otro tipo de cerradura se utiliza en algunos estacionamientos. La barrera de entrada se abre mediante una "llave magnética". El que quiera entrar al estacionamiento, necesita una tarjeta con una cinta magnética. Los datos con que la barrera recibe la orden de abrirse se acumulan de la misma manera que la música en una cinta magnetofónica.

La cantidad de datos de una medición

Al efectuar una medición, recibimos información o datos acerca del objeto que estamos midiendo.

Si una balanza tiene un límite de medición de 5 kg y la pesa más pequeña disponible es de 1 g, a la pregunta "¿cuál es el peso del objeto?", la pesa puede dar 5000 respuestas diferentes. El número de señales es, entonces, de 5000 y la cantidad de datos transmitida con cada respuesta corresponde a unos 12 bit. Una pesa de análisis más moderna nos entrega hasta 20 bit por pesada.

Para calcular la cantidad de datos obtenidos en la lectura de un termómetro clínico, tenemos que conocer, en primer término, su exactitud. La escala del termómetro clínico tiene, generalmente, una exactitud de $1/10$ °C. Si el campo de medición se ubica entre los 35 y los 42 °C, disponemos de 70 señales diferentes. Al medir la temperatura, obtenemos, entonces, unos 6 bit.

Ejercicios

1. En Alemania existen, en total, unos 20 000 códigos postales diferentes. ¿Cuál es la cantidad de datos que lleva cada código?
2. Para conocer la cantidad de datos que lleva un número de teléfono determinado, tenemos que saber si el número corresponde a una red local, nacional o internacional. Indica la cantidad aproximada de datos correspondiente a cada número en una red local que comprende 10 000 conexiones.
3. La escritura china utiliza un gran número de signos diferentes, generalmente son unos 2000. En este caso, ¿cuántos bit tiene cada signo?
4. Una fuente transmite, con cada señal, 5 bit. ¿Cuál es el número de símbolos correspondiente?
5. Una fuente tiene un número de símbolos igual a 3. Dibuja, para ella, el árbol de decisiones (debe comprender 3 decisiones sucesivas). Indica, aproximadamente, la cantidad de datos que obtiene el receptor a través de 3 señales sucesivas provenientes de esta fuente.
6. La fuente A tiene un número de símbolos que equivale, exactamente, a una potencia de 2. El número de símbolos de la fuente B es el doble de A. ¿Qué puedes decir, entonces, con respecto a la cantidad de datos que transmiten las dos fuentes?

7. Un truco de magia con cartas de juego.

Usamos 16 cartas diferentes de un juego cualquiera. El mago invita a uno de los espectadores a que saque una carta cualquiera. El espectador la mira sin que la pueda ver el mago. Se devuelve la carta y el mago las baraja. Ahora, el mago descubre todas las cartas, una tras otra, colocándolas en 4 montoncitos diferentes: una carta en el primero, la próxima en el segundo, una en el tercero, una en el cuarto y, nuevamente, una en el primero, etc., hasta terminar con las 16 cartas. El espectador tiene que decir, ahora, en cuál de los 4 montoncitos se ubica su carta. Después, el mago vuelve a juntar las cartas y las distribuye otra vez en 4 montoncitos, y el espectador tiene que volver a decir, en cuál se ubica su carta. Ahora, el mago conoce la carta elegida por el espectador. Vuelve a juntar todas las cartas y las va depositando, una por una, hasta llegar a la carta sacada por el espectador.

¿Qué cantidad de datos debe recibir el mago para poder identificar una de las 16 cartas? ¿Cuántos bit recibe cada vez que el espectador indica el montoncito en que se ubica la carta? ¿Cómo funciona el truco?

2.4 La intensidad del flujo de datos

Siempre cuando exista algún flujo – de agua, autos, seres humanos, energía, electricidad o cualquier otra cosa, objeto o magnitud física – podemos preguntar por la intensidad del flujo correspondiente. Ya sabemos que la intensidad de un flujo se obtiene dividiendo la cantidad que fluye en un momento dado y en un lugar determinado por el tiempo empleado. Podemos definir, entonces, la *intensidad del flujo de datos* en algún lugar del canal de transmisión, como el cociente entre la cantidad de datos que pasan en este lugar en un intervalo determinado y el tiempo requerido para pasar:

Intensidad del flujo de datos = cantidad de datos / tiempo

En símbolos:

$$I_H = \frac{H}{t}$$

La medida de la intensidad del flujo de datos I_H es el bit/segundo. Mientras mayor sea la cantidad de bit transmitida en cada segundo, mayor será también la intensidad del flujo de datos.

La intensidad del flujo de datos constituye una magnitud de gran utilidad. Permite comparar, por ejemplo, la eficiencia de diferentes canales de transmisión de datos. Veamos algunos ejemplos de flujos de datos.

Télex, teléfono y radio

El télex transmite unos 35 bit/s; el teléfono, en cambio, bastante más: unos 50 kbit/s. Podemos entender fácilmente porqué el flujo de datos por el teléfono es mucho mayor que en el télex. Sin considerar que, a través del teléfono, el mensaje puede ser transmitido con mayor rapidez, este medio de comunicación también les permite a los dos interlocu-

tores el intercambio de una mayor cantidad de información. Las personas se reconocen, mutuamente, por su voz, pueden hablar alto o bajo, pueden, incluso, cantar y pueden insinuar muchas cosas sin expresarlas explícitamente, cambiando el tono de la voz, la velocidad de la conversación, la utilización de intervalos, etc. Con un télex, todas estas cosas no son posibles.

Usando el teléfono, la calidad acústica de los datos transmitidos no es muy alta. Para mejorar este aspecto, debemos utilizar un flujo de datos de mayor intensidad. Por esta razón, la intensidad del flujo de datos logrado a través de una transmisión de radio FM, es aun mayor que la del teléfono. Es de 100 kbit/s, aproximadamente.

Televisión

Anteriormente (en el párrafo 2.3), calculamos la cantidad de datos correspondiente a una única imagen, sin movimiento, de televisión. El resultado era de $H = 4$ Mbit. En una transmisión de televisión se transmiten 25 imágenes en cada segundo. De esta manera, se genera la impresión de un movimiento continuo de los objetos en la pantalla. La intensidad del flujo de datos que fluye de la estación emisora al receptor de televisión será, entonces, igual a

$$4 \text{ Mbit/imagen} \cdot 25 \text{ imágenes/s} = 100 \text{ Mbit/s}$$

Retengamos, por lo tanto:

En la percepción óptica utilizamos un flujo de datos con una intensidad de unos 100 Mbit/s, en la percepción acústica, de unos 100 kbit/s.

La sonda espacial Voyager 2

Después de un viaje de 9 años y de haber recorrido unos 9000 millones de km, la sonda espacial Voyager 2 alcanzó, el 24 de Enero de 1986, el planeta Urano. La cámara de televisión a bordo del Voyager 2 captó unas 6000 imágenes de Urano. Estas imágenes se transmitieron a la tierra mediante ondas electromagnéticas, que también se utilizan en la televisión común. La intensidad del flujo de datos era de sólo 20 kbit/s. Calculemos ahora cuánto duró la emisión de todos los datos por parte del Voyager 2.

De

$$I_H = H/t$$

deducimos que

$$t = H/I_H.$$

Cada imagen tiene unos 4 Mbit. Para las 6000 imágenes, tenemos, entonces:

$$H = 6000 \cdot 4 \text{ Mbit} = 24\,000 \text{ Mbit} = 24\,000\,000 \text{ kbit}$$

Con $I_H = 20$ kbit/s, tenemos

$$t = (24\,000\,000/20) \text{ s} = 1\,200\,000 \text{ s} \approx 14 \text{ días.}$$

Para transmitir todos sus datos, Voyager 2 ocupó, entonces, unas dos semanas. El tiempo del recorrido de los datos desde Urano hasta la tierra es de, aproximadamente, 3 horas.

Redes de datos

En la transmisión de datos participan, a veces, más de dos interlocutores: el canal de transmisión de datos se ramifica. Decimos que los canales de transmisión forman una red. Tales redes las constituyen, por ejemplo, la radiotelefonía, televisión, teléfono y el internet. Distinguimos entre dos tipos de redes. En el primero de los casos, el transmisor entrega datos (información, imágenes), que pueden ser recibidos por un gran número de participantes. En el sentido contrario, desde los participantes al transmisor, no se transmiten datos. Este tipo de *redes de distribución* lo constituyen la radiotelefonía, la televisión, el sistema de altoparlantes del Colegio y también los diarios. En una llamada *red de intercomunicación*, cada uno de los participantes puede transmitir datos a cada uno de los demás. Aquí tenemos las redes de teléfono y el internet, pero también el correo común y corriente.

La red telefónica

La figura 2.14 muestra, en forma esquemática y muy simplificada, una red telefónica. Cada participante puede conectarse con cada uno de los demás. Según donde se encuentre la persona a la que se está llamando, se utiliza la comunicación local o de larga distancia. En el caso de distancias muy largas, se utiliza la comunicación por satélite. Cuando dos personas A y B están conversando, los datos son transmitidos de A a B y de B a A. Para establecer la comunicación, una de las dos personas tiene que marcar un número. En esta selección, la persona que está llamando envía un flujo de datos hasta la central de intercomunicación, para informarle con quién desea establecer contacto. Sin embargo, la cantidad de datos que fluye en este momento es mucho menor que la que se transmite durante la conversación.

Telefax y Btx

Inicialmente, la red telefónica estaba concebida para facilitar la conversación entre dos personas, es decir, para la transmisión de datos acústicos.

En la actualidad, aún no existe una red de comunicación para imágenes movidas, o sea un “teléfono visual”. Pero ya se encuentra en la etapa de planificación. En este caso, el flujo de datos tiene que ser unas 1000 veces mayor que para la información acústica. Sin embargo, ya existe la posibilidad de transmitir imágenes en blanco y negro a través de la red telefónica común, el llamado *fax*. Los dos participantes necesitan disponer, aparte del teléfono, de un aparato adicional. La persona A ingresa en el suyo una copia de la imagen que quiere transmitir, y el aparato

que posee B, reproduce esta misma imagen. En el lado de A, la imagen se descompone en 1 000 000 puntos. Cada punto puede ser blanco o negro y lleva, por lo tanto, exactamente 1 bit. La imagen completa tiene, entonces, 1 Mbit. La transmisión de una página de esta “copia a distancia” demora unos segundos. Naturalmente, no se pueden transmitir, de esta manera, imágenes en movimiento; para poder hacerlo, deberíamos ser capaces de transmitir unas 25 imágenes por segundo.

Otra ampliación de la red telefónica, en que no se utiliza datos acústicos, la constituye el Btx o Minitel. En este caso, el participante necesita disponer, fuera de su conexión telefónica, de una pantalla de televisión y un teclado. De esta manera puede recibir, en su propia pantalla, imágenes y textos y, utilizando su teclado, enviarlos a otras personas. Así puede pedir informaciones de diferente tipo: noticias deportivas, números de teléfono e itinerarios de trenes. Pero también puede iniciar, a su vez, algunos procesos, tales como pedir mercaderías en una tienda con despacho a distancia o transferir dinero en un banco. A diferencia del teléfono y del fax, en el sistema Btx, la computadora actúa como interlocutor.

Ejercicios

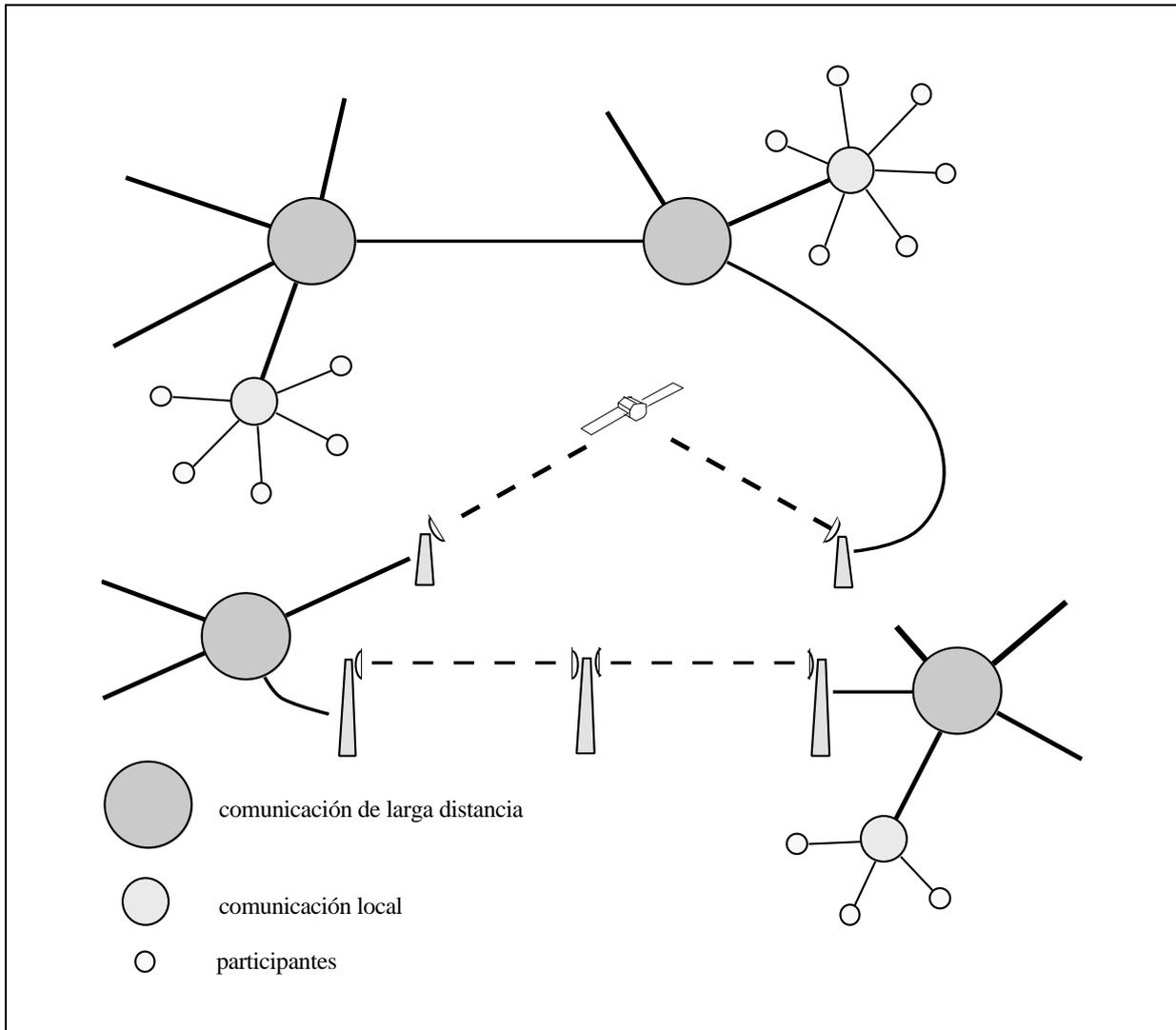
1. Cada signo que se imprime mediante una máquina de escribir, lleva unos 7 bit. ¿Cuál es la intensidad del flujo de datos entre teclado e impresora, si tipeamos 180 letras por minuto?
2. Utilizando el sistema teletex, se pueden transmitir textos escritos a máquina. En este caso, la intensidad del flujo de datos es de 2400 bit/s. ¿Cuánto duraría la recepción del texto contenido en una hoja DIN A4 ? (40 líneas por página, 70 signos por línea, 7 bit por cada signo).

2.5 Acumuladores de datos

Muchas veces necesitamos guardar imágenes, textos, trozos de música o números. En principio, el problema fundamental es siempre el mismo: Tenemos que acumular datos. Para poder realizar esta tarea, disponemos de muchas opciones diferentes, existen muchos tipos diferentes de *acumuladores de datos*, tabla 2.4.

El proceso de llenado del acumulador también se conoce como “grabación” y el de obtención de los datos es la “reproducción”. Muchas veces también se habla, simplemente, de “escribir” y de “leer”. Para la grabación y reproducción, es decir para escribir y leer, se necesitan, muchas veces, aparatos especiales. En ciertos casos, el proceso de grabación y reproducción puede ser efectuado mediante un mismo aparato, tabla 2.5.

Existen acumuladores de datos que no requieren de un aparato especial de reproducción: los libros, las ilustraciones, etc. Solo necesitamos disponer de una iluminación conveniente.



2.14. Representación simplificada de una red telefónica como ejemplo de una red de intercomunicación

Hay otra clasificación posible para los acumuladores de datos: acumuladores de grabación y reproducción y acumuladores sólo para reproducción o acumuladores de contenido fijo. En el caso de los primeros, el contenido puede ser borrado y el acumulador puede usarse nuevamente. En este grupo están los acumuladores magnéticos (cinta para video y sonido y disquet para computadora), determinados acumuladores electrónicos de la computadora y, por supuesto, el pizarrón. Acumuladores de contenido fijo (en inglés read-only-memory o ROM) pueden cargarse una sola vez. En la mayoría de los casos, este proceso ocurre durante la misma fabricación. Aquí tenemos, por ejemplo, los rollos fotográficos, los discos común y compacto, los CD-ROM, una hoja de papel escrita con tinta imborrable, el libro, el diario, tarjetas y cintas perforadas y los ROM electrónicos de la computadora.

A continuación, determinaremos, en forma aproximada, la cantidad de datos contenida en diferentes tipos de acumuladores de datos.

Acumulador de datos "libro"

Consideremos un libro promedio con 200 páginas y 4000 letras por cada página. Todo el libro contiene, por lo tanto, 800 000 letras. Según el párrafo 2.3, la cantidad de datos que lleva cada letra es de unos 7 bit. Nuestro libro promedio contiene, entonces, $800\,000 \cdot 7 \text{ bit} = 5,6 \text{ Mbit}$.

Acumulador de datos "disco" y "cinta para grabar"

En el párrafo 2.4 vimos que a las noticias acústicas les corresponde la intensidad de flujo de datos de unos 100 kbit/s. Un disco o una cinta de grabar de 1 hora = 3600 s de duración contiene, por lo tanto, $100 \text{ kbit/s} \cdot 3600 \text{ s} = 360 \text{ Mbit}$.

Acumulador de datos "videocasete" y "rollo de película"

En la televisión se transmiten 100 Mbit/s. Un videocasete de 1 hora de duración lleva, entonces,

Tabla 2.4

Cinta magnetofónica y de video
Rollo para máquina fotográfica y filmadora
Diapositiva
Transparencia para retroproyectora
Disco
Disco compacto
CD-ROM
Fotografía de papel
Libro, diario
Libreta de apuntes
Pizarrón
Notas musicales
Cinta perforada para télex
Cinta perforada para organillos y pianos automáticos
Cilindro de una cajita de música
Disquet y cinta magnética para la computadora
Memoria electrónica de la computadora y de la calculadora
Cerebro de animales y seres humanos

$100 \text{ Mbit/s} \cdot 3600 \text{ s} = 360\,000 \text{ Mbit}$. La cantidad de datos acumulada en un rollo de película de 1 hora de duración tendrá la misma dimensión.

Acumulador de datos "cerebro"

Aún no se sabe mucho acerca del funcionamiento del cerebro animal y humano y su capacidad para acumular datos puede expresarse únicamente en forma aproximada. Se supone que el cerebro humano es capaz de acumular una cantidad de datos equivalente a unos 10^{12} bit.

Acumuladores de datos en la computadora

Por un lado, un acumulador de datos en la computadora debe tener una gran capacidad para acumular datos, y, por otro, debería permitir una rápida reproducción de ellos. A veces, estas dos exigencias se contraponen: acumuladores de gran capacidad tienen un tiempo de procesamiento más lento y acumuladores de mayor rapidez tienen menor capacidad. Por esta razón, las computadoras disponen de los dos tipos de acumuladores. El acumulador de trabajo, con un corto tiempo de reproducción, funciona electrónicamente. El acumulador de gran capacidad

o disco duro funciona de manera magnética, tal como la cinta magnetofónica y el videocasete.

La computadora acumula los datos en grupos de 8 bit, llamados Byte. La capacidad de acumulación de datos de una computadora se indica, generalmente, en Byte. El acumulador de trabajo de un PC típico tiene 16 MByte (128 Mbit) y un disket acumula unos 1400 kByte (= 11,2 Mbit).

Los valores para las capacidades de los acumuladores indicados son todos muy aproximados. En el caso del libro, esta afirmación es bastante obvia, pero también en discos y cintas existen grandes diferencias. Un disco compacto lleva más datos que un disco común de igual duración: en el primero, la música se graba en forma más "exacta". Una cinta de alta velocidad, tal como se usa en un estudio de grabación, contiene mayor cantidad de bit que la cinta relativamente lenta de una grabadora común y de igual duración. De la misma manera, la película de 32 mm de ancho usada en el cine lleva más datos que la de 8 mm de una filmadora común usada por el aficionado.

Acumulador de datos ADN

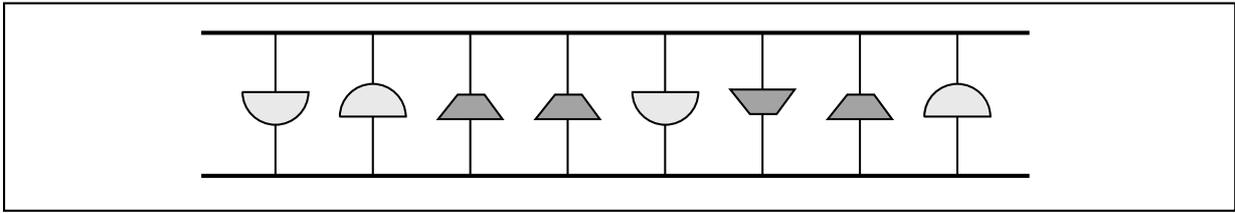
Un ser vivo se forma a través de la compleja combinación de una gran cantidad de reacciones químicas. Cada uno posee una especie de plan de construcción propio que garantiza la secuencia correcta de estas reacciones. Este plan de construcción está constituido por unas moléculas gigantes de ácido desoxirribonucleico o ADN. Estas moléculas de ADN están contenidas en el núcleo de cada célula del ser vivo.

La estructura del ADN puede describirse fácilmente (figura 2.15). Entre dos filamentos muy largos de estructura idéntica se encuentran, igual que los peldaños de una escalera, grupos de átomos de dos tipos diferentes. Cada uno de estos grupos tiene, además, la posibilidad de insertarse de dos maneras diferentes en las cadenas laterales. Así resultan 4 símbolos que codifican los datos del plan de construcción biológico. Siendo el número de símbolos igual a 4, cada símbolo lleva 2 bit.

Una de las metas más importantes de la investigación biológica actual, consiste en encontrar las re-

Tabla 2.5.

Acumulador de datos	Aparato de grabación	Aparato de reproducción
rollo de película diapositiva tarjeta perforada	filmadora máquina fotográfica aparato de perforación	proyectora de película proyectora de diapositiva aparato de lectura
Acumulador de datos	Aparato de grabación y reproducción	
videocasete casete magnetofónico disquet de computación	videograbadora grabadora disquetera	



2.15. Estructura esquemática del ADN (ácido desoxirribonucleico)

glas de codificación del plan de construcción, contenido en las moléculas de ADN.

En comparación con su diámetro, el largo de una de estas cadenas moleculares es increíblemente grande: siendo el diámetro de aproximadamente 1 nanómetro, el largo es más o menos de 1 mm, es decir un millón de veces mayor. La relación entre diámetro y largo es, por lo tanto, la misma que en un hilo de coser de 100 m de largo. Para poder caber dentro del núcleo celular, las macromoléculas de ADN están enrolladas formando un ovillo.

La longitud de la cadena de ADN es mayor mientras más desarrollado o más complejo sea el ser vivo correspondiente. En los organismos superiores, la información se encuentra repartida entre varios ovillos de ADN. En el ser humano, por ejemplo, son 46, a los que corresponde una longitud total de la cadena de ADN de 99 cm. En una bacteria, el número de peldaños es de unos 4 millones; en el ser humano, alcanza 2,9 mil millones. De esta manera, el plan de construcción biológico de la bacteria tiene 8 Mbit y el del hombre unos 6000 Mbit.

Ejercicios

1. ¿Cuáles de los acumuladores de datos enumerados en la tabla 2.4 son de grabación y reproducción y cuáles únicamente de reproducción?
2. ¿Cuántos discos LP (de 1/2 hora de duración) contienen la misma cantidad de datos que un videocasete de 4 horas de duración? (para tus cálculos, usa los valores aproximados indicados en el texto).
3. Existe un juego en el cual se van montando pequeños discos de plástico de color en una rejilla, de manera que la rejilla quede totalmente cubierta. Así, se puede armar un cuadro formado por puras manchas de color. Supongamos que la rejilla, con las dimensiones de 30 cm · 40 cm, disponga de 60 · 80 puntos de montaje (es decir, cada disquito mide 0,5 cm · 0,5 cm). Existiendo disquitos de 16 colores diferentes, ¿cuál será la cantidad de datos que corresponde a cada disquito? ¿Cuál es la cantidad de datos correspondiente a todo el cuadro?
4. Una cajita de música tiene 18 dientes de los cuales cada uno produce un sonido diferente. En cada vuelta que da el cilindro de la cajita, cada diente puede ser percutido un máximo de 20 veces. ¿Cuántos bit se acumulan en el cilindro?

3. Flujos de líquidos y gases

La mayoría de las dragas y excavadoras, varias grúas y muchas otras máquinas son impulsadas *hidráulicamente*. Esto se reconoce por la existencia de tubos y mangueras que, partiendo de una bomba central, llegan a todos los lugares donde se genera un movimiento.

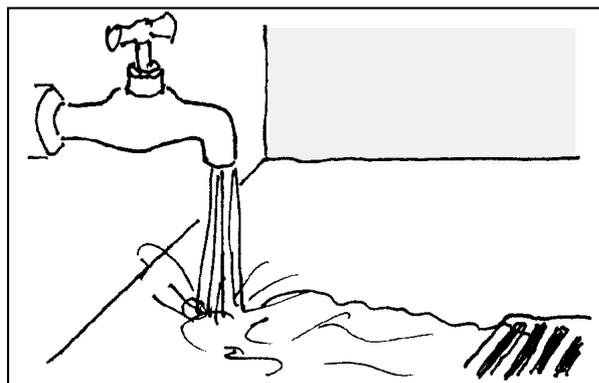
También existen máquinas y aparatos que son impulsados en forma *neumática*, como, por ejemplo, el martillo neumático. Este impulso neumático funciona de manera muy similar al impulso hidráulico, pero utiliza el aire comprimido como portador de energía. En este capítulo estudiaremos las corrientes o flujos de líquidos y gases, como los aplicados en todas estas máquinas. Descubriremos algunas reglas sencillas, y vale la pena que las aprendas muy bien, pues no son válidas sólo para los casos indicados, corrientes de aire y de agua: adaptándolas convenientemente, pueden ser aplicadas, también, a otros tipos de corrientes o flujos, tales como las corrientes eléctricas y los flujos de calor y de momento.

3.1 La presión

Si se abre totalmente la llave del agua, sale un fuerte chorro (figura 3.1), porque dentro de la cañería se encuentra el agua a gran presión. Al abrir la válvula de un neumático inflado de bicicleta o auto, el aire sale emitiendo un fuerte silbido. Esto se debe a que, dentro del neumático, el aire se encuentra a gran presión.

Al igual que el peso, la longitud y la energía, la presión es una magnitud física. Su unidad de medición es el *bar* y el instrumento que mide la presión se llama *manómetro* (figura 3.2). En la tabla 1 se indican algunos valores de presión típicos.

Además del bar existe otra unidad de medición para la presión, el Pascal o Pa, y la equivalencia entre las



3.1. Dentro de la cañería, el agua está sometida a alta presión.

Tabla 3.1 Valores típicos de diferentes presiones

Cañería de agua	2 - 5 bar
Neumático de auto	4 bar
Vapor de agua en la caldera de una planta termoeléctrica	150 bar
Aceite hidráulico de una excavadora	150 bar
En el lugar más profundo del océano	1000 bar
En un balón de oxígeno lleno	150 bar
En un balón de gas licuado lleno	8 bar
Para la obtención de diamantes artificiales a partir del grafito, el grafito es expuesto a una presión de	15 000 bar
En el interior del sol	200 000 000 000 bar

dos es de

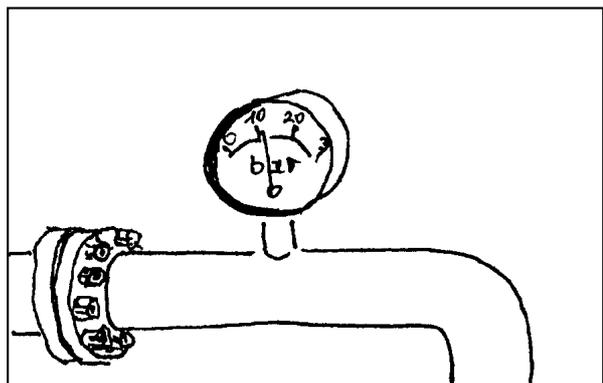
$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa.}$$

El bar es más manejable y más usado que el Pascal, pero, para el físico, la pequeña unidad Pascal tiene una gran ventaja: con ella la relación entre la presión y las demás magnitudes físicas resulta más simple. Más tarde comprenderás mejor esta afirmación.

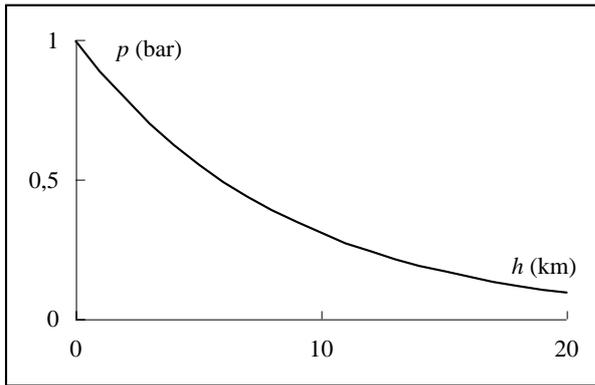
3.2 Presión atmosférica, sobrepresión, vacío

El aire a nuestro alrededor tiene una presión casi exacta de 1 bar. A esta presión la llamamos *presión normal* y tiene su origen en el hecho de que el aire de más arriba presiona, con su peso, el aire de más abajo.

Por esta misma razón, la presión atmosférica disminuye con la altura, primero rápidamente y cada vez más lentamente después. La figura 3.3 representa la presión atmosférica en función de la altura sobre el nivel del mar. A una altura de 4000 m, es decir, en la alta montaña, la presión atmosférica tiene un valor de solo unos 0,6 bar.



3.2 Las presiones se miden con un manómetro.



3.3. La presión atmosférica p en función de la altura h sobre el nivel del mar

La presión atmosférica también varía a través del tiempo, ya que su magnitud depende del tiempo atmosférico. El instrumento de medición que utilizamos para determinar la presión del aire que nos rodea se llama *barómetro*.

No percibimos la presión atmosférica, porque el aire presiona sobre nuestro cuerpo desde todas las direcciones. Incluso el aire contenido en las cavidades corporales, tales como pulmones y oídos, tiene la misma presión que el aire exterior.

La mayoría de los manómetros no indican la presión absoluta o real, sino la llamada *sobrepresión*. Así, el manómetro que usamos para verificar la presión de los neumáticos, indica la diferencia de presión entre el aire dentro del neumático y el aire exterior.

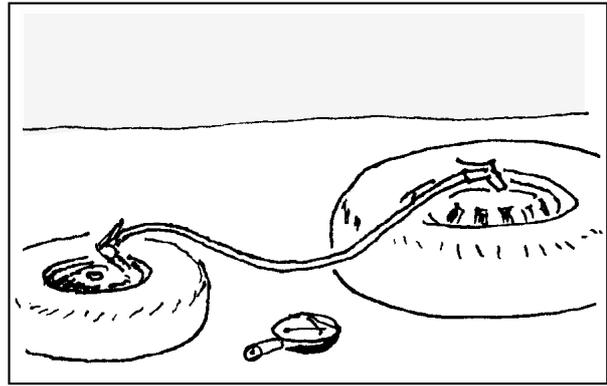
Un recipiente también puede contener aire de menor presión con respecto al exterior. En este caso hablamos de *descompresión*. Si dentro del recipiente no queda ni aire ni ninguna otra sustancia, la presión es de 0 bar. Este tipo de espacio sin materia se llama *vacío*.

Ejercicios

- Si, en tu casa, tienes un barómetro, anota, durante 7 días, en la mañana y en la tarde, la presión atmosférica marcada por el instrumento. Haz un gráfico de la presión con respecto al tiempo.
- Un automovilista verifica la presión del neumático de repuesto. El manómetro marca 0 bar de sobrepresión. ¿Cuál es la verdadera presión del aire en el neumático?

3.3 La diferencia de presión como impulso para un flujo de líquido o gas

Al abrir la válvula de un neumático de automóvil inflado, el aire sale, desde el neumático con alta presión, hacia el exterior, donde la presión es menor. Al abrir un paquete de maní envasado "al vacío", sentimos un silbido, porque el aire entra al envase donde hay menos presión que fuera. En ambos casos, el aire fluye desde un lugar de alta presión hacia otro de baja presión.



3.4. El aire fluye desde el neumático con mayor presión al de menor presión.

A una llave de agua le conectamos una manguera larga y muy delgada y abrimos la llave. Obviamente, el agua sale. En la red de agua potable, el agua se encuentra a una alta presión y en el extremo libre de la manguera, su presión es muy baja. Entonces, el agua también fluye desde un lugar de alta presión hacia otro de baja presión. Lo mismo es válido también para los otros tipos de líquidos y gases.

Líquidos y gases fluyen, por sí solo, desde un lugar de alta presión a otro de baja presión. La diferencia de presión proporciona el impulso para una corriente o un flujo de líquido o gas.

Inflamos un neumático de automóvil y lo conectamos, mediante una manguera, con otro no inflado (figura 3.4). Primero, sentimos el flujo del aire dentro de la manguera, pero, después de un rato, el aire deja de fluir. Sacamos la manguera y medimos la presión en ambos neumáticos. Resultado: los dos neumáticos muestran la misma presión. En el neumático inflado y que antes tenía mayor presión, ésta disminuyó; en el otro, aumentó. ¿Qué pasó? El aire se trasladó desde el neumático con mayor presión hacia el de menor presión, hasta que la diferencia de presión, o sea, el impulso del flujo, desapareció. El estado final, en que ya no existe flujo de aire (a pesar de que la conexión se mantiene intacta), lo conocemos como *equilibrio de presiones*.

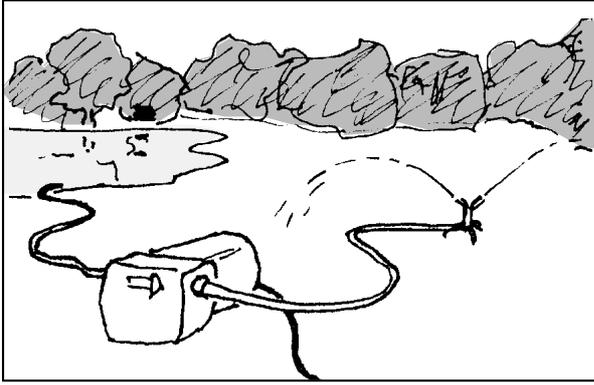
Advierte que, al final, la cantidad de aire contenida en ambos neumáticos no es igual: en el neumático más grande hay más cantidad de aire.

Podemos apreciar claramente que no es la presión sino la *diferencia* de presión la que impulsa el flujo de aire; en el momento en que se establece el equilibrio de presiones, y a pesar de que la presión sigue siendo muy alta, cesa el flujo de aire.

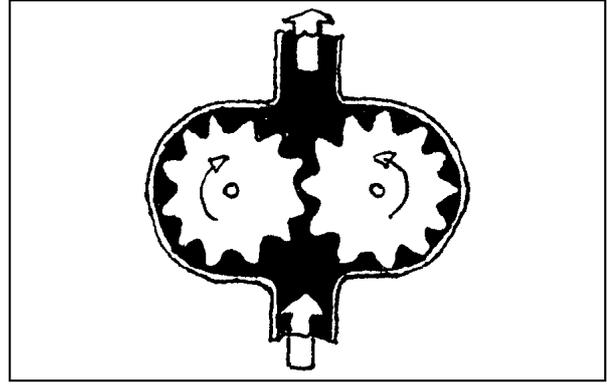
Ejercicio

La presión de un neumático grande es de 1 bar y la de uno pequeño es de 4 bar. Mediante una manguera conectamos los dos neumáticos, de manera que el aire pueda pasar del uno al otro.

- ¿Qué ocurre?
- El valor de la presión final, ¿estará más cerca de 1 bar o de 4 bar?
- Al final, ¿en cuál de los dos neumáticos hay más aire?



3.5. A la salida de la bomba, el agua tiene mayor presión que a la entrada.



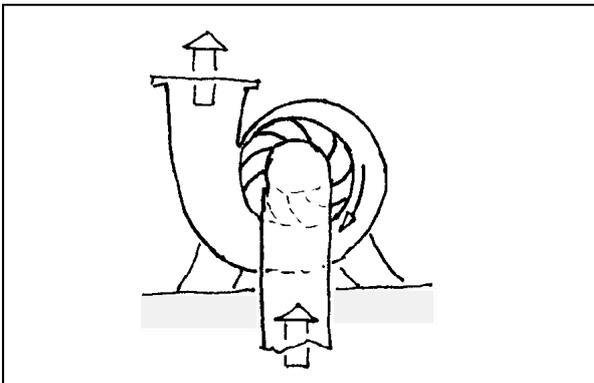
3.7. Bomba con ruedas dentadas

3.4 Bombas

En ciertas situaciones tenemos que trasladar un líquido o un gas desde un lugar de baja presión a otro de alta presión, para lo cual se usa una bomba. En la salida de la bomba de agua de la figura 3.5, el agua tiene una presión mayor que en la entrada.

Existen muchos tipos diferentes de bombas. La figura 3.6 muestra una *bomba centrífuga*. El agua que entra se ubica entre las aspas de una rueda de agua. Al girar esta rueda, el agua, que empieza a girar también, es despedida hacia afuera (igual que los ocupantes de un auto que pasa por una curva) y empujada a través del orificio de salida. Este tipo de bomba se utiliza, por ejemplo, para sacar el agua de una máquina lavadora. El modo de funcionamiento de una *bomba con ruedas dentadas* se explica en la figura 3.7. Se utiliza este tipo de bomba cuando se trata de vencer grandes diferencias de presión. Una versión más sofisticada se utiliza como bomba hidráulica en las excavadoras. Las bombas con las que se aumenta la presión de un gas se denominan también compresoras.

Las bombas trasladan gases o líquidos de un lugar de baja presión a otro de alta presión.



3.6. Bomba centrífuga

3.5 La intensidad del flujo

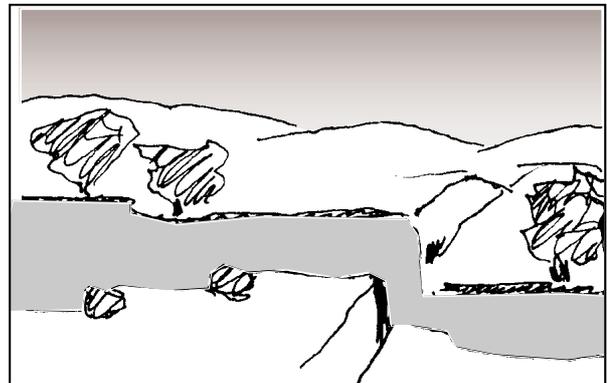
A veces tenemos que comparar dos flujos, por ejemplo dos flujos de agua. Entonces, podemos preguntar: “¿Cuál de los dos flujos es más ancho?” o “¿Cuál de los dos flujos fluye más rápido?”. Sin embargo, muchas veces no nos interesa ni el ancho ni la rapidez, sino la *intensidad del flujo*. La intensidad de un flujo de agua se define como la cantidad de agua que pasa, en un determinado intervalo de tiempo, en un determinado lugar, dividido por este mismo intervalo de tiempo.

$$\text{Intensidad de flujo} = \frac{\text{cantidad de agua}}{\text{tiempo}}$$

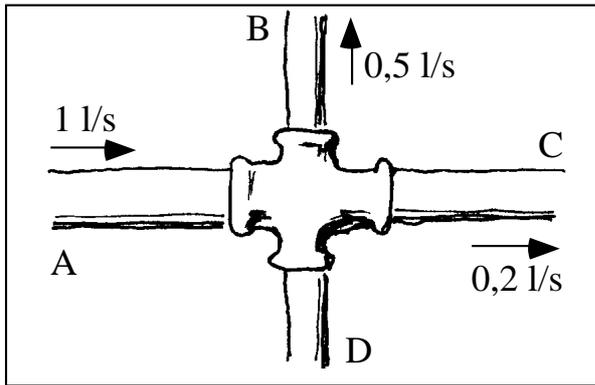
La cantidad de agua la podemos medir en litros o en kilos. La medida de la intensidad de flujo será, entonces, l/s o kg/s. Por el río Rin, junto a la ciudad alemana de Karlsruhe, pasan, en cada segundo, alrededor de 1 500 000 l bajo un puente. La intensidad del flujo del Rin es, entonces, de 1 500 000 l/s.

En el capítulo anterior, ya conocimos la intensidad del flujo energético. Ella nos indica cuántos Joules pasan, en cada segundo, por un lugar determinado.

Es muy fácil confundir la intensidad de un flujo con su velocidad. El río de la figura 3.8 tiene, en todas partes, la misma intensidad de flujo, pero su velocidad es mayor en el lugar más angosto.



3.8. En cada lugar del río, la intensidad del flujo es la misma



3.9. La cantidad de agua que llega, en cada segundo y a través del tubo A, a la intersección de los tubos, es igual a la que sale de la intersección a través de los tubos B, C y D.

En la figura 3.9, un flujo de agua de 1 l/s llega, a través del tubo A, desde la izquierda a la intersección de las cañerías. A través del tubo B salen 0,5 l/s y, a través del tubo C, 0,2 l/s. ¿Qué intensidad de flujo tiene el agua en el tubo D y en qué dirección se mueve? Ya que, en la intersección, ni desaparece ni se genera agua, la cantidad total de agua que llega a la intersección en cada segundo tiene que ser igual a la cantidad total de agua que, en cada segundo, sale de ella. Para obtener, en nuestro caso, un balance correcto, tienen que salir, a través del tubo D, 0,3 l/s.

Llegan a la intersección

$$1 \text{ l/s}$$

Salen de la intersección

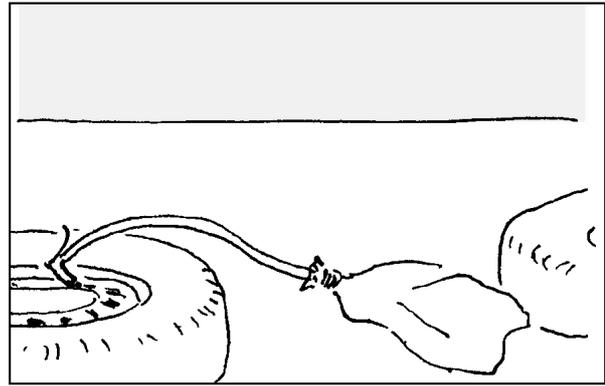
$$0,5 \text{ l/s} + 0,2 \text{ l/s} + 0,3 \text{ l/s} = 1 \text{ l/s}$$

Un lugar en que concurren diferentes flujos se llama un *nudo*. Para calcular la intensidad del flujo de agua en el tubo D, utilizamos, por lo tanto, la llamada *regla de los nudos*:

La suma de las intensidades de los flujos que llegan a un nudo es igual a la de las intensidades de los flujos que salen de él.

Ejercicios

1. En una tina de baño caben 120 litros y se llena en 20 minutos. ¿Cuál es la intensidad del flujo de agua que llega a la tina?
2. En una cañería de agua, la intensidad del flujo es de 2 l/s, en otra de 3 l/s. Estos datos, ¿nos permiten concluir en cuál de las dos cañerías el agua fluye más rápidamente? Justifica tu respuesta.
3. Tres ríos con las intensidades de flujo $5 \text{ m}^3/\text{s}$, $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3 \text{ m}^3/\text{s}$ se juntan en un lugar determinado. ¿Cuál es la intensidad del flujo total del río después de esta confluencia?



3.10. Mientras mayor sea la presión del neumático, más rápidamente se llena la bolsita de plástico.

3.6 Intensidad del flujo e impulso

Al abrir completamente la llave de agua sale menos agua que lo normal. ¿Cuál podría ser la causa? Obviamente debe ser por la falta de presión en la cañería de agua. La diferencia entre la presión en la cañería y la presión exterior o normal de 1 bar impulsa el flujo de agua que sale de la llave. Mientras mayor sea la presión en la cañería, mayor será también la diferencia de presión y mayor la intensidad del flujo.

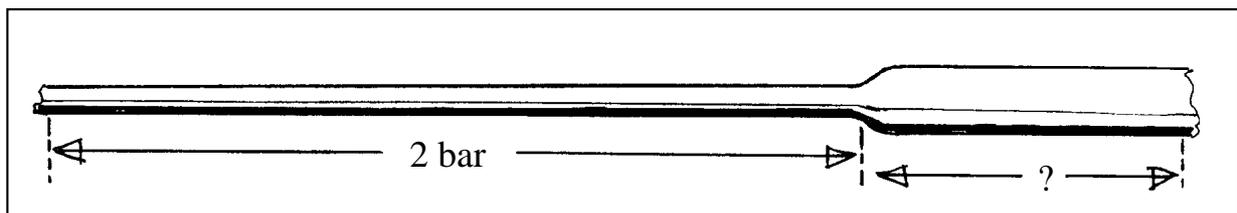
Llenamos una bolsa plástica con el aire que sale de un neumático inflado, figura 3.10. Realizamos la experiencia primero con un neumático que tiene una sobrepresión de 2 bar y después con otro con 0,5 bar de sobrepresión. Constatamos que, en el primer caso, la bolsita se llena más rápidamente que en el segundo. También aquí, la mayor diferencia de presión genera una mayor intensidad de flujo.

Mientras mayor sea la diferencia de presión entre dos lugares (mientras mayor sea el impulso), mayor será también la intensidad del flujo que se establece entre los dos lugares.

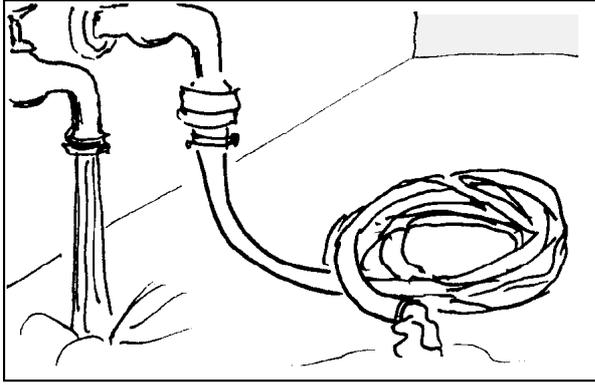
Ejercicio

A través del tubo de la figura 3.11 fluye agua.

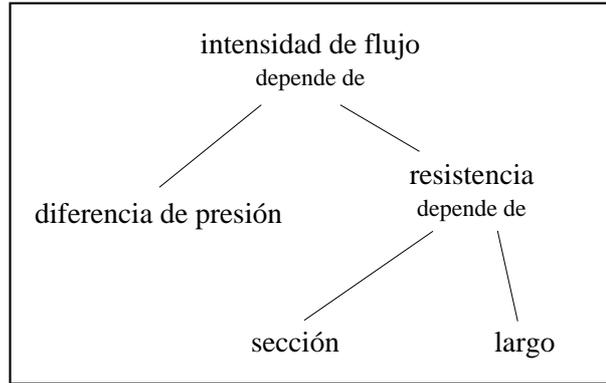
- a) La intensidad de flujo en el extremo izquierdo es de 10 l/s. ¿Cuál es la intensidad de flujo en el extremo derecho? Justifica tu respuesta.
- b) La diferencia de presión entre el extremo izquierdo y el lugar del estrechamiento es de 2 bar. La diferencia de presión entre el lugar del estrechamiento y el extremo derecho, ¿es mayor o menor que 2 bar? Justifica tu respuesta.



3.11. La diferencia de presión entre el lugar del estrechamiento y el extremo derecho del tubo, ¿es mayor o menor que 2 bar?



3.12. La manguera opone una resistencia al flujo del agua.



3.13. Relación entre la intensidad de flujo, la diferencia de presión y las características del conductor.

3.7 Intensidad del flujo y resistencia

A una llave de agua, de la que, normalmente, el agua sale con un fuerte chorro, conectamos una larga manguera. Al abrir totalmente la llave, la fuerza del chorro de agua que sale en el extremo de la manguera es notoriamente inferior. La intensidad del flujo de agua con la manguera es menor que sin ella, figura 3.12. ¿Cuál es la causa? No puede ser el impulso, porque es igual en ambos casos. La verdadera causa de la disminución de la intensidad del flujo de agua es la presencia de la manguera: ella dificulta el flujo del agua, le opone una cierta *resistencia*.

Hagamos otro experimento con un neumático y una bolsita plástica. En dos oportunidades consecutivas llenamos la bolsita con el aire proveniente del mismo neumático. La primera vez conectamos la bolsita a través de una manguera lo más corta posible, la segunda vez usamos una manguera muy larga, pero de igual grosor que la primera. En el primer experimento, la bolsita se llena más rápidamente que en el segundo; la intensidad del flujo de aire es mayor en el primer caso. La manguera larga le opone al aire una mayor resistencia que la corta. Decimos también que la manguera larga “tiene” una mayor resistencia.

Entonces, si comparamos la resistencia de dos mangueras o tubos del mismo largo, pero diferente grosor, constatamos que la resistencia es menor mientras mayor sea el diámetro del conductor.

Cada conductor opone una cierta resistencia al flujo de un gas o de un líquido que lo atraviesa. Esta resistencia es mayor mientras menor sea el diámetro del conductor y mientras mayor sea su longitud.

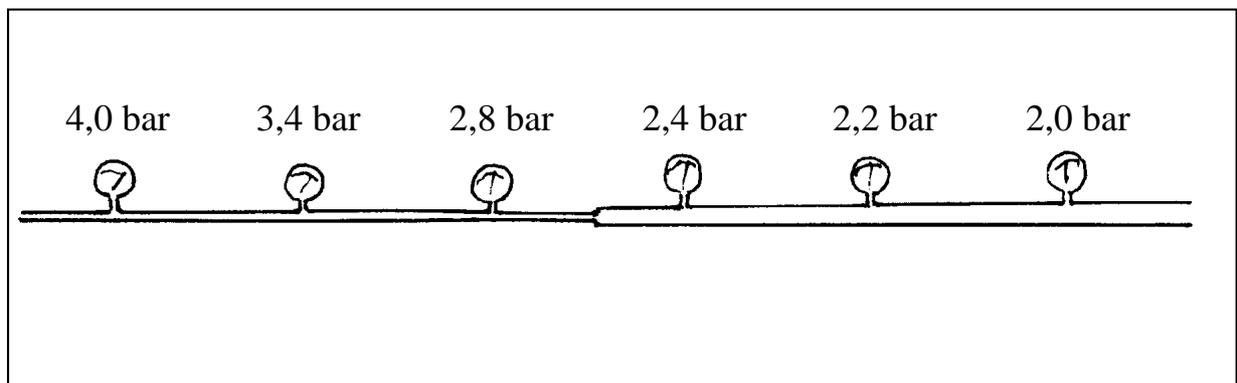
Entonces, la intensidad de un flujo no depende, únicamente, del impulso, sino también de las condiciones del conductor por el que fluye.

La intensidad de un flujo de gas o líquido en un conductor es mayor mientras

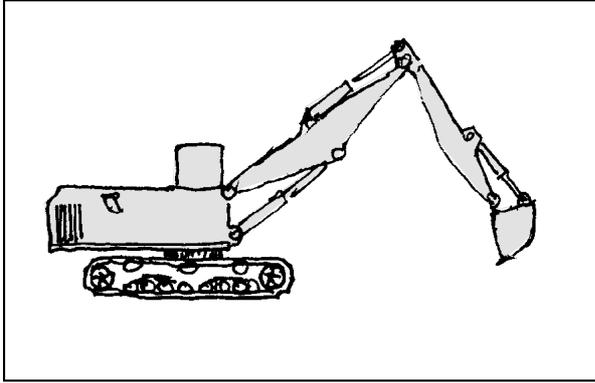
- **mayor sea la diferencia de presión entre sus extremos;**
- **menor sea su resistencia.**

En la figura 3.13 resumimos, en forma esquemática, las relaciones existentes entre la intensidad del flujo, la diferencia de presión y el largo y la sección del conductor.

La figura 3.14 representa una cañería de agua más larga en la que se han conectado, siempre a igual distancia, varios manómetros. Tratemos de interpretar los valores indicados en estos instrumentos. El hecho de que el valor indicado por el manómetro en el extremo izquierdo es mayor que el del extremo derecho, nos indica que el agua fluye desde la izquierda hacia la derecha, de la presión mayor hacia la menor. Sin embargo, la presión ya tiene que disminuir entre el primero y el segundo manómetro, porque,



3.14. En la parte más angosta del tubo, la caída de presión es mayor que en la parte más ancha.



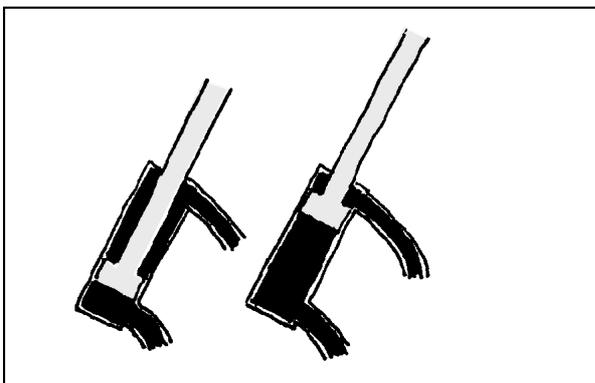
3.15. La excavadora puede desplazarse, girar la parte superior, virar y doblar su brazo móvil y descargar la pala.

para poder recorrer esta distancia, el agua necesita impulso. Lo mismo ocurre entre el segundo y el tercer manómetro y, así, sucesivamente. Además, podemos constatar que en la parte más delgada del tubo, las diferencias de presión entre dos manómetros vecinos se mantienen constantes y lo mismo ocurre en la parte más gruesa. Sin embargo, las diferencias de presión entre dos manómetros vecinos son mayores en la parte delgada que en la parte gruesa. Pero esto es fácilmente comprensible, porque es necesaria una mayor diferencia de presión para impulsar el agua a través del tubo más delgado.

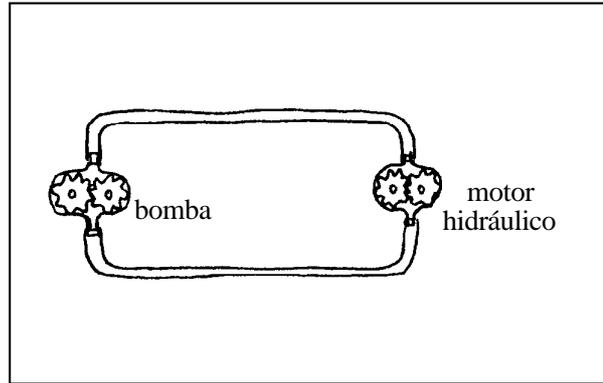
3.8 Transmisión hidráulica de la energía

Una excavadora es una máquina multifacética. Puede avanzar y retroceder, puede girar su parte superior, virar y doblar su brazo móvil y descargar la pala en el extremo de su brazo, figura 3.15. Todos estos movimientos son posibles gracias a la existencia de un sistema de circuitos hidráulicos.

Un motor Diesel impulsa una bomba. Esta bomba presiona el aceite hidráulico a través de los tubos y



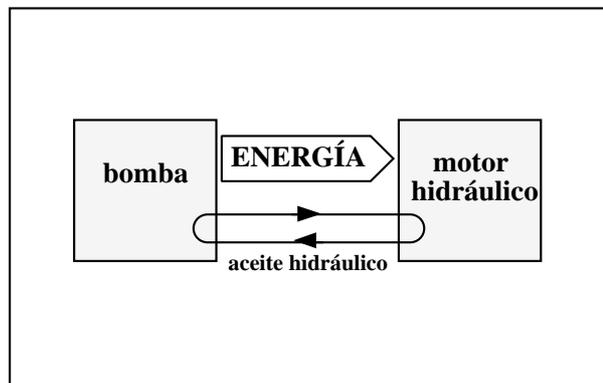
3.16. Cilindro hidráulico



3.17. Circuito hidráulico

las mangueras hacia los diferentes lugares en que ocurre un movimiento. A través de una conexión paralela, el aceite vuelve a la bomba. En los lugares en que se efectúa un movimiento de giro (en las ruedas de la excavadora y en la parte superior), existe un motor hidráulico; en los lugares en que se efectúa un movimiento de vaivén, hay un cilindro hidráulico, figure 3.16.

La figura 3.17 muestra partes del sistema hidráulico de la excavadora: la bomba y uno de los motores hidráulicos. Constatamos que el aceite hidráulico fluye dentro de un circuito cerrado. En el camino hacia el motor se encuentra bajo alta presión, en la vuelta, la presión es más baja. También podemos describir todo este proceso desde el punto de vista energético: desde el motor Diesel, la energía va con el portador momentum angular hacia la bomba. En la bomba, el portador cambia, la energía es transbordada al aceite hidráulico. Con este líquido y dentro del conductor de alta presión, la energía llega al motor hidráulico, donde nuevamente es transbordada al portador momentum angular. Después de haber descargado la energía, el aceite hidráulico vuelve a la bomba. La figura 3.18 muestra el diagrama de flujo correspondiente.



3.18. Diagrama de flujo correspondiente al impulso hidráulico

4. MECÁNICA

Comencemos ahora con el estudio de uno de los capítulos más importantes de la física, *la mecánica*. Una definición provisional sería que la mecánica estudia, fundamentalmente, el movimiento de los cuerpos. Más tarde veremos que esta definición es demasiado restrictiva, pero por el momento puede ser suficiente.

La mecánica constituye la parte más antigua de la física, ya que sus leyes más importantes se conocen desde hace más de 200 años. Incluso durante mucho tiempo, los físicos estaban empeñados en explicar mecánicamente todos los procesos de la naturaleza, no sólo los que constituyen movimientos reales y verdaderos, sino también los fenómenos térmicos, ópticos, eléctricos y químicos. Según esta interpretación, todo el universo no representaría, entonces, otra cosa que un “mecanismo” gigantesco y muy complejo.

Desde principios del siglo veinte se sabe, sin embargo, que esta interpretación es insostenible. Otros capítulos de la física, tales como el estudio de la electricidad y el calor, se reconocen ahora como independientes y equivalentes a la mecánica. En un fenómeno físico participan normalmente tanto procesos mecánicos como eléctricos, térmicos y de otra índole.

En el siguiente estudio de la mecánica nos interesará, por lo tanto, exclusivamente el aspecto mecánico de un proceso físico. Investigaremos si un objeto se mueve y cómo es su movimiento y no nos interesará su temperatura, su carga eléctrica, su color, etc. Y, evidentemente, tampoco nos interesarán en absoluto las demás cualidades no físicas de un objeto, como, por ejemplo, su precio y si es bonito o feo.

Antes de iniciar el estudio de la mecánica, dedicaremos el próximo párrafo al conocimiento de una de las herramientas más importantes del físico, las magnitudes físicas.

4.1 Magnitudes físicas

El método físico de descripción de la naturaleza es típicamente “cuantitativo”. Con este concepto queremos expresar que muchas de las conclusiones físicas se dan en forma de relaciones numéricas. El físico no se conforma con saber si un objeto tiene una alta temperatura, una pequeña masa o

una velocidad reducida; él estará siempre empeñado en conseguir los valores numéricos de esta temperatura, masa o velocidad. Su objetivo principal será, entonces, determinar, mediante una medición directa o una deducción matemática, que el valor de esta temperatura es de 1530 grados centígrados, el de la masa 5,3 miligramos y el de la velocidad 882 metros por segundo.

Temperatura, masa y velocidad constituyen, entonces, *magnitudes físicas*. Evidentemente, existen muchas otras magnitudes físicas, algunas ya las conoces y otras se te presentarán en el curso de tus clases de física.

Las magnitudes físicas forman parte de las herramientas más importantes del físico.

Recordemos ahora algunas reglas básicas para el manejo de las magnitudes físicas. Probablemente, las conoces desde hace mucho tiempo, pero es posible que no siempre las hayas aplicado de forma adecuada.

Cada magnitud física tiene como símbolo una letra. Estos símbolos son internacionales y la tabla 4.1 te muestra algunos ejemplos

Tienes que ser conciente que no da lo mismo si el símbolo utilizado es una letra minúscula o mayúscula. A menudo la letra minúscula representa una magnitud física totalmente distinta a la mayúscula. De esta manera, v representa la velocidad y V el volumen. A veces, se aceptan dos símbolos diferentes para una misma magnitud física. Un ejemplo es la energía, que puede ser representada mediante los símbolos E o W .

Cada magnitud tiene, como tú ya sabes, su *unidad* o *medida*. La unidad del tiempo es el segundo, la de la energía el Joule y la de la presión, el bar. La tabla 4.2 te muestra algunos ejemplos de magnitudes con sus respectivas unidades.

Cada unidad representa una cantidad determinada de la magnitud correspondiente y el valor total de

Tabla 4.1: Nombres y símbolos de algunas magnitudes físicas

Nombre	Símbolo
Masa	m
Velocidad	v
Tiempo	t
Volumen	V
Energía	E o W
Presión	p

Tabla 4.2: Algunas magnitudes físicas con sus unidades (medidas)

Magnitud física	Unidad
Masa	Kilogramo
Velocidad	Metro por segundo
Tiempo	Segundo
Volumen	Metro cúbico
Energía	Joule
Presión	Bar

una magnitud se expresa siempre como un múltiplo o una fracción de esta unidad. Al decir que “el contenido energético de un objeto es de 1000 Joules” se quiere expresar que este objeto contiene 1000 veces la unidad determinada de energía “1 Joule”.

De la misma manera que el nombre de la magnitud, también se abrevia el nombre de su unidad. “Metro” se escribe como “m”, “Joule” como “J” y “segundo” como “s”. Para no confundir los símbolos de las magnitudes con los de las unidades, los primeros se imprimen con letras cursivas. De esta manera, m representa la magnitud masa, pero m indica la unidad metro. También las unidades y sus símbolos han quedado establecidas por medio de convenios internacionales. En la tabla 4.3 se resume lo dicho hasta ahora sobre magnitudes y sus unidades, indicando algunas magnitudes con sus símbolos así como las unidades correspondientes con sus símbolos.

Gracias a estas abreviaciones de magnitudes y unidades se pueden expresar determinadas afirmaciones físicas en forma muy sencilla. En vez de escribir que “la velocidad es de 100 metros por segundo”, se escribe simplemente

$$v = 100 \text{ m/s}$$

o, en vez de “la energía es de 40 000 Joules”, se escribe

$$E = 40\,000 \text{ J}$$

¡Es muy importante que no confundas ni los nombres de las magnitudes y sus unidades ni los símbolos correspondientes!

Muchas veces encontramos cantidades muy grandes o muy pequeñas de determinadas magnitudes

Tabla 4.3: Nombres y unidades de algunas magnitudes físicas y sus símbolos respectivos

Magnitud (símbolo)	Unidad (símbolo)
Masa (m)	Kilogramo (kg)
Velocidad (v)	Metro por segundo (m/s)
Tiempo (t)	Segundo (s)
Volumen (V)	Metro cúbico (m ³)
Energía (E)	Joule (J)
Presión (P)	Bar (bar)

Tabla 4.4: Prefijos que indican múltiplos y fracciones de unidades

Prefijo	Símbolo	Significado
Kilo	k	mil
Mega	M	millón
Giga	G	mil millones
Tera	T	billón
Mili	m	milésimo
Micro	μ	millonésimo
Nano	n	mil millonésimo
Pico	p	billonésimo

físicas y en estos casos usamos como unidad un múltiplo de la unidad original. Para designar a estos múltiplos se antepone al nombre normal un determinado prefijo. La tabla 4.4 muestra el significado de estos prefijos y sus símbolos correspondientes.

$$\begin{aligned} \text{Ejemplos: } 40\,000 \text{ J} &= 40 \text{ kJ} = 0,04 \text{ MJ} \\ 0,000\,002 \text{ m} &= 0,002 \text{ mm} = 2 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Ejercicios

1. Indica 4 magnitudes distintas a las de la tabla 4.1 con sus unidades y los símbolos correspondientes.

2. Abrevia las afirmaciones siguientes, usando los prefijos de la tabla 4.4:

$$E = 12\,000\,000 \text{ J}$$

$$v = 1\,500 \text{ m/s}$$

$$p = 110\,000 \text{ Pa (Pascal)}$$

3. Expresa la velocidad $v = 72 \text{ km/h}$ en m/s.

4. Menciona las unidades de algunas magnitudes de tu elección y que actualmente ya no estén en uso.

4.2 Momentum y velocidad

Según nuestra definición preliminar, la mecánica estudia el movimiento de los objetos o *cuerpos*.

Para poder iniciar la descripción física del movimiento, tenemos que conseguir primero las herramientas necesarias. ¿Recuerdas que nuestras herramientas más importantes son las magnitudes físicas? Pronto conoceremos un gran número de magnitudes físicas, pero, por el momento, podemos conformarnos con dos de ellas que caracterizan el estado de movimiento de un cuerpo. Una de ellas la conoces desde hace mucho tiempo: *la velocidad* (símbolo v). Para medir la velocidad, conocemos una serie de unidades diferentes: kilómetro por hora, nudo, milímetro por día, etc. La medida usada por la física la establecimos en el capítulo anterior, el metro por segundo (símbolo m/s).

La segunda magnitud necesaria seguramente aún no la conoces como magnitud física propiamente

tal, es decir, como una entidad que puede ser relacionada con un valor numérico. Pero sin considerar esta cualidad especial ya la conoces bastante bien y te vas a familiarizar con ella y vas a ser capaz de determinar también su valor. Se trata de otra magnitud que necesitamos para describir un movimiento y que se utiliza, por ejemplo, para diferenciar un vehículo o móvil en reposo de otro en movimiento. Frente a la velocidad tiene, sin embargo, una particularidad especial: representa algo que está contenido en el cuerpo en movimiento y no cuando está en reposo. Todos conocemos conceptos que tienen justamente esta propiedad: decimos, por ejemplo, que un coche pesado en movimiento tiene “vuelo” y no lo tiene cuando está en reposo. Las propiedades de lo que vulgarmente llamamos “vuelo” coinciden perfectamente con las de la magnitud física que buscamos. En realidad, podríamos usar para ella el nombre de vuelo, pero se ha convenido en usar el término técnico de *cantidad de movimiento* o *momentum*. El símbolo correspondiente es “ p ”. (¡Atención!: es el mismo símbolo que el de la presión).

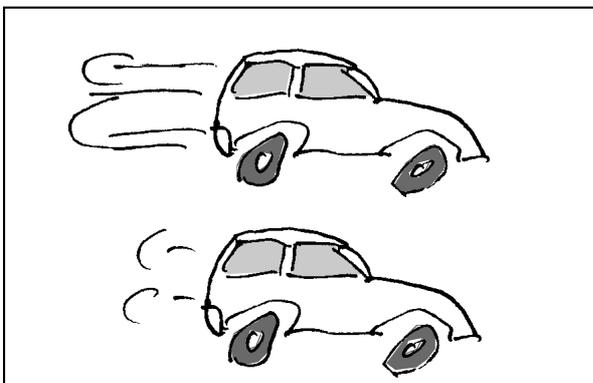
Un cuerpo en movimiento contiene momentum. Si se mueve rápidamente y si es pesado, este momentum es grande. Si no se mueve, no contiene momentum.

Discutiremos más adelante cómo se puede determinar cuantitativamente el momentum o vuelo que contiene un cuerpo, pero damos a conocer ahora su unidad. Su nombre es *Huygens*, símbolo H_y , según el físico Christian Huygens (1629-1695), que contribuyó de forma importante al descubrimiento de la magnitud de momentum.

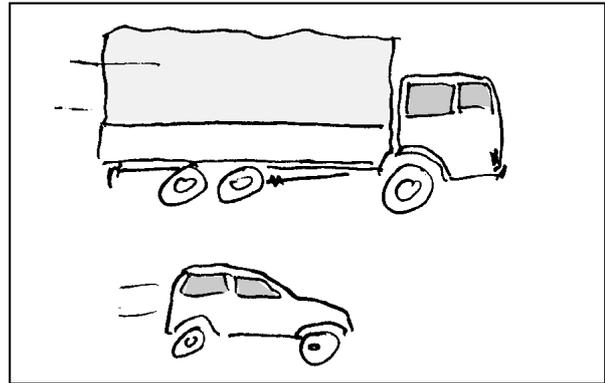
Estudiaremos ahora las propiedades más importantes de la magnitud p , recordando siempre que el momentum es, en el fondo, lo que vulgarmente llamamos vuelo o impulso.

En una carretera viajan dos coches iguales, uno más rápido y el otro más lento (figura 4.1). ¿Cuál de los vehículos tiene más momentum? (¿Cuál tiene más vuelo?). El que se mueve más rápidamente, el que tiene mayor velocidad.

Cuanto mayor sea la velocidad de un cuerpo, más momentum contiene.



4.1 Los dos coches son iguales. El de mayor velocidad tiene más momentum.



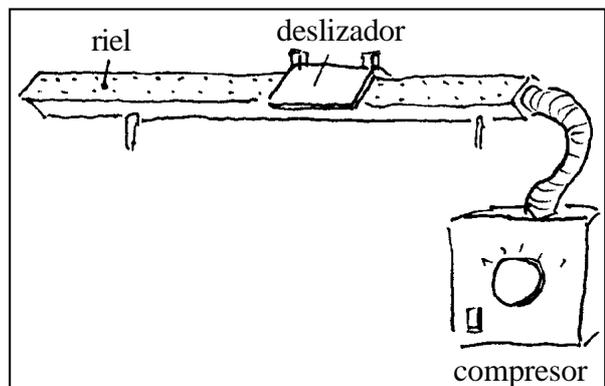
4.2 Los dos coches van a la misma velocidad. El de mayor peso tiene más momentum.

Un camión y un coche circulan juntos a la misma velocidad de 60 km/h. El camión tiene una masa de 8000 kg y el auto 1200 kg, figura 4.2. ¿Cuál de los dos vehículos tiene más momentum ahora? Evidentemente, el camión. La magnitud medida en kg y que vulgarmente se llama “peso”, se conoce en física como la *masa*. Tenemos entonces:

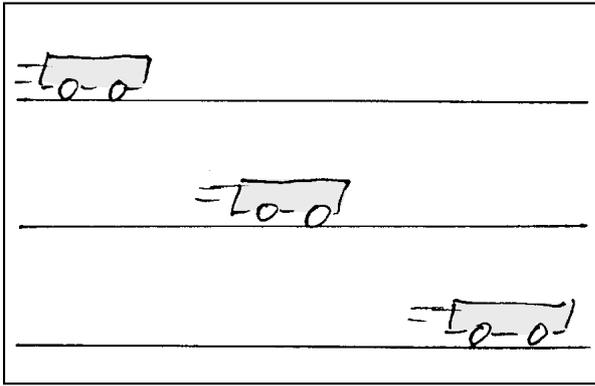
Cuanto mayor sea la masa de un cuerpo, más momentum contiene.

A continuación, realizaremos algunos experimentos en los que el roce aparece como factor perturbador. Utilizaremos, entonces, unos carritos provistos de un cojín de aire y que tienen, por lo tanto, un roce mínimo. La figura 4.3 muestra una de estas instalaciones de deslizadores que son preferidas para la realización de este tipo de experimentos. El riel tiene 4 hileras de orificios muy finos a través de los cuales sale el aire. El deslizador no toca el riel, sino que queda suspendido sobre un cojín de aire.

Supongamos ahora que un móvil con muy poco roce se mueva en una trayectoria horizontal. Podría tratarse de un deslizador con cojín de aire o también de un vagón de ferrocarril sin locomotora sobre un riel absolutamente horizontal. Observemos este móvil en tres momentos diferentes, según la figura 4.4. En el primer momento, figura 4.4a, el móvil se mueve con una velocidad determinada y, por lo tanto, contiene una cierta canti-



4.3 Deslizadores con cojín de aire. Se mueve prácticamente sin roce.

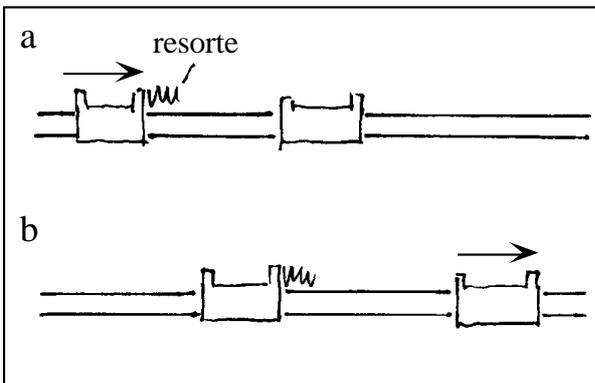


4.4 Este carrito casi no tiene roce. No pierde momentum.

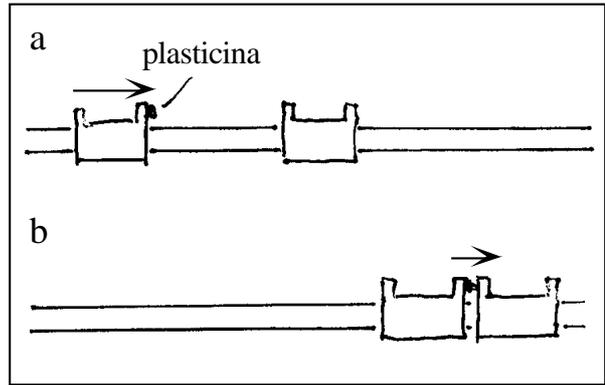
dad de momentum. En el momento siguiente, 4.4b, tiene la misma velocidad, e igualmente en el tercer momento, 4.4c. El momentum que contenía el móvil en el primer momento lo sigue conteniendo en el segundo y en el tercero. El momentum se ha mantenido dentro del móvil, similar a una carga que podría llevar y sin perder nada de ella.

Por el contrario, en un móvil cuyas ruedas producen mucho roce, la carga de momentum que contiene al principio disminuye constantemente. Más tarde, examinaremos este caso para ver lo que ocurre con el momentum; por el momento, seguimos experimentando con móviles, cuyo roce es prácticamente inexistente.

La figura 4.5 nos muestra dos deslizadores de igual construcción. El de la izquierda, deslizador A, se mueve hacia la derecha; el otro, el deslizador B, está en reposo. Algo más tarde, en la figura 4.5.b, A choca contra B y observamos que, después del choque, A está parado y B se mueve hacia la derecha. Explicaremos este fenómeno indicando lo que ocurrió con el momentum: al principio, es decir antes del choque, A contenía una cierta cantidad de momentum, por ejemplo 12 Hy, B no tenía nada. En el momento del choque, todo el momentum de A se ha trasladado a B. Los 12 Hy han sido traspasados de A a B de manera que después del choque A carece de momentum.



4.5 Antes del choque (a), el deslizador de la izquierda está en movimiento, el de la derecha está parado. Después del choque (b), el de la derecha se mueve y el de la izquierda está parado.



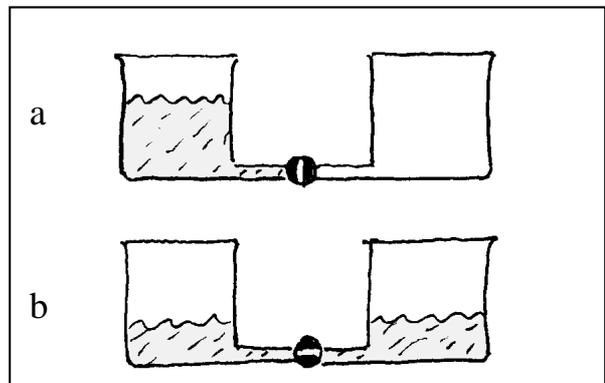
4.6 Antes del choque (a), el deslizador de la izquierda se mueve y el de la derecha está parado. Después (b), los dos se mueven, pero con menor velocidad.

Se puede trasladar el momentum de un cuerpo a otro.

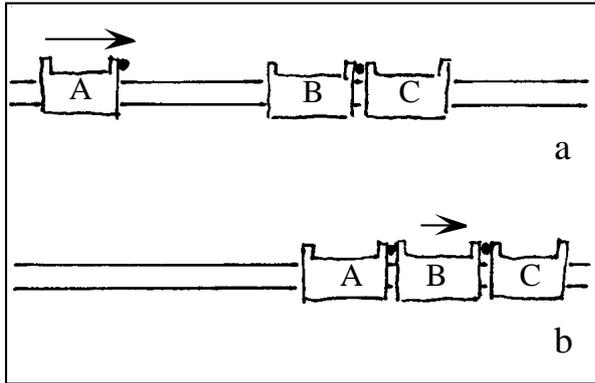
En el experimento 4.5 existe, entre los dos deslizadores, un amortiguador o tope elástico en forma de resorte. Repetiremos ahora el mismo experimento con un tope totalmente inelástico, sustituyendo el resorte por un pedacito de plasticina (figura 4.6). El experimento transcurre ahora de una manera totalmente distinta: al principio, el deslizador A se mueve y B está en reposo, pero después del choque, los dos deslizadores se mueven juntos y con la misma velocidad a la derecha. Esta velocidad es, sin embargo, menor que la del deslizador A antes del choque. ¿Cómo explicar esto? En este caso, no todo el momentum ha sido traspasado del deslizador A al B, sino que los 12 Hy han sido repartidos de forma equitativa entre los dos deslizadores, de manera que, al final, cada uno tenga 6 Hy.

Se puede repartir el momentum entre varios cuerpos.

Lo ocurrido con el momentum en la figura 4.6 puede compararse con lo que pasa con el agua en la figura 4.7. En 4.7a todo el agua está en el recipiente de la izquierda. Al abrir la llave, exactamente la mitad del agua fluye hacia el recipiente de la derecha. El agua se reparte entre los dos recipientes igual que el momentum en la figura 4.6 entre los dos deslizadores.



4.7 El agua se reparte en los dos recipientes, tal como en la figura 4.6, el momentum se reparte entre los dos deslizadores.



4.8 En el momento del choque, el momentum de A se reparte entre los tres deslizadores A, B y C.

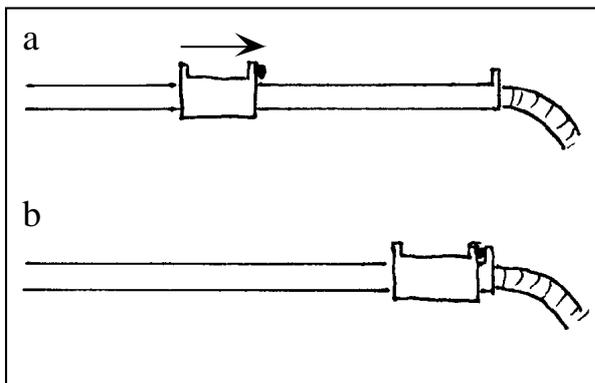
Hacemos chocar ahora el deslizador A, con su tope inelástico, contra dos deslizadores acoplados B y C, figura 4.8. Ahora el momentum que A contenía inicialmente se reparte de forma equitativa entre los 3 deslizadores, de manera que cada uno se queda con $1/3$ de la cantidad de momentum inicial. Si A contenía al comienzo $12 H_y$, cada deslizador contiene, después del choque, $4 H_y$.

Si hacemos chocar A contra 3, 4 ó 5 deslizadores en reposo, su momentum se repartirá entre los 4, 5 ó 6 móviles. Cuanto mayor sea la cantidad de móviles contra los cuales choca A, menos momentum recibirá cada uno y menor será la velocidad con que se mueve todo el trenecito.

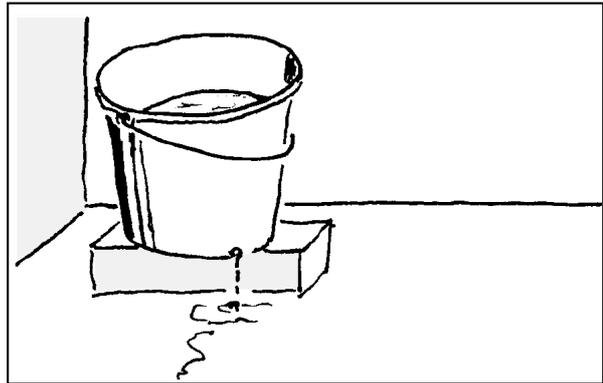
En vez de hacer chocar el deslizador A contra un gran número de otros deslizadores iguales, lo llevamos directamente a un tope fijo al final del riel, figura 4.9. Evidentemente, el deslizador A se detendrá bruscamente. ¿Dónde quedó ahora el momentum? ¿Cuál es el cuerpo que lo absorbió? En primer término, debe ser el riel. El momentum se reparte, entonces, entre A y el riel. Pero el riel está unido a la mesa, de manera que el momentum se reparte en realidad, entre A, el riel y la mesa. Pero, finalmente, la mesa está unida a la tierra y el momentum sigue repartiéndose por toda la tierra.

Dicho de otro modo, el momentum fluye hacia la tierra donde se disipa, es decir, se "diluye" tanto que ya no notamos su existencia.

Otra versión del experimento anterior sería la si-



4.9 En el momento del choque, el momentum del deslizador se va a tierra.



4.10 Balde con un agujero. El agua se esparce por los alrededores, de manera que, finalmente, ya no se ve.

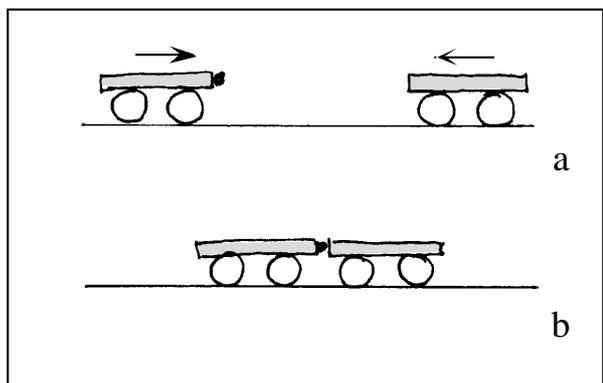
guiente: ponemos el deslizador en movimiento y, antes de que alcance el final del riel, cortamos el flujo de aire. El cojín de aire desaparece, el deslizador entra en contacto con el riel y se detiene. Mientras existe el cojín de aire, el movimiento del deslizador no tiene roce, pero, al eliminar el cojín de aire, hacemos actuar el roce. Podemos concluir:

Cuando un móvil en movimiento se detiene debido al roce, el momentum se disipa en la tierra.

También en este caso conviene hacer la comparación entre momentum y agua. Un móvil que se detiene debido al roce puede compararse con un balde de agua con un agujero, figura 4.10. El agua sale poco a poco y, finalmente, ya no notamos su presencia.

Roce sería, entonces, un escape del momentum y un móvil sin roce corresponde a un balde sin ninguna pérdida.

Hagamos nuevamente un experimento con dos móviles o deslizadores. Los móviles tienen un tope inelástico y son empujados de manera que se mueven con la misma velocidad el uno contra el otro. Chocan y quedan detenidos, figura 4.11. De nuevo podemos preguntar: ¿Dónde quedó el momentum ahora? Parece que no se ha disipado en la tierra porque no hay roce. De la misma manera, podemos pensar en dos objetos que hubieran chocado en la misma forma en el espacio interplanetario. Se habrían detenido igual, pero en esta situa-



4.11 Dos móviles se mueven con igual velocidad, el uno contra el otro. Al chocar, los dos se detienen.

ción no existe la tierra que habría podido absorber el momentum. La respuesta tiene que ser la siguiente: los momentum de los dos móviles se han compensado de alguna manera, ¿Pero cómo es posible esto? La explicación se vuelve muy sencilla si le asignamos a uno de los cuerpos un momentum positivo y al otro, uno negativo. Si uno de los móviles tiene, antes del choque, un momentum de $+20 \text{ Hy}$ y el otro -20 Hy , el momentum total, incluso antes del choque, es igual a 0 Hy . Después del choque, sigue siendo 0 Hy , tal como lo muestra el experimento, es decir, el balance final es correcto. Podemos concluir:

El momentum puede tener valores positivos y negativos.

¿Pero cuál de los cuerpos de la figura 4.11a tiene momentum positivo y cuál negativo? En el fondo, podemos determinar esto de cualquier manera. De las clases de matemáticas, tú sabes que el eje x positivo se traza hacia la derecha. Hagamos lo mismo con el impulso y convenimos:

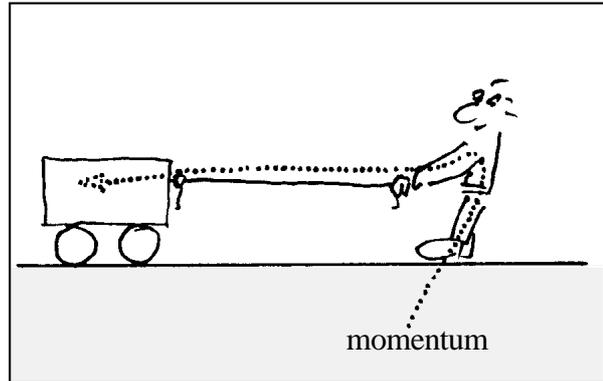
El momentum de un cuerpo es positivo cuando se mueve hacia la derecha y negativo cuando se mueve hacia la izquierda.

Ejercicios

1. Un móvil que contiene una cantidad de momentum de 1500 Hy choca contra 4 móviles en reposo. Todos los móviles son iguales y se mantienen unidos después del choque. ¿Cuál es el momentum total de los 5 móviles después del choque? ¿Qué cantidad de momentum contiene cada uno de ellos?
2. Dos carritos acoplados con un momentum total de $12\,000 \text{ Hy}$ chocan contra un tercero. Todos los carritos son iguales y se mantienen unidos después del choque. ¿Qué cantidad de momentum contiene cada uno de ellos antes del choque? ¿Cuál es la cantidad de momentum de cada uno después del choque?
3. Dos deslizadores iguales se mueven el uno contra el otro con la misma velocidad. Los dos están provistos de toques elásticos en forma de resorte. El deslizador izquierdo contiene $+5 \text{ Hy}$ y el derecho -5 Hy . ¿Qué pasa con el momentum de los dos deslizadores durante el choque?
4. Dos carritos con un total de 500 Hy se mueven hacia la derecha y chocan con un tercero que se mueve en sentido contrario. Este tercer carrito tiene -200 Hy . Todos los carritos son iguales y se mantienen unidos después del choque. ¿Cuál es el momentum de cada carrito después del choque y en qué dirección se mueven?
5. Una pelota es lanzada horizontalmente contra una pared y rebota en sentido contrario con la misma velocidad. Su momentum antes del choque es de 1 Hy . ¿Cuál es el momentum después del choque? ¿Cuál es la diferencia de entre antes y después? ¿Dónde quedó el momentum restante?

4.3 Bombas de momentum

Ya tratamos de aclarar la pregunta de qué absorbe el momentum de un cuerpo cuya velocidad va disminuyendo y encontramos la solución de que este momentum fluye hacia la tierra. Ahora plantearemos el problema al revés: ¿De dónde recibe su



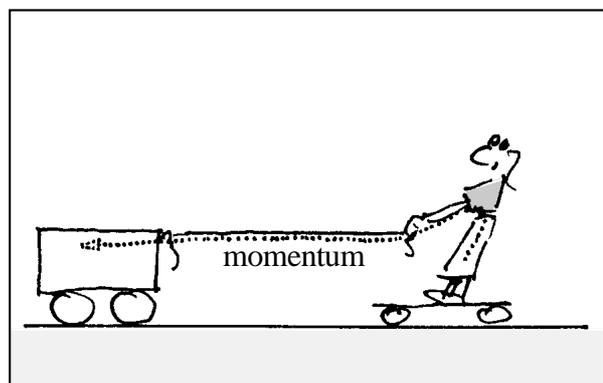
4.12 Mientras la persona esté tirando, el momentum del carrito aumenta.

momentum un móvil que está acelerando?

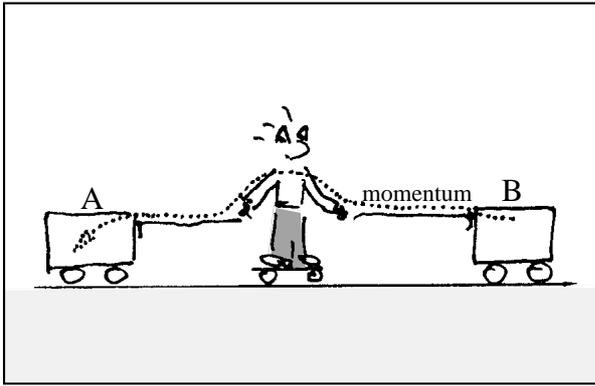
Un coche se pone en movimiento cuando alguien lo tira mediante una cuerda, tal como lo muestra la figura 4.12. Mientras la persona está tirando, el coche acelera, es decir, su momentum aumenta. ¿De dónde recibe este momentum? ¿De la persona que está tirando? Entonces debería disminuir el momentum de la persona, pero esto no ocurre. La persona se mantiene constantemente en reposo, es decir, su momento era y es igual a 0 Hy .

Podemos cambiar un poco las condiciones del experimento, haciendo que el momentum provenga realmente de la persona, figura 4.13. Al tirar de la persona del cordel, el momentum del carro de la izquierda aumenta, pero el carrito de la derecha, con la persona encima, comenzará a moverse hacia la izquierda. Adquiere un momentum negativo o, dicho de otro modo, su momentum disminuye. Mientras la persona tira del cordel, el momentum fluye desde el carrito de la derecha (con la persona) hacia el de la izquierda. Este flujo es generado a través de los músculos de la persona. Ella actúa, en este caso, como “bomba de momentum”.

Ahora, podemos entender también el caso de la figura 4.12: la persona bombea el momentum desde la tierra y a través de la cuerda hacia el carrito. No podemos percibir el aumento del momentum negativo de la tierra, como tampoco podemos observar el aumento de su momentum positivo cuando un carrito es frenado gracias al rozamiento. Ob-



4.13 A través de la cuerda, la persona trasporta el momentum desde la derecha hacia la izquierda.

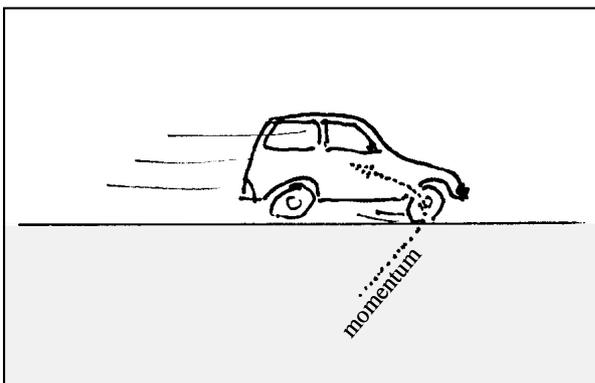


4.14 La persona está bombeando el momentum desde el carrito B al A.

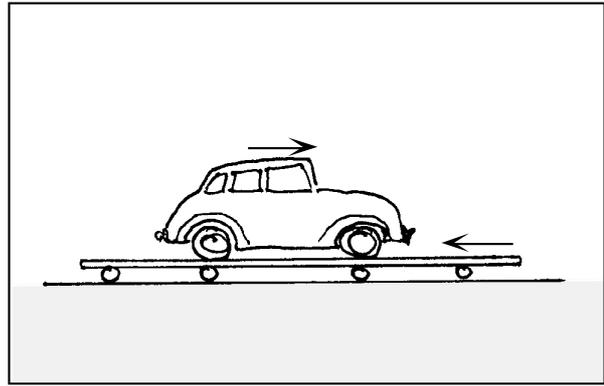
servemos algunos otros ejemplos para el bombeo del momentum de un cuerpo a otro: La persona de la figura 4.14 tira de los dos carritos A y B hacia sí, de manera que ambos son acelerados. El momentum de A aumenta, el de B incrementa su valor negativo, es decir, disminuye. El momentum de la persona situada en medio se mantiene en 0 Hy. De esta manera, la persona traslada momentum del carrito derecho al izquierdo. Además, la persona está parada en un monopatín, para que podamos estar seguros de que no hay momentum que viene o se va de la tierra.

Un automóvil se mueve con velocidad cada vez mayor, o sea su momentum aumenta. En este caso, el motor trabaja como bomba de momentum: traslada el momentum desde la tierra hacia el auto a través de las ruedas de propulsión que, en los automóviles más pequeños, son, generalmente, las ruedas delanteras, figura 4.15.

Un cochecito de juguete con control remoto está puesto sobre un pedazo de cartón colocado, a su vez, sobre unos rodillos, que pueden ser pajitas para beber o lápices, figura 4.16. Hacemos partir el autito de manera que se mueva hacia la derecha. Su momentum se incrementará durante este proceso. Pero, simultáneamente, el cartón se desplazará hacia la izquierda, lo que significa que su momentum se hace negativo o disminuye. Por lo tanto, el motor está bombeando el momentum desde el soporte al carrito.



4.15 El motor del coche bombea el momentum desde la tierra y a través de las ruedas de impulsión hacia el coche .



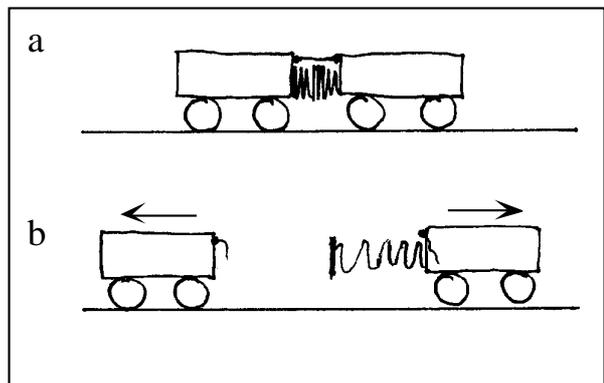
4.16 El motor del cochecito de juguete bombea el momentum desde la base de cartón hacia el cochecito.

Dos carritos deslizadores con cojín de aire están unidos mediante un hilo, figura 4.17. El hilo es tan corto que el tope se encuentra totalmente comprimido. Al cortar el hilo, los dos carritos se ponen en movimiento, el de la derecha hacia la derecha, el de la izquierda hacia la izquierda. Al carrito de la derecha se le habrá suministrado momentum (positivo); el de la izquierda perderá momentum (positivo). En este caso, el resorte actúa como bomba de momentum. Al distenderse traslada momentum desde el carrito de la izquierda al de la derecha.

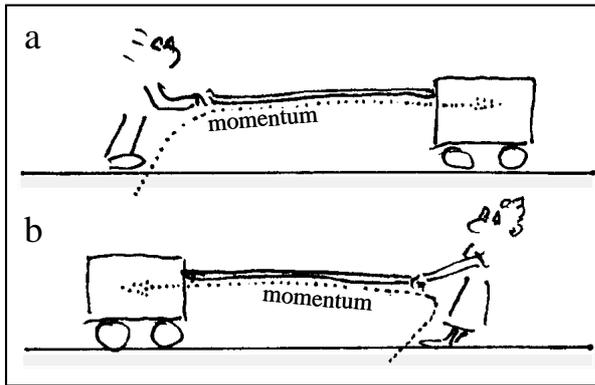
4.4 Conductores y no conductores de momentum

Acabamos de ver que el momentum puede ser trasladado desde un cuerpo A hacia otro cuerpo B. También podemos decir que el momentum *fluye* de A a B o que existe un *flujo* (o una corriente) de momentum entre los cuerpos A y B.

Una condición fundamental para que pueda fluir el momentum desde A a B es la existencia de una conexión; pero no puede ser una conexión cualquiera: tiene que ser permeable para el momentum o tiene que ser un *conductor* del momentum. ¿Cómo son estas conexiones conductoras de momentum? ¿Cuáles son los objetos conductores del momentum y cuáles no lo son?



4.17 El resorte bombea el momentum del carrito de la izquierda al de la derecha.



4.18 A través de la barra, el momentum fluye desde la tierra hacia el carrito. (a) El momentum fluye, dentro de la barra, hacia la derecha. (b) El momentum fluye hacia la izquierda.

En la figura 4.18a, la persona empuja un carrito mediante una barra. El carrito empieza a moverse con mayor velocidad, su momentum aumenta. Por lo tanto, la persona bombea momentum desde la tierra hacia el carrito. En la barra, el momentum fluye de izquierda a derecha.

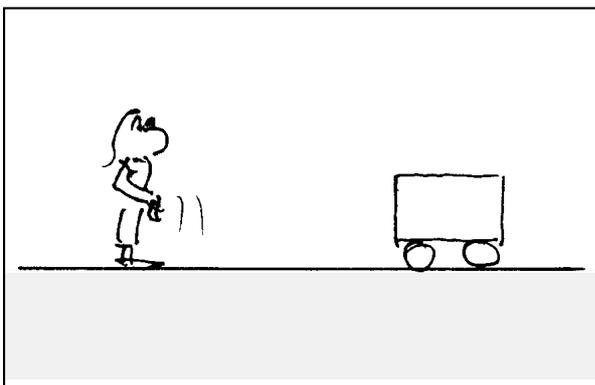
En la figura 4.18b, también se traslada momentum al carrito, pero en este caso, la persona tira del carrito con ayuda de la barra. El momentum fluye, por lo tanto, a través de la barra desde la derecha hacia la izquierda. En estas dos situaciones podemos afirmar que la barra es un conductor de momentum. Está claro que no importa ni su forma exacta ni el material del cual está hecha. Lo importante es que sea un material sólido. Concluimos entonces:

Los cuerpos sólidos conducen el momentum.

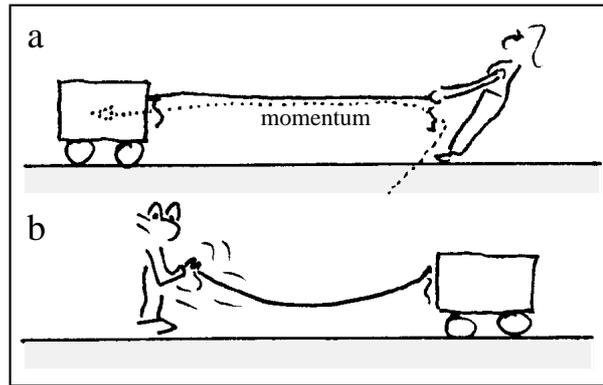
La figura 4.19 muestra a una persona un tanto ingenua. Trata de poner en movimiento el carrito empujando el aire y con la esperanza de que el aire conduzca el momentum hacia el carrito. Finalmente, podemos convencerla:

El aire no conduce el momentum.

Más tarde, veremos que esta afirmación tiene validez limitada. Pero en todo caso se utiliza en el deslizador con cojín de aire: el aire entre el carrito y el riel impide el flujo del momentum desde el deslizador hacia el riel.



4.19 La persona está tratando, sin éxito, de hacer pasar el momentum a través del aire.



4.20 A través de la cuerda, el momentum puede desplazarse de derecha a izquierda (a), pero no de izquierda a derecha (b).

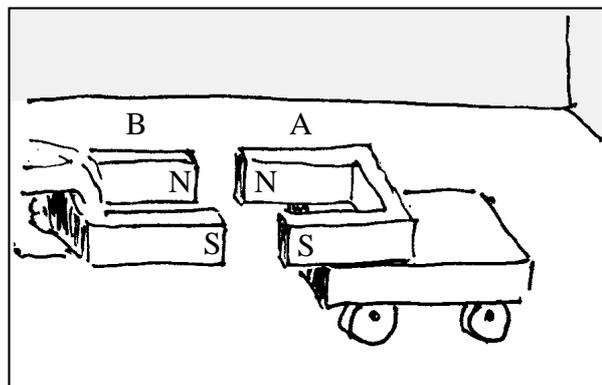
En la figura 4.20 se está examinando la capacidad de conducir el momentum que tiene una cuerda. Podemos constatar que el momentum fluye sin problema de derecha a izquierda, figura 4.20a, pero que no lo hace, en absoluto, de izquierda a derecha, figura 4.20b.

Las cuerdas conducen el momentum únicamente en un solo sentido.

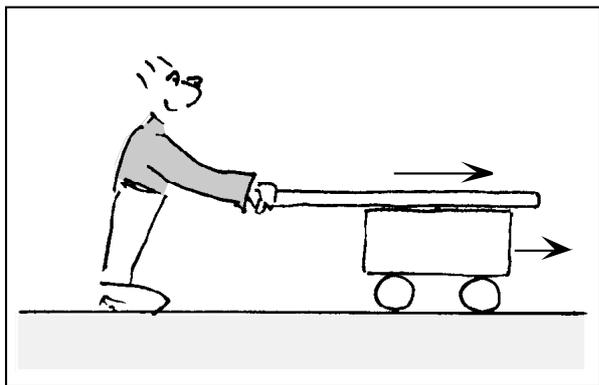
Hagamos ahora otro experimento, más difícil de interpretar que los anteriores. En un carrito colocamos un imán A, figura 4.21. A él le acercamos un segundo imán B, de manera que se enfrenten los polos del mismo nombre: norte con norte, sur con sur. Al acercar suficientemente el imán B con el imán A, el carrito empezará a moverse, su momentum aumentará. Bombeamos, entonces, el momentum desde la tierra y a través del imán B y del imán A hacia el carrito. ¿Pero cómo pasó el momentum desde el imán B al A? La observación del fenómeno nos permite concluir que debe existir alguna conexión entre los dos imanes. Debe haber algún "ente" invisible que conduce el momentum. Llamamos *campo magnético* a esta cosa que rodea a cada polo magnético.

Campos magnéticos conducen el momentum.

Figura 4.22 muestra una persona que traslada momentum a un carrito, moviendo una barra por encima de la cara superior. La barra se desliza sobre el carrito, ya que no está unida a él. De esta manera, se puede trasladar, efectivamente, algo de mo-



4.21 Entre los dos imanes existe un campo magnético. Este campo conduce el momentum.



4.22 Traspaso del momentum mediante el rozamiento

momentum al carrito, pero, evidentemente, no se trata de una manera muy eficaz. Constatamos que el traslado de momentum es mejor cuanto mayor sea el rozamiento entre la barra y el carrito. Al deslizarse fácilmente la barra sobre el carrito, el flujo de momentum es mínimo. Si el rozamiento es grande, es decir, si la barra y el carrito tienen, por ejemplo, una superficie muy áspera, la transmisión de momentum es buena.

Concluimos:

Al haber rozamiento entre dos objetos, el momentum se traslada del uno al otro. Cuanto mayor sea el rozamiento, mejor será el traslado del momentum.

En el fondo, siempre supusimos la validez de esta regla: para que el momentum de un objeto no se pierda en la tierra, tenemos que evitar la existencia de una conexión conductora de momentum entre el objeto y la tierra, o sea tenemos que evitar, en lo posible, el rozamiento.

El dispositivo más eficaz para disminuir el rozamiento entre un objeto y la tierra es la rueda.

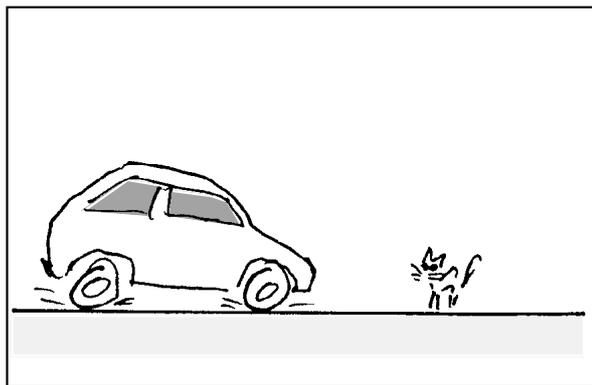
Las ruedas sirven para el aislamiento del momentum.

Pero existen también otros métodos:

El aire en los deslizadores con cojín de aire y también en los aviones y helicópteros, los patines de los trineos y el agua en botes y barcos.

Sin embargo, las ruedas sirven verdaderamente de aislante del momentum cuando pueden girar con absoluta libertad. Las ruedas impulsadoras del coche, por ejemplo, no son aislantes del impulso, porque están conectadas a través del motor con el chasis, para que el motor pueda bombear momentum desde la tierra hacia el coche.

En muchas ocasiones es deseable que el momentum contenido en un móvil pueda ser eliminado rápidamente, figura 4.23. Para este fin, los móviles disponen de frenos. Al frenar, el rozamiento de las ruedas es aumentado fuertemente; las ruedas se transforman en buenos conductores de momentum y el momentum del vehículo fluye rápidamente hacia la tierra. El freno es, entonces, un conductor de momentum que se puede “abrir y ce-



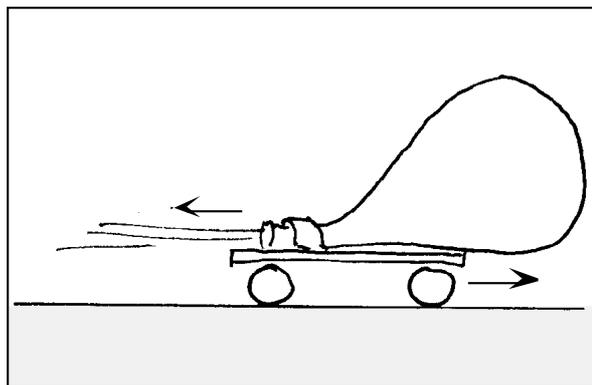
4.23 El móvil debe perder rápidamente su momentum.

rrar”, una especie de válvula o interruptor para el flujo de momentum.

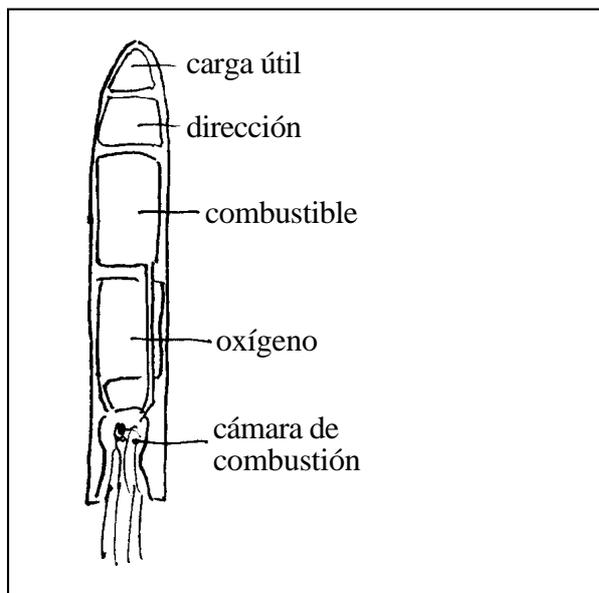
Un automóvil que se mueve rápidamente no pierde momentum únicamente a través del rozamiento de sus ruedas, sino también por el rozamiento entre la superficie exterior del móvil y el aire. En velocidades superiores a los 80 km/h, este fenómeno constituye, incluso, la mayor fuente de pérdidas. En este caso, el momentum fluye, en primer término, hacia el aire. Podemos percibir el mayor contenido de momentum del aire a través de su fuerte movimiento inmediatamente después del paso del coche. Poco a poco, el aire entregará su momentum a la tierra, y nuevamente mediante el rozamiento.

Podemos demostrar el contenido de momentum del aire mediante el experimento de la figura 4.24. En un carrito fijamos un globo de aire inflado. Si abrimos el globo y soltamos al mismo tiempo el carrito, éste empezará a moverse. El globo, al contraerse, empuja el aire hacia la izquierda. Dicho de otra manera: el globo bombea el momentum desde el aire hacia el carrito.

La propulsión del carrito de la figura 4.24 funciona, en el fondo, de la misma manera que la de un cohete. También el cohete obtiene el momentum a través de la expulsión de un gas a alta velocidad. La mayor parte del cohete está ocupada por dos depósitos, figura 4.25. Uno contiene el combustible, por ejemplo, hidrógeno líquido, el otro contiene oxígeno líquido. La combustión del hidrógeno produce vapor de agua a alta presión, que es ex-



4.24 El aire expulsado obtiene momentum negativo, el carrito momentum positivo.



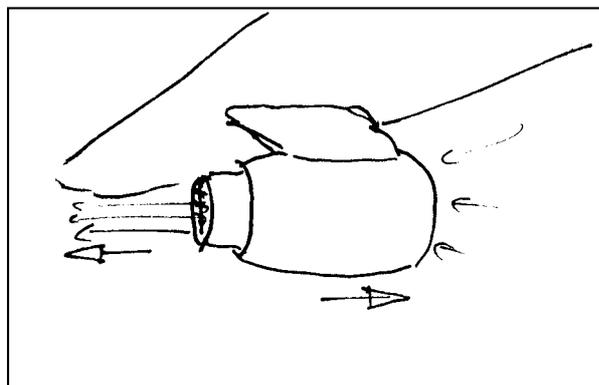
4.25 Esquema de un cohete

pulsado a gran velocidad y se lleva el momentum. De esta manera, el cohete obtiene momentum de signo contrario.

Los grandes aviones de pasajeros son impulsados mediante motores de propulsión a chorro. El motor de propulsión a chorro funciona básicamente de la misma manera que nuestro carrito con globo o un cohete, figura 4.26. En este caso, se utiliza queroseno como combustible. No se necesita llevar oxígeno, ya que el avión se mueve dentro del aire que contiene suficiente oxígeno. El motor de propulsión a chorro aspira, en la parte anterior, el aire necesario para la combustión del queroseno y expulsa, hacia atrás, los productos de la combustión, es decir vapor de agua y dióxido de carbono. En este proceso, se traslada al avión el valor negativo del momentum llevado por los gases de escape.

Ejercicios

1. Las cuerdas conducen el momentum sólo hacia la izquierda y no hacia la derecha. Idea algún dispositivo que conduzca el momentum sólo hacia la derecha y no hacia la izquierda.



4.26 Motor de propulsión a chorro

2. En una calle cubierta de hielo, el conductor de un coche frena bruscamente. ¿Qué pasará? Al frenar, la capacidad para conducir el momentum tiene gran importancia. ¿Qué puedes decir al respecto en este caso de la calle con hielo?

3. En una calle cubierta de hielo, el conductor de un coche intenta arrancar bruscamente. ¿Qué pasará en este caso?

4. Un barco empieza a moverse. ¿Cómo le llega el momentum al barco?

5. Un barco se mueve con velocidad constante, es decir, su contenido de momentum no varía. ¿Dónde queda el momentum que el motor bombea constantemente hacia el barco?

6. Describe las siguientes situaciones indicando lo que pasa con el momentum:

- El automóvil arranca.
- El automóvil se mueve lentamente en neutro.
- El automóvil frena.
- El automóvil se mueve con alta velocidad constante.

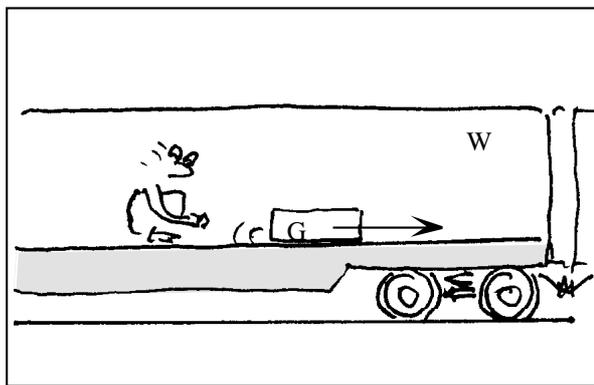
4.5 El sentido de los flujos de momentum

El experimento siguiente lo podemos efectuar sólo mentalmente, ya que necesitamos un tren en movimiento.

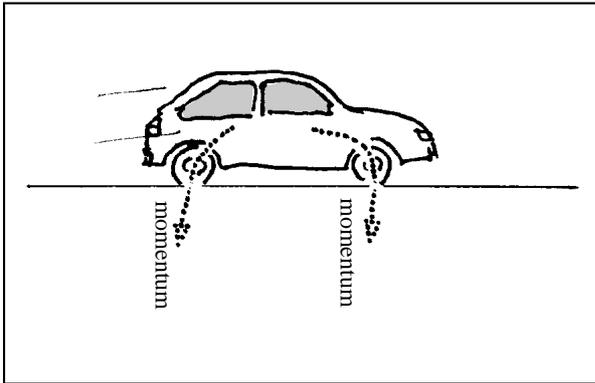
En un carro W que se mueve hacia la derecha, figura 4.27, se lanza al suelo un objeto G, de manera que se deslice por el suelo hacia la derecha. Inmediatamente después del lanzamiento, la velocidad de G es mayor que la del tren. Sin embargo, el objeto se detiene rápidamente, es decir, no se mueve más con relación al tren. También podemos decir que ahora se mueve a la misma velocidad que la del tren. Durante el deslizamiento, el momentum de G ha disminuido, ha existido un flujo desde G hacia W.

Efectuemos otro lanzamiento de G, pero ahora debe deslizarse hacia la izquierda. En este caso, la velocidad inicial de G es menor que la del tren. Nuevamente, las dos velocidades se igualan rápidamente, pero, ahora, el momentum de G aumenta durante el deslizamiento. Existe, por lo tanto, un flujo de momentum desde el carro W hacia el objeto G.

¿Notaste que existe una regla sencilla para determinar el flujo del momentum? El momentum flu-



4.27 Dentro de un carro de ferrocarril, un objeto se desliza por el suelo.



4.28 El auto se mueve con el motor apagado hasta detenerse. El momentum fluye desde el objeto con mayor al de menor velocidad.

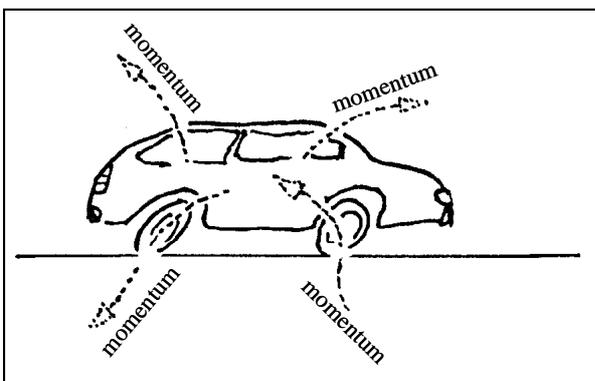
ye en los dos casos desde el cuerpo con mayor velocidad hacia el cuerpo con menor velocidad; en el primer caso desde G hacia W y en el segundo caso desde W hacia G. Esta regla es siempre válida para los casos en que exista un flujo de momentum que se deba al rozamiento. También en el caso del auto que se mueve con el motor apagado hasta detenerse, en la figura 4.28, el momentum fluye del cuerpo con mayor velocidad (el auto) hacia el cuerpo con menor velocidad (la tierra con velocidad 0 km/h).

Siempre que queramos establecer un flujo de momentum en sentido contrario, es decir, del cuerpo con menor velocidad al cuerpo con mayor velocidad, necesitamos una bomba de momentum.

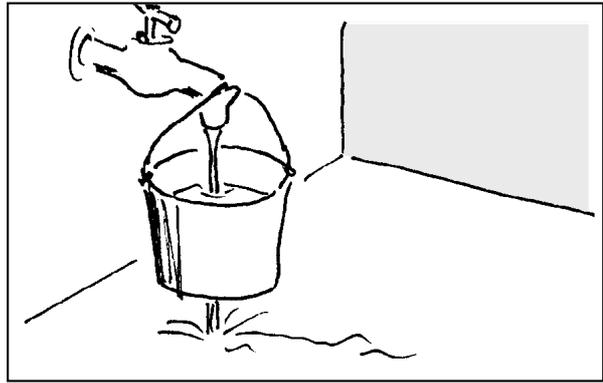
Podemos establecer, entonces, la siguiente regla:

El momentum fluye, por sí solo, desde un cuerpo con mayor velocidad hacia otro con menor velocidad. Una bomba de momentum (un motor, el hombre) produce un flujo de momentum en sentido contrario.

Hagamos, finalmente, el balance del momentum para un auto que se mueve por una autopista con el acelerador a fondo y velocidad constante, figura 4.29: el motor bombea, constantemente, momentum hacia el auto. Sin embargo, el momentum del auto no aumenta, porque todo el momentum suministrado por el motor se devuelve nuevamente a través del rozamiento hacia el aire y la tierra.



4.29 El auto se mueve con velocidad constante. Todo el momentum que el motor bombea hacia el auto es traspasado nuevamente al ambiente debido al rozamiento.

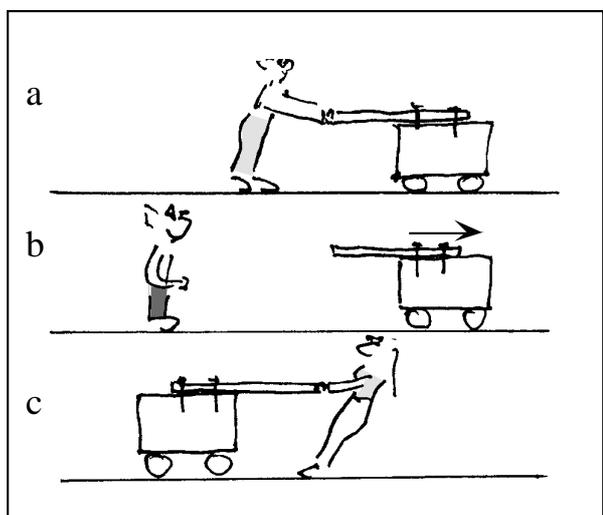


4.30 A través del agujero se escapa la misma cantidad de agua que la que se introduce mediante el grifo. La cantidad de agua en el balde se mantiene constante.

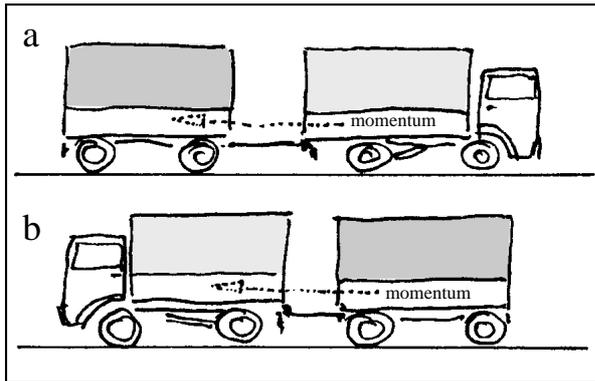
Comparemos esta situación con otra, en que el momentum es sustituido por el agua, figura 4.30. El balde con el agujero corresponde al auto. El balde pierde agua y el motor pierde momentum. Constantemente, se agrega tanta agua al balde como la que sale por el agujero, y la cantidad total de agua en el balde no cambia .

4.6 Tensión de presión y de tracción

En la figura 4.31a, una persona pone en movimiento un carrito. A través de la barra, el momentum fluye de izquierda a derecha. En la figura 4.31b, el carrito sigue rodando por sí solo. Aparte de la pérdida por el rozamiento, su momentum no cambiará. Por lo tanto, por la barra en la figura 4.31b no fluye momentum. En la figura 4.31c, el momentum fluye de derecha a izquierda. Ponte ahora en el lugar de la barra. ¿Sentirías alguna diferencia en los tres casos? ¡Por supuesto! Podemos imaginarnos los brazos de la persona como la prolongación de la barra y, a través de los brazos, la persona sentirá una diferencia en los tres casos. En el primero, siente una tensión de presión, en el tercero, una tensión de tracción, y en el segundo, ni presión ni tracción.



4.31 (a) En la barra el momentum fluye hacia la derecha. (b) En la barra no hay corriente de momentum. (c) En la barra el momentum fluye hacia la izquierda.



4.32 El camión con su remolque se mueve hacia la derecha (a) y hacia la izquierda (b). En ambos casos se aplica una tensión de tracción sobre la barra de enganche y el momentum fluye hacia la izquierda.

Podemos trasladar esta afirmación a la barra: en el primer caso se encuentra bajo una tensión de presión; en el segundo, no hay tensión y en el tercero, está bajo tensión de tracción.

Tenemos, entonces, la siguiente regla:

Flujo de momentum hacia la derecha: tensión de presión.

Flujo de momentum hacia la izquierda: tensión de tracción.

Probemos la validez de esta regla con otro ejemplo: la figura 4.32a muestra un camión con remolque que acaba de arrancar. El motor del camión bombea momentum desde la tierra hacia el camión y, a través del enganche, hacia la izquierda al remolque. Sabemos que la barra de enganche se encuentra bajo tensión de tracción, de acuerdo con nuestra regla.

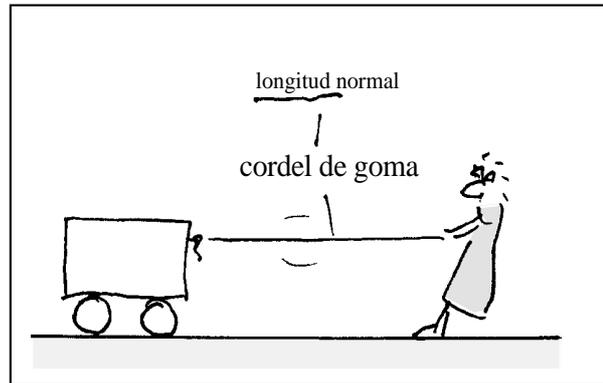
Observemos ahora el camión con su remolque que arranca hacia la izquierda, figura 4.32b. En este caso, el motor bombea momentum negativo al camión y al remolque, es decir, le extrae momentum positivo. Por lo tanto, el momentum positivo fluye, a través de la barra del enganche, hacia la izquierda. Esta barra se encuentra, evidentemente, bajo tensión de presión. Nuestra regla mantiene su validez.

La barra no nos muestra si se encuentra bajo tensión de presión o de tracción o bajo tensión alguna, es decir, no podemos determinar el sentido del flujo del momentum en ella. Sin embargo, existen objetos que nos muestran claramente el estado de tensión en que se encuentran: todos los objetos que pueden ser deformados elásticamente, tales como cintas de goma o resortes de acero. Tales objetos se alargan con una tensión de tracción y se acortan con una tensión de presión. Podemos determinar, por lo tanto, en qué sentido fluye en ellos el momentum, figuras 4.33 y 4.34.

Resumamos:

Alargamiento: tensión de tracción, flujo del momentum hacia la izquierda.

Acortamiento: tensión de presión, flujo del momentum hacia la derecha.



4.33 A través de la goma fluye una corriente de momentum hacia la izquierda. La goma se encuentra bajo tensión de tracción y se alarga.

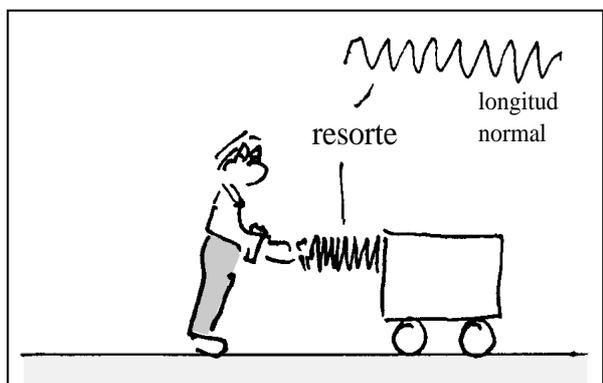
Ejercicios

1. Un coche que se mueve hacia la izquierda, frena bruscamente. ¿Desde dónde y hacia dónde fluye el momentum? ¿Se cumple la regla según la cual el momentum fluye por sí solo desde un cuerpo con mayor velocidad hacia otro con menor velocidad?
2. Una persona empuja un carrito, moviéndolo hacia la izquierda. En sus brazos existirá, entonces, una tensión de presión. ¿En qué sentido fluye el momentum en sus brazos?
3. Un camión con remolque se está moviendo hacia la derecha con velocidad constante. ¿Bajo qué tensión (presión o tracción) se encuentra la barra del enganche? Dibuja un esquema del flujo de momentum.

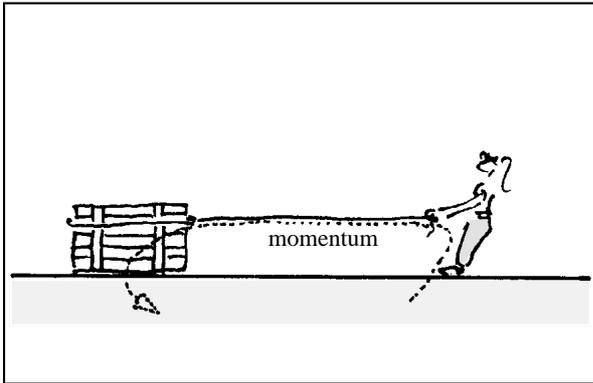
4.7 Circuitos de flujos de momentum

Puede ocurrir que, en algún lugar, exista un flujo de momentum pero que, sin embargo, no haya variación de la cantidad de momentum. La figura 4.35 muestra un ejemplo: una persona arrastra una caja, haciéndola deslizar por el suelo con velocidad constante.

En vez de la caja, la persona también podría arrastrar un carrito, pero la caja tiene la ventaja de mostrarnos claramente en qué parte se ejerce el rozamiento: en la superficie de contacto con el suelo. En las ruedas hay rozamiento en los soportes de los ejes, en los neumáticos y en la superficie de contacto con el suelo.



4.34 A través del resorte, el momentum fluye hacia la derecha. El resorte se acorta.



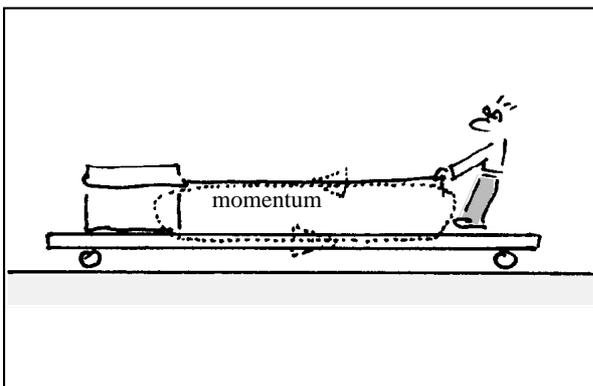
4.35 A pesar de que existe una corriente de momentum, éste no se acumula en ninguna parte.

Nos planteamos ahora la pregunta de siempre: ¿Cuál es el camino del momentum? Esperamos que la respuesta sea fácil para ti: la persona bombea el momentum desde la tierra y, a través de la cuerda, hacia la caja. Desde la caja y debido al roce, el momentum vuelve a la tierra. Podríamos afirmar, entonces, que existe un circuito de momentum, aunque no conozcamos muy bien su camino de vuelta hacia la tierra.

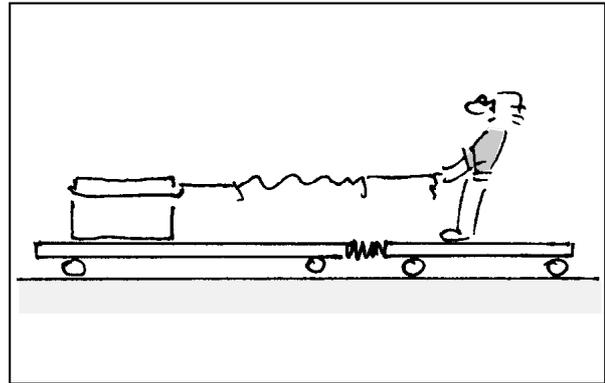
Nuevamente, podríamos aclarar esta situación comparándola con un flujo de agua. ¿Sabes cómo?

La figura 4.36 muestra una variación del experimento de la figura 4.35: ahora la caja no se desliza sobre la tierra, sino sobre una tabla con rodamientos. En este caso, el camino del momentum se puede reconocer más fácilmente. Debido a la existencia de los rodamientos, el momentum no puede pasar de la tabla a la tierra y la persona tampoco puede bombear el momentum desde la tierra. Entonces, la persona bombea el momentum desde la tabla, este momentum fluye a través de la cuerda hacia la caja y, desde la caja, vuelve a la tabla. En la tabla se traslada nuevamente hacia la derecha, hasta llegar a la persona. El momentum describe, por lo tanto, un verdadero circuito, en el cual el camino es perfectamente reconocible en todas sus partes. Decimos, entonces, que el momentum forma un *circuito*.

Variando otra vez el experimento, figura 4.37, po-



4.36 Circuito cerrado de momentum



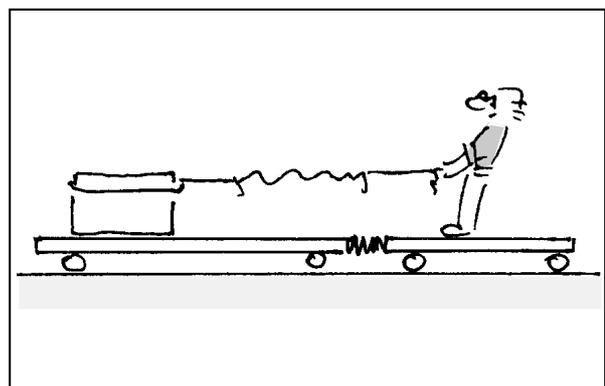
4.37 Los resortes indican el sentido de la corriente de momentum.

demos percibir claramente que en la cuerda el momentum fluye hacia la izquierda y en la tabla, hacia la derecha. Estos resortes nos muestran el sentido del flujo de momentum. El resorte de la cuerda está extendido, está bajo tensión de tracción, o sea, el momentum fluye hacia la izquierda. El resorte entre las dos tablas está comprimido, bajo tensión de presión, o sea, el momentum fluye hacia la derecha.

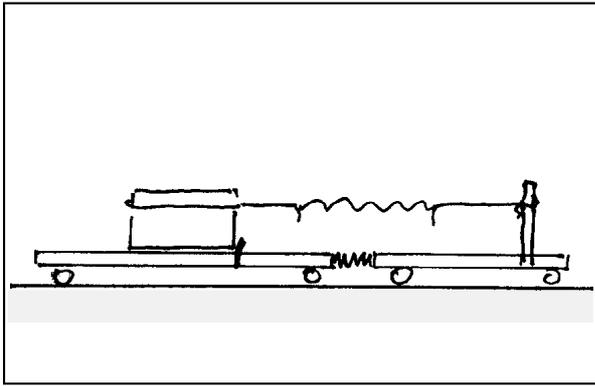
El momentum puede fluir en un circuito cerrado. En este caso no aumenta ni disminuye en ningún lugar. Una parte del circuito del momentum se encuentra bajo tensión de tracción, la otra, bajo tensión de presión.

Cambiamos ahora el experimento, esta vez en dos etapas: primeramente, bloqueamos la caja, figura 4.38. Al tirar la persona, la caja ya no se mueve. Constatamos que, en realidad, ya no necesitamos a la persona. Simplemente podemos fijar de alguna manera la cuerda tensada en el lado derecho, figura 4.39. La cuerda sigue bajo tensión de tracción y la tabla bajo tensión de presión. Esto significa que el flujo del momentum sigue circulando, pero sin que haya movimiento y a pesar de que ya no exista "bomba de momentum".

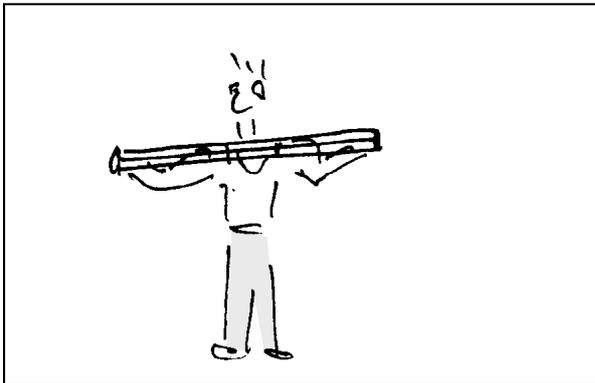
Te sorprenderá que haya algo que pueda fluir sin que exista propulsión alguna. En el capítulo 3 aprendimos, justamente, que se necesita una propulsión para que se produzca algún flujo. Ahora vemos que esta regla no es siempre válida. Existen



4.38 La caja no se mueve, pero de todas maneras existe un flujo de momentum.



4.39 Corriente de momentum sin impulso.

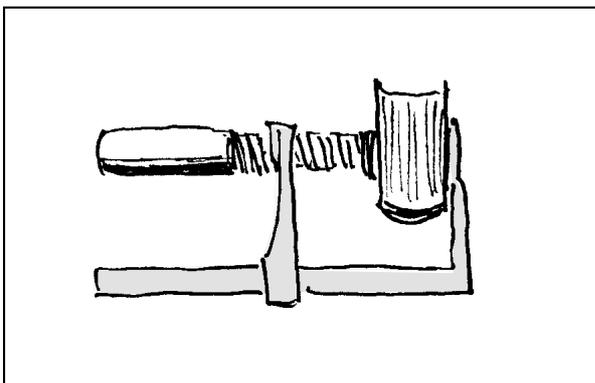


4.40 Circuito cerrado de momentum

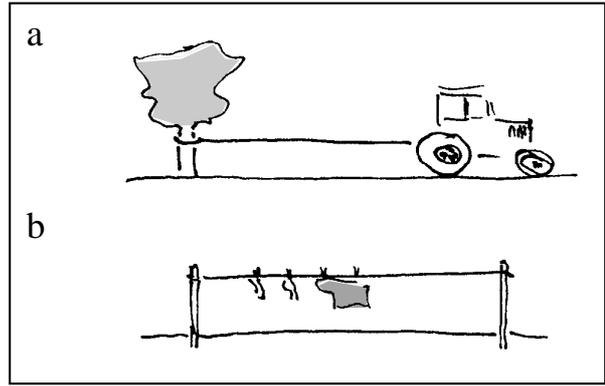
flujos sin propulsión. El hecho de que no se necesite propulsión significa, evidentemente, que no hay resistencia que se oponga al flujo.

Más tarde veremos que también las corrientes eléctricas necesitan, por regla general, alguna propulsión. Sin embargo, se conocen conductores eléctricos sin resistencia, los llamados supraconductores. En un circuito eléctrico confeccionado con supraconductores, la corriente eléctrica fluye sin propulsión.

Circuitos eléctricos sin resistencia son muy escasos; circuitos de impulso sin resistencia, en cambio, se encuentran frecuentemente. Las figuras 4.40 y 4.41 muestran dos ejemplos.



4.41 Circuito cerrado de momentum



4.42 Con respecto a los ejercicios 1 y 2

Ejercicios

1. Figura 4.42a muestra un tractor que trata de arrancar un árbol. Dibuja el camino del flujo del momentum correspondiente.
2. Figura 4.42b muestra un cordel para colgar ropa. Dibuja el camino del flujo del momentum correspondiente. ¿En qué parte hay tensión de tracción y en qué parte tensión de presión?
3. ¿Cómo se podría realizar un flujo de materia sin resistencia? ¿Existe algo así en la naturaleza?

4.8 La intensidad del flujo de momentum

Desde el vehículo de tracción (figura 4.43) se desplaza un flujo constante de momentum hacia el acoplado: a través de la barra de enganche fluye un número determinado de Huygens en cada segundo. La cantidad de momentum que fluye a través de un conductor en cada unidad de tiempo se llama *intensidad del flujo de momentum*.

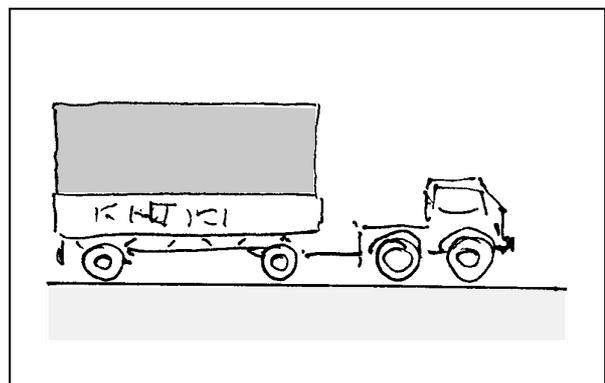
$$\text{intensidad del flujo de momentum} = \frac{\text{momentum}}{\text{tiempo}}$$

Podemos simplificar esta ecuación, utilizando los símbolos que corresponden a las diferentes magnitudes:

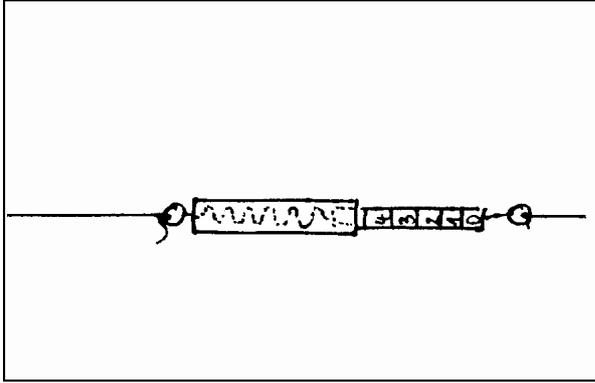
p = momentum

F = intensidad del flujo de momentum

t = tiempo



4.43 Desde el vehículo de tracción se desplaza, hacia el acoplado, un flujo constante de momentum.



4.44 Dinamómetro

Entonces tenemos:

$$F = \frac{p}{t}$$

Si, en la figura 4.43. fluyen, por ejemplo, en cada segundo 500 Hy, F será igual a 500 Hy/s.

Para la unidad Hy/s se usa la abreviación Newton (N):

$$N = \frac{\text{Hy}}{\text{s}}$$

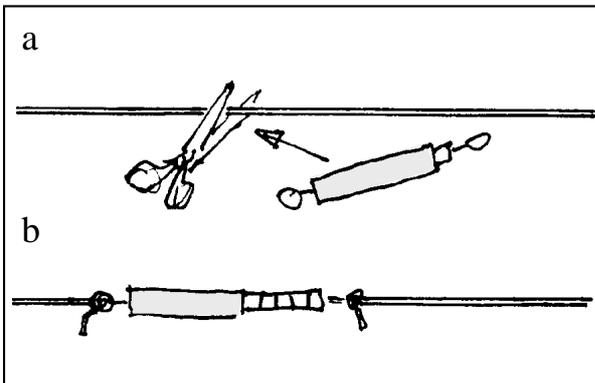
Podemos escribir, entonces:

$$F = 500 \text{ N}$$

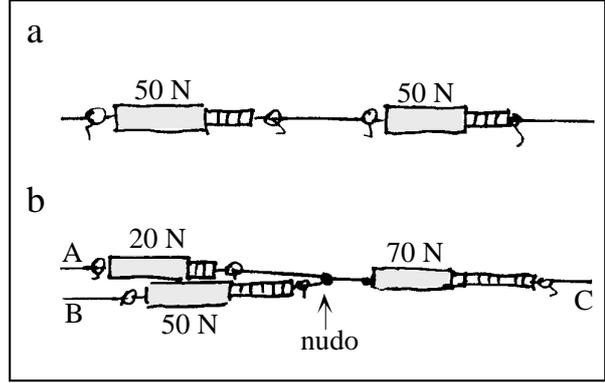
La unidad de la intensidad del flujo de momentum debe su nombre a Isaac Newton (1643-1727), quien le diera a la mecánica la forma en que aún hoy en día se enseña. Entre otras, la ecuación $F = p/t$ se debe a Newton.

Se pueden medir fácilmente las intensidades del flujo de momentum con un llamado dinamómetro (ver figura 4.44). Un dinamómetro consta, esencialmente, de un resorte de acero que se alarga con el aumento de la intensidad del flujo de momentum que se desplaza a través de él. La escala está calibrada en la unidad Newton.

La figura 4.45 muestra el uso de un dinamómetro. Queremos medir la intensidad del flujo de momentum, que se desplaza a través del cordel de la figura 4.45a. Cortamos el cordel en cualquier par-



4.45 (a) Queremos medir la intensidad del flujo de momentum en un cordel. (b) Cortamos el cordel y unimos sus terminales con el dinamómetro.



4.46 (a) El flujo de momentum pasa, sucesivamente, a través de los dos instrumentos de medición. (b) El flujo de momentum se divide.

te y unimos los terminales con los ganchitos del dinamómetro, figura 4.45b.

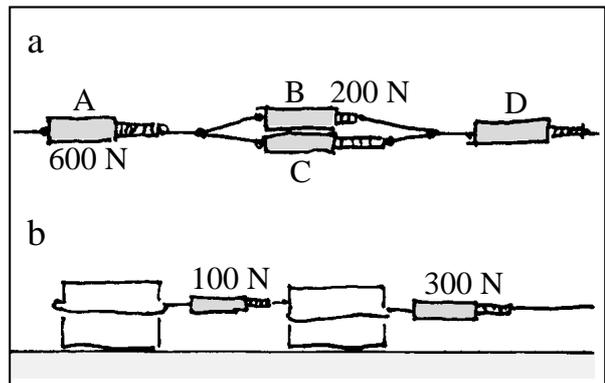
En la figura 4.46a, se mide dos veces seguidas la intensidad del mismo flujo de momentum. Ambos dinamómetros marcan lo mismo y cada uno de ellos indica lo que marcaría un único dinamómetro.

Igual que en las corrientes de agua, existen ramificaciones de los flujos de momentum. La figura 4.46.b muestra un ejemplo. En este caso, la suma de las intensidades en los dos cordeles A y B tiene que ser igual a la del cordel C. Acabamos de aplicar, nuevamente, la regla de los nudos que tú conoces de las corrientes de agua del capítulo 3.5.

Con respecto a un nudo, los flujos entrantes tienen, en conjunto, la misma intensidad que los flujos salientes.

Ejercicios

1. A un carro con muy poco roce le llega un flujo de momentum de intensidad constante. Después de 10 segundos se ha acumulado la cantidad de momentum de 200 Hy. ¿Cuál era la intensidad del flujo correspondiente?
2. Al partir un camión con su acoplado, se traslada un flujo de momentum de 6000 N a través del enganche hacia el acoplado. ¿Qué cantidad de momentum tiene el acoplado después de 5 segundos, si no consideramos las posibles pérdidas por el roce?
3. ¿Cuánto marcan los dinamómetros C y D en la figura 4.47a?



4.47 (a) Con respecto al ejercicio 3. (b) Con respecto al ejercicio 4

4. Las dos cajas de la figura 4.47b son tiradas a ras de suelo con velocidad constante. ¿Qué intensidad tiene el flujo de momentum que pasa de la caja izquierda a la tierra? ¿Qué intensidad tiene el que pasa de la caja derecha a la tierra?

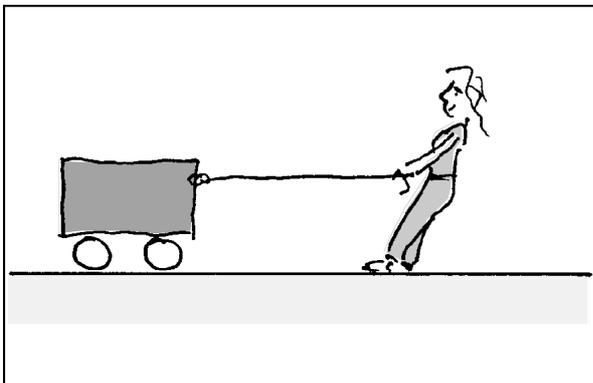
5. A un móvil, cuyo roce es despreciable, le llega un flujo de momentum constante de 40 N. Representa gráficamente el momentum en función del tiempo.

4.9 La fuerza

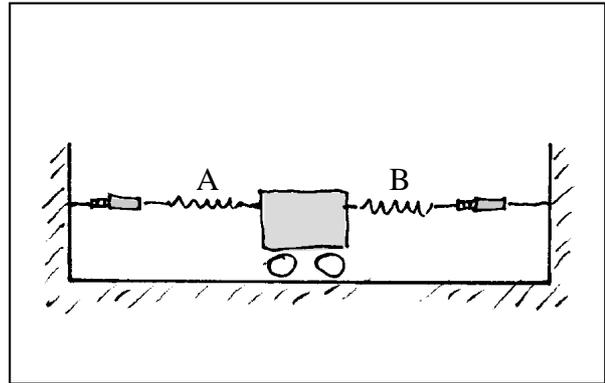
La única finalidad de este párrafo es la de introducir una palabra nueva para un concepto bien conocido.

El nombre de intensidad del flujo de momentum para la magnitud F sólo existe desde comienzos de este siglo, pero la magnitud misma se conoce desde los tiempos de Newton, es decir, desde hace unos 300 años. Sin embargo, en ese entonces se la designaba de otra manera: se llamaba *fuerza*. Aun hoy en día se utiliza ampliamente el nombre de fuerza para la magnitud F ; en el fondo es mucho más común que el nombre de flujo de momentum. Es necesario, por lo tanto, que nos acostumbremos a su uso. Pero existe un gran problema: a pesar de que “fuerza” determina la misma magnitud física que “flujo de momentum”, los dos conceptos se manejan de manera muy diferente.

Explicaremos, ahora, el uso del modelo de fuerza mediante las figuras 4.48 y 4.49. En 4.48, una persona tira un carrito sin roce, de manera que empieza a moverse hacia la derecha. Recordemos, brevemente, la explicación del modelo de los flujos de momentum: la persona bombea el momentum desde la tierra y a través del cordel hacia el carrito. Mediante este proceso, la cantidad de momentum del carrito aumenta. Aplicando el modelo de fuerza se explica así: sobre el carrito actúa una fuerza. De ese modo, aumenta la cantidad de momentum del carrito. La explicación de la figura 4.49 es algo más difícil: dos resortes, A y B, están tirando el carrito, el A hacia la izquierda y el B hacia la derecha. Los dos dinamómetros marcan, evidentemente, lo mismo; supongamos, 50 N. Ahora, la explicación según el modelo de los flujos de momentum dice: desde la tierra fluye un flujo de mo-



4.48 La persona aplica una fuerza sobre el carrito. De ese modo, el momentum del carrito varía.



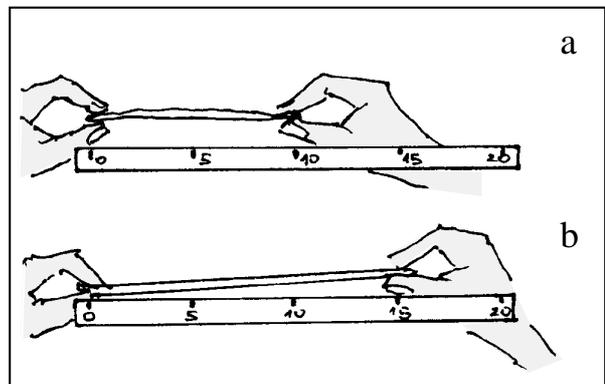
4.49 El resorte A aplica, sobre el carrito, una fuerza dirigida hacia la izquierda; el resorte B aplica una fuerza dirigida hacia la derecha. Al tener las dos fuerzas la misma magnitud, el momentum del carrito no varía.

mentum de 50 N a través del resorte B y desde la derecha hacia el carrito, y desde él, a través del resorte A, vuelve a la tierra. La explicación, según el modelo de fuerza, es la siguiente: el resorte A aplica sobre el carrito una fuerza de 50 N, dirigida hacia la izquierda; el resorte B aplica la misma fuerza de 50 N hacia la derecha. Por ser las dos fuerzas de igual magnitud, pero aplicadas en sentido contrario, el momentum del carrito no varía.

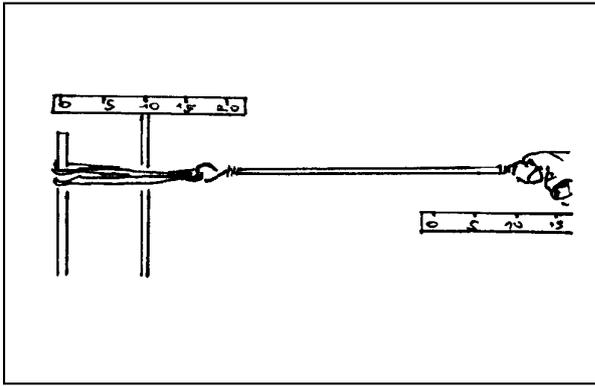
4.10 La medición de la intensidad del flujo de momentum

Construyamos, nosotros mismos, un instrumento de medición de la intensidad del flujo de momentum, o sea un dinamómetro. Supongamos que aún no se ha inventado este instrumento ni definido la unidad de medición de la intensidad del flujo.

Comencemos fijando nuestra propia unidad de medición. Necesitamos una gran cantidad de elásticos absolutamente idénticos. Con una regla determinamos su longitud, pero sin tensarlos más allá de su longitud normal (figura 4.50a). Supongamos que encontramos 0,10 m. Por no existir tensión alguna, no pasa ningún flujo de momentum a través del elástico. Pues bien, lo estiramos hasta que alcance una longitud de 0,15 m, figura 4.50b. En ese momento, existe, evidentemente, un



4.50 Determinamos una unidad para la intensidad del flujo de momentum. (a) El elástico se encuentra estirado pero no tenso.



4.51 La cinta elástica ("expandera") se calibra con la ayuda de "unidades de elástico".

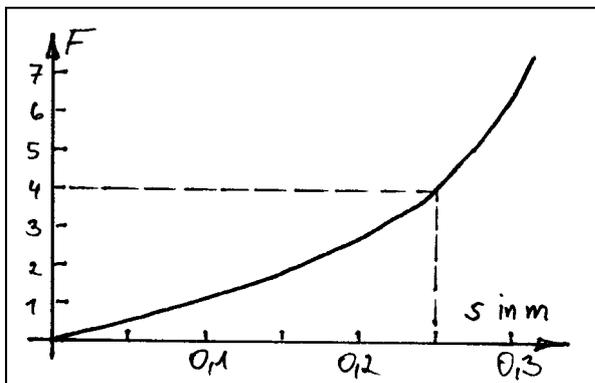
flujo de momentum. Declaremos su intensidad como nuestra unidad de medición (por tener el elástico dos filamentos de goma paralelos, en cada uno de ellos fluye la mitad de esta unidad de intensidad del flujo de momentum).

Utilizando más elásticos, podemos, pues, proporcionarnos tantas unidades de flujo como queramos. En otras palabras, podemos conseguir múltiplos de nuestra unidad de medición. Al utilizar, por ejemplo, tres elásticos juntos, tendremos en ellos tres unidades de intensidad de flujo de momentum.

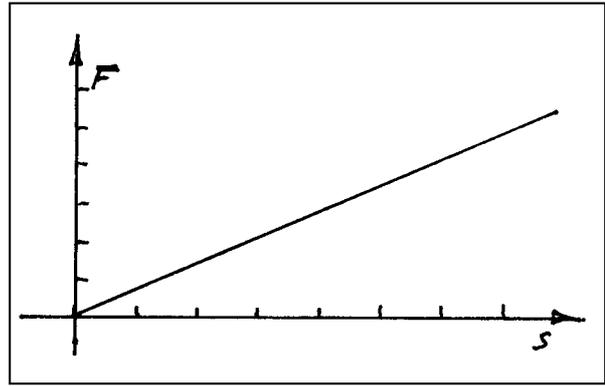
Con la ayuda de nuestros elásticos, podemos calibrar ahora cualquier otro objeto elástico como, por ejemplo, la cinta elástica de la figura 4.51. Para este fin, producimos en la cinta elástica un flujo de una, dos, tres y más unidades de intensidad de flujo y medimos, en cada caso, la variación de su longitud comparativamente con la longitud inicial, sin ser tensado.

La figura 4.52 muestra el gráfico de la intensidad del flujo de momentum en función de esta elongación. Este gráfico representa, al mismo tiempo, la curva de calibración de la cinta elástica. Si ahora queremos medir alguna intensidad de flujo de momentum, podemos prescindir del procedimiento anterior, un tanto engorroso, y utilizar, en cambio, la cinta elástica.

Queremos medir, por ejemplo, la intensidad del flujo de momentum que pasa al carrito que esta-



4.52 Curva de calibración de la cinta elástica: se representa la intensidad del flujo de momentum en función de la elongación del cordel.



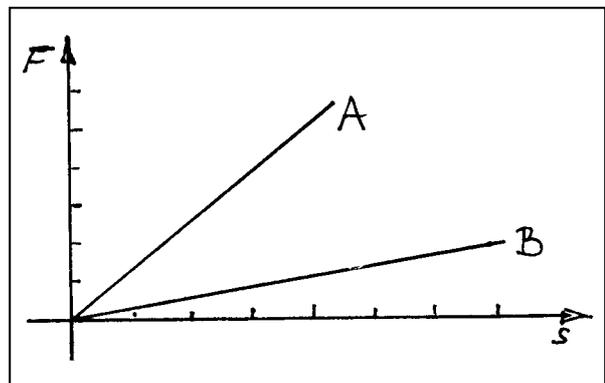
4.53 Para un resorte de acero, la relación entre la intensidad del flujo de momentum y la elongación es lineal.

mos tirando. Para conseguirlo, tiramos el carrito mediante la cinta elástica y medimos su elongación. Si es, por ejemplo, de 0,25 m, el gráfico nos indica que la intensidad del flujo de momentum correspondiente es de 4 unidades.

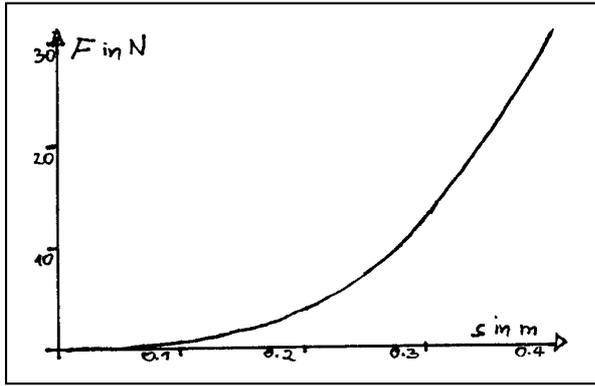
Determinemos, también, la relación entre la elongación de un resorte de acero y la intensidad del flujo de momentum. El gráfico de la figura 4.43 muestra el resultado de las mediciones correspondientes. La relación es lineal, o sea, más simple que en el caso de la cinta elástica. La elongación s y la intensidad del flujo de momentum, F , son directamente proporcionales. Decimos, también, que el resorte se alarga de acuerdo a la *ley de Hooke*. Matemáticamente, la ley de Hooke se expresa de la siguiente manera:

$$F = D \cdot s$$

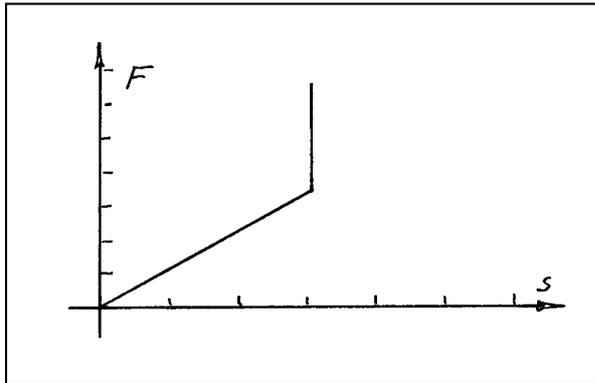
D es una constante que corresponde al resorte usado y se llama *constante del resorte*. Se mide en N/m. Para cada resorte, D tendrá un valor diferente. La figura 4.54 muestra la relación entre F y s para dos resortes diferentes. Para el resorte A, D es mayor que para el resorte B. Para un resorte con mayor D , la intensidad del flujo de momentum para una elongación determinada, será mayor que para otro resorte con menor D . Mayor intensidad del flujo de momentum significa mayor tensión de tracción. El resorte con mayor D será, por lo tanto, un resorte más duro.



4.54 La constante del resorte A es mayor que la del resorte B. El resorte A es más duro que B.



4.55 Con respecto al ejercicio 2



4.56 Con respecto al ejercicio 3

Muchos resortes pueden ser utilizados también en situaciones de presión. Para estos resortes, la ley de Hooke, es decir, la relación lineal entre intensidad de flujo y variación de longitud, es válida tanto para los casos de alargamiento (valores positivos de s), como para los casos de acortamiento (valores negativos para s).

Ejercicios

1. Un resorte tiene una constante $D = 150 \text{ N/m}$. En cuánto se estira si fluyen a través de él:

- 12 N
- 24 N

2. Para un determinado cordel, se aplica la relación entre F y s representada en el gráfico de la figura 4.55.

- ¿En cuánto se alarga el cordel con un flujo de momentum de intensidad 15 N y 30 N, respectivamente?
- ¿Cuál es la intensidad del flujo de momentum correspondiente a un alargamiento de 20 cm?

c) ¿Qué sentimos al tensar este cordel con las manos? Compara con un resorte de acero.

3. ¿Cómo podríamos construir un dispositivo cuya relación entre F y s corresponda al gráfico de la figura 4.56?

4. Unimos dos resortes y los introducimos en un cordel, por el cual pasa un flujo de momentum. Uno de ellos se alarga cuatro veces más que el otro. ¿Cuál será la relación entre sus constantes de resorte D ?

4.11 La velocidad

La magnitud física que indica qué tan rápido se mueve un móvil o cualquier otro objeto se llama velocidad y su símbolo es v .

Un automovilista siempre debe conocer la velocidad de su vehículo. Para este efecto, cada automóvil dispone de un medidor de la magnitud de velocidad o tacómetro. Este instrumento indica la velocidad con la unidad kilómetro en cada hora o km/h. La figura 4.57 muestra el registro gráfico de la velocidad de un camión. La velocidad del camión ha quedado anotada en forma automática durante un cierto tiempo. Tratemos de interpretar el gráfico: el camión partió en el momento $t = 0$ minutos. Transcurridos 4 minutos, tuvo que detenerse por breve lapso, haciéndolo de nuevo después de 9 minutos. Seguramente, había un semáforo con luz roja. Del minuto 10 al 16 se movió en forma lenta a 35 km/h. Probablemente iba cuesta arriba o había tráfico muy intenso. A partir del minuto 17 alcanzó una velocidad de magnitud 85 km/h, más alta y constante. Evidentemente, ya había dejado la ciudad.

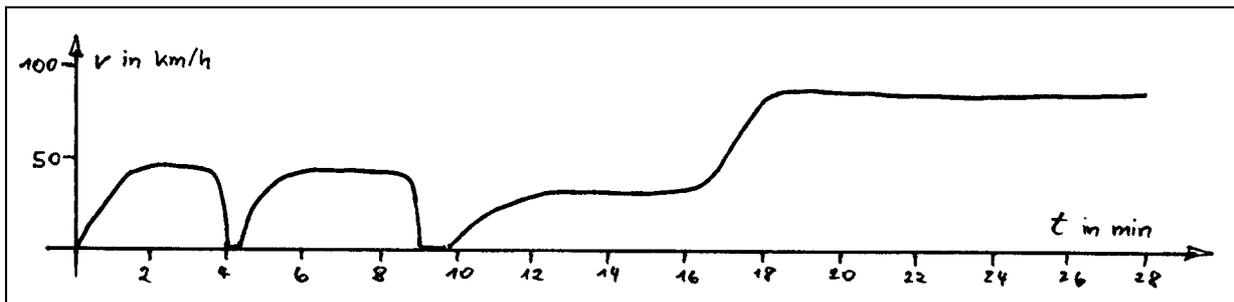
Mientras un cuerpo se esté moviendo con velocidad constante, la relación entre la magnitud de su velocidad, el camino recorrido y el tiempo empleado es bastante simple.

Si un auto que se mueve con velocidad constante requiere media hora para recorrer 60 km, recorrerá 90 km en 0,75 h, 120 km en cada hora, 240 km en 2 horas, etc., según la tabla 4.5.

El camino recorrido s es directamente proporcional al tiempo t :

$$s \sim t.$$

La figura 4.58 muestra el gráfico correspondiente a esta relación. Podemos expresar esta situación



4.57 Registro gráfico de la velocidad de un camión. Se representa la velocidad en función del tiempo.

Tabla 4.5: Camino recorrido, tiempo empleado y cociente entre camino y tiempo para un móvil que se mueve con velocidad constante.

s en km	t en h	s/t en km/h
60	0,5	120
90	0,75	120
120	1	120
180	1,5	120
240	2	120

de otra manera, diciendo que el cociente s/t es constante. En efecto, tenemos :

$$\frac{60 \text{ km}}{0,5 \text{ h}} = \frac{90 \text{ km}}{0,75 \text{ h}} = \frac{120 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{240 \text{ km}}{2 \text{ h}} = \dots$$

y este cociente es igual a la magnitud de la velocidad $v = 120 \text{ km/h}$. Para el caso de una velocidad constante, podemos escribir entonces

$$v = \frac{s}{t}$$

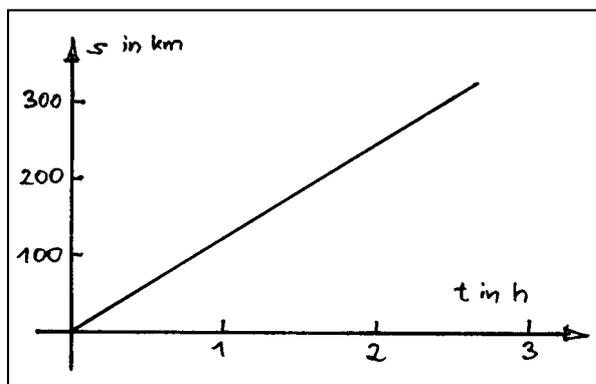
Igual que en otras magnitudes, la velocidad también tiene otras unidades de medición. La magnitud de la velocidad de los autos se indica en km/h; la de los barcos en nudos. La unidad de medición usada en física, según convenio internacional, es metro en cada segundo o m/s.

Transformemos la unidad km/h a m/s:

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0,2778 \text{ m/s}$$

Ejercicios

1. Un ciclista recorre la distancia de 10 km en 40 minutos. ¿Cuál es su velocidad en km/h?
2. Un tren se mueve durante 1 h 32 min con velocidad constante, recorriendo durante ese tiempo la distancia de 185 km. ¿Cuál es la magnitud de su velocidad en km/h y m/s?
3. Un auto se mueve durante 20 minutos con velocidad constante de magnitud 90 km/h. ¿Cuántos km recorre en ese tiempo?
4. La velocidad de la luz es de 300.000 km/s, la distancia de la tierra al sol de 150.000.000 km. ¿Cuánto se demora la luz en su recorrido desde el sol hasta la tierra?



4.58 Relación entre camino recorrido y tiempo empleado para un auto.

4.12 La relación entre momentum, masa y velocidad

Ya sabemos que mientras más pesado y más veloz sea un objeto, su momentum será mayor. Esta afirmación relaciona las tres magnitudes físicas, momentum, masa y velocidad entre sí. Ahora examinaremos esta afirmación con mayor exactitud, tratando de establecer una relación "cuantitativa".

¿Cómo depende el momentum de las otras dos magnitudes? La solución de nuestro problema se facilita dividiéndolo en dos partes: busquemos primero la relación entre el momentum y la masa del objeto estudiado y, después con respecto a su velocidad.

Para poder considerar la influencia exclusiva de la masa sobre el momentum, tenemos que examinar cuerpos de diferente masa que se muevan todos con la misma velocidad. Nuestro problema se clarifica aún más si elegimos los objetos tal como muestra la figura 4.59.

El objeto A es un deslizador con cojín de aire que se mueve sobre el riel correspondiente. El objeto B está formado por dos deslizadores acoplados, cada uno de los cuales pesa lo mismo que el objeto A. La masa de B será, entonces, el doble de A,

$$m_B = 2 \cdot m_A$$

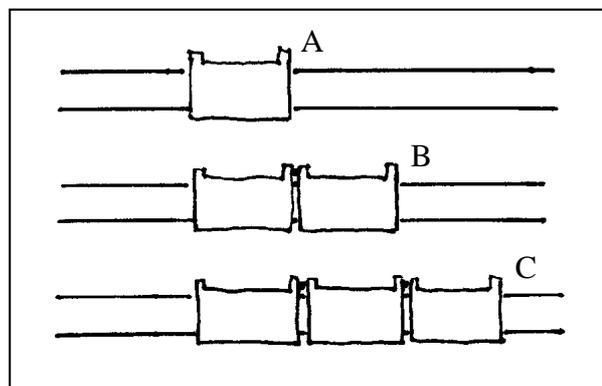
El objeto C está formado por tres deslizadores y tiene, por lo tanto, la triple masa de A

$$m_C = 3 \cdot m_A$$

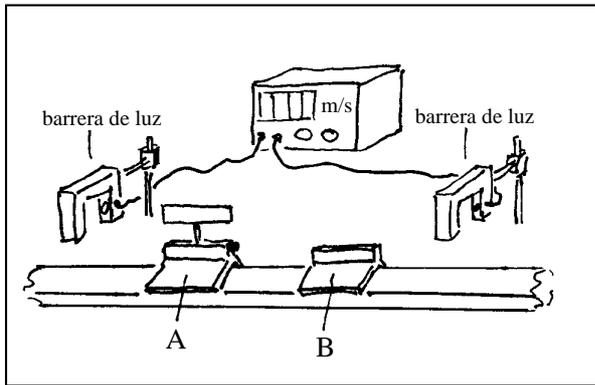
Podemos imaginarnos la existencia de otros objetos más con cuádruple, quíntuple, etc., masa. Todos los objetos A, B, C, etc., deben moverse con la misma velocidad. ¿Cuál será, entonces, la relación entre sus momentum respectivos? El objeto B no es más que dos objetos A acoplados. Si A tiene el momentum p_A , B deberá tener dos veces el momentum p_A :

$$p_B = 2 \cdot p_A$$

Como C consta de tres objetos A y cada uno se mueve con la misma velocidad de A, C deberá te-



4.59 El cuerpo B tiene una masa igual al doble de A y el cuerpo C tiene una masa igual al triple de A. Además, el cuerpo B tiene la doble cantidad de momentum de A y el cuerpo C tiene la triple cantidad de momentum de A.



4.60 En el momento del choque, la cantidad de momentum de A disminuye a la mitad. La medición nos muestra que también la velocidad disminuye a la mitad.

ner tres veces el momentum de A:

$$p_C = 3 \cdot p_A$$

Reconocemos, entonces, la relación existente: los momentum de dos cuerpos se diferencian en el mismo factor que sus masas respectivas, siempre que las velocidades sean las mismas. En otras palabras, momentum y masa son proporcionales.

$$p \sim m \quad \text{para } v = \text{constante}$$

Ya tenemos, entonces, la primera relación buscada. Para la segunda, la que existe entre el momentum y la velocidad, la deducción se torna algo más complicada. La idea es la siguiente: disminuimos el momentum de un cuerpo a la mitad y medimos la variación de velocidad correspondiente. Después disminuimos el momentum a la tercera parte y determinamos nuevamente la variación de v , etc. La figura 4.60 muestra el experimento en detalle.

El objeto A se mueve hacia la derecha, en dirección al cuerpo B que está en reposo. A choca con B y se mantiene adherido a él, de manera que A y B siguen moviéndose juntos hacia la derecha. Medimos la velocidad de A antes y después del choque (después del choque será, evidentemente, igual a la de B) y buscamos los valores del momentum y de la velocidad del cuerpo A antes y después del choque.

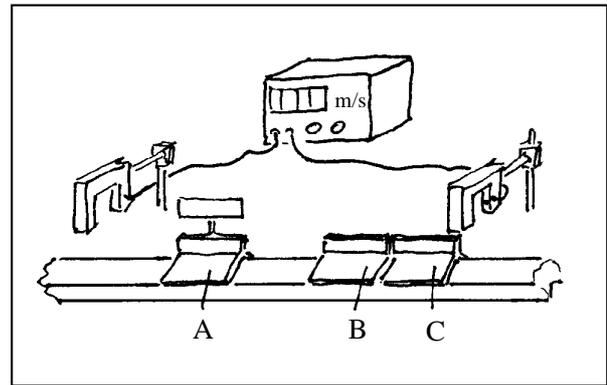
El momentum del cuerpo antes del choque lo designamos como p y el que tiene después del choque p' . En el momento del choque, se reparte equitativamente sobre los cuerpos A y B y A tendrá, después del choque, la mitad del momentum de antes.

Tenemos, entonces:

$$p' = (1/2) \cdot p$$

La medición directa nos proporciona los valores de las velocidades antes y después del choque. Constatamos que la velocidad v' , después del choque, es igual a la mitad de v , de antes:

$$v' = (1/2) \cdot v$$



4.61 En el momento del choque, tanto la cantidad de momentum como la velocidad del cuerpo A disminuye a la tercera parte de su valor inicial.

Si hacemos chocar A contra dos objetos en reposo B y C, figura 4.61, el momentum se reparte entre tres cuerpos y tenemos

$$p' = (1/3) \cdot p$$

La medición directa de las velocidades nos muestra, además, que

$$v' = (1/3) \cdot v$$

Podemos concluir, entonces, que para un cuerpo determinado con masa constante, el momentum y la velocidad son proporcionales:

$$p \sim v \quad \text{para } m = \text{constante}$$

Ahora disponemos, en forma separada, de las dos relaciones buscadas, la que existe entre p y m y la de p y v . Anotémoslas, nuevamente, en forma ordenada:

$$p \sim v \quad \text{para } m = \text{constante} \quad (1)$$

$$p \sim m \quad \text{para } v = \text{constante} \quad (2)$$

La matemática nos permite reunir estas dos relaciones en una sola:

$$p \sim m \cdot v \quad (3)$$

Podemos comprobar la exactitud de esta proporcionalidad (3), pues contiene las dos relaciones anteriores (1) y (2). Si mantenemos v constante y variamos únicamente m , la relación (3) se transforma en (1). Si mantenemos, en cambio, m constante y variamos v , aparece la relación (2).

Sin embargo, la relación (3) aún no nos permite calcular el momentum de un cuerpo a partir de su masa y su velocidad. Nos faltaría introducir un factor de proporcionalidad en (3). Pero tenemos suerte: no necesitamos este factor, porque la unidad del momentum, el Huygens (Hy), se ha definido de tal manera que este factor es igual a 1 para la masa expresada en kg y la velocidad en m/s.

Entonces, tenemos:

$$p = m \cdot v$$

Este es el resultado buscado. Ahora disponemos de una fórmula de gran utilidad, ya que ella nos

permite calcular el momentum de un cuerpo, conociendo su masa y su velocidad. Masa y velocidad de un cuerpo se pueden determinar fácilmente. Por lo tanto, disponemos de un método fácil para determinar el momentum. Recuerda que la fórmula nos permite el cálculo del momentum en Hy sólo cuando tenemos la masa en kg y la velocidad en m/s.

El momentum de un cuerpo es proporcional a su masa y su velocidad.

Apliquemos ahora esta fórmula al caso especial de la transferencia del momentum: ya notamos anteriormente que, al traspasar una cantidad de momentum no muy grande a un cuerpo muy pesado, la variación del momentum de este cuerpo es prácticamente invisible. Un auto que frena traspasa su momentum a la tierra, pero ésta no se hará más veloz. Si una persona empieza a caminar dentro de un tren, traspasa momentum al tren, pero éste no cambiará su velocidad en forma notoria. Nuestra nueva fórmula nos dice exactamente lo mismo: suponemos que un cuerpo con una masa de 10 kg se mueve con una velocidad de 1 m/s. Su momentum, de acuerdo a nuestra fórmula, será:

$$p = 10 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s} = 10 \text{ Hy}$$

Ahora, este cuerpo traspasa este momentum a otro cuerpo, inicialmente en reposo y con una masa de 100 000 kg. ¿Cuál será la velocidad adquirida por este segundo cuerpo más pesado?

De la fórmula $p = m \cdot v$ resulta que $v = p/m$.

Si reemplazamos nuestros valores, tenemos

$$v = 10 \text{ Hy} / (100\,000 \text{ kg}) = 0,0001 \text{ m/s}$$

¡ Una velocidad sumamente reducida!

Ejercicios

1. Un camión de 12 t (12 000 kg) se mueve a una velocidad de 90 km/h. ¿Cuál es su momentum?
2. El arquero detiene una pelota que llega con una velocidad de 20 m/s. ¿Cuál es el momentum que, a través del arquero, fluye a la tierra? (la pelota pesa 420 g).
3. Una pelota de tenis de 50 g es arrojada perpendicularmente a una pared a una velocidad de 30 m/s. ¿Qué momentum es traspasado a la pared?
4. Una persona acelera un carro con poco roce. Un dinamómetro marca la intensidad de la corriente de momentum que fluye hacia el carro. La persona tira durante 5 segundos. ¿Cuál será la velocidad final alcanzada por el carro? (El carro pesa 150 kg, el dinamómetro marca 15 N).
5. Una locomotora acelera un tren. A través del enganche entre la locomotora y el primer carro fluye una corriente de momentum de 200 kN. ¿Cuál será el momentum del tren (sin locomotora) después de 30 segundos? El tren ha alcanzado ahora una velocidad de 54 km/h. ¿Cuánto pesa el tren?
6. Un carro que está detenido pesa 42 kg. Ahora se le acelera haciendo pasar, a través de la barra de tracción, una corriente de momentum de 20 N. ¿Cuál es el momentum que fluye al carro en el lapso de 3 segundos? Si su velocidad es ahora de 1,2 m/s ¿cuál es el momentum correspondiente? ¿Qué pasó con el momentum restante?

Tabla 4.6: Nombre y unidad SI para algunas magnitudes físicas y sus símbolos.

Nombre de la magnitud (símbolo)	Unidad SI (símbolo)
Presión (p)	Pascal (Pa)
Energía (E)	Joule (J)
Intensidad de flujo energético (P)	Watt (W)
Tiempo (t)	Segundo (s)
Momentum (p)	Huygens (Hy)
Intensidad del flujo de momentum, fuerza (F)	Newton (N)
Velocidad (v)	Metro por segundo (m/s)
Distancia (s)	Metro (m)
Masa (m)	Kilógramo (kg)

7. En un tubo recto de 2 km de largo y 10 cm de diámetro fluye agua con una velocidad de 0,5 m/s. Con una válvula al final del tubo se detiene el flujo de agua. Calcula el momentum entregado por el agua en este instante. ¿A dónde va este momentum?

Si el cerrar de la válvula dura 2 segundos, ¿cuál es la fuerza (la intensidad de la corriente de momentum) que ejerce el agua sobre la válvula?

Indicación: Calcula primero el volumen del agua en litros. 1 litro de agua tiene una masa de 1 kg.

4.13 Las unidades SI

En la parte de la física que acabas de conocer, se ha confirmado lo que afirmamos al iniciar el estudio de la mecánica: para poder describir físicamente a nuestro mundo, se necesitan las magnitudes físicas. Uno de los objetivos importantes de la física, y quizás el más importante de todos, es el establecimiento de relaciones entre estas magnitudes.

En la tabla 4.6 resumimos, una vez más, algunas de las magnitudes físicas que encontramos hasta el momento. Además, anotamos, en la tabla 4.7 algunas relaciones que hemos podido establecer entre ellas.

Tú sabes que cada magnitud tiene su unidad de medición o medida. Para la mayoría de ellas existen, en realidad, más de una (Tabla 4.8). Esta situación se debe a varias razones: muchas veces se han definido, en los diferentes campos de la ciencia, de la técnica o la artesanía, distintas unidades de medición. Así, los sastres usaban la vara, los plomeros la pulgada y los físicos el metro. A veces, se pusieron de acuerdo en usar una misma unidad pero, desafortunadamente en los distintos países existían distintas unidades. De esta manera se mide, en la mayoría de los países europeos, la masa en kilogramos; en Estados Unidos, sin embargo, en libras.

Tabla 4.7: Fórmulas físicas

$P = \frac{E}{t}$	$F = \frac{p}{t}$	$v = \frac{s}{t}$	$p = m \cdot v$
-------------------	-------------------	-------------------	-----------------

Tabla 4.8: La mayoría de las magnitudes físicas tienen, fuera de la unidad SI, también otras medidas.

Nombre de la magnitud física	Medidas
Presión	Pascal, bar, atmósfera
Energía	Joule, caloría
Intensidad del flujo energético	Watt, caballo de fuerza
Tiempo	Segundo, minuto, año
Intensidad del flujo de momentum, fuerza	Newton, dyn
Velocidad	Metro por segundo, kilómetro por hora, nudo
Distancia	Metro, pulgada, año luz
Masse	Kilógramo, libra

Pero, finalmente, se ha producido el consenso en torno a este asunto y se ha establecido un sistema de unidades de medición internacionalmente aceptado, el Sistema Internacional. Según este sistema, cada magnitud tiene (con pocas excepciones) una única unidad de medición, la llamada *unidad SI*.

Sin embargo, el uso de estas unidades SI no tiene como única ventaja el consenso internacional. El sistema ha sido elaborado de tal manera que las fórmulas se puedan expresar en la forma más simple. Si en las fórmulas de la Tabla 4.7 expresamos los valores de las magnitudes del lado derecho en unidades SI, el resultado, es decir, el valor de la magnitud del lado izquierdo, también se dará en unidades SI. Si, en cambio, usáramos unidades diferentes para expresar los valores de las magnitudes de la derecha, el resultado aparecería en una unidad absolutamente inusual.

Veamos dos ejemplos:

Según la primera ecuación de la Tabla 4.7, la intensidad del flujo energético se calcula dividiendo la energía por el tiempo. Si se expresa la energía en Joules y el tiempo en segundos, la unidad del flujo energético se dará en Joule/segundo, o sea, en Watts. El Watt es otra unidad SI. Si hubiéramos expresado la energía en calorías y el tiempo en minutos, el resultado se habría dado en calorías por minuto, una unidad que nadie conoce.

Otro ejemplo:

Según la ecuación $p = m \cdot v$, se calcula el momentum de un cuerpo multiplicando su masa por su velocidad. Si expresamos la velocidad en m/s y la masa en kg, el momentum se obtiene en $\text{kg} \cdot \text{m/s}$. Usando, en cambio, el km/h para la velocidad y el g para la masa, el resultado se habría dado, otra vez, en una unidad totalmente desconocida.

Saquemos, entonces, la siguiente conclusión:

Si, al resolver un problema, los valores iniciales no están dados en unidades SI, lo primero que tienes que hacer es transformarlos en unidades SI.

4.14 Movimientos verticales

En los párrafos siguientes, nos preocuparemos de los conceptos de atracción y fuerza de gravedad y de los objetos que caen a la tierra. Hasta ahora hemos considerado únicamente los movimientos que se desarrollan en la horizontal pero, a partir de este momento, estudiaremos también los movimientos verticales. Todo lo que hemos aprendido acerca de los movimientos horizontales, lo podemos aplicar directamente a los movimientos verticales. Lo único que tenemos que hacer es girar nuestro eje x en 90° , de manera que se ubique verticalmente. Efectuamos este giro del eje x de manera que su lado positivo indique hacia abajo. Esto significa lo siguiente:

El momentum de un cuerpo es positivo cuando se mueve hacia abajo y negativo cuando se mueve hacia arriba.

En el párrafo 4.6 habíamos encontrado la siguiente regla:

Flujo del momentum hacia la derecha: tensión de presión. Flujo del momentum hacia la izquierda: tensión de tracción.

Lo que antes era “derecha”, ahora es “abajo”, y lo que era “izquierda” ahora es “arriba”. Por lo tanto, la nueva regla es:

Flujo de momentum hacia abajo: Tensión de presión.

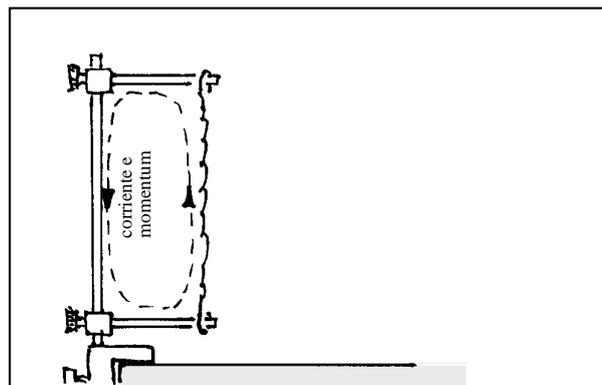
Flujo de momentum hacia arriba: Tensión de tracción.

La figura 4.62 muestra un ejemplo de un circuito cerrado.

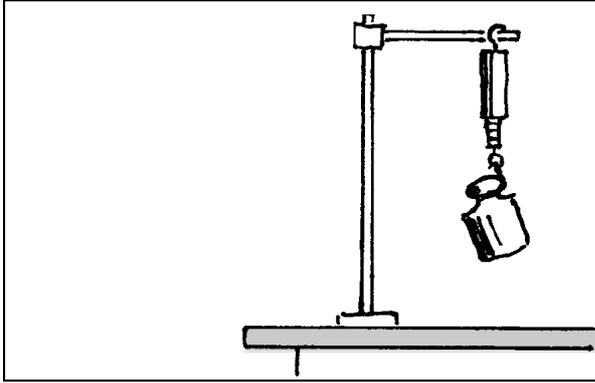
4.15 La atracción gravitacional – el campo gravitacional

Todos los objetos son atraídos por la tierra. Dos observaciones avalan esta afirmación:

1. Si tomamos un objeto con la mano y, después, lo soltamos, se cae al suelo.
2. Todos los objetos tienen peso.



4.62 Circuito cerrado de flujo de momentum, en que el eje x es vertical.



4.63 El momentum que fluye hacia la tierra a través del dinamómetro y el soporte llega al cuerpo a través de una unión invisible.

Estas dos observaciones nos indican que todo objeto recibe momentum desde la tierra. Un cuerpo que cae, aumenta constantemente su velocidad: su momentum aumenta. También el cuerpo que no está cayendo recibe momentum. Lo podemos apreciar al colgarlo en un dinamómetro, figura 4.63. El dinamómetro nos indica que existe un flujo constante de momentum desde el cuerpo y a través del soporte a la tierra. Este momentum tiene que ser restituido constantemente.

El momentum fluye, por lo tanto, desde la tierra hacia el cuerpo en forma constante y a través de una conexión absolutamente invisible.

Anteriormente ya hemos encontrado una conexión conductora de momentum similar e invisible: el campo magnético. En el caso que nos interesa ahora, no puede tratarse de un campo magnético, porque si así fuera, la tierra atraería únicamente a los imanes y cuerpos de hierro. Por lo tanto, esta conexión no puede ser un campo magnético pero, algo muy similar. Lo llamamos campo gravitacional. Igual como un polo magnético está rodeado por un campo magnético, cada objeto que tiene masa está rodeado por un campo gravitacional. Mientras mayor sea su masa, mayor será la densidad de este campo gravitacional.

Cada cuerpo está rodeado por un campo gravitacional. Mientras mayor sea la masa del cuerpo, mayor será la densidad de su campo gravitacional. A través del campo gravitacional, el momentum fluye desde un cuerpo a otro. La atracción gravitacional se genera, entonces, a través del flujo de momentum desde la tierra hacia un cuerpo determinado.

4.16 ¿De qué depende la atracción gravitacional?

Hagamos un experimento: colguemos en un dinamómetro primero un pedazo de hierro de 1 kg masa y después un pedazo de madera, también de 1 kg masa. En ambos casos el dinamómetro marcará lo mismo. ¿Te sorprende esto? Por supuesto que no. ¿Pero cómo determinamos que un pedazo

de hierro o de madera tenga la masa de 1 kg? Colocándolo en una balanza. La mayoría de nuestras balanzas funciona igual que un dinamómetro. Usando la balanza o el dinamómetro definimos, entonces, lo que entendemos por masa: Si dos cuerpos originan, en el dinamómetro, la misma lectura, tienen la misma masa.

Podemos expresarlo de otra manera: dos cuerpos tienen la misma masa cuando, desde la tierra, fluyen hacia ellos corrientes de momentum de igual intensidad.

Usemos ahora dos cuerpos con una masa de 1 kg cada uno. Si juntamos los dos, tendremos ahora un cuerpo de 2 kg de masa. Hacia los dos cuerpos unidos fluye, entonces, una corriente de momentum de doble intensidad. Esto te parecerá obvio, sin embargo, podríamos imaginarnos que, agregando un segundo cuerpo, se altere la corriente de momentum que fluye hacia el primero.

¿Cuál es ahora la intensidad de la corriente de momentum que fluye hacia un cuerpo de 1 kg? El dinamómetro nos indica una intensidad de unos 10 N. Una medición más exacta arroja el valor de 9,81 N. A un cuerpo de 2 kg masa llegarán, entonces, $2 \cdot 9,81 \text{ N} = 19,62 \text{ N}$ y a uno de 10 kg masa 98,1 N. Existe, por lo tanto, una relación de proporcionalidad: La intensidad de la corriente de momentum que fluye desde la tierra hacia un cuerpo determinado es proporcional a la masa del cuerpo:

$$F \sim m$$

El factor de proporcionalidad correspondiente tiene el valor de 9,81 N/kg.

$$F = m \cdot 9,81 \text{ N/kg}$$

Sin embargo, nuestra deducción aún no está completa. 1 kg de hierro pesa lo mismo que 1 kg de madera, pero en la luna 1 kg de hierro pesa menos que en la tierra. Hagamos, entonces, imaginariamente, el siguiente experimento: Determinemos el peso de un objeto de 1 kg de masa en lugares diferentes: en nuestra casa, en el polo norte, en el Ecuador, en la Luna, en Marte, en la superficie solar, en una estrella de neutrones. Los resultados correspondientes se resumen en la tabla 4.9.

En cada lugar se cumple la relación

$$F \sim m,$$

pero el factor de proporcionalidad será cada vez,

Tabla 4.9: Valores del factor local en diferentes lugares

Lugar	g en N/kg
Europa central	9,81
Polo norte y polo sur	9,83
Ecuador	9,78
Superficie lunar	1,62
Superficie de Marte	3,8
Superficie solar	274
Superficie de una estrella de neutrones	1 000 000 000 000

distinto. En los diferentes lugares de la superficie terrestre, las diferencias son pequeñas, pero en otros cuerpos celestes son mucho mayores. Expresemos pues la relación entre F y m de una manera más general:

$$F = m \cdot g$$

donde g depende del lugar en que se encuentre el cuerpo de masa m , y lo llamaremos, por tanto, *factor local*.

La intensidad del flujo de momentum entre la tierra y un cuerpo equivale al producto de la masa del cuerpo por el factor local. El factor local tiene, en la superficie terrestre, el valor de 9,81 N/kg, o sea, aproximadamente de 10 N/kg.

Agreguemos ahora la descripción de la atracción de gravedad de acuerdo al modelo de fuerza: la magnitud F se conoce como la *fuerza de gravedad* o *peso* y se dice que sobre un cuerpo actúa la fuerza de gravedad.

¿Qué significa en realidad cuando decimos de un cuerpo que es muy pesado? A lo mejor queremos decir que es muy difícil levantarlo del suelo. ¿Significará, entonces, que tiene una masa muy grande? Probablemente no, ya que en la Luna no costaría mucho levantarlo del suelo lunar. “Pesado” significa más bien que la corriente de momentum que fluye desde la tierra hacia el cuerpo es muy intensa o, en otras palabras, que la fuerza de gravedad que actúa sobre él es muy grande. Un mismo cuerpo puede, por lo tanto, ser liviano y pesado a la vez, según el lugar en que se encuentre.

Ejercicios

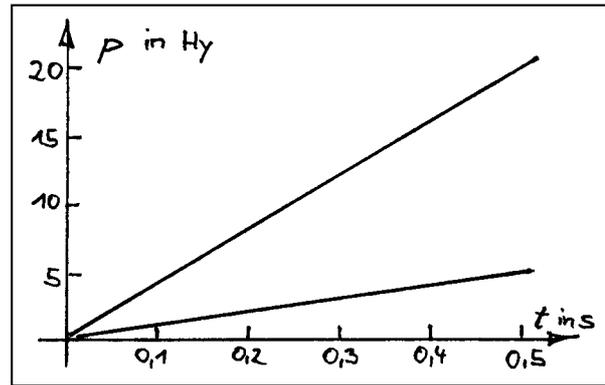
1. ¿Cuál es la corriente de momentum que fluye desde la tierra hacia tu propio cuerpo? (¿Cuál es la fuerza de gravedad que actúa sobre tu cuerpo?) ¿Qué intensidad tendría esta corriente de momentum en la Luna y en una estrella de neutrones?

2. Durante una expedición lunar los astronautas determinan la fuerza de gravedad que actúa sobre un cuerpo, mediante un dinamómetro. Si el instrumento marca $F = 300$ N, ¿cuál es la masa del cuerpo?

4.17 La caída libre

Ya vimos que al soltar un objeto cogido con la mano, éste se cae al suelo. Ahora podemos explicar este fenómeno: Al objeto fluye una corriente de momentum de intensidad $m \cdot g$. Mientras más dure su caída, más rápidamente cae.

Sin embargo, hay algo raro. Si dejamos caer dos objetos distintos, uno pesado y otro liviano, simultáneamente y desde la misma altura, podemos constatar que los dos llegan juntos al suelo. ¿No debería caer más rápidamente el cuerpo más pesado, ya que recibe mayor cantidad de momentum desde la tierra?



4.64 La cantidad de momentum en función del tiempo para dos cuerpos de diferente peso que están cayendo.

Calculemos el aumento del momentum de los dos cuerpos, suponiendo que el más pesado tenga una masa de 4 kg y el más liviano 1 kg.

Al reemplazar F en

$$p = F \cdot t$$

por

$$F = m \cdot g,$$

obtenemos

$$p = m \cdot g \cdot t \quad (1)$$

Colocando ahora la masa y el factor local, resulta, para el cuerpo más pesado,

$$p = 4 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot t = 40 \text{ N} \cdot t$$

y para el cuerpo más liviano

$$p = 1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot t = 10 \text{ N} \cdot t$$

La figura 4.64 representa estas dos relaciones entre p y t . El gráfico indica que el momentum de los dos cuerpos aumenta en forma regular, pero el momentum del cuerpo más pesado aumenta más rápidamente que el del más liviano. En cada instante el momentum del cuerpo pesado es cuatro veces mayor que el del más liviano.

Pero ¿por qué caen juntos los dos cuerpos? Para encontrar la respuesta a esta pregunta, usaremos la fórmula

$$p = m \cdot v \quad (2)$$

Esta relación nos permite sacar la conclusión que el momentum que necesitamos para que el cuerpo más pesado alcance una velocidad determinada, es cuatro veces mayor al que se necesita para hacer lo mismo con el cuerpo más liviano.

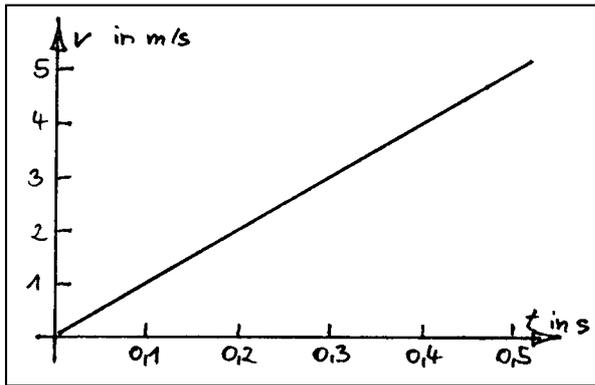
También podemos obtener el mismo resultado a través de un cálculo sencillo: Al igualar los lados derechos de las ecuaciones (1) y (2) obtenemos

$$m \cdot g \cdot t = m \cdot v$$

Dividiendo ahora ambos lados por m , resulta

$$v = g \cdot t \quad (3)$$

Esta ecuación nos indica que la velocidad de un cuerpo que cae aumenta regularmente. Como la



4.65 La velocidad de un cuerpo en caída libre aumenta en forma lineal con respecto al tiempo.

masa del cuerpo ya no aparece en la ecuación, también podemos concluir que la velocidad con que cae un cuerpo no depende de su masa.

La figura 4.65 representa la velocidad de caída de un cuerpo cualquiera en función del tiempo.

El hecho que en la ecuación (3) aparezca el factor local, nos indica, sin embargo, que la velocidad de caída depende del lugar en que se encuentra el cuerpo. En la Luna, por ejemplo, todos los cuerpos caen con una velocidad seis veces menor que la de la Tierra.

En todas nuestras consideraciones, partimos de la suposición que el cuerpo que cae recibe momentum sólo desde la Tierra y que, durante la caída, no hay pérdida de momentum. De esta manera simplificamos, evidentemente, la situación real: en realidad, el cuerpo que cae pierde momentum a través del roce con el aire. Si el cuerpo no es muy liviano y cae desde una altura relativamente pequeña, nuestra simplificación es aceptable. En este caso, hablamos de una *caída libre*. Pero si el cuerpo es muy liviano y tiene, además, una gran superficie, nuestras deducciones son incorrectas.

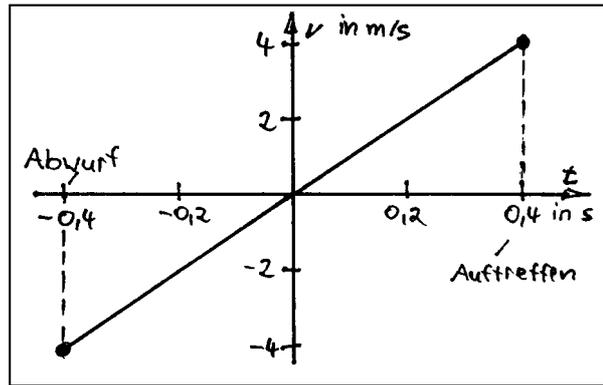
Mientras podamos desprestigiar el roce con el aire, resultan válidas las siguientes afirmaciones:

Si un cuerpo A tiene doble masa con respecto a otro cuerpo B, la cantidad de momentum que recibe desde la Tierra en cada segundo es también el doble. Pero también necesita la doble cantidad de momentum para poder alcanzar la misma velocidad de caída que B.

La velocidad de los cuerpos en caída libre aumenta regularmente.

Todos los cuerpos caen con la misma velocidad.

Consideramos ahora otra variante de la caída libre: en vez de dejar caer, simplemente, el objeto desde su estado de reposo, lo lanzamos verticalmente hacia arriba. En este caso, tendrá, en el momento de la partida, momentum negativo. Pero ahora recibirá, desde la tierra, constantemente, momentum positivo lo que hará disminuir su momentum negativo: el objeto disminuirá, poco a poco, su velocidad, se detendrá e iniciará, finalmen-



4.66 La velocidad de un cuerpo que es lanzado verticalmente hacia arriba. Al subir, la velocidad es negativa, al bajar, positiva.

te, un movimiento en sentido positivo, es decir, hacia abajo.

Al comparar el movimiento del cuerpo hacia arriba con el movimiento hacia abajo, tenemos la misma situación que existe al comparar un objeto con su imagen reflejada en un espejo. Al caer, el momentum del cuerpo aumenta regularmente; al subir, el momentum negativo disminuye regularmente. Lo mismo vale para la velocidad: al subir, la velocidad negativa disminuye proporcionalmente con el tiempo; al caer, la velocidad positiva aumenta proporcionalmente con el tiempo.

En la figura 4.66 representamos la velocidad en función del tiempo. En el gráfico, el origen del eje del tiempo es el momento en que el cuerpo empieza a caer. El lanzamiento ocurre, entonces, en el momento "menos 0,4 segundos". El gráfico muestra también que, tanto para subir como para bajar, el cuerpo ocupa el mismo tiempo.

Ejercicios

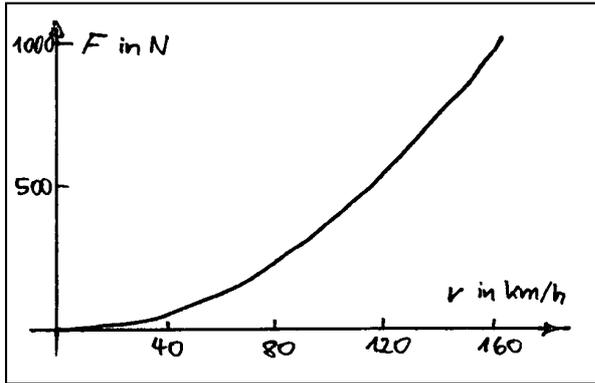
1. Tu saltas a la piscina desde un trampolín de 3 m de altura. La caída libre dura 0,77 s. ¿Qué cantidad de momentum tendrás al llegar a la superficie del agua y cuál será tu velocidad en ese momento?
2. ¿Cuál es la magnitud de la velocidad de un cuerpo en caída libre después de 0,5 s de caída en la Tierra, en la Luna, en el Sol, en una estrella de neutrones?
3. Una piedra es lanzada verticalmente hacia arriba. La velocidad inicial es de 15 m/s. ¿Después de cuánto tiempo vuelve a la tierra?
4. Con una honda se dispara una piedra verticalmente hacia arriba. Después de 5 s vuelve a caer sobre la Tierra. ¿Cuál era la magnitud de su velocidad inicial?

4.18 Caída con roce

En muchos casos no podemos, sin embargo, desprestigiar el roce con el aire. Su magnitud depende:

1. de la forma del cuerpo y,
2. de su velocidad.

Con respecto al automóvil, tú sabes que:



4.67 La intensidad del flujo de momentum que fluye hacia el aire, en función de la velocidad, para un auto típico

1. a la carrocería se le da una forma aerodinámica, con la intención de disminuir el roce con el aire y,
2. al andar a gran velocidad, el roce y, también el gasto de bencina, es mayor que andando despacio.

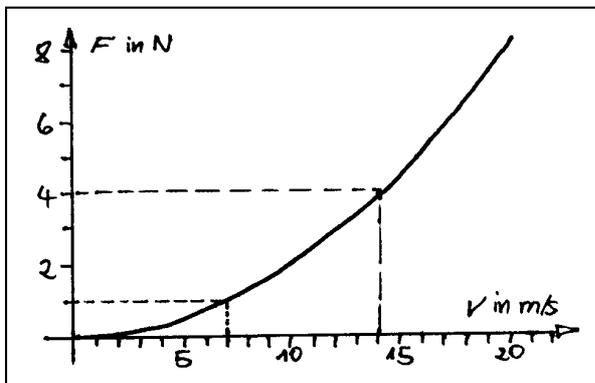
Las figuras 4.67 y 4.68 muestran que el roce, es decir, la intensidad de la corriente que fluye hacia el aire, aumenta considerablemente con el incremento de la velocidad. Los dos gráficos indican la pérdida de momentum debido al roce en función de la velocidad: en la figura 4.67 para un auto y en la figura 4.68 para un objeto mucho más pequeño, una pelota de 30 cm de diámetro.

Ya vimos que, al no existir o siendo despreciables estas pérdidas por roce, todos los cuerpos caen con la misma velocidad. Pero, ¿qué pasa, ahora, con la velocidad de caída si tenemos que considerar el aire?

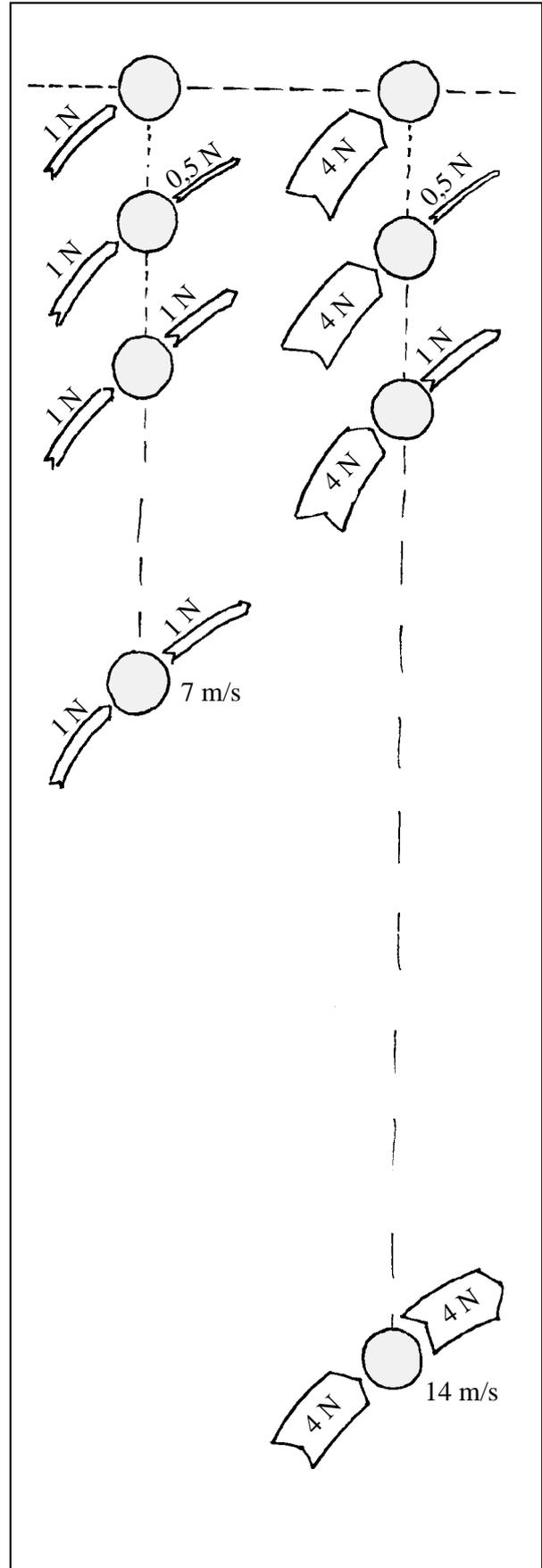
Dejamos caer una pelota grande, pero muy liviana, figura 4.69, lado izquierdo. Sus medidas son $m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$ y diámetro = 30 cm = 0,3 m. Por lo tanto, desde la tierra fluye a la pelota una corriente de momentum de intensidad constante igual a

$$F = m \cdot g = 0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 1 \text{ N}.$$

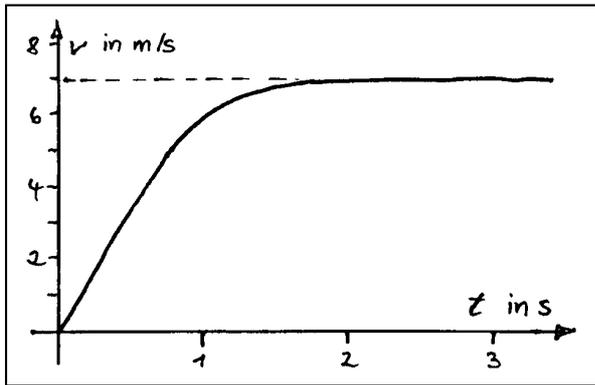
Al caer, la velocidad inicial es muy pequeña y, por lo tanto, también la pérdida de momentum debido a la presencia del aire. Al alcanzar la velocidad de los 2 m/s, la corriente de momentum que fluye ha-



4.68 La intensidad del flujo de momentum que fluye hacia el aire, en función de la velocidad, para una esfera de 30 cm de diámetro



4.69 Una esfera liviana (izquierda) y otra pesada (derecha) caen a tierra. La esfera liviana alcanza su velocidad límite antes que la pesada.



4.70 Cuando existe roce con el aire, la velocidad de un cuerpo que cae aumenta sólo hasta alcanzar una velocidad máxima límite.

El aire aún tiene, según la figura 4.68, una intensidad inferior a 0,1 N. En comparación con el flujo de momentum proveniente de la tierra, igual a 1 N, esta pérdida es bastante pequeña. Pero la pérdida de momentum aumenta rápidamente y, finalmente, la pelota entrega al aire en segundo tanto momentum como el que ya recibe desde la tierra. A partir de este momento, su momentum ya no aumenta. La figura 4.68 nos indica que la velocidad de la pelota será, en este momento, de unos 7 m/s.

La figura 4.70 muestra la velocidad de una pelota en función del tiempo. Al comienzo, la velocidad aumenta en forma lineal: la pelota se comporta igual que un cuerpo en caída libre. Pero poco a poco, la pérdida aumenta y, finalmente, cuando las cantidades de momentum aferente y eferente se igualan, la velocidad no puede seguir aumentando. La velocidad que alcanza el cuerpo en este momento se llama *velocidad límite*.

Ahora dejamos caer otra pelota, del mismo diámetro (30 cm) pero con un peso cuatro veces mayor que la primera (figura 4.69, lado derecho): $m = 0,4$ kg.

Desde la tierra y a través del campo gravitacional, fluye hacia el cuerpo una corriente de momentum de

$$F = m \cdot g = 0,4 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 4 \text{ N}.$$

¿Cuál será ahora la velocidad límite alcanzada?

El gráfico de la figura 4.68 nos indica que el flujo de momentum que se pierde se iguala al que proviene de la tierra en cuando la velocidad es igual a 14 m/s. La pelota más pesada alcanza, por lo tanto, una velocidad límite de 14 m/s.

A altas velocidades, el roce con el aire ya no se puede despreciar. La velocidad de un cuerpo que cae aumenta hasta alcanzar una velocidad límite que, a su vez, depende de la forma del cuerpo y es mayor para cuerpos más pesados.

Esta situación de que, a pesar de una constante entrega de momentum, su cantidad total no sigue aumentando debido al incremento de las pérdidas, la podemos observar también en otras partes. En el fondo, es ésta la razón para establecer la existencia de una velocidad máxima para todos los vehículos.

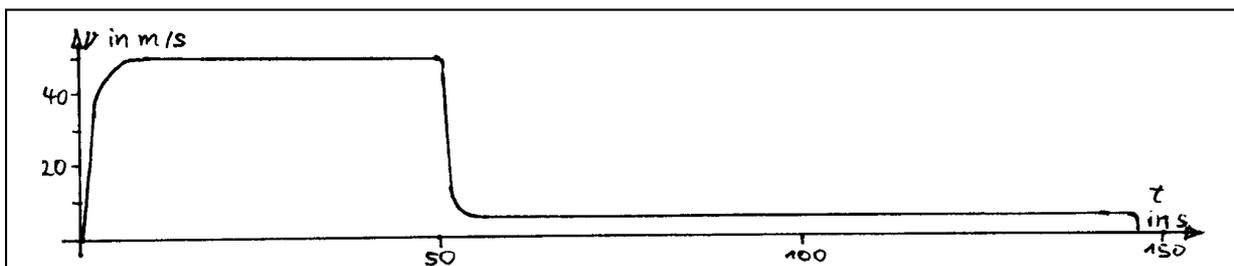
Al iniciar su carrera, un auto incrementa su velocidad, es decir, aumenta su cantidad de momentum pero, al mismo tiempo, las pérdidas por roce se hacen cada vez mayores. Finalmente, el auto pierde, debido al roce, tanto el momentum como el que el motor bombea constantemente desde la tierra. Lo mismo vale para las bicicletas, el ferrocarril, los barcos y los aviones.

Otra interesante aplicación para nuestras consideraciones lo constituye el salto en paracaídas. La persona salta del avión y alcanza, en pocos segundos, su velocidad límite de unos 50 m/s. Con esta misma velocidad “cae” durante un tiempo prolongado. La corriente de momentum que fluye hacia la persona a través del campo gravitacional tiene la misma intensidad de la que fluye hacia el aire debido al roce.

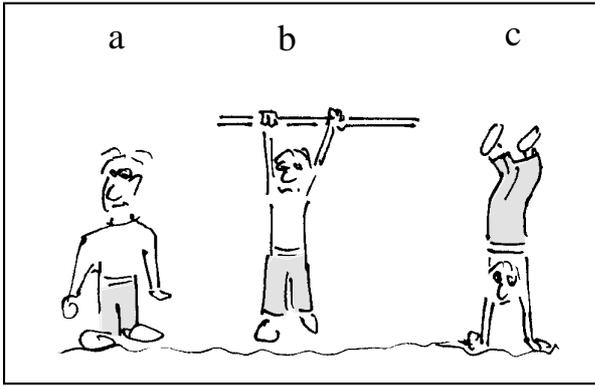
A unos 400 m del suelo se abre el paracaídas. Esto implica un brusco aumento del roce con el aire. El flujo de momentum perdido se hace repentinamente mucho más intenso que el ganado. Por lo tanto, el momentum disminuye y con él también disminuye la velocidad y la pérdida por el roce.

Finalmente, a la velocidad relativamente baja de unos 4 m/s, la corriente de momentum del roce alcanza nuevamente el mismo valor de la corriente de momentum gravitacional. En este momento, el paracaídas, con la persona colgando, cae lentamente a la tierra. La figura 4.71 muestra la velocidad, en función del tiempo del paracaídas.

Nuestras consideraciones referentes a la existencia de una velocidad límite pierden toda validez cuando no existe aire ni ningún otro medio que pudiera ejercer algún roce. En la Luna no hay atmósfera y, por lo tanto, todos los cuerpos caen con la misma velocidad: una hoja de papel cae tan rápido como una piedra pesada. Para poder observar esta situación en la tierra, necesitamos un tubo de



4.71 La velocidad de caída de un paracaidista en función del tiempo



4.72 Lo que haga este hombre, no puede dejar de sentir su propia pesadez.

vidrio, al cual se le haya bombeado el aire. Al dejar caer en él algunos objetos de masas muy diferentes, se observará, efectivamente, que todos caen con la misma velocidad.

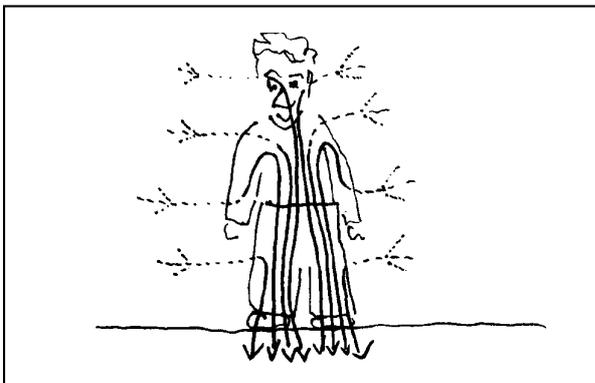
Ejercicios

¿Cuál será la velocidad límite que alcanza una esfera que cae y que tiene un diámetro de 30 cm y una masa de 0,8 kg?

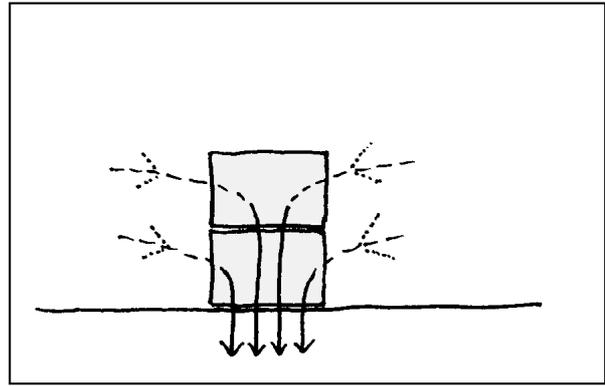
4.19 La ingravidez

El hombre de la figura 4.72a se siente pesado; su cuerpo debe sostener el peso de la cabeza y sus pies sacan la peor parte; deben sostener todo el cuerpo. El hombre tiene una idea, representada en la figura 4.72b. Las piernas están descargadas pero los brazos deben sostener todo el peso. La figura 4.72c muestra su tercer intento por deshacerse del peso, pero nuevamente fracasa.

Lo que perturba al hombre de la figura 4.72 es el hecho de “sentirse pesado”. Tratemos de definir físicamente este sentimiento. Lo que el hombre siente en cada uno de los tres casos, son las corrientes de momentum que fluyen dentro de su cuerpo. A cada parte de su cuerpo llega, a través del campo gravitacional, el momentum que, a su vez, tiene que ser devuelto a la tierra. En la figura 4.73 se grafican estas corrientes de momentum para una persona de pie: el momentum fluye hacia



4.73 Los flujos de momentum que llegan a la persona a través del campo gravitacional, también tienen que salir de ella.



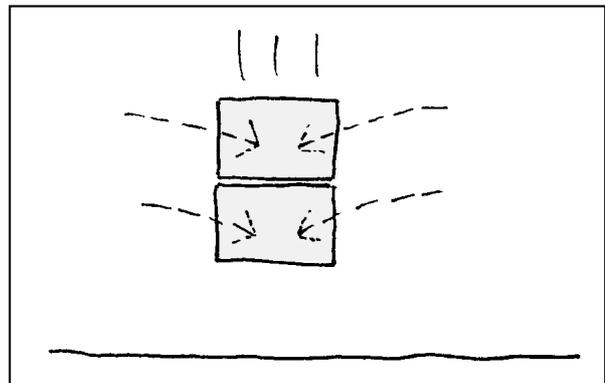
4.74 Esquemización de una persona, conformada sólo por las partes superior e inferior.

la cabeza, los brazos, el tronco, etc. Toda esta cantidad de momentum tiene que volver a la tierra a través de las piernas y los pies. En ellos, la corriente de momentum alcanza, pues, su mayor intensidad.

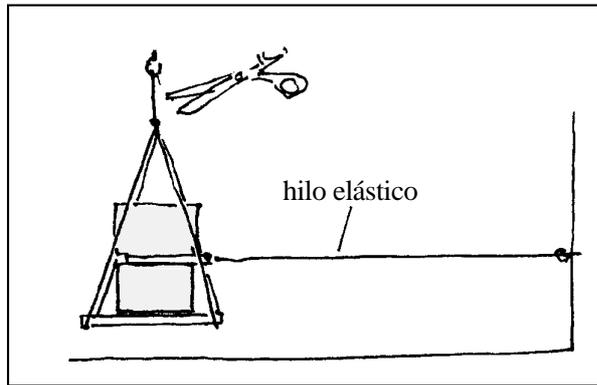
Consideremos, ahora, la esquematización de una persona, conformada por dos cubos sobrepuestos, que representan las partes superior e inferior del cuerpo (figura 4.74). Observamos que la intensidad del flujo de momentum en la superficie inferior del cubo de abajo es el doble de la que atraviesa la superficie inferior del cubo de arriba.

Ahora, trataremos de colocar a esta “persona” en el estado de ingravidez, es decir, en un estado en que no es atravesada por ningún flujo de momentum. En otras palabras, en un estado en que ninguna de sus partes se encuentre sometida a una tensión de presión o de tracción.

Probablemente, pensarás que, para conseguir este resultado, habría que trasladar a la persona a una gran distancia de la tierra, a un lugar en que ya no sienta el campo gravitacional de ella. En este lugar, no llegaría momentum a la persona y, por lo tanto, no habría ningún flujo de momentum que la atravesara. Esta posibilidad existe realmente, pero hay un método mucho más simple: dejamos que el momentum entre a la persona, pero no lo dejamos salir nuevamente. En esta situación, ya no existe ningún flujo de momentum que la atraviese y la persona se sentirá sin peso.



4.75 Un cuerpo en caída libre no tiene peso. En él no existen flujos de momentum.

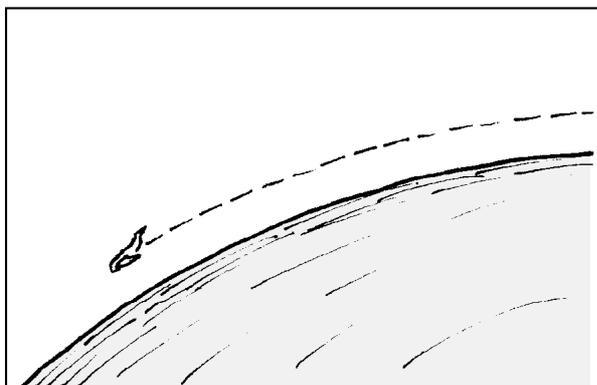


4.76 Al caer libremente, los dos cuerpos no tienen peso; la tabla se suelta.

¿Cómo podemos lograr esto? Muy simple. Para que el momentum no pueda salir de la persona y no pueda fluir hacia la tierra, basta con interrumpir la conexión con la tierra. Así, dejamos que nuestra persona caiga libremente: figura 4.75. Si bien ahora fluye, desde el campo gravitacional, momentum a cada cubo y a cada una de sus partes (a cada parte de la persona), éste ya no se desplaza dentro del cubo ni se traslada al otro cubo. En consecuencia, ya no existirá más tensión, ni de presión ni de tracción. El cubo inferior ya no sentirá el peso del de arriba.

La misma conclusión podemos aplicar para una persona real, como tú: al saltar de alguna parte, no tendrás peso mientras estés cayendo. Incluso, cuando saltas hacia arriba, pierdes tu peso. Mientras no tengas contacto con la tierra, te mantendrás en estado de ingravidez, hasta tocar nuevamente la tierra.

Sin embargo, el tiempo de caída es, generalmente, tan corto que no nos damos cuenta del estado de ingravidez en que nos encontramos en ese momento. Hagamos, por lo tanto, un experimento con nuestra persona modelo, figura 4.76. Los dos cubos se encuentran en una bandeja que se sujeta mediante unos cordeles, similar al platillo de una balanza. Entre los dos cubos, se coloca una tabla delgada que está unida a la pared mediante un hilo elástico. Este hilo elástico movería la tabla si no fuera por el peso del cubo superior.



4.77 El transbordador vuela a una altura de sólo 250 km. El factor local es prácticamente el mismo que en la superficie terrestre.

Ahora el experimento: cortamos el hilo que sujeta todo el dispositivo. En ese mismo momento, la tabla sale disparada por la atracción del hilo elástico. ¿Por qué? Durante un corto tiempo, los dos cubos caían libremente y se encontraban en estado de ingravidez. El cubo superior ya no ejercía presión sobre el inferior y la tabla se soltó.

Tú sabes que, en su nave espacial, los astronautas se encuentran en estado de ingravidez. ¿Cómo podemos explicar esta situación? ¿Porque están muy lejos de la tierra? De ningún modo. El "Space Shuttle" vuela a una altura aproximada de unos 250 km, muy baja en comparación con el radio terrestre. En el fondo, casi vuela a ras del suelo, figura 4.77. A esta altura, la intensidad del campo gravitacional de la tierra es casi la misma que en el suelo. El factor local correspondiente a una altura de 250 km es $g = 9,64 \text{ N/kg}$, es decir, apenas inferior al que corresponde a la superficie terrestre.

Entonces, la explicación debe ser otra. Es la misma que acabamos de encontrar para todos los objetos en caída libre: cuando dejan de actuar los cohetes impulsores, la nave espacial se transforma en un cuerpo en caída libre. Pero ¿por qué la nave espacial o el satélite no caen a la tierra? En realidad, es exactamente lo que hacen. Pero tienen siempre un gran impulso en dirección horizontal: entonces, cae, pues, del mismo modo que una piedra al ser arrojada en sentido horizontal, pero cae tan lejos que siempre "cae detrás de la tierra". Por lo tanto, "cae" alrededor de la tierra y nunca choca con el suelo.

Los cuerpos que caen libremente se encuentran en estado de ingravidez.

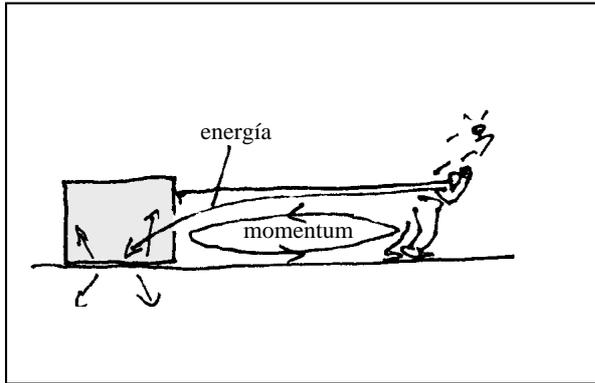
Ejercicios

1. En su nave espacial, un astronauta tiene dos objetos iguales, pero de diferente masa. ¿Puede averiguar cuál es el objeto de mayor masa? ¿Cómo?
2. Una nave espacial se encuentra tan lejos de la tierra que ya prácticamente no existe campo gravitacional. Los astronautas quisieran sentir su propio peso. ¿Qué pueden hacer si no quieren volver a la tierra ni viajar a otro cuerpo celeste?

4.20 El momentum como portador de energía

Al realizar un esfuerzo físico, gastamos energía. Pero, ¿qué significa "gastamos"? Bueno, por ejemplo, que tenemos que comer mucho para soportar el esfuerzo. Con la comida obtenemos la energía y, al realizar un esfuerzo físico, la desprendemos nuevamente. De esta manera, cuando decimos que "tú gastas mucha energía", queremos expresar que "fluye mucha energía a través de tu cuerpo, que absorbes y desprendes mucha energía".

La persona de la figura 4.78 arrastra una caja por el suelo. (Sin duda, podría trasladar la caja más cómodamente, pero, entonces, no podríamos discu-



4.78 El momentum fluye en un circuito cerrado. La energía fluye desde la musculatura de la persona hacia la parte inferior de la caja.

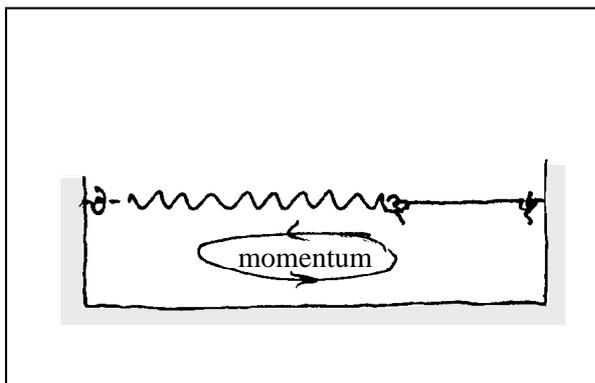
tir tan bien nuestro problema). La persona se esfuerza mucho; desprende mucha energía. ¿Dónde queda esta energía? Se traslada hacia la caja, mejor dicho, a la parte inferior de la caja, donde produce calor.

Examinemos, ahora, este transporte de energía entre la persona y la caja. Tenemos que aclarar un primer punto importante: ¿Cuál es, en este caso, el portador de energía? Junto con la corriente de energía, también fluye, a través del cordel, entre la persona y la caja, una corriente de momentum. Suponemos, por lo tanto, que el portador de energía buscado es el momentum.

El momentum es un portador de energía.

Sin embargo, podemos comprobar, inmediatamente, que no siempre la corriente de momentum va acompañada por una corriente de energía: la corriente de momentum de la figura 4.78 vuelve, como ya sabemos, desde la caja y a través de la tierra, a la persona; pero la energía busca, a partir de la cara inferior de la caja, su propio camino. Por lo tanto, la corriente de momentum, que vuelve a la persona, ya no lleva energía.

Ahora, ¿de qué depende la intensidad de esta corriente de energía? O, expresado de manera más general, ¿qué debemos hacer para poder transmitir, mediante un cordel o una barra, la mayor cantidad de energía posible?



4.79 A pesar de la existencia de un flujo de momentum no hay ningún flujo de energía.

Si tensamos un cordel entre dos paredes, tal como lo muestra la figura 4.79, se genera una corriente de momentum; pero, seguramente, no existirá ninguna corriente de energía, porque no hay nada que se esté moviendo o que se caliente. ¿Cuál es, entonces, la diferencia entre los cordel de las figuras 4.78 y 4.79? El primer cordel se mueve; el segundo, no. Constatamos, entonces, que el transporte de energía depende de la velocidad con que se mueve el conductor de momentum.

Además, y evidentemente, la intensidad de la corriente de energía dependerá también de la intensidad de la corriente de momentum, porque si no aplicamos al cordel una tensión mecánica, tampoco habrá transmisión de energía.

Obtenemos, entonces, una conclusión importante:

La intensidad de la corriente de energía P que fluye a través de un cordel depende

- de la intensidad de la corriente de momentum F en el cordel, y

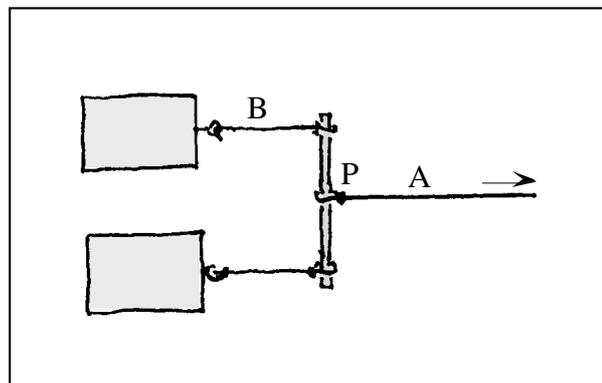
- de la velocidad v del cordel.

Aclaremos, nuevamente, la relación cuantitativa. ¿Cuál es la ecuación que interrelaciona las magnitudes P , F y v ?

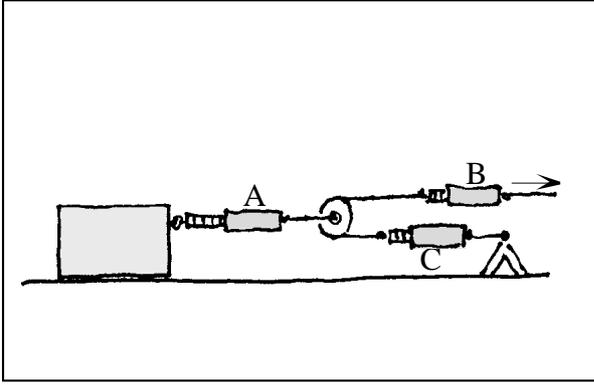
Podemos establecer con facilidad cómo depende la intensidad de la corriente de energía P de la intensidad de la corriente de momentum F . La figura 4.80 muestra, desde arriba, cómo se arrastran por el suelo dos cajas iguales. Comparemos ahora los dos segmentos de cordel A y B. Ambos se mueven con la misma velocidad. Tanto la corriente de momentum, como la de energía, se dividen en partes iguales en el nudo P: en el segmento B, la intensidad de la corriente de momentum equivale a la mitad de la de A, y lo mismo ocurre con la intensidad de la corriente de energía. Tenemos, entonces, que, a la misma velocidad, la intensidad de la corriente de energía es directamente proporcional a la intensidad de la corriente de momentum.

$$P \sim F$$

Para encontrar la relación existente entre P y v realizamos el siguiente experimento: tiramos una



4.80 Las dos cajas son arrastradas sobre el suelo. Vista desde arriba



4.81 En el cordel A, la intensidad del flujo de momentum es el doble de la del cordel B. La velocidad del cordel A es la mitad de la de B.

caja con la ayuda de una polea móvil, según figura 4.81. Comparemos los segmentos de cordel A y B: con respecto a la corriente de energía, constatamos que toda la energía que fluye, desde la derecha, al segmento B sigue, a través de la polea, hacia el segmento A. En el segmento C no fluye energía, porque no hay movimiento.

Tenemos, entonces, que

$$P_A = P_B$$

Comparemos, ahora, las velocidades de A y B. Si la caja, y con ella el cordel A, se mueve hacia la derecha en una distancia determinada, el extremo derecho de B se moverá hacia la derecha, recorriendo la doble distancia. Suponiendo que la caja se mueve 10 cm, la polea también se mueve 10 cm. Si el cordel B no pasara por la polea, sino que se uniera al extremo derecho de A, también B se movería hacia la derecha 10 cm. Debido a la polea, el cordel C también se acorta 10 cm y estos 10 cm los aprovecha el cordel B que, por lo tanto, se alargará en 20 cm. Por la misma razón, la velocidad de B será siempre el doble de A, y tenemos que

$$v_B = 2v_A$$

Comparemos, finalmente, las corrientes de momentum que fluyen en A y en B. La medición correspondiente nos muestra que la intensidad de la corriente de momentum en B es justo la mitad de la en A. (En C es igual que en B, ya que se tiene que cumplir la ley de los nudos).

Podemos escribir, por lo tanto, que

$$F_A = 2F_B$$

Todos estos resultados anteriores, los podemos expresar correctamente a través de la relación

$$P \sim v \cdot F$$

Esta expresión nos indica que, si la velocidad es constante, P es proporcional a F . También nos dice lo siguiente: al duplicar v y reducir, al mismo tiempo, F a la mitad, P se mantiene constante. Es justamente lo que nos muestra nuestro experimento con la polea.

Al transmitir energía mediante el portador de energía momentum, la intensidad del flujo energético es proporcional a la intensidad del flujo de momentum y a la velocidad con que se mueve el conductor de momentum .

Para transformar esta relación de proporcionalidad a ecuación, deberíamos introducir un factor de proporcionalidad; pero, afortunadamente, las medidas del sistema internacional (SI) están definidas de manera que, simplemente,

$$P = v \cdot F$$

Esté es el resultado buscado. Con esta ecuación, podemos calcular la intensidad del flujo energético en el cordel, si conocemos la intensidad del flujo de momentum y la velocidad con que se mueve el cordel.

Un ejemplo: tiramos un cordel con un dinamómetro. Este instrumento marca 120 N, y el cordel se mueve con una velocidad de 0,5 m/s. La intensidad del flujo energético será, entonces, igual a

$$F = v \cdot F = 0,5 \text{ m/s} \cdot 120 \text{ N} = 60 \text{ W}$$

Nota que la velocidad debe darse en m/s y la flujos en la corriente de momentum en N, para obtener la el flujo energético en la unidad SI Watt.

Ejercicios

1. Un tractor tira un acoplado en un camino plano con la velocidad de 20 km/h. A través de la barra de enganche, fluye una corriente de momentum de 900 N. ¿Cuál es el gasto energético del acoplado? (¿Cuál es la intensidad del flujo energético desde el tractor al acoplado?). ¿Dónde queda el momentum que fluye hacia el acoplado y dónde queda la energía?
2. La correa de transmisión de una máquina se mueve con una velocidad de 10 m/s. El flujo de energía que transmite la correa tiene una intensidad de 800 W. ¿Con qué fuerza tira la correa? (¿Cuál es la intensidad del flujo de momentum en la correa?)
3. Una grúa levanta una carga de 50 kg con una velocidad de 0,8 m/s. ¿Cuál es la intensidad del flujo energético en el cordel de la grúa? Al levantar la carga a una altura de 5 m, ¿cuánto dura este proceso y cuánta energía fluye en el cordel en este tiempo?

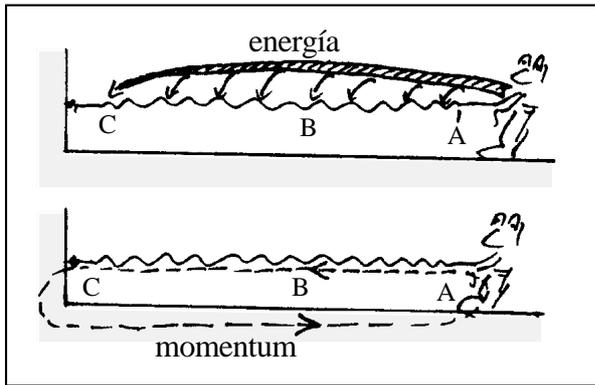
4.21 Acumuladores mecánicos de energía

a) *Cuerpos deformados elásticamente como acumuladores de energía*

Tensamos un resorte largo y fuerte, figura 4.82. Eso implica un gran esfuerzo, porque gastamos energía. Consideremos el extremo derecho del resorte (posición A en la figura 4.82). Este extremo se encuentra bajo tensión mecánica, es decir, por él fluye una corriente de momentum F y se mueve con la velocidad v . Según nuestra fórmula

$$P = v \cdot F,$$

también fluye por él una corriente de energía.



4.82 Al tensar el resorte, se origina un flujo de energía que proviene del extremo derecho.

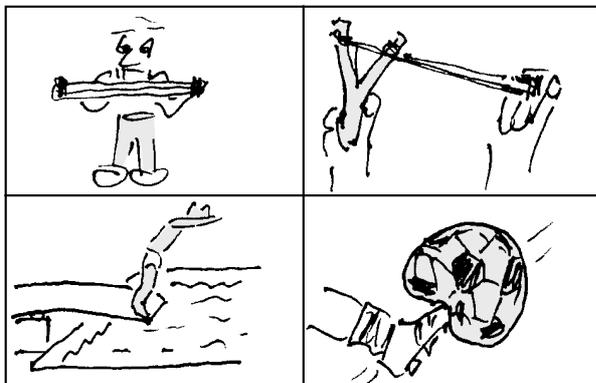
Consideremos, ahora, el extremo izquierdo del resorte (posición C). El flujo de momentum en este lugar es igual al de A; pero como C no se mueve, ya no existe flujo de energía. La energía que entra en el resorte en A ya no sale en C. La energía es acumulada en el resorte.

Podemos examinar estos flujos también en otros lugares del resorte, por ejemplo en B, en el medio. Nuevamente, el flujo de momentum es el mismo que en A y en C. La velocidad del punto medio del resorte, en cambio, es igual a la mitad de la de A. En consecuencia, también la intensidad del flujo de energía en este lugar equivale a la mitad de la que entra al resorte en A.

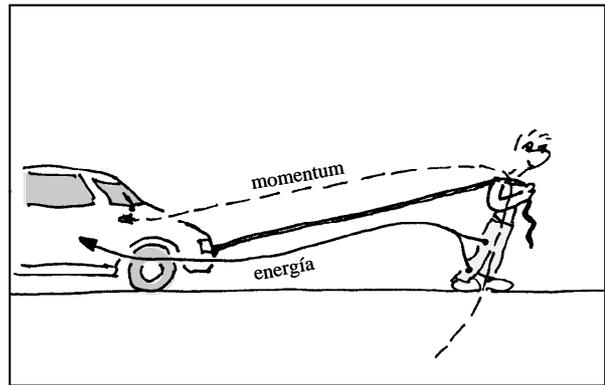
Esto es comprensible, porque la mitad de la energía se acumula en la mitad derecha del resorte y la otra mitad fluye hacia la mitad izquierda. Siguiendo con esta misma idea, podemos afirmar que, en cada tercio del resorte, se acumula la tercera parte de la energía, en cada cuarto, la cuarta parte, etc.

Es decir, la energía se reparte equitativamente a lo largo del resorte. Si logramos comprimir un resorte sin que se desvíe lateralmente, podemos, de esta manera, acumular en él energía.

Un resorte es un acumulador de energía. Mientras mayor sea el alargamiento o el acortamiento del resorte, mayor será la cantidad de energía que contiene.



4.83 La energía es acumulada en un extensor estirado, una honda tensada, un trampolín curvado y en una pelota de fútbol hundida.



4.84 Cuando el carrito es acelerado, fluye hacia él momentum y también energía.

Evidentemente, estas reflexiones no se aplican sólo a los resortes, sino a todo tipo de objetos que pueden ser deformados elásticamente: un extensor estirado contiene energía, de la misma manera que una honda tensada, un trampolín curvado o una pelota de fútbol hundida (figura 4.83).

b) Cuerpos en movimiento como acumuladores de energía

Cargamos con momentum un carrito con poco roce, tal como lo hemos hecho en muchas oportunidades, figura 4.84. Pero ahora también sabemos que, dentro del cordel, no fluye sólo momentum, sino energía también. Ahora, la energía, igual que el momentum, ya no puede abandonar el carrito. Al tirar, acumulamos en el carrito tanto momentum como energía.

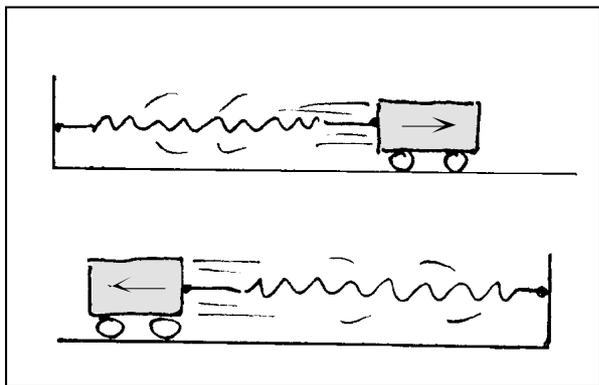
Un cuerpo en movimiento contiene energía. Mientras mayor sea su velocidad, mayor será también la cantidad de energía que contiene.

Cuando un carrito en movimiento frena, su momentum fluye hacia la tierra. La energía, en cambio, sigue un camino diferente. Se utiliza en la generación de calor. Siempre se produce calor cuando hay roce.

La energía se disipa, en este caso, en el ambiente: parte en la tierra, parte en el carrito y en el aire.

También podemos trasladar la energía contenida en un carrito en movimiento a un resorte y acumularla ahí: hacemos que el carrito tense un resorte, figura 4.85. En este proceso, el carrito se detiene. Podemos tensar el resorte de dos maneras diferentes: o fijamos su extremo izquierdo en la pared y dejamos que el carrito tire su extremo derecho hacia la derecha, o viceversa. El resultado es, en cada caso, el mismo: un resorte tensado y cargado con energía. En el primer caso, la energía proviene de un carrito con momentum positivo; en el segundo, de un carrito con momentum negativo; pero en los dos casos, los carritos tienen energía positiva.

La energía de un cuerpo en movimiento es siempre positiva y no depende del sentido de su movimiento.



4.85 El carrito en movimiento entrega su energía a un resorte. (a) El carrito se mueve hacia la derecha. (b) El carrito se mueve hacia la izquierda.

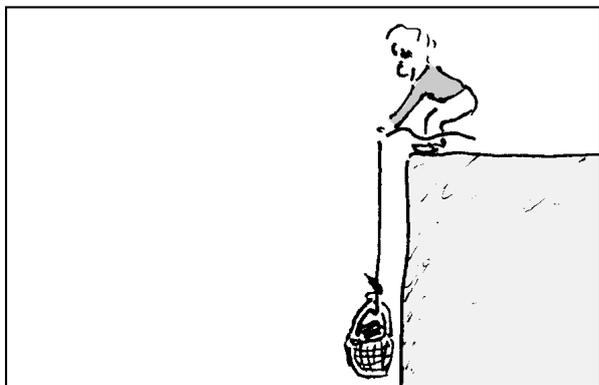
c) El campo gravitacional como acumulador de energía

Tiramos hacia arriba un objeto pesado, figura 4.86. En el cordel fluye, nuevamente, además de momentum, energía. El momentum proviene, como sabemos, de la tierra y llega, a través del campo gravitacional, al cuerpo. Podemos imaginarnos el campo gravitacional como un resorte invisible que actúa sobre el cuerpo. De la misma manera que, al tensar el resorte, acumulamos en él energía, también acumulamos energía en el campo gravitacional al levantar un cuerpo. Al hacer bajar el cuerpo nuevamente, podemos recuperar la energía acumulada en el campo gravitacional.

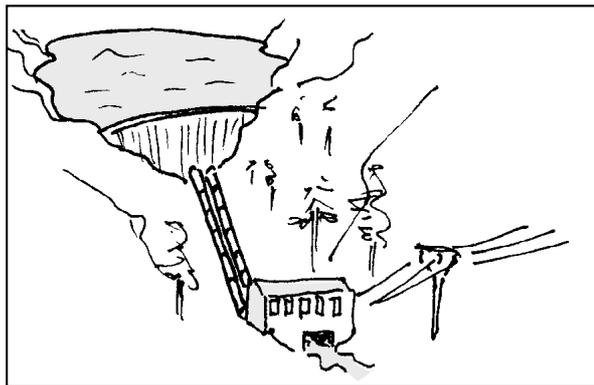
Para levantar un cuerpo pesado, se requiere de más energía que para levantar uno liviano. Por lo tanto, acumulamos mayor cantidad de energía en el campo gravitacional, mientras más pesado sea el cuerpo que levantamos.

El campo gravitacional es un acumulador de energía. Mientras mayor sea la altura a que se levanta un objeto y mientras mayor sea su peso, mayor será también la cantidad de energía acumulada por el campo gravitacional.

La energía del campo gravitacional es aprovechada, por ejemplo, en una planta hidroeléctrica, figura 4.87. En lugares elevados de la cordillera, se junta el agua de riachuelos y ríos y se la conduce, a tra-



4.86 Al levantar la carga, la energía se acumula en el campo gravitacional.



4.87 Planta hidroeléctrica. Al pasar por los tubos, el agua absorbe energía proveniente del campo gravitacional. En la turbina vuelve a entregar esta energía.

vés de tubos, hacia abajo. Al descender, el agua obtiene energía proveniente del campo gravitacional. Finalmente, pasa a través de la turbina de la planta, donde entrega su energía. La energía entra a la turbina con el portador "agua en movimiento" y, de la turbina al generador, sigue con el portador "momentum angular".

4.22 Los difíciles caminos del momentum y de la energía

Examinemos, a continuación, dos situaciones de movimiento: el movimiento de una piedra arrojada verticalmente hacia arriba (figura 4.88), y el movimiento de un cuerpo que oscila entre dos resortes (figura 4.89).

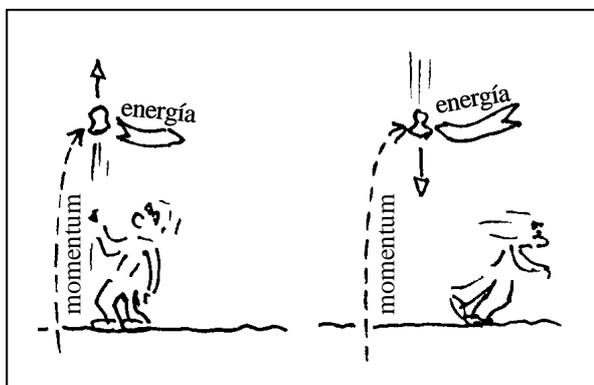
En ambos casos planteamos las siguientes preguntas:

¿Cuál es el camino que sigue la energía?

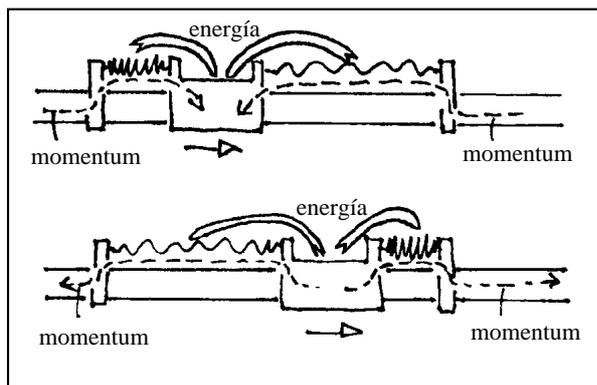
¿Cuál es el camino que sigue el momentum?

a) La piedra arrojada verticalmente hacia arriba

La energía: En el momento del lanzamiento, la energía pasa de la musculatura de la persona que lanza, hacia la piedra. Durante el ascenso, la energía fluye hacia el campo gravitacional. Al llegar al



4.88 Los caminos seguidos por la energía y el momentum en el caso de un objeto lanzado verticalmente hacia arriba



4.89 Los caminos seguidos por la energía y el momentum en un objeto oscilante.

punto de culminación, toda la energía ha salido de la piedra, pero durante la caída, vuelve a fluir desde el campo gravitacional hacia ella. Al chocar con la tierra, se produce calor. Con el calor, la energía se disipa en el ambiente: en la piedra, en la tierra y en el aire.

El momentum: En el instante del lanzamiento, la persona “bombea” momentum negativo desde la tierra a la piedra. Durante el ascenso, fluye momentum positivo desde la tierra, y a través del campo gravitacional, hacia la piedra; su momentum negativo disminuye. En el punto de culminación, todo el momentum negativo de la piedra se ha anulado; pero el flujo de momentum positivo no para y, por lo tanto, la piedra comienza a moverse en el sentido positivo, es decir, hacia abajo. Durante la caída, su momentum positivo aumenta y, al chocar con el suelo, lo entrega a la tierra.

b) El objeto oscilante

El deslizador con cojín de aire de la figura 4.89 ejecuta un movimiento de vaivén, una llamada oscilación. Seguramente, ya habrás visto muchos otros movimientos de oscilación. En muchas de estas situaciones, los caminos recorridos por el momentum y la energía son similares a la que describe la figura 4.89. Examinemos, por lo tanto, con mayor exactitud, lo que ocurre con el deslizador de la figu-

ra 4.89. Desde su posición de equilibrio, lo desviamos hacia la izquierda y lo soltamos.

La energía: En el momento en que soltamos el deslizador, los dos resortes contienen energía acumulada: el de la izquierda porque está comprimido, y el de la derecha porque está tensado. El deslizador se mueve hacia la derecha y obtiene energía de ambos resortes, pues los dos se distienden. Al llegar al punto medio, ambos resortes habrán entregado toda su energía, la que está contenida en el cuerpo en movimiento. El cuerpo sigue deslizándose hacia la derecha y pierde velocidad, porque vuelve a entregar su energía a los dos resortes. Al llegar al extremo derecho, toda la energía está contenida nuevamente en los resortes y el proceso vuelve a transcurrir en el sentido opuesto.

El momentum: En el instante de la partida, el resorte izquierdo se encuentra bajo tensión de presión y el resorte derecho bajo tensión de tracción. En el resorte de la izquierda fluye, por lo tanto, una corriente de momentum hacia la derecha y en el de la derecha, hacia la izquierda. En total existen, entonces, dos flujos de momentum desde la tierra hacia el cuerpo. En consecuencia, el momentum del deslizador aumentará hasta que alcance el punto medio de su recorrido. En ese instante, los resortes están distendidos; la corriente de momentum deja de fluir, pero al moverse el deslizador más allá de su posición media, los resortes vuelven a tensarse. Ahora, el resorte de la derecha estará bajo tensión de presión y el de la izquierda, bajo tensión de tracción. El momentum fluye, pues, en sentido contrario: abandona el cuerpo en ambos extremos y fluye hacia las paredes.

Ejercicios

1. Un carro de ferrocarril choca contra un amortiguador premunido de resortes. ¿Cuáles son los caminos recorridos por el momentum y la energía?
2. Una pelota cae sobre la tierra, rebota y vuelve a saltar hacia arriba. ¿Cuáles son los caminos que siguen el momentum y la energía?
3. Un objeto cuelga del techo mediante un elástico, de manera que puede oscilar hacia arriba y abajo. Describe los caminos que siguen el momentum y la energía.

5. El momentum como vector

5.1 Vectores

Espesa niebla en una zona de intenso tráfico marítimo. El capitán Amundsen recibe, de parte de su radiooperador, información acerca de la posición y la velocidad de los barcos cercanos al Gigantic: “A la distancia de 5,6 millas y en dirección nornoreste con respecto al Gigantic se mueve un buque tanque con la velocidad de 35 nudos (65 km/h)”. ¿Bastará esta información para que el capitán Amundsen pueda evitar una colisión? Evidentemente no (figura 5.1). “¿En qué dirección se mueve?”, pregunta el capitán, porque sabe que hay peligro inminente si el petrolero se dirige en dirección oeste. En este caso, deberá iniciar, inmediatamente, las maniobras destinadas a eludir la colisión. Sin embargo, si el barco se dirige hacia el este, no hay peligro alguno.

Para poder describir, en forma absolutamente clara, el movimiento de un cuerpo (en este caso el buque tanque), hay que indicar:

- la rapidez con que se mueve el cuerpo, es decir, 65 km/h, y
- la dirección en que se mueve el cuerpo, aquí dirección este.

Estas dos indicaciones forman parte del concepto de velocidad. El solo valor de 65 km/h no determina, en forma definitiva, la velocidad del cuerpo. Hay que agregar, además, la dirección y el sentido del movimiento. Decimos que la velocidad tiene una *magnitud* y una *dirección*. En nuestro caso

- la magnitud de la velocidad es de 65 km/h;
- la dirección es este.

Existen otras magnitudes físicas cuya determinación completa requiere indicar la magnitud y la dirección. El momentum pertenece a ellas.

Los dos autos de la figura 5.2 tienen una cantidad de

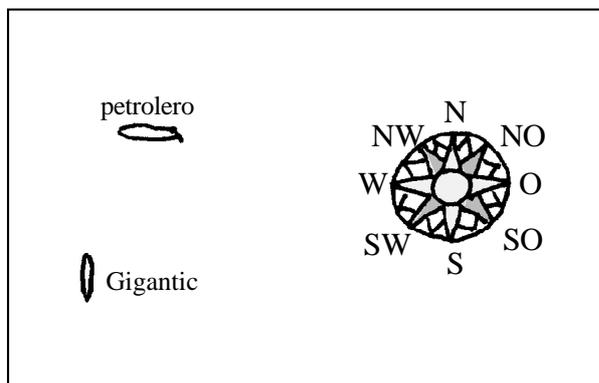


Fig. 5.1. Las posiciones del Gigantic y del buque tanque. El petrolero se mueve en dirección este, no hay peligro.

momentum igual a 2000 Hy, pero no tienen el mismo momentum, porque no se mueven en la misma dirección. El auto A se mueve en dirección x y el auto B en dirección perpendicular a x .

Es el mismo caso que la velocidad: para determinar en forma completa el momentum de un cuerpo, tenemos que indicar su magnitud y su dirección. En nuestro caso:

Momentum del auto A: Magnitud: 2000 Hy;
Dirección: x .

Momentum del auto B: Magnitud: 2000 Hy;
Dirección: perpendicular a x .

Un momentum es idéntico a otro sólo cuando coincide en su magnitud y en su dirección.

Las magnitudes físicas que se determinan en la forma explicada se llaman *vectores*:

Un vector queda determinado a través de su magnitud y su dirección. La velocidad y el momentum son vectores.

Las magnitudes físicas “normales”, es decir las que se determinan únicamente a través de una cantidad numérica, se conocen como *escalares*.

La expresión

$$m = 5 \text{ kg}$$

es completa. Indicar su dirección no tendría ningún sentido. La masa, por lo tanto, es una magnitud escalar. Otros ejemplos de magnitudes escalares son la energía, la intensidad de la corriente eléctrica y la temperatura.

¿Cómo podemos, ahora, comunicar el valor completo de una magnitud vectorial, por ejemplo el momentum de un cuerpo? Un caso puede ser:

- Magnitud del momentum: 2000 Hy
- Dirección del momentum: 35° con respecto al eje x .

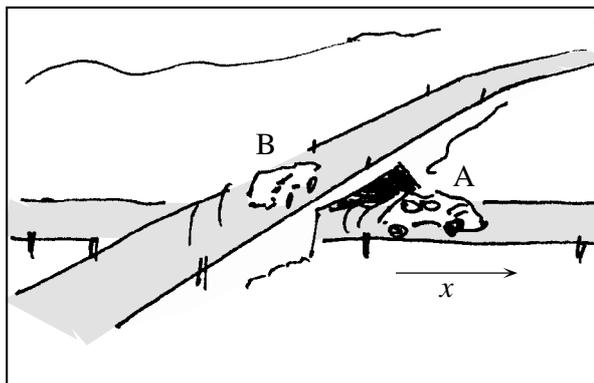


Fig. 5.2. Los momenta de los dos autos no son iguales.

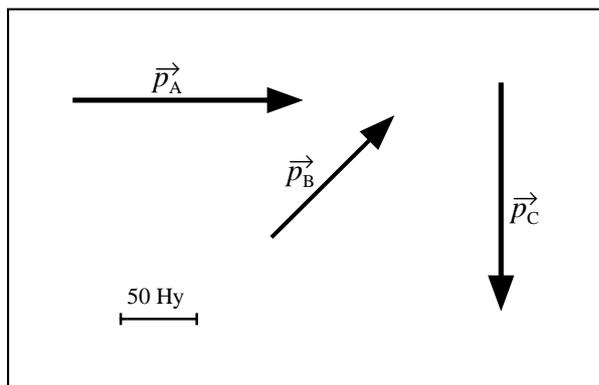


Fig. 5.3. Los momenta de los tres objetos A, B y C representados mediante flechas

Pero existe un método mucho más práctico para indicar un momentum (o cualquier magnitud vectorial): a través de un dibujo. En primer término tenemos que fijar la escala, por ejemplo:

1 cm del dibujo equivale a 50 Hy.

Ahora podemos representar el momentum mediante una flecha: su longitud indica la magnitud del momentum y su dirección indica la dirección del momentum.

En la figura 5.3 se representa el momentum que corresponde a los tres cuerpos A, B y C. Recuerda que siempre 1 cm equivale a 50 Hy.

Para hacernos más fácil la vida, le asignamos nombres diferentes al momentum según su dirección, figura 5.3: El que corresponde al cuerpo A lo llamamos momentum- 0° , porque la flecha forma, con respecto al eje x , un ángulo de 0° . El que corresponde al cuerpo B lo llamamos momentum- 45° , porque su flecha forma, con respecto al eje x , un ángulo de 45° . Al momentum del cuerpo C, finalmente, lo designamos, de acuerdo a lo expuesto, como momentum- 270° .

El carácter de vector de una magnitud física se puede expresar a través de un símbolo correspondiente: colocamos encima de la letra una flechita. De esta manera, el símbolo del vector velocidad será \vec{v} y el del momentum, \vec{p} . En la figura 5.3 usamos estos nuevos símbolos.

Ejercicios

- Representa gráficamente los siguientes valores de momentum:
Cuerpo P: Magnitud del momentum: 20 Hy
Dirección del momentum: 270° con respecto al eje x .
Cuerpo Q: Magnitud del momentum: 1200 Hy
Dirección del momentum: 10° con respecto al eje x .
- Anteriormente habíamos considerado solamente movimientos paralelos a un único eje. En este caso teníamos que diferenciar entre valores positivos y negativos. Representa, en forma de flecha, los momenta $p_1 = 3,5 \text{ Hy}$ y $p_2 = -4,5 \text{ Hy}$.
- Indica la magnitud y la dirección de los momenta representados como flechas en la figura 5.4.

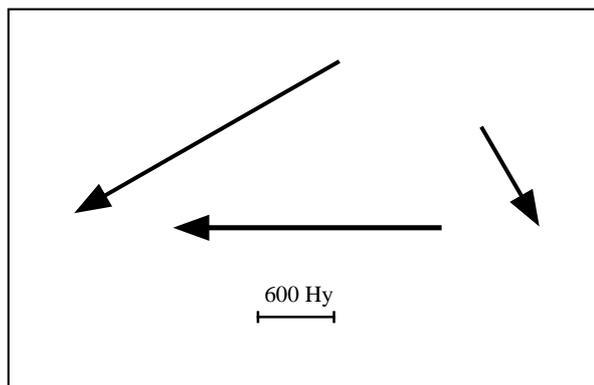


Fig. 5.4. Con respecto al ejercicio 3

5.2 La dirección de un flujo y la dirección de lo que fluye

Una persona parada en el borde de una laguna trata de mover una balsa con la ayuda de una barra larga. Las figuras 5.5a, b y c muestran tres escenas diferentes, vistas desde arriba. Describiremos lo que ocurre. Para facilitarnos la tarea hemos marcado la dirección del eje x e indicamos siempre la dirección del momentum con respecto a esta dirección x .

En la figura 5.5a, la persona empuja la balsa hacia su derecha, es decir, en el sentido positivo del eje x . Supongamos que la persona empuja de tal manera que en cada segundo fluyen 150 Huygens hacia la balsa. La intensidad del flujo de momentum será, por lo tanto, igual a $150 \text{ Hy/s} = 150 \text{ N}$. En la figura 5.5b, la persona está alejando la balsa hacia el centro de la laguna. Nuevamente está empujando de manera que en cada segundo llegan a la balsa 150 Hy. También en la figura 5.5c, la persona empuja con 150 N, pero ahora oblicuamente hacia adelante y hacia la derecha.

Si bien en todos estos casos fluye el mismo número de Huygens por segundo, los flujos de momentum son distintos, porque lo que fluye no es igual cada vez.

En el primer caso, la balsa recibe momentum- 0° y, por lo tanto, a lo largo de la barra fluye momentum- 0° . En el segundo caso, la balsa recibe momentum- 90° , por lo que debe fluir, a lo largo de la barra, momentum- 90° . En el tercer caso, fluye, en la barra, momentum- 45° .

Las flechas dibujadas al lado de cada barra representan el momentum que fluye desde la persona hacia la balsa. Puedes imaginarte que cada flecha representa una pequeña porción de momentum que se está moviendo, a lo largo de la barra, desde la persona hacia la balsa.

La línea larga y discontinua indica, a su vez, el camino seguido por el momentum.

Así, puedes advertir que con la intensidad del flujo de momentum se nos presenta una situación idéntica a la del momentum mismo: Para determinarla no es suficiente indicar un puro número, una cantidad. La intensidad del flujo de momentum recién queda

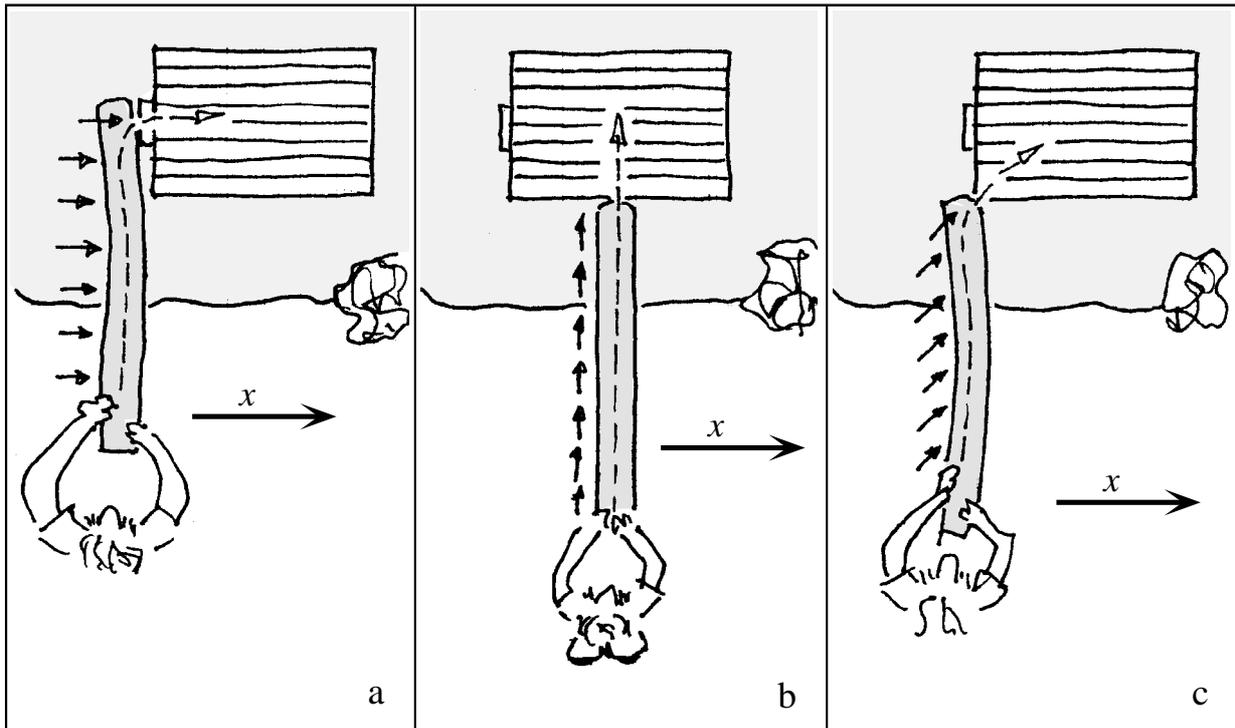


Fig. 5.5. Hacia la balsa, es decir a través de la barra desde abajo hacia arriba, fluye (a) momentum-0°, (b) momentum-90° y (c) momentum-45°.

determinada en forma completa cuando indicamos, al lado de su magnitud (150 Hy), la dirección en que fluye el momentum (0° o 90° o 45°) también. Entonces:

La intensidad del flujo de momentum es una magnitud vectorial.

Igual que los demás, podemos representar este vector mediante una flecha. En ella

- la longitud de la flecha significa la magnitud del flujo de momentum, y
- la dirección de la flecha, la dirección del momentum que fluye a través del conductor.

El símbolo correspondiente será \vec{F} .

La figura 5.6 muestra los vectores de la intensidad del flujo de momentum que corresponden a las figuras 5.5a, b y c.

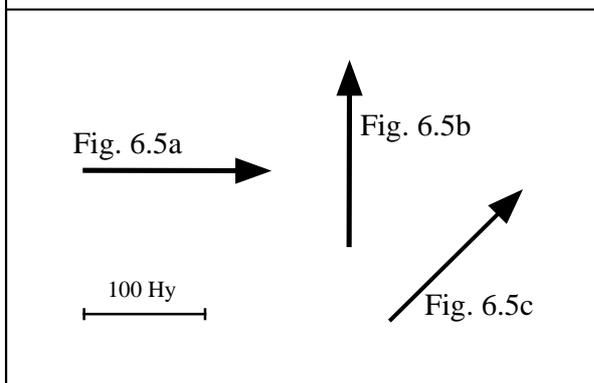


Fig. 5.6. Vectores intensidad de flujo de momentum que fluyen hacia la balsa en las figuras 5.5 a, b y c

Consideremos, ahora, la figura 5.7, comparándola, al mismo tiempo, con la figura 5.5c: en la figura 5.7 también fluye momentum-45° hacia la balsa, pero, a diferencia de lo que ocurre en la figura 5.5c, no a lo largo de una barra recta, sino a través de una barra curva. En este caso, el momentum tiene que seguir una curva en S. Tenemos entonces: en ambas figuras fluye la misma cantidad de momentum y en los dos casos corresponde a 150 Hy/s. Pero la primera vez, el momentum fluye a través de un conductor recto y la segunda, a través de uno curvo. Por lo tanto, las flechas vectoriales que corresponden a las figuras 5.5c y 5.7 son iguales entre si.

El camino que sigue el momentum en las dos figuras queda señalado mediante una línea discontinua.

No debes confundir la dirección del camino con la dirección del momentum trasladado.

Al describir las tres situaciones representadas en las figuras 5.5a, b y c dijimos qué tipo de momentum y cuánto fluye *desde la tierra hacia la balsa*. Sin embargo, podríamos describir estas mismas situaciones considerando qué tipo de momentum y cuánto fluye *desde la balsa hacia la tierra*. Las dos descripciones son absolutamente equivalentes.

“Desde la tierra hacia la balsa fluyen en cada segundo x Huygens de momentum con una dirección determinada” significa lo mismo que “desde la balsa hacia la tierra fluyen en cada segundo x Hy de momentum en la dirección contraria”.

La figura 5.8 muestra la misma situación que la figura 5.5a, pero la interpretación correspondiente es diferente. La figura 5.8 no muestra qué tipo de momentum llega a la balsa, sino qué tipo de momentum fluye hacia la tierra, es decir, momentum-180°.

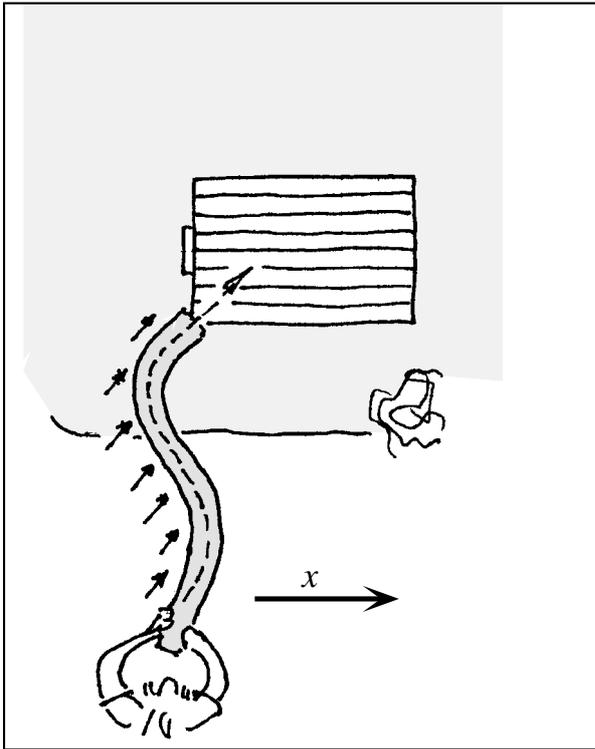


Fig. 5.7. Hacia la balsa fluye momentum-45°, a través de una barra curvada.

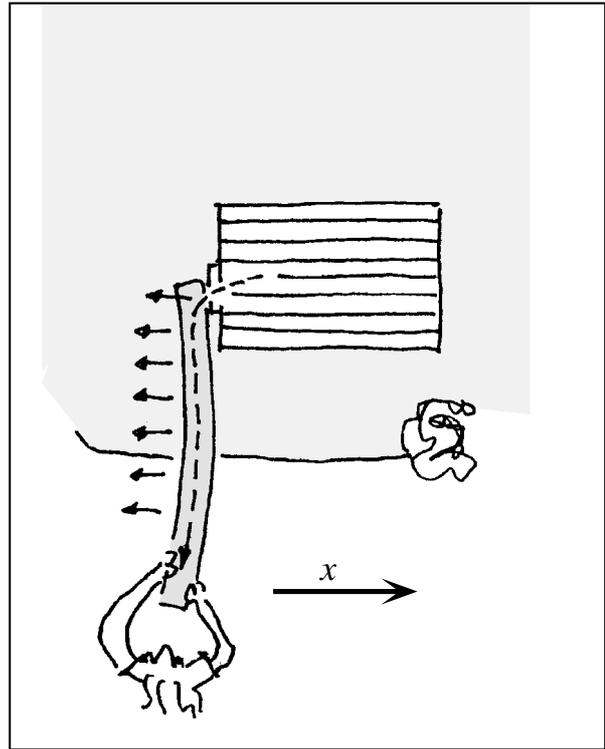


Fig.5.8. La misma situación que figura 5.5a, pero interpretada de otra manera: hacia la tierra fluye momentum-180°.

Tu puedes ver que a la flecha de la intensidad del flujo de momentum le corresponden, en las dos interpretaciones, direcciones opuestas.

Por lo tanto, las dos afirmaciones siguientes serán equivalentes:

- Desde la tierra hacia la balsa fluyen 150 Hy/s de momentum-0°;
- Desde la balsa hacia la tierra fluyen 150 Hy/s de momentum-180°.

Ejercicios

1. A través de la barra ubicada entre el tractor y el acoplado (figura 5.9) fluye una corriente de momentum de 300 N. ¿Qué tipo de momentum fluye hacia el acoplado? Representa, mediante una flecha vectorial, la intensidad del flujo de momentum. Describe esta misma situación, indicando cuánto y qué tipo de momentum fluye, a través de la barra, desde el acoplado hacia el tractor.

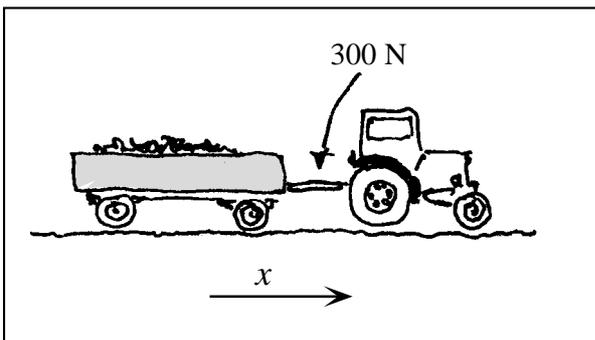


Fig. 5.9. Con respecto al ejercicio 1

2. Una persona está empujando, mediante una barra en forma de espiral, a un carrito en dirección x positivo, figura 5.10. Fluye una corriente de momentum de intensidad igual a 25 N.

- a) ¿Qué tipo de momentum fluye hacia el carrito?
- b) Dibuja, en la figura 5.10, el camino que recorre el momentum.
- c) Dibuja la flecha vectorial correspondiente a la intensidad del flujo de momentum.

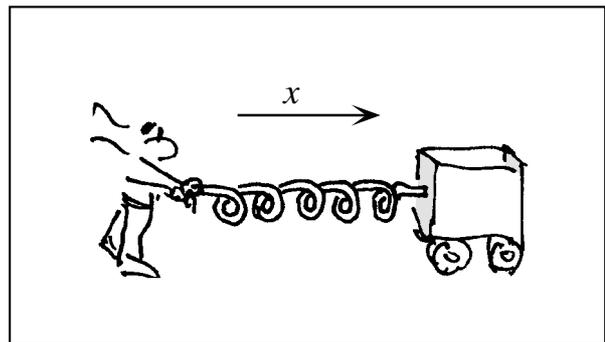


Fig. 5.10. Con respecto al ejercicio 2

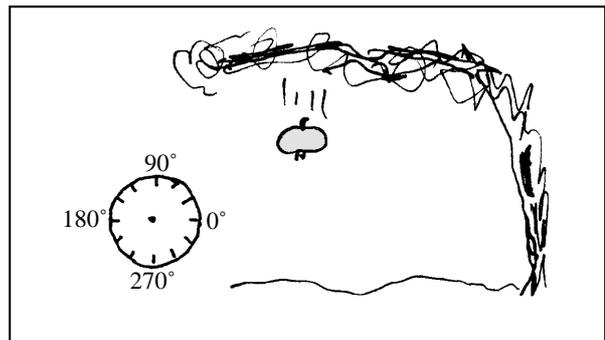


Fig. 5.11. Con respecto al ejercicio 3

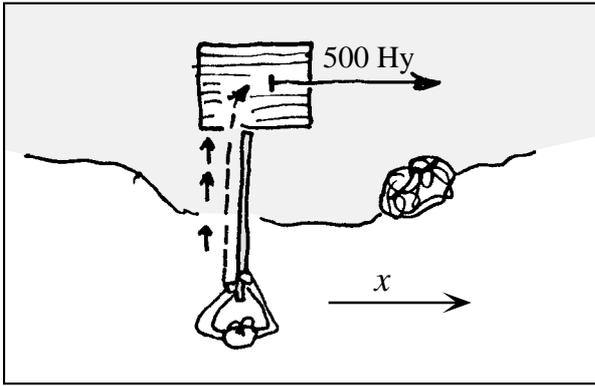


Fig.5.12. La balsa tiene 500 Hy de momentum-0° y recibe, además, 150 Hy de momentum-90°.

3. E Una manzana cae desde el árbol, figura 5.11. Hacia ella fluye, a través del campo gravitacional, momentum proveniente de la tierra. La manzana pesa 300 g (gramos peso).

- a) ¿Qué intensidad tiene el flujo de momentum?
- b) ¿Qué tipo de momentum fluye hacia la manzana? (Indica el ángulo con respecto a un plano perpendicular).
- c) Dibuja la flecha vectorial que corresponde a la intensidad del flujo de momentum.

5.3 La suma de los vectores

Consideremos, una vez más, la laguna con la balsa, figura 5.12. La balsa se mueve (“tiene vuelo”) hacia la derecha. Expresado en terminología física, tiene momentum-0°, suponemos de una magnitud de 500 Hy. La persona empuja con una barra contra la balsa, en la figura desde abajo. Empuja de manera que en cada segundo se transfieren a la balsa 50 Hy de momentum-90°. Empuja, además, durante 3 segundos. ¿Cuánto momentum tiene la balsa ahora?

Bueno, tiene 500 Hy de momentum-0° más 3 · 50 Hy de momentum-90°. Pero, cuál es la suma correspondiente y de qué tipo será el momentum total?

Seguramente, puedes imaginarte que, al final, la balsa ya no se moverá ni en forma paralela ni perpendicularmente con respecto a la dirección x, sino que se desplazará oblicuamente hacia el ángulo su-

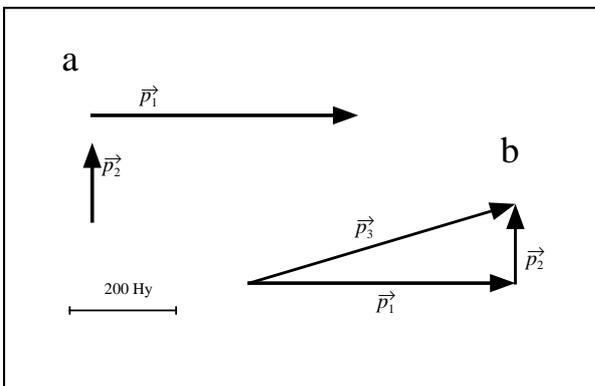


Fig. 5.13. Suma de vectores

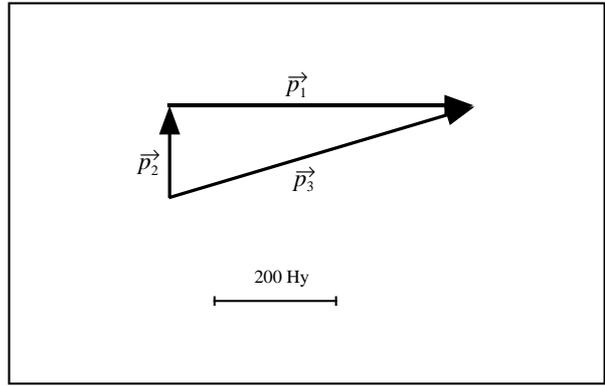


Fig. 5.14. La suma de los vectores es conmutativa.

perior derecho de la figura. El momentum total y final tampoco será, entonces, ni momentum-0° ni momentum-90°.

Podemos expresar la pregunta por el momentum total de otra manra: ¿Cómo se suman vectores? ¿Cómo sumamos 500 Hy de momentum-0° más 150 Hy de momentum-90°?

Es fácil encontrar la solución utilizando la representación de los vectores de momentum mediante flechas.

Representemos cada uno de los valores de momentum a través de su flecha, figura 5.13a, llamando a estas flechas \vec{p}_1 y \vec{p}_2 . Ahora, las unimos de manera que el origen de \vec{p}_2 coincida con la punta de \vec{p}_1 figura 5.13b. Dibujamos una tercera flecha \vec{p}_3 , haciendo coincidir su origen con el de \vec{p}_1 , y su punta con la de \vec{p}_2 . Esta flecha \vec{p}_3 representa el momentum total buscado.

Lo que acabamos de hacer se llama *sumar vectores* y se representa simbólicamente de la siguiente manera:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3$$

En vez de agregar \vec{p}_2 a \vec{p}_1 , se puede también agregar \vec{p}_1 a \vec{p}_2 , figura 5.14. El resultado es el mismo. La suma de vectores, igual que una suma cualquiera, es conmutativa.

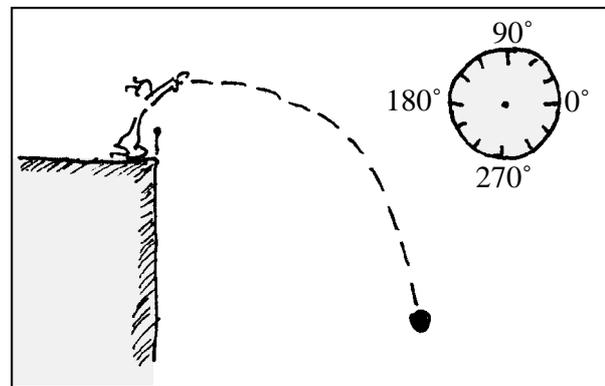


Fig. 5.15. Al principio, la piedra sólo tiene momentum-0°. A través del campo gravitacional recibe, además y constantemente, momentum-270°.

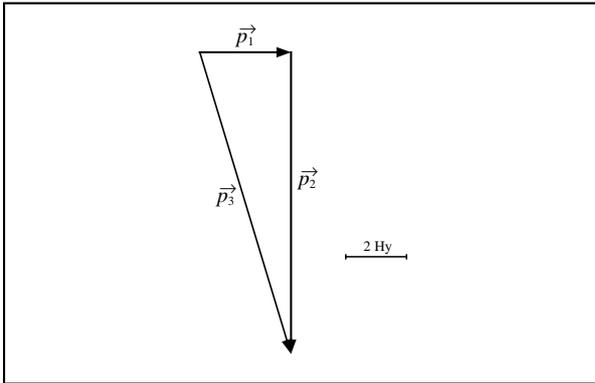


Fig. 5.16. Los vectores correspondientes al lanzamiento de la figura 5.15

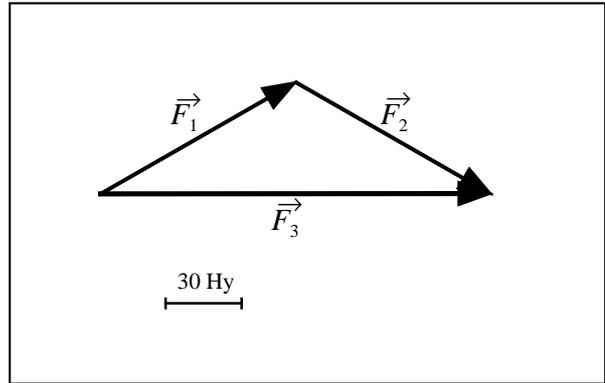


Fig. 5.18. Flechas vectoriales correspondientes a las intensidades de los flujos de momentum de la figura 5.17

Ejemplo

Lanzamos una piedra de 0,5 kg de masa en dirección horizontal, figura 5.15. Inmediatamente después de su lanzamiento, la piedra tiene 3 Hy de momentum-0°. Debido a su masa, recibe ahora, de parte de la tierra, constantemente nuevo momentum-270°. ¿Cuánto momentum, y de qué tipo, tiene la piedra después de 2 segundos?

Calculamos, primero, la intensidad del flujo de momentum proveniente de la tierra:

$$F = m \cdot g = 0,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 5 \text{ N}$$

Esto significa que la piedra recibe, de parte de la tierra, 5 Hy en cada segundo. El momentum recibido, al cabo de 2 segundos, será igual a

$$p = F \cdot t = 5 \text{ Hy/s} \cdot 2 \text{ s} = 10 \text{ Hy}$$

Ahora tenemos que sumar

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3$$

en que corresponde

- \vec{p}_1 : 3 Hy de momentum-0°, y
- \vec{p}_2 : 10 Hy de momentum-270°.

La figura 5.16 muestra la solución. La magnitud del momentum total lo podemos calcular mediante el teorema de Pitágoras:

$$\begin{aligned} \text{magnitud de } \vec{p}_3 &= \sqrt{(3 \text{ Hy})^2 + (10 \text{ Hy})^2} \\ &= \sqrt{9 + 100} \text{ Hy} \\ &= 10,44 \text{ Hy} \end{aligned}$$

Ejemplo

Dos personas arrastran un bote a lo largo de un canal. Una de las dos camina por una orilla, la otra por la orilla opuesta, figura 5.17. Los dos cordeles forman, con respecto al canal, un ángulo de 30° (mejor dicho, el cordel superior forma un ángulo de 30°, el cordel inferior, uno de 330°). En cada cordel fluye una corriente de momentum de 90 N. ¿Cuánto momentum y de qué tipo recibe el bote en cada segundo?

En el cordel superior fluyen, hacia el bote, 90 N de momentum-30°, en el cordel inferior 90 N de momentum-330°. En la figura 5.18 se han sumado las dos flechas correspondientes a las intensidades del flujo de momentum. La intensidad del flujo de momentum total que llega al bote es igual a la suma de los dos vectores. Según el dibujo, será igual a 156 N de momentum-0°.

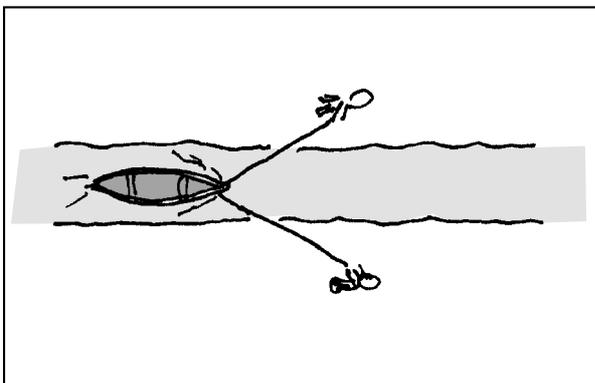


Fig.5.17. El bote recibe de una persona momentum-30° y de la otra momentum-330°.

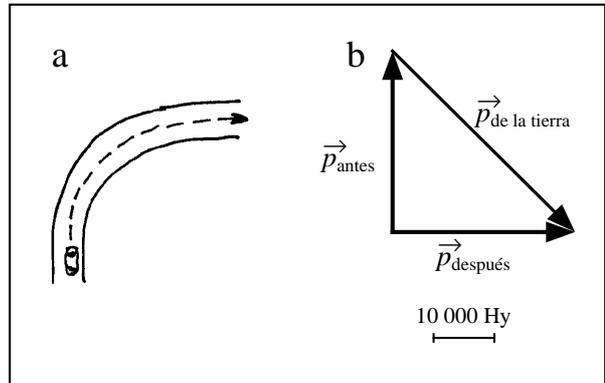


Fig. 5.19. (a) El auto recorre una curva de 90°. (b) Construcción del vector del momentum que el auto recibe desde la tierra.

Ejemplo

Un auto recorre una curva de 90° , figura 5.19a. Antes y después, su momentum tiene la misma magnitud de $30\,000\text{ Hy}$. Al recorrer la curva, el auto recibe momentum desde la tierra y tendremos, entonces, la siguiente relación: momentum inicial del auto + momentum proveniente de la tierra = momentum final del auto. El signo “+” significa, evidentemente, suma vectorial.

La figura 5.19b nos enseña la construcción de la flecha vectorial correspondiente al momentum entregado por la tierra al auto. Su dirección es la de la bisectriz del ángulo formado por los dos segmentos de camino recto y su magnitud, de acuerdo al teorema de Pitágoras, es de unos $42\,000\text{ Hy}$.

Ejercicios

- Una piedra que pesa 100 g es arrojada horizontalmente desde una torre, con un momentum inicial de $0,5\text{ Hy}$ de magnitud.
 - ¿Qué cantidad de momentum y de qué tipo recibe desde la tierra en cada segundo?
 - Construye la flecha vectorial correspondiente al momentum de la piedra un segundo después de ser arrojada.
 - ¿Cuál es la magnitud del momentum en este mismo instante?
- Una piedra que pesa $0,3\text{ kg}$ es arrojada horizontalmente desde una torre. Su velocidad inicial tiene una magnitud de 5 m/s .
 - ¿Cuál es la magnitud de su momentum inicial?
 - En un momento determinado, el ángulo con que la piedra cae oblicuamente hacia abajo será exactamente de 45° . Hasta este instante, ¿cuánto momentum ha recibido la piedra desde la tierra? Construye el diagrama vectorial. ¿Cuál es la magnitud del momentum en ese instante?
- Una bala que pesa 3 kg es empujada oblicuamente hacia arriba con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal. Su momentum inicial tiene una magnitud de 12 Hy . ¿Después de cuánto tiempo se mueve oblicuamente hacia abajo, formando, con respecto a la horizontal, un ángulo de 45° ?
- Un tren recorre una curva de 30° . Su velocidad tiene una magnitud de 70 km/h y su masa es igual a 1200 t . Construye la flecha vectorial que representa el momentum recibido por el tren desde la tierra.
- Un auto recorre una curva de 90° . Su velocidad inicial tiene una magnitud de 30 km/h y, la final, de 50 km/h . Su masa es igual a 1400 kg . Construye la flecha vectorial correspondiente al momentum que recibe el auto al recorrer la curva. ¿Cuál es la magnitud de este momentum?
- El arquero lanza la pelota al campo de juego. Un jugador la “chutea” de vuelta, directamente al arco. Describe de dónde recibe la pelota su momentum y de qué forma lo pierde. Considera también la resistencia del aire.

5.4 Satélites, lunas, planetas

Ya hemos visto que un objeto que se encuentra cerca de la superficie terrestre recibe momentum- 270° . Si lo dejamos caer, el momentum- 270° aumenta y el

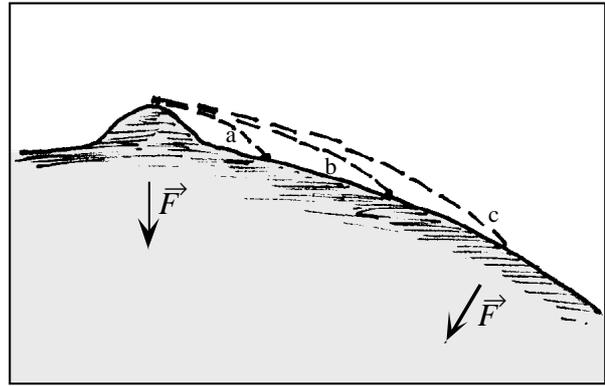


Fig. 5.20. Un objeto es arrojado desde la punta de una alta montaña. Las tres trayectorias corresponden a tres valores diferentes del momentum inicial.

objeto empieza a moverse en dirección hacia la tierra.

Pero no solamente al soltar el objeto caerá a la tierra, sino, también, al lanzarlo en forma horizontal, figura 5.15.

Nos imaginamos ahora que estamos arrojando un objeto desde una alta montaña y con muchísimo momentum- 0° inicial. La figura 5.20 muestra su trayectoria para tres valores diferentes del momentum- 0° inicial.

El objeto llegará tan lejos que la curvatura de la superficie terrestre se hará perceptible. Cerca del punto de lanzamiento, el objeto recibe momentum- 270° . Sin embargo, a medida que el objeto vaya avanzando, la dirección del momentum recibido va cambiando. De esta manera, en la figura 5.20 y al final de la trayectoria c, el objeto ya no recibe momentum- 270° , sino momentum- 240° .

Si logramos conseguir un momentum inicial apropiadamente grande, se presentará la situación ilustrada en la figura 5.21: el objeto sigue cayendo, pero sin acercarse a la superficie terrestre.

En el lugar A obtiene momentum- 270° , en B, momentum- 225° , en C, momentum- 180° , en D, momentum- 90° , en E, momentum- 0° , etc. El momentum que se va agregando hace que la trayectoria del

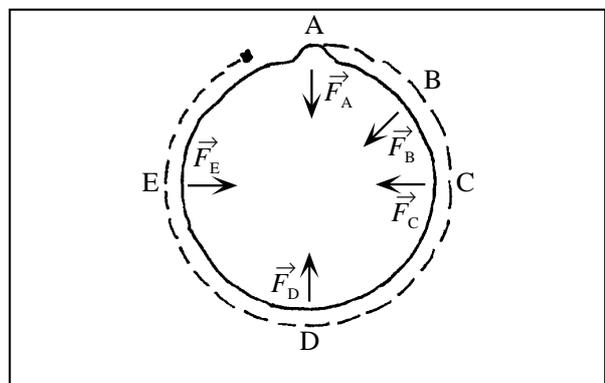


Fig. 5.21. La dirección del momentum que llega desde la tierra es perpendicular al momentum que tiene el cuerpo en este mismo instante.

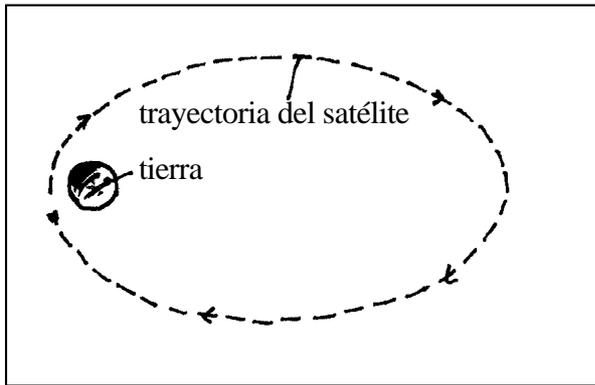


Fig. 5.22. Si el momentum inicial es mayor que el que necesita para una trayectoria circular, el satélite se moverá en una trayectoria elíptica.

objeto se esté curvando, en cada punto, hacia la superficie terrestre. Al conseguir un momentum inicial apropiado, el objeto alcanzará una trayectoria circular.

La dirección del momentum que recibe el objeto en cada punto es perpendicular a la dirección del momentum que tiene en este mismo instante. De esta manera, en el punto B, el objeto tiene momentum-315° y recibe momentum-225°, en C, tiene momentum-270° y recibe momentum-180°, etc.

Esperamos que te hayas dado cuenta que lo que acabamos de discutir no constituye, de ninguna manera, un experimento teórico, irreal y loco.

Al decir que un satélite es “colocado en órbita” queremos expresar que

- se le coloca a cierta altura, y
- se le entrega la cantidad apropiada de momentum horizontal para que pueda describir una trayectoria circular.

Si al satélite no le entregamos una cantidad de momentum inicial suficiente, volverá a caer sobre la tierra, igual que los objetos de la figura 5.20. Por otro lado, si le entregamos una mayor cantidad de momentum inicial, se alejará más de la tierra y su trayectoria será elíptica, figura 5.22.

Solamente con un momentum inicial mucho mayor podríamos lograr que el objeto se aleje definitivamente de la tierra. En este caso, ya no va a ser un satélite sino una *sonda espacial* (una sonda espacial muy exitosa fue Voyager 2 que, después de un vuelo de unos 10 años abandonó el sistema solar).

Sin embargo, los movimientos satelitales no son, de ninguna manera, inventos del hombre. Existen en la naturaleza desde hace muchísimo tiempo antes de la era humana. El movimiento circular del satélite natural luna en torno a la tierra es igual al de un satélite artificial. Solo que la luna gira a una altura mucho mayor. Mientras que los satélites artificiales se mueven entre 200 km y 40 000 km de distancia de la superficie terrestre, la distancia de la luna a la tierra es de casi 400 000 km.

Seguramente, tu ya sabes, que no sólo la tierra tiene luna, sino también los demás planetas.

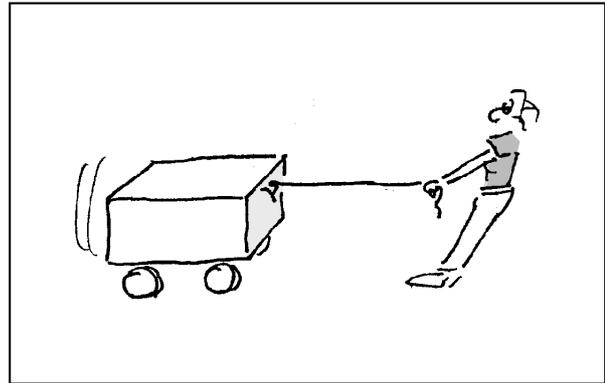


Fig. 5.23. Las ruedas aíslan al carrito de la tierra y el momentum que llega desde la persona no puede escurrirse. Se acumula en el carrito.

Y, finalmente, también el movimiento de la tierra en torno al sol es del mismo tipo como el que acabas de conocer. La tierra, igual que los demás planetas, recibe constantemente momentum desde el sol. Su dirección es, en cada momento, perpendicular a la del momentum que tiene en este mismo instante.

5.5 Ruedas

Hace algún tiempo atrás, cuando aún no sabemos que el momentum es un vector, estudiamos los conductores y los no conductores de momentum. Entonces existía, para nosotros, únicamente momentum de un solo tipo y considerábamos movimientos en una sola dirección. Entre otras, encontramos la siguiente regla: las ruedas sirven para aislar el momentum.

Esta regla se hace, ahora, más compleja si consideramos que el momentum puede fluir en diferentes direcciones.

La figura 5.23 nos muestra, una vez más, cómo podemos demostrar que las ruedas impiden el flujo de momentum hacia la tierra. La persona está tirando y el momentum fluye, a través del cordel, hacia el carrito. Pero, como el momentum no puede fluir hacia la tierra a través de las ruedas, se va acumulando en el carrito y éste se mueve cada vez más rápidamente.

En la figura 5.24, la persona igualmente tira un ca-

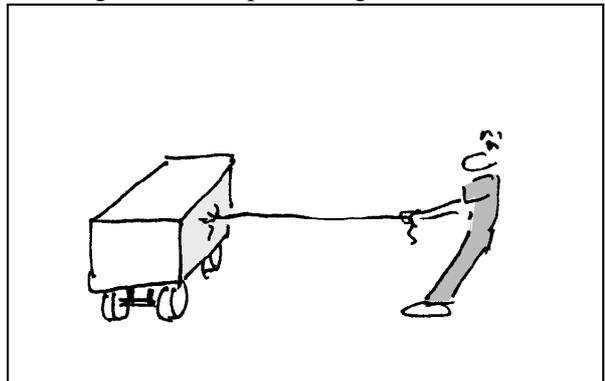


Fig. 5.24. El momentum que llega desde la persona fluye hacia la tierra. El momentum perpendicular no es detenido por las ruedas.

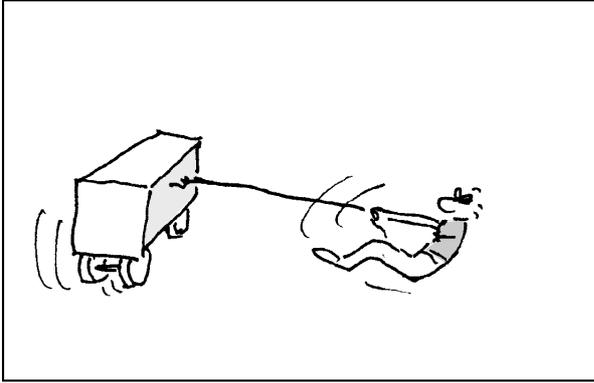


Fig. 5.25. Con un flujo de momentum muy fuerte, la unión conductora colapsa.

rito. Pero, en este caso y a pesar de la existencia de las ruedas, el momentum no se va acumulando dentro del carrito. Fluye hacia la tierra y el carrito no se mueve. Aquí, y a diferencia de la figura 5.23, el momentum que llega al carrito tiene dirección perpendicular a las ruedas.

Podemos afirmar, por lo tanto:

Las ruedas permiten el flujo del momentum perpendicular hacia la tierra, pero no dejan pasar el momentum longitudinal.

Pero, acabamos de pintar las cosas muy en blanco y negro. Por un lado sabemos que, debido a la existencia del roce, una pequeña parte del momentum longitudinal fluye hacia la tierra y, por otro lado, al tirar fuertemente (es decir, haciendo llegar un flujo de momentum muy potente), podemos hacer colapsar la unión conductora de momentum perpendicular de la figura 5.24 (figura 5.25).

El auto de la figura 5.26 que recorre la curva tiene que desprender su momentum- 0° . Esto funciona debido a que las ruedas dejan que el momentum perpendicular fluya hacia la tierra, salvo cuando el camino está con hielo, porque entonces las ruedas se transformarán en no conductores de momentum de cualquier dirección. En este caso, los vehículos que se mueven sobre rieles son más seguros, ya que sus ruedas siempre serán buenos conductores para el momentum perpendicular.

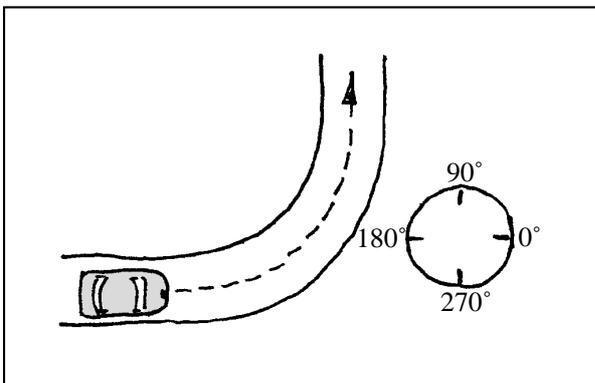


Fig. 5.26. Al pasar la curva, el auto tiene que desprender su momentum- 0° hacia la tierra y recibir, de ella, momentum- 90° .

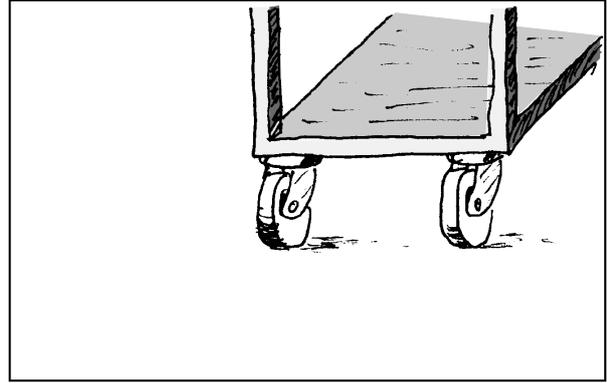


Fig. 5.27. Las ruedas son móviles. No dejan pasar ni momentum longitudinal ni perpendicular.

Mucho más difusa se presenta la situación en el caso de los barcos. El momentum longitudinal se transmite más difícilmente al agua que el momentum perpendicular, pero la diferencia no es tan nítida como en los vehículos terrestres.

A veces es deseable que un móvil no pierda ni su momentum longitudinal ni perpendicular. Un método para conseguir esto consiste en colocar las ruedas de manera que puedan cambiar su dirección. A lo mejor, en tu Colegio, la mesa en que se arman los experimentos de Física tiene este tipo de ruedas, figura 5.27.

Y ahora, ¿terminamos con el asunto de las ruedas? Todavía no, porque acabamos de estudiar únicamente los movimientos correspondientes al plano en que se mueve el carrito. Aún nos falta considerar una tercera dirección.

Toma un carrito y presiónalo, desde arriba, contra la mesa. Obviamente no se moverá. Ahora, tiralo verticalmente hacia arriba: se moverá hacia arriba. Haz lo mismo en una pared, en vez de la mesa. Presionando el carrito contra la pared, tampoco se mueve, porque el momentum se escurre a través de la pared, figura 5.28. Alejándolo de la pared, sí se moverá, porque el momentum ya no puede fluir hacia la pared. De todas maneras, en estos casos las ruedas son absolutamente innecesarias.

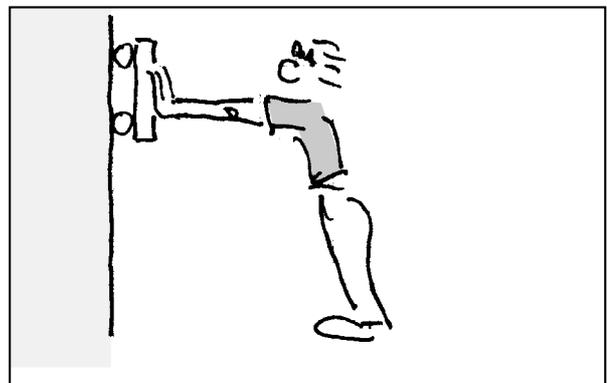


Fig. 5.28. El momentum, cuya dirección es perpendicular a la base de sustentación del carrito, se escurre a través de la pared.

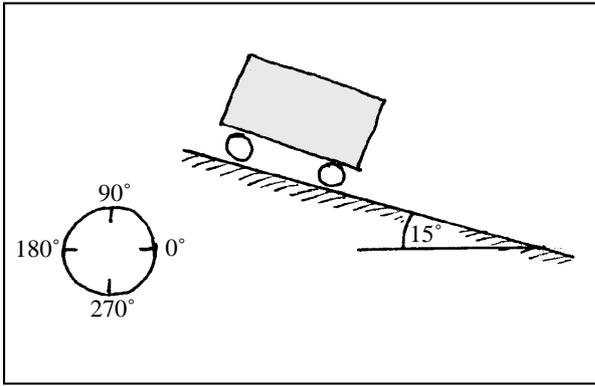


Fig. 5.29. Al carrito le llega momentum-270°, y se descompone en una parte que fluye hacia la tierra y otra que se acumula en el carrito.

Ejemplo

Un carro que pesa 20 kg (tiene una masa de 20 kg) está parado en un camino en pendiente y se le sueltan los frenos, figura 5.29. ¿Qué ocurre? A través del campo gravitacional fluye, constantemente, momentum-270° hacia el carro. La magnitud de la intensidad del flujo de momentum será, entonces, igual a

$$F = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 200 \text{ N}$$

¿Qué pasa con este momentum? ¿Fluye hacia la tierra o se acumula dentro del carro?

En realidad, no sabemos lo que ocurre con el momentum-270°, pero sí sabemos lo que ocurre con el momentum que tiene dirección paralela y el que tiene dirección perpendicular con respecto a la posición del carro.

El momentum en dirección longitudinal es del tipo 345°. No puede escurrirse y se acumula dentro del carro.

El momentum en dirección perpendicular, en cambio, es del tipo 225° y fluye totalmente hacia la tierra.

Lo que tenemos que hacer, entonces, es descomponer el flujo de momentum-270° aferente \vec{F} en un flujo longitudinal \vec{F}_{long} de momentum-345° y otro

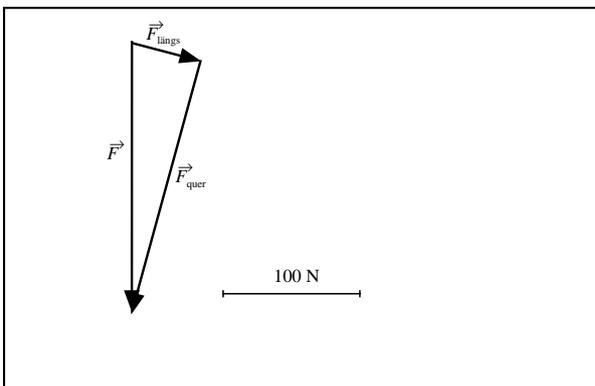


Fig. 5.30. Descomposición del vector del flujo de momentum-270° aferente en una componente -225° y otra -345°.

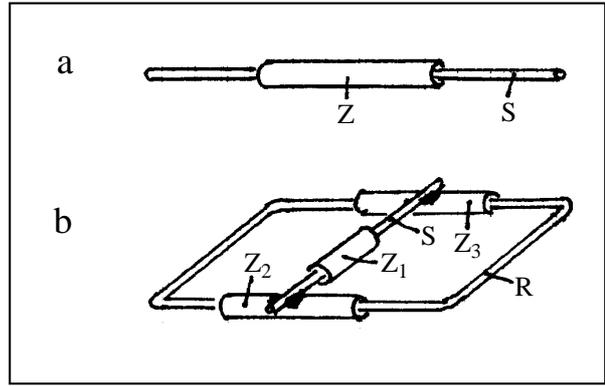


Fig. 5.31. (a) Con respecto al ejercicio 1, (b) con respecto al ejercicio 2

perpendicular \vec{F}_{perp} de momentum-225°, figura 5.30. La misma figura nos indica que

$$F_{\text{long}} = 50 \text{ N}$$

$$F_{\text{perp}} = 190 \text{ N}$$

Tenemos, entonces, que, en cada segundo, 190 Hy de momentum fluyen hacia la tierra y, por otro lado, el momentum del carro se incrementa en 50 Hy.

Ejercicios

1. Una manilla en forma cilíndrica, Z, puede deslizarse sin roce sobre una barra S, figura 5.31a. ¿Para qué tipo de momentum será permeable la unión entre manilla y barra y para qué tipo de momentum será impermeable?
2. El cilindro Z1 puede deslizarse sobre la barra S y los cilindros Z2 y Z3 pueden deslizarse sobre el marco R, figura 5.31b. ¿Para qué tipo de momentum será permeable la unión entre Z1 y R para qué tipo de momentum no lo será?

5.6 Cordeles

Otra de las antiguas reglas que tenemos que completar es: los cordeles conducen el momentum en una sola dirección.

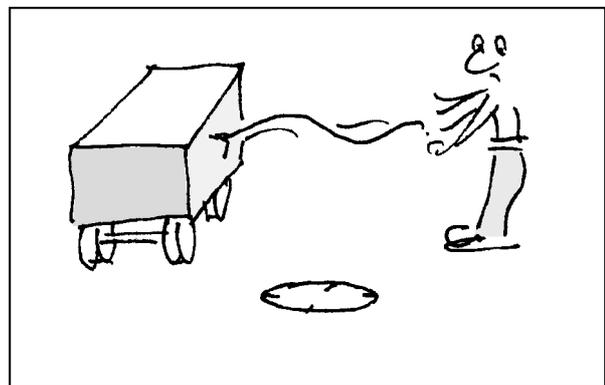


Fig. 5.32. La persona intenta poner en movimiento el carrito en dirección perpendicular a la del cordel.

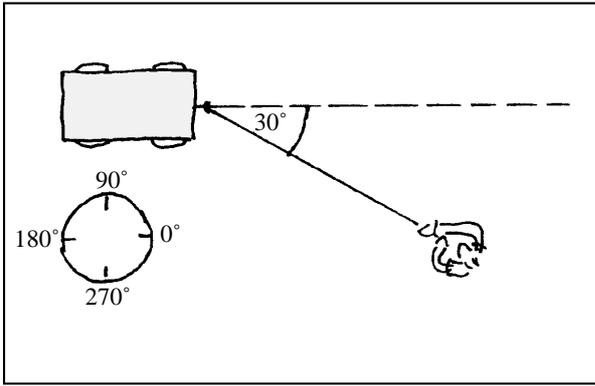


Fig. 5.33. El carrito con el cordel, visto desde arriba. Se tira el cordel, el momentum-0° del carrito aumenta.

Lo que ocurre en la figura 5.32 no se entiende fácilmente: con la ayuda de un cordel, la persona trata de poner en movimiento el carrito hacia un lado, evidentemente sin poder lograrlo. Si describimos la situación usando el concepto de momentum, podemos decir que la persona intenta hacer pasar, a través de un cordel colocado en dirección 0°, momentum-90°. Y esto no funciona. Los cordeles son, entonces, selectivos.

A través de un cordel solo podemos hacer pasar momentum de dirección paralela al cordel y en un único sentido.

Apliquemos esta regla en su nueva expresión: La figura 5.33 muestra, visto desde arriba, un carrito que es tirado mediante un cordel. Sin embargo, el cordel no se tira hacia adelante sino hacia un lado. En el cordel fluye una corriente de momentum de 40 N. ¿En cuántos Hy varía el momentum del carrito en cada segundo? ¿Qué cantidad de momentum fluye hacia la tierra?

El momentum que fluye a través del cordel debe tener su misma dirección. Al vector de la intensidad

del flujo correspondiente lo designamos por \vec{F} , figura 5.34, y lo descomponemos en dos componentes

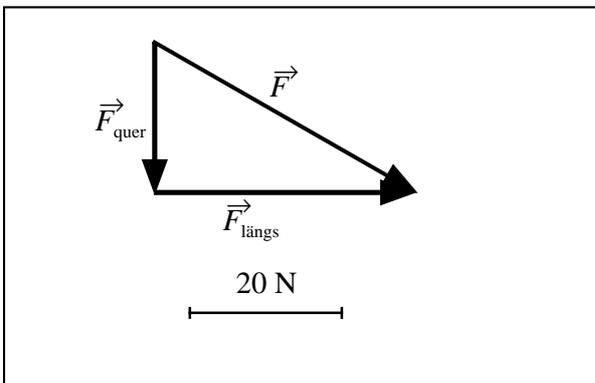


Fig. 5.34. Descomposición del vector del flujo de momentum en una parte longitudinal y otra perpendicular.

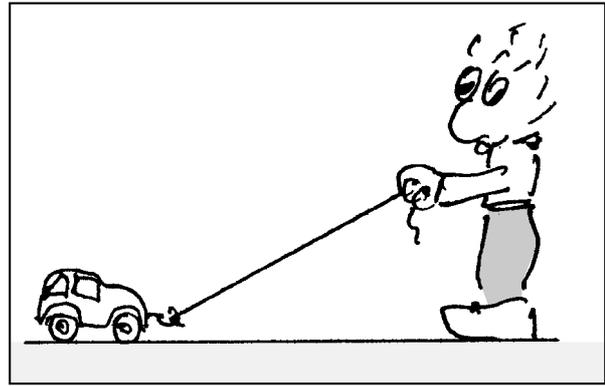


Fig. 5.35. Con respecto al ejercicio 1

- una componente \vec{F}_{perp} , que actúa en forma perpendicular a la dirección del movimiento del carrito y se escurre a través de las ruedas, y
- una componente \vec{F}_{long} , que actúa en la misma dirección del movimiento del carrito y genera un incremento de su momentum.

La figura nos enseña que

$$F_{\text{perp}} = 20 \text{ N}$$

$$F_{\text{long}} = 34 \text{ N} .$$

Entonces: En cada segundo fluyen 20 Hy de momentum perpendicular hacia la tierra y el momentum longitudinal del carrito se incrementa en 34 Hy.

Ejercicios

1. Un auto de juguete está tirado con un cordel sobre el piso horizontal. El cordel se dirige oblicuamente hacia arriba, figura 5.35. En el cordel fluye una corriente de momentum de 20 N. ¿Cuántos N hacen avanzar el autito?
2. Un auto arrastra a otro auto. Los dos coches se mueven en la misma dirección, pero están desplazados lateralmente en una distancia de 1 m, figura 5.36. El cordel de arrastre tiene una longitud de 3 m. A través del cordel fluye una corriente de momentum de 500 N. ¿Qué flujo de momentum participa en el movimiento del auto que está arrastrado?

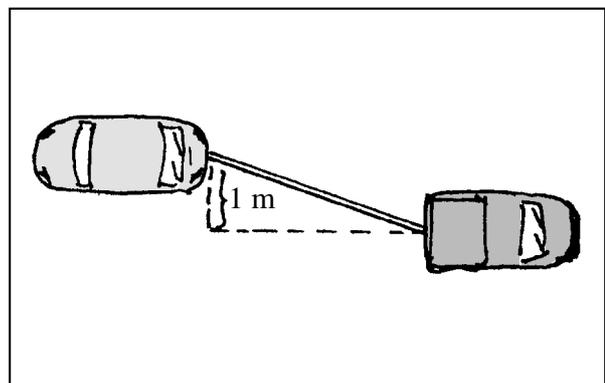


Fig. 5.36. Con respecto al ejercicio 2

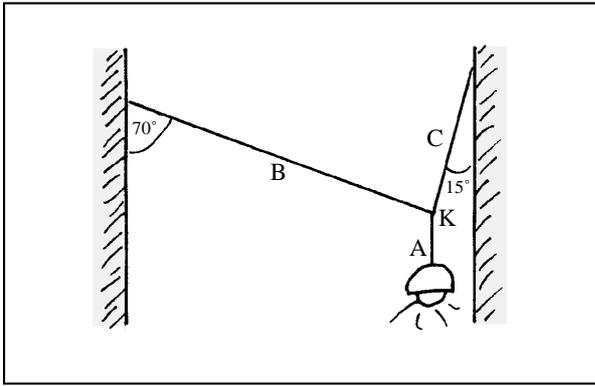


Fig. 5.37. ¿Cuál es la carga sobre las paredes de la casa al colgar la lámpara?

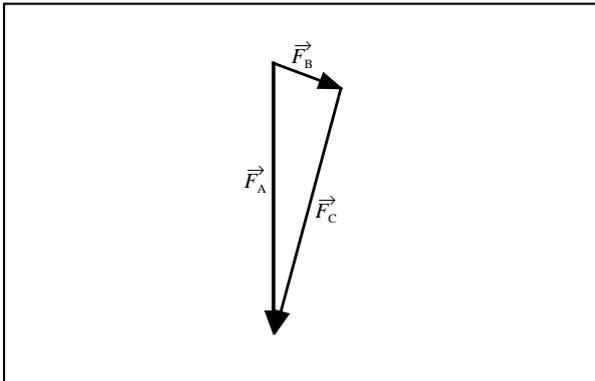


Fig. 5.38. El flujo de momentum que fluye a través del cordel A hacia el nudo K tiene la misma intensidad que la suma de los flujos eferentes en los cordeles B y C.

5.7 La regla de los nudos para flujos de momentum

Una lámpara está sujeta, mediante cordeles, en las paredes opuestas de una casa, figura 5.37. Tiene una masa de 3,5 kg. ¿De qué manera se cargan los ganchos respectivos?

Pensamos que tú te das cuenta que estamos preguntando por los vectores de los flujos de momentum en los dos cordeles B y C. Por de pronto, no tenemos ningún problema en determinar el flujo de momentum en el cordel A: Hacia la lámpara, y a través del campo gravitacional, fluye momentum- 270° . La intensidad correspondiente será igual a

$$F = m \cdot g = 3,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 35 \text{ N}$$

Este flujo de momentum pasa a través del cordel A y llega hasta el nudo K. ¿Cómo sigue después?

Por ser B un cordel, solo puede fluir en él momentum paralelo a B. Lo mismo vale para C. Tenemos que *descomponer*, por lo tanto, el vector \vec{F}_A en dos vectores: uno, \vec{F}_B que sea paralelo a B y otro, \vec{F}_C paralelo a C. La intensidad total en B y en C tiene que ser igual a la de A. Vale, por lo tanto, que

$$\vec{F}_A = \vec{F}_B + \vec{F}_C$$

En la figura 5.38, se realizó la descomposición co-

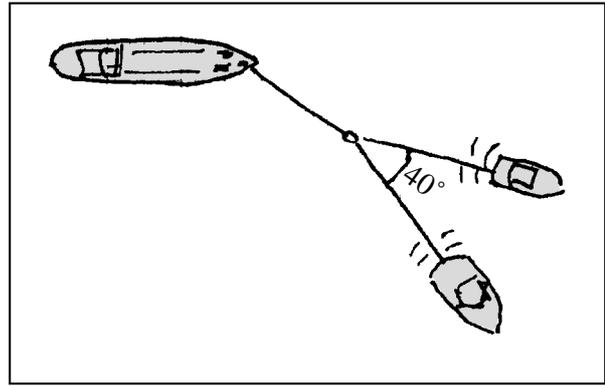


Fig. 5.39. Con respecto al ejercicio 1

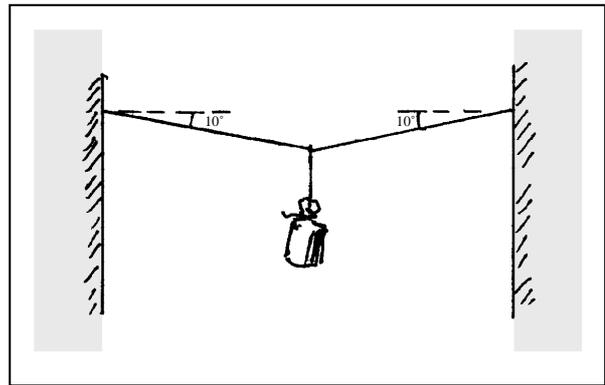


Fig. 5.40. Con respecto al ejercicio 2

respondiente. \vec{F}_A es paralelo al cordel A, \vec{F}_B a B y \vec{F}_C a C. Midiendo la longitud de los vectores, encontramos que

$$F_B = 9 \text{ N}$$

y

$$F_C = 33 \text{ N}.$$

¿Notaste que acabamos de encontrarnos con un viejo conocido? Aplicamos una *regla de nudos*, la que corresponde a los flujos de momentum:

Con respecto a un nudo, la suma de los flujos de momentum aferentes es igual a la de los flujos eferentes.

Un nudo es un lugar en que concurren tres o más flujos de momentum. Al decir “la suma”, queremos expresar que las intensidades de los flujos de momentum se componen de acuerdo a la regla que rige la suma de los vectores.

Ejercicios

1. Dos remolcadores arrastran un barco, figura 5.39. Cada uno de ellos tira con 15 000 N. ¿Cuánto mide el flujo de momentum en el segmento con que se tira el barco?

2. Tenemos que colgar un objeto de 10 kg de masa en los dos ganchos de la figura 5.40. El cordel resiste intensidades de flujo de momentum hasta 200 N, si son más fuertes se rompe. ¿Qué ocurrirá? ¿Resiste el cordel o no?

6. El calor

Otro gran capítulo de la física al cual nos dedicaremos ahora es el que se ocupa del estudio del calor, es decir de los fenómenos que tienen que ver con que un cuerpo esté más caliente o más frío. En forma similar como en mecánica, donde hacemos constantemente un balance del impulso, efectuaremos ahora, en forma reiterada, balances del calor.

También esta ciencia del calor es fundamental para poder comprender los fenómenos naturales, así como el funcionamiento de una serie de artefactos técnicos y máquinas.

La vida en la tierra debe su existencia a un inmenso flujo de calor proveniente del sol. El clima y el tiempo atmosférico de nuestro planeta son consecuencias de fenómenos térmicos, es decir, relacionados con el calor.

Muchísimas máquinas funcionan aprovechando las leyes de la llamada termodinámica: el motor del auto, la turbina a vapor en la planta termoeléctrica y la bomba de calor del refrigerador.

La pérdida de calor de una casa y su reposición a través de la calefacción pueden ser explicadas cuantitativamente mediante los recursos de esta ciencia.

Y no nos olvidemos, asimismo, del papel fundamental que desempeña el calor en todos los fenómenos químicos.

En resumen podemos afirmar que el capítulo del calor estudia fenómenos diferentes a la mecánica, utilizando, por lo tanto, magnitudes físicas distintas. Pero esto no significa que podemos olvidarnos totalmente de la mecánica, porque, en primer término, existen algunas magnitudes comunes, como la energía y la intensidad del flujo energético y, en segundo lugar, hay relaciones, leyes y reglas de la mecánica que tienen su equivalente térmico. Por lo tanto, no tenemos que empezar nuestros estudios desde cero para poder entender el calor.

6.1 Entropía y temperatura

Tal como ocurre todas las veces cuando iniciamos un nuevo capítulo de la física, tenemos que partir conociendo nuestras herramientas más importantes, es decir las magnitudes físicas con que tendremos que trabajar. En mecánica comenzamos con dos magnitudes que describen el estado de movimiento en que

se encuentra un cuerpo, la velocidad y el momento. En forma similar, iniciaremos el estudio del calor, conociendo dos magnitudes que describen el estado calórico o térmico de un cuerpo.

Ya conoces una de estas magnitudes, la *temperatura*. Usamos como símbolo la letra griega teta ϑ y la medimos con la unidad grado Celsius o centígrado ($^{\circ}\text{C}$). La afirmación de que la temperatura de un cuerpo sea de 18 grados centígrados la podemos escribir entonces en forma abreviada:

$$\vartheta = 18^{\circ}\text{C}.$$

Seguramente conocerás la segunda magnitud utilizada, pero con un nombre diferente al que usa oficialmente la física. Se trata de lo que corrientemente llamamos “cantidad de calor” o simplemente “calor”. Para entender la diferencia entre la cantidad de calor y la temperatura hacemos un experimento muy sencillo, figura 6.1. El vaso A contiene 1 litro de agua a 80°C . Echamos la mitad de esta agua a otro vaso vacío B. ¿Qué pasa con la temperatura y con la cantidad de calor? La temperatura del agua en cada vaso es la misma antes y después, pero la cantidad de calor se ha repartido entre los dos vasos. Si teníamos inicialmente 10 unidades de calor en el vaso A tendremos después 5 en A y 5 en B.

La temperatura caracteriza, entonces, el estado calórico de un cuerpo (estar más caliente o más frío) y no depende de su tamaño. La cantidad de calor, en cambio es algo que está *contenido* en el cuerpo.

Para designar la cantidad de calor usaremos en física el término técnico de entropía. Su símbolo es S y su unidad de medición el Carnot (Ct). Si el contenido

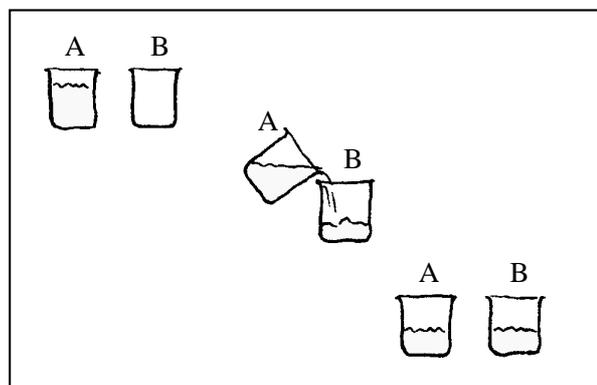


Fig. 6.1. La mitad del agua del recipiente A se traspa al recipiente B.

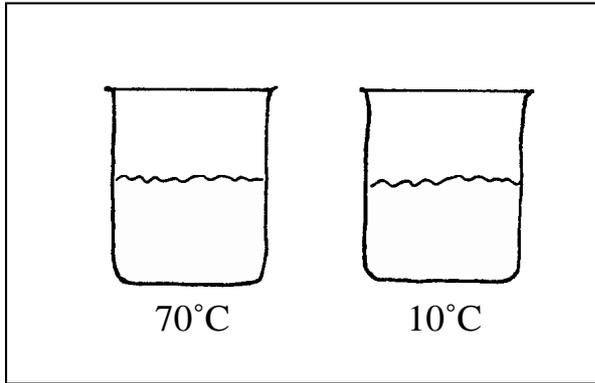


Fig. 6.2. El agua del recipiente de la izquierda contiene más entropía que el de la derecha.

de entropía de un cuerpo es de 20 Carnot, podemos escribir en forma abreviada

$$S = 20 \text{ Ct.}$$

El nombre de esta unidad de medición proviene del físico Sadi Carnot (1796 – 1832), cuya contribución en el descubrimiento de la entropía fue determinante.

Si a continuación investigaremos acerca de las características de la magnitud entropía, tienes que tener siempre presente de que en el fondo se trata de lo que corrientemente llamamos calor.

Comparemos ahora los dos vasos con agua de la figura 6.2. En los vasos hay una misma cantidad de agua. El agua del vaso de la izquierda está caliente, tiene una temperatura de 70°C , el agua del otro vaso está más fría, su temperatura es de 10°C . ¿Cuál de los dos vasos contiene más entropía, es decir en cuál hay más calor? Evidentemente en el de la izquierda.

La entropía que contiene un objeto será mayor mientras más alta sea su temperatura.

Ahora comparamos los vasos de la figura 6.3. Las temperaturas son las mismas, pero la masa de agua no es igual en ambos recipientes. ¿Cuál de los vasos contiene más entropía? De nuevo, el de la izquierda.

La entropía que contiene un objeto será mayor mientras más grande sea su masa.

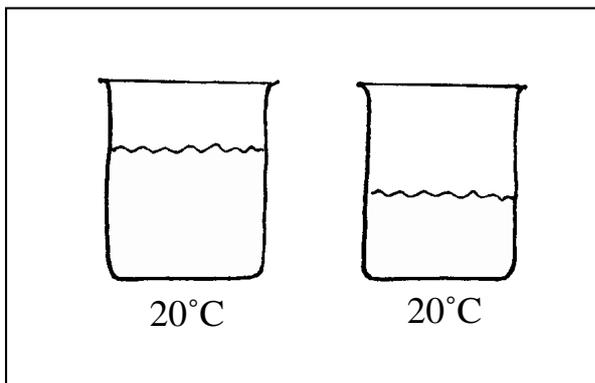


Fig. 6.3. El agua del recipiente de la izquierda contiene más entropía que el de la derecha.

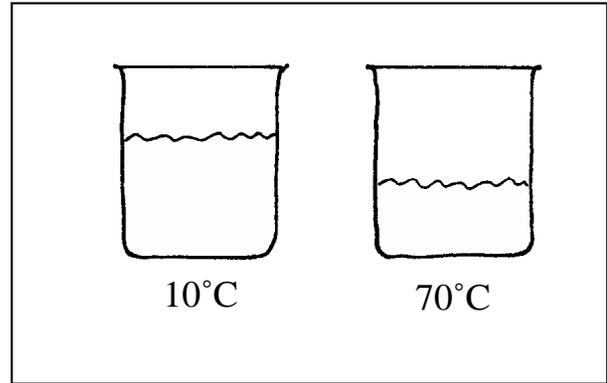


Fig. 6.4. En este caso no podemos decidir fácilmente cuál de los dos recipientes contiene más entropía.

Aún no podemos determinar cuál de los dos vasos de la figura 6.4 contiene más entropía.

Volvamos a examinar un experimento como el de la figura 6.1. En el vaso A hay 1 litro de agua con una cantidad de entropía de 4000 Ct. Echamos ahora la cuarta parte, es decir, 250 ml, al otro vaso vacío B. ¿Cuánta entropía hay ahora en A y en B? Al traspasar el agua, la entropía se divide en la misma proporción que la cantidad de agua: 1000 Ct han pasado al vaso B, 3000 Ct quedan en A.

¿Cuánto es un Carnot? ¿Es mucha o poca entropía? Ya sabes que para fundir hielo se necesita “calor”, es decir entropía.

1 Carnot es la cantidad de entropía que necesitamos para fundir $0,893 \text{ cm}^3$ de hielo. Formulado como regla aproximada

1 Carnot funde 1 cm³ de hielo.

Ejercicios

1. El aire de una pieza A con un volumen de 75 m^3 está a una temperatura de 25°C . El aire de otra pieza B con un volumen de 60 m^3 está a una temperatura de 18°C . ¿Cuál de las dos piezas contiene más entropía?
2. El café en un jarro lleno contiene una cantidad de entropía de 3900 Ct. Ahora echamos la misma cantidad de café a tres tazas iguales y el jarro queda con café hasta la mitad. ¿Qué cantidad de entropía contiene ahora el jarro y cuánto hay en cada taza?

6.2 La diferencia de temperatura como origen de un flujo de entropía

Coloquemos un recipiente A con agua caliente dentro de otro B con agua fría, figura 6.5. Observemos lo que ocurre y tratemos de explicar nuestras observaciones.

Observamos que la temperatura del agua en A baja y la de B sube. Las temperaturas se mueven la una hacia la otra y, finalmente, se igualan. Pero la temperatura de B no sube más allá de la de A.

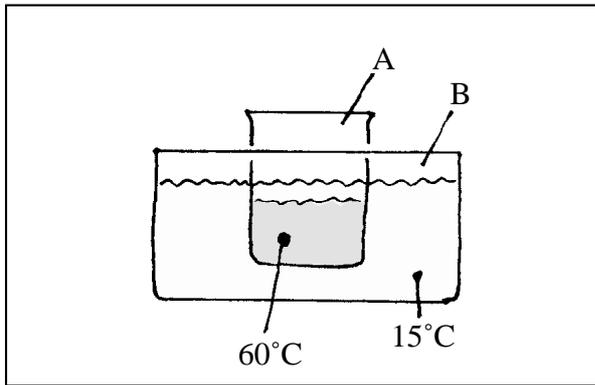


Fig. 6.5. La entropía fluye del recipiente interior A al exterior B.

Explicación: La entropía fluye de A hacia B, hasta que las temperaturas se igualen.

Podemos repetir el experimento con otros recipientes, tal como lo muestran las figuras 6.6a y 6.6b. Siempre las temperaturas se igualan. En el caso de 6.6a la temperatura final estará más cerca de la temperatura inicial de B, en la figura 6.6b estará más cerca de la temperatura inicial de A. Pero en todos los casos tendremos finalmente

$$v_A = v_B$$

Por supuesto podemos iniciar el experimento con la mayor temperatura en el recipiente exterior y la menor temperatura en el recipiente interior. También, en este caso, las temperaturas se moverán la una hacia la otra para quedar finalmente iguales.

Concluimos:

La entropía fluye por sí sola desde lugares de mayor temperatura hacia lugares de menor temperatura.

Seguramente esta afirmación te parecerá conocida. Hojeando hacia atrás encontrarás dos variantes de ella y también la reencontraremos más adelante. Podemos interpretar la diferencia de temperatura $v_A - v_B$ como origen de un flujo de entropía.

Una diferencia de temperatura es el origen de un flujo de entropía.

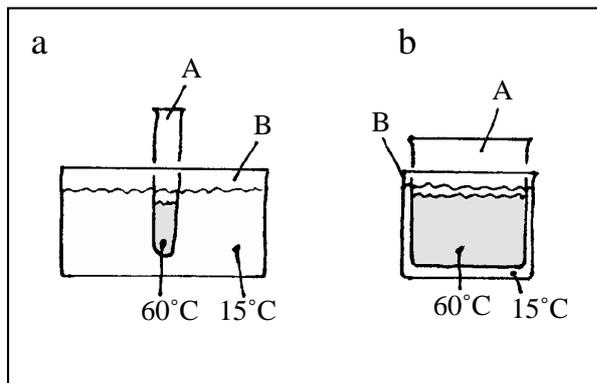


Fig. 6.6. En ambos casos la entropía fluye del recipiente interior A al exterior B.

Ahora podemos comprender fácilmente porqué el flujo de entropía se detiene finalmente en las figuras 6.5 y 6.6. Al igualarse las temperaturas, desaparece también el impulso para originar un flujo de entropía.

El estado de igualdad de temperatura alcanzado al término del experimento se llama *equilibrio térmico*.

Te sirven una taza de té, pero el té está demasiado caliente. Entonces tú esperas hasta que se enfríe. ¿Qué pasa realmente cuando se enfría el té? Por ser la temperatura inicial del té superior a la del aire ambiental fluye una corriente de entropía desde el té hacia el ambiente. ¿Entonces el ambiente se calienta? Si queremos ser muy exactos, la respuesta es sí. Pero la entropía proveniente del té se reparte, se diluye, se disipa tanto que ya no puede ser detectada.

Toquemos ahora diferentes objetos de la sala de clases. Algunos dejan una sensación de frío: el metal de los bancos, los pilares de hormigón. Otros objetos parecen ser menos fríos: la madera de las mesas. Y otros parecen casi agradablemente calientes: un guante de lana, un pedazo de plumavit. La temperatura de un objeto de hierro parece ser más baja que la de un objeto de madera. Estas observaciones deberían hacerte reflexionar. Acabamos de concluir que la entropía fluye por sí sola desde un lugar de mayor temperatura a uno de menor temperatura. Debería existir entonces un flujo constante de entropía desde los objetos de madera hacia los de hierro. El hierro se calentaría y la madera se enfriaría. ¿Hasta cuándo? Hasta que las temperaturas se igualen.

Antes de seguir especulando, mediremos la temperatura de los diferentes objetos de la sala con un "medidor de temperatura", de manera que no dependamos de nuestras apreciaciones subjetivas. El resultado es sorprendente: Todas las temperaturas son iguales. Hierro, madera y plumavit están a la misma temperatura, siempre que estos objetos se encuentren en la misma sala durante un tiempo suficiente para que sus temperaturas hayan podido igualarse. Sólo en invierno los objetos ubicados a mayor altura dentro de la sala tendrán una temperatura algo mayor que los que se encuentran más abajo. Esto se debe a que el aire calentado en la calefacción sube. El establecimiento de un equilibrio térmico se ve perturbado constantemente debido a la existencia de la calefacción. En verano, en cambio, este equilibrio puede establecerse, por regla general, en forma satisfactoria. Concluimos, entonces, que nuestras apreciaciones subjetivas de "caliente" y "frío" son engañosas. Cómo se produce este engaño y porqué en el fondo no lo es, lo sabremos en uno de los párrafos siguientes.

Ejercicios

- (a) Cuando cocinamos, la entropía fluye desde la llama de gas hacia la olla, ¿por qué? (b) Al colocar la olla caliente en la mesa sobre una tablita o carpetita aislante, ésta se calienta. Sabemos que la entropía pasa de la olla a la tablita. ¿por qué? (c) Pongamos una botella de bebida que proviene del refrigerador sobre la mesa. La mesa se enfría en el lugar en que se encuentra la botella. ¿Por qué?
- Un pedazo grande de metal se encuentra a una temperatura de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un pedazo pequeño del mismo metal, a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Juntemos los dos pedazos de manera que la entropía pueda fluir del uno al otro. ¿Desde cuál de los dos pedazos fluye hacia el otro? ¿La temperatura final se encuentra más cerca de los $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ o de los $10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

6.3 La bomba de calor

El hecho de que la entropía fluya, por sí sola, de un objeto de mayor a otro de menor temperatura no significa que ésta no pueda fluir también en el sentido contrario, es decir, de frío a caliente. Sí puede hacerlo, pero no “por sí sola”. Para que lo haga, tenemos que forzarla, usando una “bomba de entropía”. Un artefacto de este tipo suele llamarse *bomba de calor*.

Cada uno de nosotros tiene en su casa alguna bomba de calor: forma parte importante del refrigerador, donde la utilizamos para trasladar entropía desde el interior del refrigerador hacia afuera. Pero antes de estudiar más detalladamente el refrigerador, tenemos que conocer algunas características generales de la bomba de calor.

Como todas las bombas, la bomba de calor tiene dos conexiones para lo que tiene que bombear: una entrada y una salida. Una bomba de agua tiene una entrada y una salida para el agua, una bomba de momentum tiene entrada y salida para el momentum y, de la misma manera, una bomba de entropía tiene entrada y salida para la entropía (figura 6.7).

Tanto la entrada como la salida tiene forma de serpentín, por el cual fluye un líquido o un gas. De

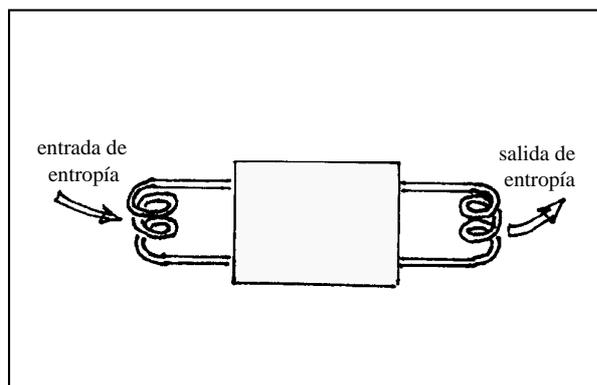


Fig. 6.7. La bomba de calor tiene entrada y salida para la entropía.

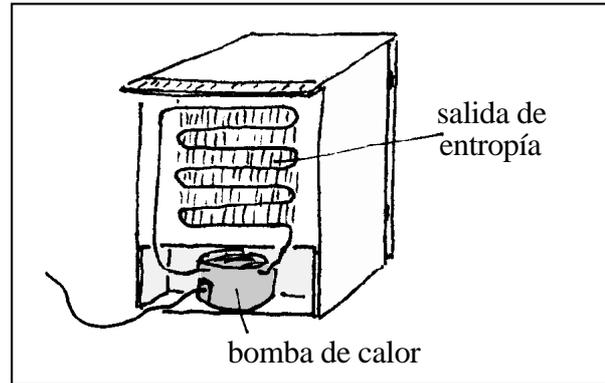


Fig. 6.8. Parte posterior del refrigerador. Se aprecia la bomba de calor y el serpentín a través del cual la entropía abandona el refrigerador.

esta manera, la entropía es transportada hacia adentro o hacia afuera de la bomba.

Una bomba de calor transporta la entropía desde un lugar de menor temperatura a otro de mayor temperatura.

Enfriar un objeto significa quitarle entropía; calentar un objeto significa entregarle entropía. La fig. 6.7 nos muestra que una bomba de calor la podemos usar tanto para enfriar como para calentar un cuerpo. Efectivamente se usan bombas de calor para ambos fines.

Miremos ahora más de cerca el refrigerador de la figura 6.8. La bomba de calor se encuentra atrás y en la parte inferior. Igualmente atrás podemos ver la salida de la entropía: un serpentín que ocupa gran parte del lado posterior del refrigerador. Para facilitar el paso de la entropía al aire existe, entre los tubos, una rejilla metálica. El hecho que este serpentín esté caliente mientras el refrigerador funciona nos indica que en este lugar se encuentra la salida de la entropía. La entrada de entropía la encontramos dentro del refrigerador, en forma de un serpentín, en la pared del congelador.

Algunas casas son calefaccionadas mediante una bomba de calor. La entropía proviene del aire exterior o, si existe, de algún curso de agua que se encuentre cerca. De la misma manera, se puede calentar el agua de una piscina.

Otro artefacto que funciona en base a una bomba de calor es el aire acondicionado, ya que mantiene, en el interior de la pieza, una determinada temperatura y humedad del aire. Para poder enfriar el aire, utiliza una bomba de calor. La figura 6.9 muestra un dispositivo sencillo destinado a enfriar el aire del interior de una pieza.

Ejercicios

- Examina el refrigerador de tu casa. Busca la entrada y la salida de la entropía. Toca con la mano el serpentín de la salida de la entropía.
- ¿Qué ocurre con la entropía si dejamos abierta la puerta del refrigerador durante un tiempo prolongado?

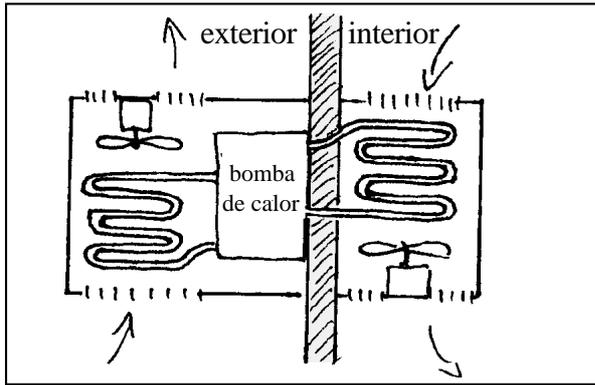


Fig. 6.9. Aire acondicionado simple. Los ventiladores internos y externos incrementan el intercambio de calor con el aire circundante.

6.4 La temperatura absoluta

¿Cuánta entropía podemos sacar de un cuerpo y cuánta entropía contiene? Tenemos que aclarar, en primer termino, que se trata de dos preguntas diferentes. Si existe únicamente entropía positiva, no podemos sacar más entropía de un objeto de la que está contenida en él. De la misma manera, no podemos sacar más aire de un recipiente del que contiene.

¿Cuánta entropía podemos sacar de un cuerpo y cuánta entropía contiene? Tenemos que aclarar, en primer termino, que se trata de dos preguntas diferentes. Si existe únicamente entropía positiva, no podemos sacar más entropía de un objeto de la que está contenida en él. De la misma manera, no podemos sacar más aire de un recipiente del que contiene.

Sería diferente el caso si existiera entropía negativa. Entonces, podríamos seguir sacando entropía de un cuerpo más allá de los cero Carnot. Al sacar, por ejemplo, otros 5 Ct, el contenido de entropía llegaría a -5 Ct. Sabemos que, en el caso del momentum, esta situación es posible. A un cuerpo en reposo y cuyo momentum es igual a 0 Huygens (Hy) le podemos seguir extrayendo momentum, su momentum se vuelve negativo.

Reemplacemos, entonces, la pregunta inicial por otra: ¿Existe entropía negativa? A lo mejor una entropía negativa correspondería a lo que corrientemente llamamos “frío” o “cantidad de frío”.

En principio, la respuesta es fácil de encontrar. Todo lo que necesitamos es una buena bomba de calor. Tomemos cualquier objeto, un ladrillo, por ejemplo, y le sacamos toda la entropía posible. Si usamos primero el refrigerador, podemos bajar la temperatura del ladrillo a unos -5 °C y no podemos seguir, porque la bomba de calor del refrigerador no da para más. Sin embargo, podremos sacarle más entropía colocándolo en el congelador y llegaremos, probablemente, a unos -18 °C. Existen bombas de calor mejores (y más caras), con las cuales se pueden al-

canzar temperaturas aún más bajas. A estos artefactos se les llama “máquinas frigoríficas” y con ellas podremos lograr una temperatura de -200 °C. A esta temperatura, el aire ya está líquido y, por lo tanto, se usan estas máquinas para licuar el aire. Existen otras máquinas que nos permiten seguir sacando entropía de nuestro ladrillo haciendo bajar más su temperatura. Podemos alcanzar los -250 °C, después -260 °C y, con mayor esfuerzo, -270 , -271 , -272 y -273 °C. Pero, al llegar a $-273,15$ °C, no podemos seguir más. A pesar de realizar el mayor esfuerzo posible y utilizando los medios más refinados, no podemos bajar más la temperatura.

La explicación es bastante simple:

1. A esta temperatura el ladrillo ya no contiene entropía.
2. La entropía no puede ser negativa.

La temperatura más baja que puede alcanzar un objeto es de $-273,15$ °C. A esta temperatura ya no contiene entropía.

Para $\vartheta = -273,15$ °C, $S = 0$ Ct.

Después del descubrimiento de la existencia de una temperatura mínima era bastante obvia la

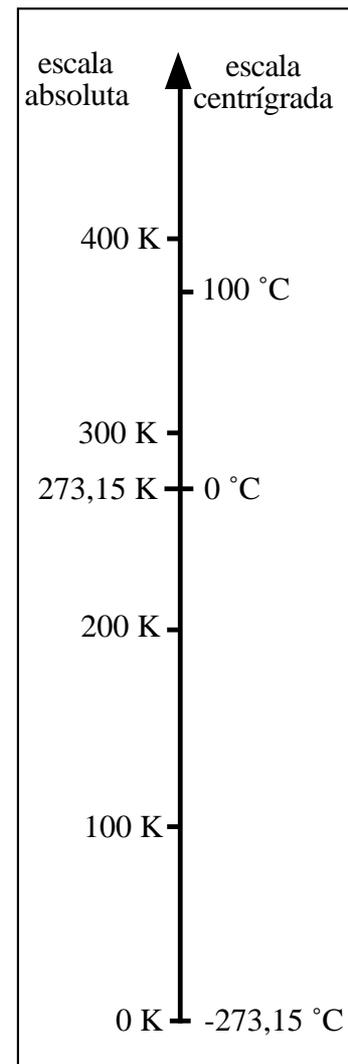


Fig. 6.10. Escalas Celsius y absoluta

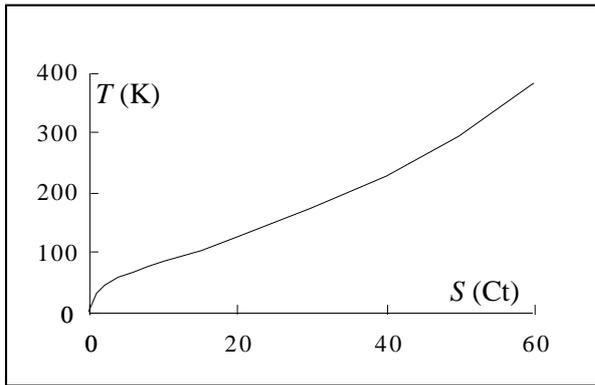


Fig. 6.11. La temperatura como función del contenido de entropía de 100 g de cobre.

introducción de una nueva escala de temperatura. En esta nueva escala *absoluta* el punto cero se traslada a los $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. El símbolo usado para esta temperatura es T y la unidad de medición se llama Kelvin o K. La figura 6.10 muestra la relación exacta entre las dos escalas. Es importante hacer notar que una diferencia de temperatura de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ equivale a 1 K.

En la escala Celsius el punto de ebullición del agua es de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\vartheta = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y en la escala absoluta es igual a $373,15\text{ K}$ ($T = 373,15\text{ K}$).

El punto cero de la escala absoluta de temperatura está ubicado en $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. La unidad de medición de la temperatura absoluta es el Kelvin.

En la figura 6.11 se muestra la relación existente entre el contenido de entropía y la temperatura de un pedazo de cobre de 100 g.

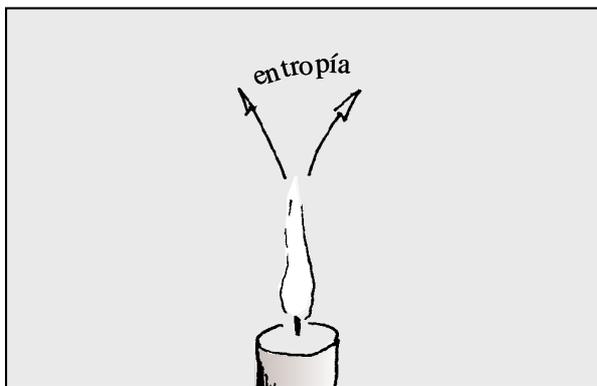


Fig. 6.12. En la llama se produce entropía.

Ejercicios

1. Transforma las siguientes temperaturas Celsius a temperatura absoluta:

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de fusión del hielo)

$25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura normal)

$100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de ebullición del agua)

$-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de ebullición del oxígeno)

$-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de ebullición del nitrógeno)

$-268,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura de ebullición del helio)

$-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto cero absoluto)

2. Transforma las siguientes temperaturas absolutas a temperaturas Celsius:

$13,95\text{ K}$ (temperatura de fusión del hidrógeno)

$20,35\text{ K}$ (temperatura de ebullición del hidrógeno)

$54,35\text{ K}$ (temperatura de fusión del oxígeno)

$63,15\text{ K}$ (temperatura de fusión del nitrógeno)

3. ¿Cuánta entropía contiene 1 kg de cobre a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$? Utiliza la figura 6.11

6.5 Producción de entropía

Para calefaccionar una pieza podemos utilizar una bomba de calor: desde afuera bombeamos entropía hacia adentro. Pero en la práctica usamos, por regla general, otro sistema de calefacción: quemamos algún combustible como parafina, carbón, leña o gas. Una combustión es una reacción química, donde combustible y comburente (oxígeno) son transformados en otras sustancias, gas carbónico y agua en estado de gas. ¿De dónde proviene la entropía entregada por la llama en una combustión? No estaba contenida ni en el combustible ni en el comburente, ya que ambas sustancias estaban frías. Evidentemente, la entropía se formó en el proceso de combustión. *En la llama se produce entropía*, Fig. 6.12.

Otro sistema de calefacción es la eléctrica. A través de un alambre delgado fluye una potente corriente eléctrica. En este proceso, el alambre se calienta. *En*

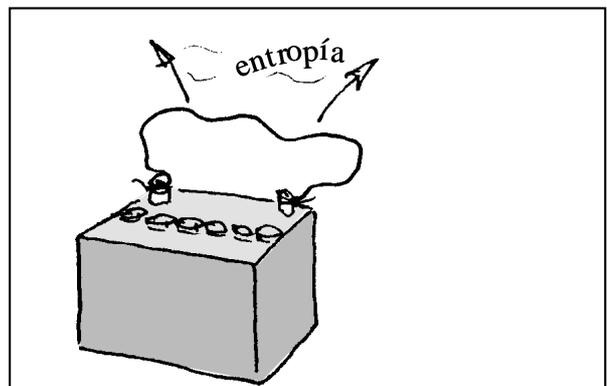


Fig. 6.13. A través del alambre fluye una corriente eléctrica. En este proceso se genera entropía.

el alambre se produce entropía. Muchos artefactos eléctricos funcionan de acuerdo a este sistema: la plancha, el calentador de agua, el secador de pelo y la ampollita.

Seguramente, conoces un tercer método para producir entropía, el roce mecánico. Si bajas deslizándote muy rápidamente por las barras verticales, sientes, en forma desagradable, la producción de entropía. También se nota al perforar con un taladro romo o al cortar con un serrucho sin filo. *En la superficie de contacto de dos objetos que se están rozando se produce entropía.*

En todos estos casos la entropía se produce o se crea realmente: no se traslada desde alguna otra parte.

Podemos producir entropía

- **a través de una reacción química, por ejemplo una combustión,**
- **en un alambre en que fluye una corriente eléctrica**
- **mediante el roce mecánico.**

En el fondo, todos estos procesos pueden interpretarse como una especie de roce. Siempre cuando algo fluye a través de algún conductor en que existe una resistencia, se produce roce. En el caso del roce mecánico, el momentum fluye de un cuerpo a otro a través de una conexión que es mala conductora del momentum. En los calefactores eléctricos, la electricidad fluye a través de un alambre que le opone una resistencia. También en una reacción química se vence una especie de resistencia de roce, la llamada resistencia de reacción.

Acabamos de discutir el problema del origen de la entropía en la calefacción de una pieza o de un objeto cualquiera. Consideremos ahora el problema inverso: ¿Cómo podemos enfriar un objeto? Ya conocemos un método: podemos extraerle entropía mediante una bomba de calor.

Podemos aplicar un segundo método cuando el objeto está más caliente que el ambiente, es decir, cuando está a una temperatura más elevada. ¿Qué hacemos cuando el té está demasiado caliente? Simplemente, esperamos. La entropía fluye por sí sola hacia el ambiente más frío.

En los dos casos, con o sin bomba de calor, la entropía extraída de un objeto reaparece en otro lugar. ¿No podríamos hacerla desaparecer en forma definitiva sin que reaparezca en otra parte? ¿No podríamos *destruir* la entropía, ya que podemos *producirla* ?

Muchos científicos e inventores han tratado de conseguirlo, pero sin éxito. Hoy tenemos la certeza de que la entropía no puede ser destruída.

Podemos producir entropía, pero no destruirla.

Recordemos al respecto otras dos magnitudes físicas, la energía y el momentum. Ambas no se pueden ni crear ni destruir y esto siempre nos ha parecido absolutamente convincente. Si la cantidad de

energía aumenta en algún lugar, debe disminuir en otro, y viceversa. Lo mismo vale para el momentum

La energía no se puede ni crear ni destruir.

El momentum no se puede ni crear ni destruir.

El hecho de que la entropía pueda ser creada origina problemas y consecuencias muy curiosas.

Este es un primer problema: la entropía puede ser creada y, efectivamente, se forma en un sinnúmero de procesos terrestres. Una importante fuente de entropía la constituyen las combustiones. Recuerda que estas combustiones no sólo se realizan en estufas, calderas y motores de automóviles, sino en mayor medida aún, en la misma naturaleza: en todos los seres vivos, desde los microbios hasta los mamíferos, ocurren constantemente procesos de oxidación, es decir, de combustión, que producen entropía. ¿No debería aumentar, entonces, la cantidad de entropía de la tierra y no debería producirse un calentamiento progresivo de nuestro planeta? En realidad, y sin considerar pequeñas fluctuaciones, la temperatura de la tierra se ha mantenido constante durante millones de años. La explicación está en que no podemos considerar la tierra como un objeto aislado. En primer término, la tierra recibe permanentemente entropía a través de la luz solar (también en este caso, la entropía fluye desde la temperatura alta a la más baja; la temperatura de la superficie solar es de unos 6000 K, la de la superficie terrestre de unos 300 K), y, en segundo término, la tierra entrega constantemente entropía al espacio (de nuevo la entropía fluye desde la temperatura alta a la más baja; el espacio interplanetario está a una temperatura de unos 3 K). La tierra, igualmente, desprende su entropía mediante una clase de luz, la luz infrarroja. Esta luz infrarroja irradiada lleva tanta entropía como para mantener la temperatura de la tierra prácticamente constante. ¿Y qué pasa en el espacio si la entropía aumenta? Esta pregunta aún no se ha podido contestar, pero, en realidad, constituye un problema de menor envergadura frente a todas las demás interrogantes acerca de la estructura y la evolución del cosmos.

Existe otra situación derivada del hecho de que la entropía puede ser creada pero no destruída: Estamos mirando la proyección de una película (sin sonido), pero no sabemos si esta proyección se realiza en el sentido correcto o inverso. ¿Puedes determinar, entonces, el sentido de la proyección ? La "película" ~de la figura 6.14 muestra, en la proyección correcta, una vela que arde y se consume. Proyectada al revés, muestra algo que en realidad no existe: una vela que se hace cada vez más grande. La película nos muestra, entonces, un proceso *irreversible*. ¿Por qué irreversible? Porque en este proceso se produce entropía. La inversión del proceso implicaría una destrucción de entropía, algo absolutamente imposible.

La secuencia de la figura 6.15 muestra otro proceso irreversible: una persona se desliza hacia abajo en una barra vertical. También este proceso es irrever-

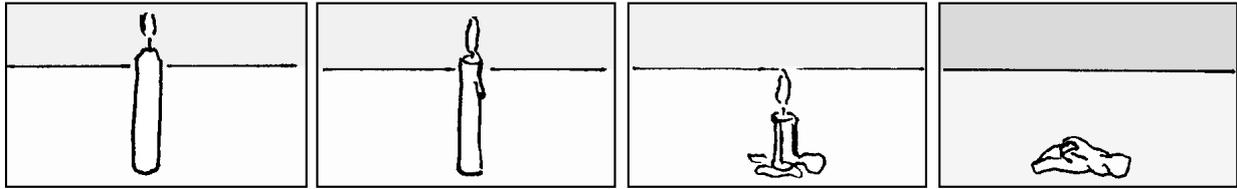


Fig. 6.14. La combustión de una vela es un proceso irreversible.



Fig. 6.15. ¿Es correcto el orden de estas ilustraciones?

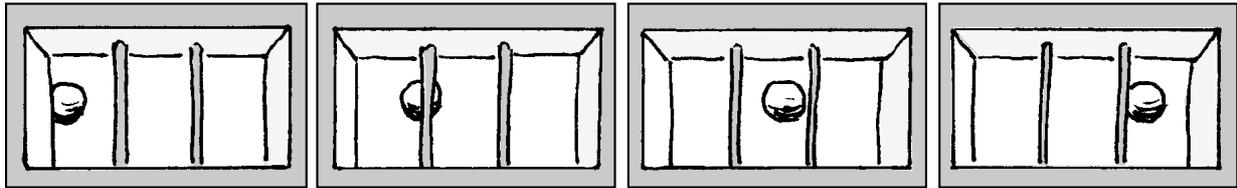


Fig. 6.16. El paso de la pelota es un proceso reversible.

sible, porque se produce entropía.

Sin embargo, los procesos en que no se produce entropía sí pueden desarrollarse perfectamente bien en ambos sentidos. La figura 6.16 muestra una pelota en vuelo que pasa tras una ventana. ¿Se mueve la pelota de izquierda a derecha como lo muestra la película o estamos mirando la película al revés y la pelota, en realidad, se mueve de derecha a izquierda?

Los procesos en que se produce entropía son irreversibles.

Ejercicios

1. Conectamos una ampolletita a una batería. La ampolletita se prende y la batería se agota paulatinamente. Describe el proceso inverso.
2. Describe, detalladamente, todos los procesos que ocurrirían si el proceso “auto en marcha” se realizara en forma invertida.
3. Una persona que anda en bicicleta frena. ¿Qué ocurriría si este proceso se realizara en forma inversa?

6.6 La intensidad del flujo de entropía

La barra metálica de la figura 6.17 es calentada en su extremo izquierdo y enfriada en su extremo derecho. En otras palabras, se entrega entropía en la parte izquierda y se extrae entropía en la parte derecha. Dentro de la barra fluye la entropía de izquierda a derecha, de la temperatura alta a la más baja. Decimos que existe un *flujo de entropía*. La cantidad de Carnot que fluye en cada segundo nos indica la *intensidad del flujo de entropía*.

$$\text{intensidad del flujo de entropía} = \frac{\text{entropía}}{\text{tiempo}}$$

Introduciendo el simbolo I_S para la intensidad del flujo de entropía tenemos

$$I_S = \frac{S}{t}$$

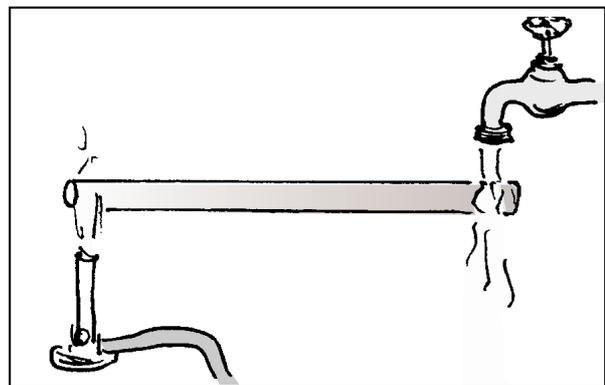


Fig. 6.17. Una corriente de entropía fluye desde el extremo caliente de la barra hacia el extremo frío.

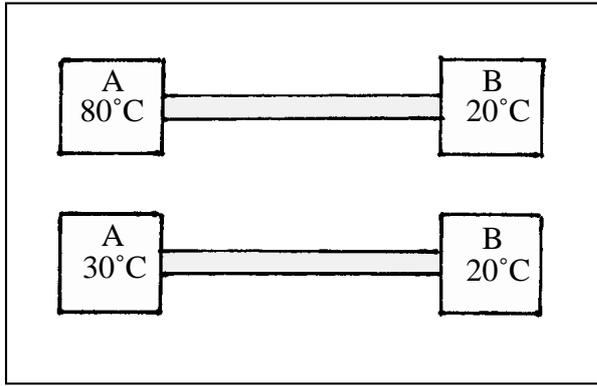


Fig. 6.18. En el dispositivo superior la diferencia de temperatura entre los cuerpos A y B es mayor.

La unidad de medición para la intensidad del flujo de entropía es Carnot por segundo, abreviado como Ct/s.

¿De qué factores depende la intensidad del flujo de entropía entre dos puntos A y B? Miremos la figura 6.18. En el esquema superior, la diferencia de temperatura entre los cuerpos A y B es mayor que en el inferior. Todas las demás condiciones son idénticas. Por ser mayor la diferencia de temperatura en el esquema superior, la intensidad del flujo de entropía será mayor en este caso.

Mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre dos lugares, mayor será también la intensidad del flujo de entropía entre estos dos lugares.

6.7 La resistencia calórica

Sin embargo, la intensidad del flujo de entropía puede ser, a igual diferencia de temperatura, distinta. No depende únicamente de la variación de temperatura, sino también, de las características del conductor, es decir, de su resistencia calórica, figura 6.19. ¿De qué depende esta resistencia calórica del conductor?

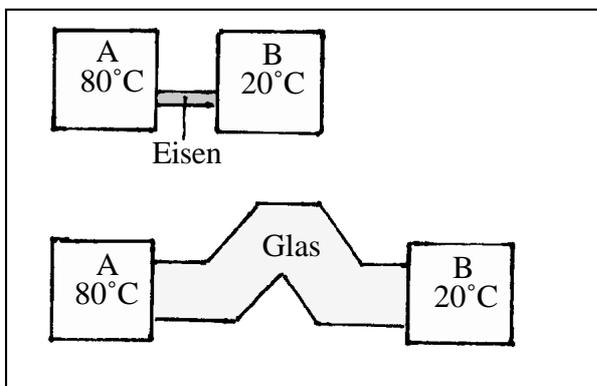


Fig. 6.19. Uniones con diferentes resistencias calóricas.

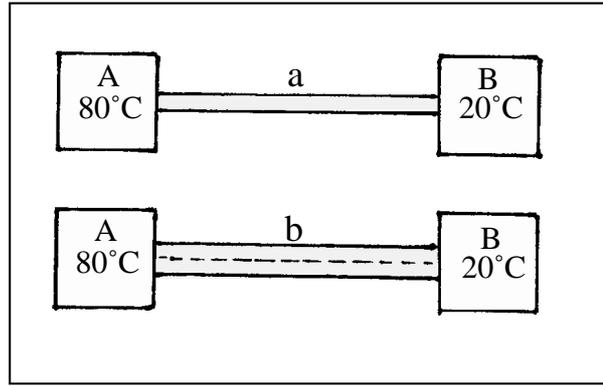


Fig. 6.20. A través del conductor más grueso fluye una corriente de entropía más intensa.

La figura 6.20 muestra dos conductores de entropía, entre cuyos extremos existe una misma diferencia de temperatura de 60 K. Pero la sección del conductor b tiene el doble de área del de a. Ahora fluye en cada mitad del conductor b (la superior y la inferior) la misma entropía que en a, en las dos mitades juntas el doble de a.

En la figura 6.21, se representan otros dos conductores a y b, tal que b tenga el doble largo de a. Compararemos una de las dos mitades de b, por ejemplo la izquierda, con a. Las dos tienen exactamente la misma estructura, pero en los extremos de a existe una mayor diferencia de temperatura que en la mitad de b. Por lo tanto, tendremos en este pedazo de b, un flujo de entropía más débil que en a. En el otro pedazo de b, a la derecha, tendremos, evidentemente, también un flujo de entropía más débil.

En la figura 6.22, vemos, finalmente, dos conductores de igual largo y diámetro y en cuyos extremos existe la misma diferencia de temperatura. Sin embargo, en b fluye un flujo de entropía más débil que en a, porque b es de madera y a de cobre.

Cada conductor opone una resistencia al flujo de entropía. Esta resistencia será mayor mientras menor sea el área de la sección del conductor y mientras mayor sea su largo. Además, dependerá del material del que está hecho el conductor.

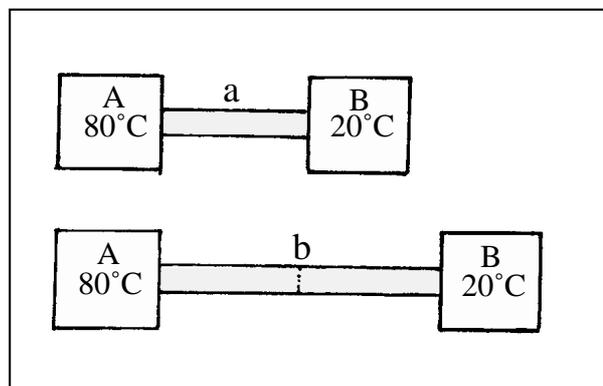
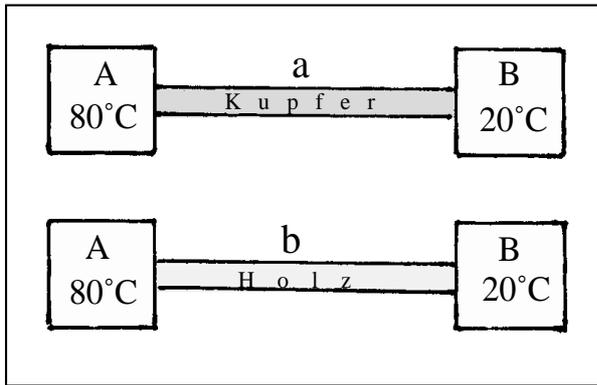


Fig. 6.21. En la unión más corta fluye una corriente de entropía más intensa



A Fig. 6.22. En el conductor de cobre fluye una corriente de entropía más intensa que en el conductor de madera.

En la figura 6.23, encuentras un resumen de los factores que determinan la intensidad del flujo de entropía y la resistencia calórica.

Examinemos, ahora, algunos materiales para saber si su resistencia calórica es alta o baja, si son malos o buenos conductores del calor. Sujetamos con los dedos una pequeña barra de un determinado material y calentamos el extremo libre en una llama, según figura 6.24. De acuerdo a la resistencia calórica del material, nuestros dedos percibirán el calor conducido con mayor o menor rapidez.

Notamos que madera, vidrio y plástico tienen una resistencia calórica bastante alta; los metales, en cambio, son buenos conductores del calor; su resistencia calórica es baja. El aire y los gases, en general, tienen una resistencia calórica relativamente alta, por lo que se utilizan, para el aislamiento calórico, materiales con un alto contenido de aire, tales como ladrillos ahuecados y espumas plásticas. Igualmente un suéter de lana calienta tanto, porque la lana contiene un gran número de cavidades llenas de aire.

Ahora, también, podemos aclarar el hecho de que un objeto metálico da la impresión de ser más frío que uno de madera.

Establezcamos, en primer término, que esta observación vale únicamente para temperaturas bajas. Si metemos los dos objetos en agua hirviendo, de manera que alcancen una temperatura de 100 °C, y

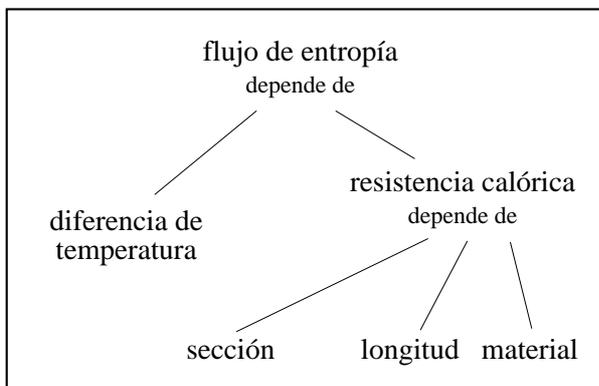


Fig. 6.23. Relación entre intensidad del flujo de entropía, diferencia de temperatura y características del conductor

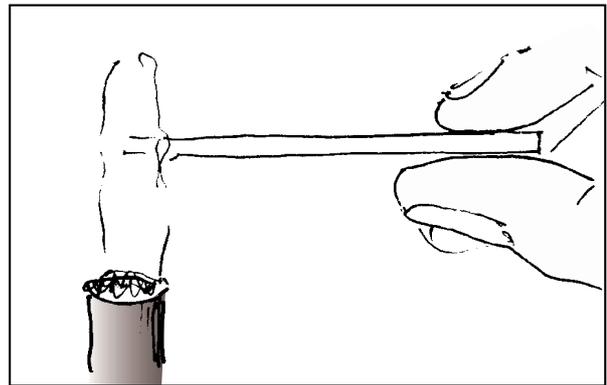


Fig. 6.24. Según la resistencia calórica de la barra, el extremo derecho se calienta más o menos rápidamente.

los tocamos después con los dedos, el objeto metálico se apreciará más caliente que el de madera. ¿Cómo explicar esto?

Al tocar con los dedos, que tienen una temperatura de unos 25 °C, objetos de madera y de metal, cuyas temperaturas son de 10 °C, la entropía fluye desde los dedos hacia los objetos, figura 6.25.

La madera se calentará rápidamente en el punto de contacto y alcanzará la temperatura del dedo, porque no puede conducir la entropía. En el metal, en cambio, la entropía fluye del punto de contacto hacia el interior del objeto, y el lugar del contacto se calienta poco.

En un objeto mal conductor del calor, no sentimos, por lo tanto, su temperatura antes del contacto, sino aquella que alcanza a través del contacto con los dedos.

Ejercicios

1. ¿Cómo debemos construir una casa para que la pérdida de calor o de entropía sea mínima?
2. En el radiador de la calefacción central, la entropía debe transferirse lo más fácilmente posible desde el agua caliente en el interior del radiador hacia el exterior. ¿Cómo se logra este objetivo?

Nombra otros objetos o artefactos de nuestro interés que sean buenos conductores de calor.

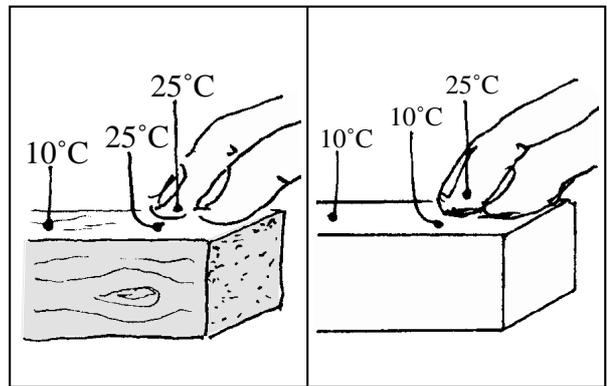


Fig. 6.25. Antes del contacto con el dedo los dos objetos tienen la misma temperatura, después ya no.

6.8 Transporte de entropía por convección

Una diferencia de temperatura origina una corriente de entropía. Si queremos traspasar entropía de un lugar A a otro B, es suficiente establecer una mayor temperatura en A que en B. A esta forma de transportar entropía la llamamos *conducción* de calor. Es la manera más conocida y aparentemente más normal para traspasar entropía de A a B.

Sin embargo, al observar nuestro ambiente, podemos comprobar que, generalmente, el transporte de entropía, y, sobre todo, el transporte de entropía a gran distancia, no se realiza de esta manera. Existe otro tipo de transporte de entropía, el transporte convectivo o la *convección*.

Calentemos un líquido o un gas y transportémoslo de A a B, utilizando, por ejemplo, una bomba. La entropía será transportada por la sustancia en movimiento. No se necesita una diferencia de temperatura para originar la corriente de entropía, pero sí necesitamos impulsar la corriente del líquido o del gas.

Como ejemplo para un transporte convectivo de entropía, tenemos la calefacción central, figura 6.26.

En la caldera, generalmente ubicada en el sótano de la casa, se calienta el agua, quemando, por ejemplo, parafina. El agua caliente es bombeada a través de la cañería de los radiadores, que se encuentran en las diferentes piezas de la casa. En el radiador el agua entrega una parte de su entropía al ambiente y, después, vuelve a la caldera.

Transportes convectivos de entropía pueden ser realizados mucho más fácilmente que los que se consiguen utilizando una diferencia de temperatura. La razón es que no existen, en el fondo, buenos conductores de calor. Incluso el cobre, considerado como buen conductor de calor, en realidad no lo es. Sería imposible, por ejemplo, conducir el calor desde la caldera a los radiadores mediante barras de cobre; pero no hay ningún problema en transportar la entropía junto con el agua o el aire a lo largo de grandes distancias.

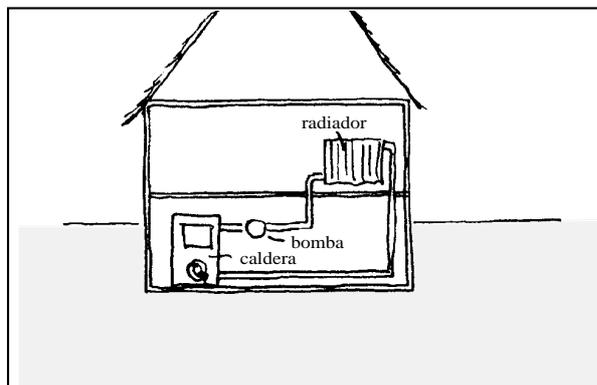


Fig. 6.26. Calefacción central. La entropía pasa de la caldera al radiador por medio de transporte convectivo.

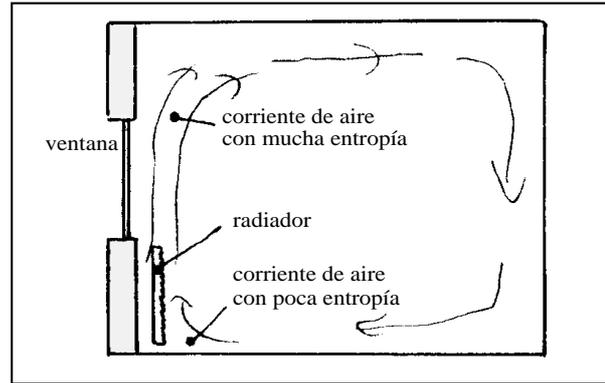


Fig. 6.27. La entropía se reparte en la pieza por convección.

Transporte de entropía por convección: La entropía es llevada por un gas o un líquido en movimiento. Para obtener un transporte convectivo de entropía no se necesita diferencia de temperatura.

En la naturaleza y la técnica existen múltiples ejemplos de corrientes de entropía convectivas.

En una pieza calefaccionada, la entropía proveniente del radiador o de la estufa debe ser repartida en todo el espacio disponible. ¿Cómo ocurre esto, siendo el aire un muy mal conductor del calor? La entropía es transportada en forma convectiva mediante el aire que, por lo demás, no tiene que ser bombeado. En el radiador o la estufa el aire caliente sube por tener menor densidad, figura 6.27.

Todo motor de automóvil tiene que ser refrigerado constantemente mediante una extracción de entropía, figura 6.28. La mayor parte de los motores de automóvil disponen de un sistema de refrigeración por agua: la entropía es transportada, igual que en la calefacción central, mediante el agua desde el motor hasta el radiador. Una bomba mantiene esta circulación de agua y, del radiador, la entropía pasa al aire.

Los grandes transportes de entropía que ocurren en la naturaleza y que determinan nuestro tiempo atmosférico son, igualmente, de tipo convectivo. En la atmósfera se transporta entropía a grandes distancias mediante el viento, es decir, aire en movimiento.

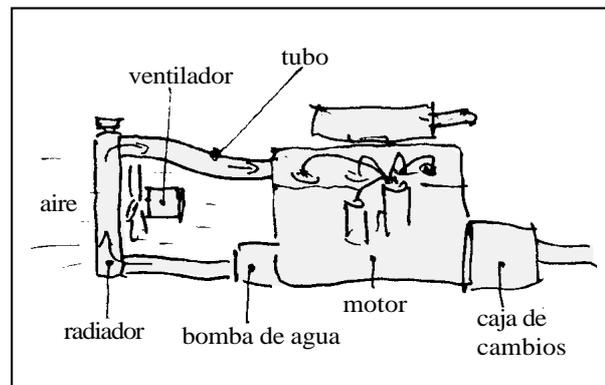


Fig. 6.28. Refrigeración del motor de auto. La entropía pasa del motor al radiador por convección.

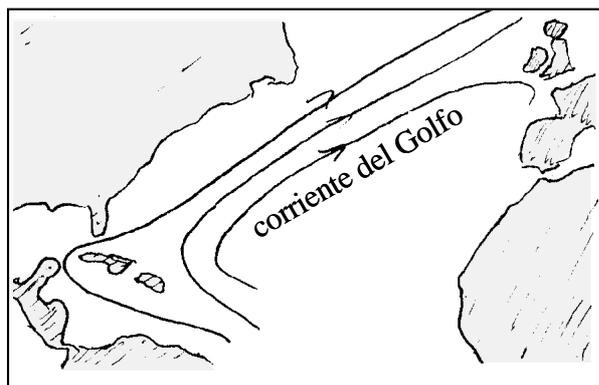


Fig. 6.29. La corriente del golfo. La entropía es transportada con una corriente de agua desde el Caribe hacia Europa.

Otro ejemplo interesante de un transporte convectivo de entropía lo constituye la corriente marina del golfo que lleva entropía desde el Caribe hacia Europa, figura 6.29.

Una consecuencia importante de esta situación consiste en que el clima en muchas partes de Europa es más cálido de lo que correspondería a la latitud geográfica respectiva.

Comparemos, una vez más, el transporte de entropía por conducción de calor con el que se produce por convección, siguiendo el camino recorrido por la entropía en una casa con calefacción central: La entropía producida por la combustión en la caldera llega en forma convectiva hasta la pared exterior del estanque de agua. Esta pared la atraviesa en forma normal, es decir, impulsada por una diferencia de temperatura. Después fluye en forma convectiva junto con el agua hasta el radiador. La pared del radiador tiene que ser traspasada en forma normal, por conducción del calor, y, desde la superficie exterior del radiador, la entropía llega finalmente por vía convectiva a las diferentes partes de la pieza. Podemos constatar, entonces, que en el largo camino de la entropía desde la llama en la caldera hasta la pieza, sólo mínimas distancias de pocos milímetros son recorridos mediante conducción normal de calor.

Todos los transportes de entropía a grandes distancias se realizan mediante convección.

Ejercicios

1. Describe de qué maneras una casa puede perder calor. ¿Cuáles son las pérdidas causadas por conducción y cuáles por convección?
2. Describe el camino recorrido por la entropía desde el interior de un motor de automóvil hasta el aire exterior. ¿En qué partes fluye debido a una diferencia de temperatura y en qué partes es transportada por convección?
3. ¿Cómo funciona la calefacción del automóvil? Describe el camino recorrido por la entropía. Beschreibe, auf welchen Wegen ein Haus Wärme verliert. Welche Verluste beruhen auf Wärmeleitung, welche auf Konvektion?

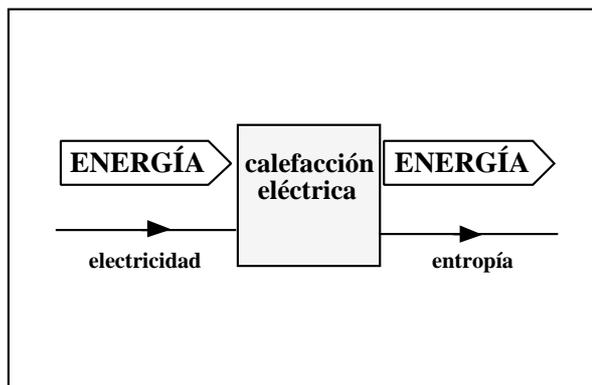


Fig. 6.30. Diagrama de flujo de la calefacción eléctrica.

6.9 La entropía como portador de energía

Establezcamos el balance energético para una calefacción eléctrica. La calefacción eléctrica consiste, fundamentalmente, en un alambre recorrido y calentado por una corriente eléctrica. Tú sabes que este tipo de calefacción tiene múltiples aplicaciones prácticas: en cocinas y estufas eléctricas, planchas, ampolletas etc.

Por un lado sabemos que en la calefacción se produce entropía. Mientras esté en funcionamiento se entrega entropía. Por otro lado, sabemos que la calefacción a su vez requiere de energía, es decir, que a través del cable llega energía con el portador electricidad. Esta energía que llega al artefacto junto con la electricidad tiene que salir nuevamente y, como tantas otras veces, surge la pregunta: Mediante qué portador sale la energía del artefacto. La respuesta es bastante obvia: de la calefacción sale, junto con la energía, también entropía y esta entropía es el portador buscado.

Podemos generalizar esta afirmación: siempre que exista una corriente de entropía también existe un flujo de energía.

La entropía es un portador de energía.

La calefacción eléctrica corresponde a los artefactos que conocimos anteriormente como transbordadores de energía: la energía entra al artefacto junto con el portador electricidad y sale con la entropía producida. La energía es transbordada de la electricidad a la entropía.

La figura 6.30 muestra el esquema correspondiente; pero ya sabemos que este diagrama de flujo no es completo, porque el portador de energía de entrada, la electricidad, tiene que salir nuevamente del artefacto, pues la electricidad no se puede ni producir ni destruir.

En la figura 6.31 aparece, por lo tanto, la electricidad con entrada y salida, mientras que la entropía tiene únicamente salida. Podemos resumir esta situación diciendo que en la calefacción eléctrica la energía es transbordada a la entropía generada en forma espontánea.

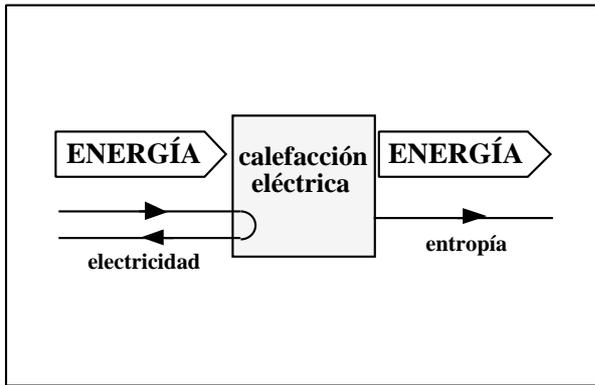


Fig. 6.31. Diagrama de flujo completo de la calefacción eléctrica.

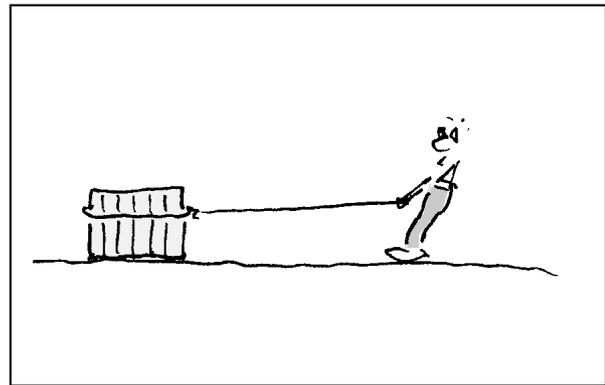


Fig. 6.33. Con respecto al ejercicio 1: La entropía se genera en la parte inferior de la caja.

Podemos traspasar estas ideas también a otros procesos en que se produce entropía. La figura 6.32 muestra el diagrama de flujo de una estufa a parafina. A la estufa llega la energía con el portador “parafina + oxígeno”. Al ser descargada esta energía, la parafina y el oxígeno son transformados en gases de escape (vapor de agua y gas carbónico). En el proceso de combustión, se produce entropía y la energía sale de la estufa junto con ella.

Ejercicios

1. Dibuja el diagrama de flujo para el proceso de roce representado en la figura 6.33. Indicación especial: El transbordador de energía corresponde aquí a la parte inferior de la caja en que se produce el roce.
2. Una torre armada con piezas de una caja de construcciones se derrumba. ¿En qué momento de este proceso se genera entropía y de dónde viene la energía necesaria ?

6.10 La relación entre flujo de energía y flujo de entropía

Cada flujo de entropía es acompañado por un flujo de energía. ¿En qué relación están las intensidades P e I_S de estos dos flujos? Podemos dar fácilmente una primera respuesta parcial a esta pregunta: Un

flujo de entropía de gran intensidad debe estar relacionado con un flujo muy intenso de energía. Con mayor exactitud podemos afirmar que dos flujos de entropía de igual intensidad llevan juntos la doble cantidad de energía correspondiente a cada uno. Expresado matemáticamente:

$$P \sim I_S \quad (1)$$

Sin embargo, esta expresión aún no representa la relación completa entre P e I_S . Para encontrarla, estudiemos nuevamente un balance energético, pero esta vez no referente a una calefacción eléctrica sino a una bomba de calor eléctrica. La figura 6.34 muestra el diagrama de flujo correspondiente a este transbordador de energía.

En este caso, a cada flujo saliente le corresponde otro entrante de igual intensidad, también para la entropía. El portador de entrada es nuevamente la electricidad y ésta abandona la bomba de calor después de haber descargado la energía. Por el otro lado, llega a la bomba de calor un flujo de entropía que carga la energía proveniente de la electricidad. La energía abandona, entonces, la bomba junto con la entropía saliente.

Observemos ahora más detenidamente la parte derecha del diagrama de flujo. La flecha para la energía de este lado representa sólo la energía transbordada desde la electricidad.

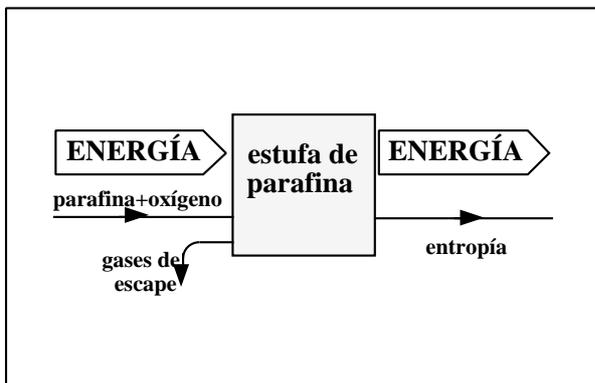


Fig. 6.32. Diagrama de flujo de la estufa a parafina

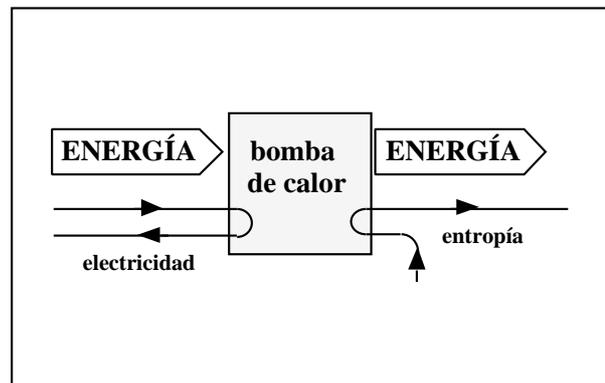


Fig. 6.34. Diagrama de flujo de la bomba de calor.

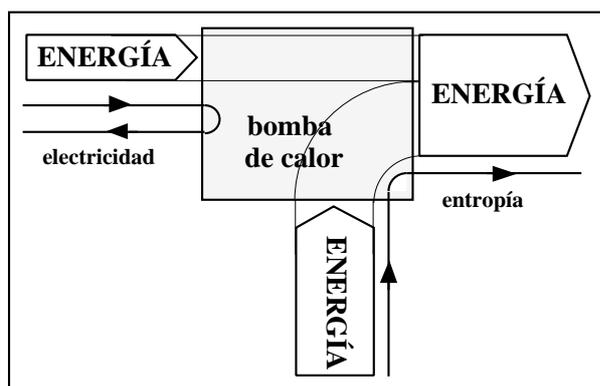


Fig. 6.35. Bomba de calor con representación detallada de las corrientes de energía que fluyen con la entropía.

La figura 6.35 muestra, en forma más exacta, este mismo lado derecho del diagrama: También la entropía entrante lleva energía, pero la entropía saliente lleva más energía que la entrante, porque le ha sido transbordada la energía proveniente de la electricidad.

En la figura 6.34 se representa, por lo tanto, sólo el “flujo de energía neto”. En la figura 6.35 podemos constatar que dos flujos de entropía de igual intensidad pueden llevar diferentes cantidades de energía. El flujo de energía entrante lleva poca energía; el flujo saliente lleva más. Entonces, la intensidad del flujo de energía depende de otros factores adicionales.

¿En qué se diferencia la entrada de la entropía de la salida? ¿En la temperatura! En consecuencia, la intensidad del flujo energético depende, además, de la temperatura del conductor de entropía. Podemos decir que el factor de proporcionalidad que transforma la expresión (1) en ecuación depende de la temperatura o, de manera más simple, podemos afirmar que el factor de proporcionalidad es la temperatura absoluta. Tenemos entonces que

$$P = T \cdot I_S \quad (2)$$

¿Casualidad? Por supuesto que no, porque la escala de temperatura que todos usamos y que hemos aplicado en tantas oportunidades, se define justamente a través de la ecuación (2).

Un flujo de entropía de intensidad I_S lleva un flujo de energía de intensidad $T \cdot I_S$.

Ecuación (2) nos muestra que podemos interpretar la temperatura de la siguiente manera:

La temperatura indica la cantidad de energía que lleva un flujo de entropía.

Ahora podemos establecer un balance calórico cuantitativo exacto para la bomba de calor: Llamamos T_A a la temperatura alta con que la entropía sale de la máquina y T_B a la más baja con que entra. Con la entropía de la temperatura más baja entra, entonces, un flujo energético de intensidad

$$P_B = T_B \cdot I_S$$

y en la salida (en la temperatura alta) tenemos un flujo energético de intensidad

$$P_A = T_A \cdot I_S$$

La intensidad del flujo energético neto es, entonces,

$$P = P_A - P_B = T_A I_S - T_B I_S$$

o sea,

$$P = (T_A - T_B) I_S \quad (3)$$

Esta intensidad neta tiene que ser igual a la del flujo energético que entra a la bomba de calor a través del cable eléctrico. La ecuación (3) nos indica, por lo tanto, el gasto energético de la bomba de calor y permite, además, la siguiente interpretación:

La bomba de calor ocupará más energía mientras

- **mayor cantidad de entropía tenga que impulsar y**
- **mayor sea la diferencia de temperatura que tenga que vencer.**

Ejemplo: Una bomba de calor con la que se calefacciona una casa transporta en cada segundo 30 Ct desde el exterior al interior de la casa. La temperatura exterior es de 10 °C y la temperatura interior, de 22 °C. ¿Cuál es el gasto energético de la bomba? No necesitamos transformar las temperaturas Celsius a temperaturas absolutas, porque las diferencias son las mismas en ambas escalas. $T_A - T_B$ equivale, entonces, a 12 K y tenemos

$$P = (T_A - T_B) I_S = 12 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 360 \text{ W}.$$

Ahora, si esta misma casa es calefaccionada con una estufa eléctrica corriente, es decir, no bombeamos la entropía desde el exterior sino la generamos en el interior de la casa, evidentemente la temperatura interior sigue siendo 22 °C y necesitamos siempre 30 Ct/s, porque la casa pierde esta misma cantidad de calor a través de sus paredes.

La intensidad del flujo energético que sale de la calefacción eléctrica se calcula según ecuación (2), siendo $T = (273 + 22)\text{K} = 295 \text{ K}$ e $I_S = 30 \text{ Ct/s}$:

$$P = T \cdot I_S = 295 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 8850 \text{ W}$$

El gasto energético de la calefacción eléctrica resulta, según nuestros cálculos, mucho mayor que el de la bomba de calor. Sin embargo, en la práctica, esta diferencia no es tan grande, ya que también en la bomba de calor se produce algo de entropía.

Ejercicios

1. Una casa es calefaccionada mediante una estufa a parafina y la temperatura interior se mantiene en 20 °C. Existe una pérdida de entropía de 35Ct/s. ¿Cuál es el gasto energético de la calefacción?

2. El radiador de un auto que está a una temperatura de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ entrega al aire 60 Ct/s . ¿Cuál es el flujo energético que pasa del radiador al aire?

3. La temperatura en la parte inferior de una plancha de 1000 W es de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. ¿Cuánta entropía sale de la plancha en cada segundo?

4. Una piscina es temperada mediante una bomba de calor que obtiene la entropía de un riachuelo cercano. La temperatura del agua del riachuelo es de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la de la piscina de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. El agua de la piscina pierde continuamente una cantidad de entropía de 500 Ct/s y la bomba de calor tiene que reponer constantemente esta misma cantidad de entropía. ¿Cuál es el gasto energético de la bomba de calor?

5. (a) Una casa es calefaccionada mediante una bomba de calor. La temperatura exterior es de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; la interior, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. La bomba de calor entrega 30 Ct/s . ¿Cuál es su gasto energético?

(b) La misma casa es calefaccionada ahora con una estufa eléctrica corriente, es decir, los 30 Ct/s no son bombeados desde el exterior, sino generados en el interior de la misma casa. ¿Cuál es ahora el gasto energético?

6.11 Las máquinas térmicas

Explicamos el concepto de máquina térmica a través de la figura 6.36: Es, fundamentalmente, un transbordador de energía que recibe la energía con el portador entropía y la entrega con el portador momentum angular. Esto último significa que la energía es entregada a través de un eje o árbol en rotación; la máquina sirve para impulsar algo.

Son máquinas térmicas

- la turbina de vapor
- la máquina de vapor
- todos los motores de combustión interna
- los motores de propulsión a chorro
- y otros más.

Estudiaremos más adelante cómo funcionan todas estas máquinas en detalle, por el momento consideramos sólo lo que tienen en común. Empecemos con un pequeño rodeo.

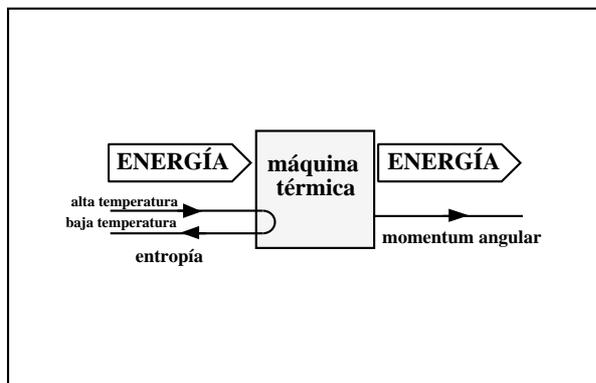


Fig. 6.36. Diagrama de flujo de una máquina térmica.

La figura 6.37 muestra el diagrama de flujo de una turbina de agua que, evidentemente, no es una máquina térmica. A esta turbina le llega agua a alta presión, para salir, posteriormente, a baja presión. El agua a alta presión porta gran cantidad de energía, el agua a baja presión, poca. Al pasar el agua de la alta a la baja presión descarga la energía que sale de la turbina a través de un árbol, es decir, con el portador momentum angular.

Si comparamos las figuras 6.37 y 6.36 podemos ver que ambos artefactos tienen en común una característica fundamental: a la máquina térmica le llega la entropía con alta temperatura, es decir, cargada con una gran cantidad de energía. Esta misma entropía sale de la máquina con una baja temperatura, es decir, con poca energía. Al pasar la entropía de la alta a la baja temperatura, descarga la energía que, a su vez, sale de la máquina térmica a través de un árbol en rotación, o sea, con el portador momentum angular.

En una máquina térmica se transborda la energía del portador entropía al portador momentum angular.

Calculemos ahora la energía entregada por una máquina térmica en cada segundo: La máquina absorbe en la entrada de entropía, con la alta temperatura T_A , una corriente de energía de intensidad $T_A I_S$ y entrega, en la salida de entropía con la baja temperatura T_B una corriente de energía de intensidad $T_B I_S$. La diferencia corresponde a la intensidad de la corriente energética que es transbordada al momentum angular. Con el momentum angular, abandona la máquina una corriente de energía de intensidad

$$P = T_A I_S - T_B I_S = (T_A - T_B) I_S$$

Una máquina térmica entregará, por lo tanto más energía a través del momentum angular cuanto

- mayor sea la intensidad de la corriente de entropía que fluye a través de la máquina, y
- mayor sea la caída de la temperatura que sufre la corriente de entropía dentro de la máquina.

En muchas plantas eléctricas, el generador es impulsado mediante una máquina térmica. La figura

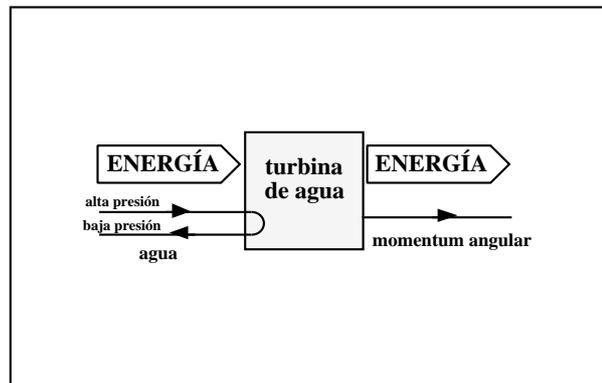


Fig. 6.37. Diagrama de flujo de una turbina de agua.

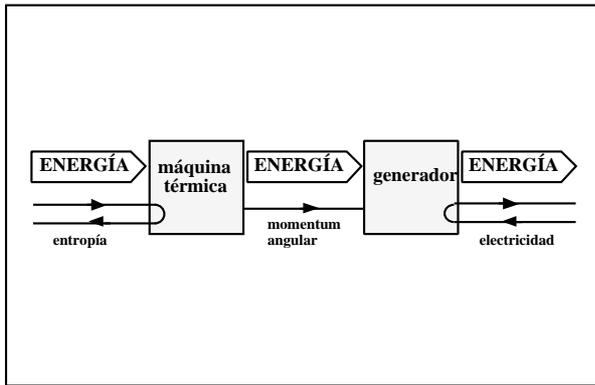


Fig. 6.38. Diagrama de flujo de una central termoeléctrica.

6.38 muestra el diagrama de flujo de los dos artefactos acoplados.

Sin embargo, podemos representar también los dos transbordadores mediante un solo cuadrado, figura 6.39. Al comparar este diagrama con el de una bomba de calor eléctrica (representada nuevamente en la figura 6.40, igual a la figura 6.34), constatamos que los dos se distinguen únicamente por el sentido de las flechas.

Una planta termoeléctrica funciona, por lo tanto, en el sentido contrario de una bomba de calor. Si la bomba de calor transborda la energía del portador electricidad al portador entropía, la planta termoeléctrica de la figura 6.39 lo hace de la entropía a la electricidad.

6.12 Las fuentes de energía para las máquinas térmicas

Al hacer funcionar una máquina térmica, siempre se nos presentan dos problemas:

- 1) Necesitamos una fuente de entropía de alta temperatura.
- 2) Es fundamental poder contar con la posibilidad de deshacernos de la entropía de baja temperatura, es decir, necesitamos una especie de “basural de entropía”.

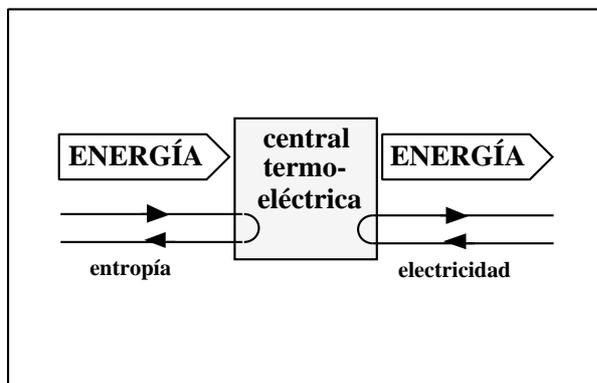


Fig. 6.39. Diagrama de flujo de una central termoeléctrica. Turbina y generador se representan mediante un único símbolo.

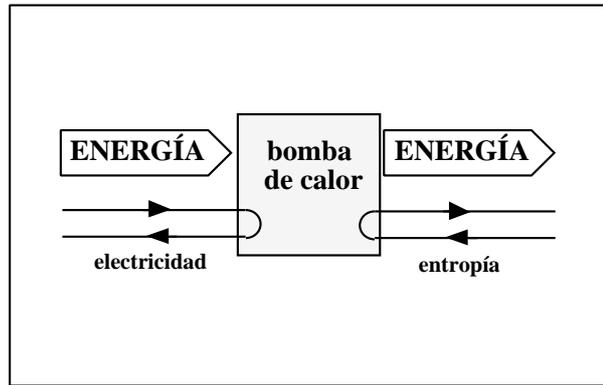


Fig. 6.40. Diagrama de flujo de una bomba de calor

Estos dos problemas pueden ser resueltos de diferentes maneras.

Fuentes naturales de entropía

La utilización de las fuentes naturales de entropía de alta temperatura constituye, evidentemente, la solución menos comprometedora para el ambiente.

En algunos lugares de la tierra existen, a profundidades no demasiado extremas, depósitos de vapor caliente que, a través de perforaciones, pueden ser sacados a la superficie para impulsar alguna planta energética. Desgraciadamente, estos yacimientos de *energía geotérmica* no son muy frecuentes.

La otra posibilidad consiste en el aprovechamiento de las inmensas cantidades de entropía de alta temperatura que llegan a la tierra con la luz solar. Ya se está utilizando en algunas *plantas solares*. Si bien esta fuente de entropía es prácticamente inagotable, su aprovechamiento eficiente implica la resolución previa de algunos problemas prácticos: por un lado, la luz solar se reparte en grandes áreas y la entropía, y con ella la energía, aparece como diluida. Tenemos que recolectarla, por lo tanto, mediante extensas superficies iluminadas, usando, por ejemplo, grandes espejos que concentran la luz solar en una especie de caldera. Un segundo problema consiste en que no podemos disponer de la energía solar en forma continua: durante la noche no hay sol y en invierno, cuando más energía necesitamos, el sol alumbraba sólo débilmente.

Fuentes artificiales de entropía

La mayor parte de la entropía que utilizamos para hacer funcionar nuestras máquinas térmicas la conseguimos de una manera bastante menos elegante: la generamos a través de la combustión de carburantes y combustibles o aprovechando la fisión nuclear.

La utilización intensa y en gran escala, de las máquinas térmicas origina grandes problemas, tanto en la obtención de la entropía, como en la eliminación de la “basura térmica”. Veamos de qué manera se trata de solucionarlos en el caso de las máquinas térmicas más importantes.

Plantas termoeléctricas

La mayor parte de ellas utiliza turbinas de vapor y la entropía se genera a través de la combustión de carbón en la caldera. En las plantas termonucleares es producida en el reactor mediante la fisión de los núcleos atómicos del uranio.

Cuando la entropía abandona la planta, la temperatura ya no es muy superior a la del ambiente, por lo que se entrega, generalmente a las aguas de un gran río. Si no existe esta posibilidad o si el agua del río es insuficiente, la entropía es entregada al aire a través de grandes torres de refrigeración.

Motores de combustión interna

La entropía es producida en el interior del motor a través de la combustión de algún carburante, como bencina o diesel y lo abandona, en su mayor parte, con los gases de escape. En realidad la figura 6.36 no representa fielmente la situación del motor de combustión interna, porque en él la entropía no llega desde el exterior.

Máquina de vapor

Antes de la aparición de los motores eléctricos y de combustión interna, era la máquina impulsadora más usada y servía para mover locomotoras y barcos, apisonadoras y arados, trilladoras y un sinnúmero de máquinas en todo tipo de fábricas. También, en este caso, la entropía se generaba en una caldera a través de la combustión del carbón. Después de haber impulsado la máquina, el vapor, por lo general, fue despedido simplemente al aire y con él también se entregaba la entropía al ambiente.

El motor de propulsión a chorro

Se usa para impulsar los grandes aviones de pasajeros. No corresponde exactamente a nuestra definición de máquina térmica, porque no entrega la energía mediante un árbol y con el portador momentum angular sino con el portador momentum, figura 6.41.

Este motor “bombea” el momentum desde el aire hacia el avión. Igual que en el motor de combustión interna, la entropía se genera mediante la combustión de un carburante y se entrega al ambiente con los gases de escape.

Ejercicios

1. A través de una máquina térmica fluye una corriente de entropía de 100 Ct/s. La temperatura en la entrada es de 150 °C y en la salida, 50 °C. ¿Cuánta energía entrega la máquina en cada segundo con el portador momentum angular?
2. E Una planta eléctrica entrega, con la electricidad, una corriente de energía de 1000 MW. La temperatura del vapor en la entrada de la turbina es de 750 K y en la salida de 310 K. ¿Qué intensidad tiene el flujo de entropía que sale con el agua de

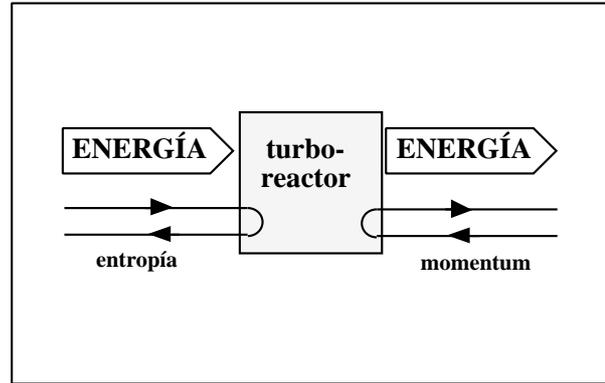


Fig. 6.41. Diagrama de flujo del motor de propulsión a chorro

refrigeración y cuál es la intensidad del flujo energético que lleva este flujo de entropía ?

3. Indica algunas posibilidades de cómo se podría aprovechar la entropía en alta temperatura existente en la naturaleza. Discute también posibilidades que incluso parezcan poco realistas.

6.13 Generación de entropía a través de corrientes de entropía

A través de una barra de un material buen conductor del calor fluye una corriente de entropía, figura 6.42. La corriente es mantenida mediante una diferencia de temperatura. Hay un aislamiento térmico lateral para impedir la pérdida de entropía. Al comienzo del experimento, habrá variaciones de temperatura en algunos lugares de la barra, pero, después de un cierto tiempo, estos cambios cesarán y se establecerá un *estado estacionario*.

Nuestra nueva ecuación, que relaciona la intensidad del flujo energético con la de la entropía, interpreta este experimento de una manera sorprendente.

Observemos tres lugares diferentes de la barra: el extremo derecho, frío, el medio y el extremo izquierdo, caliente. Marquemos mediante los números 1, 2 y 3 los valores de las magnitudes que se refieran a estos lugares. En el extremo izquierdo, fluye, hacia la derecha, una corriente de energía de intensidad P_3 . Debido a la condición estacionaria,

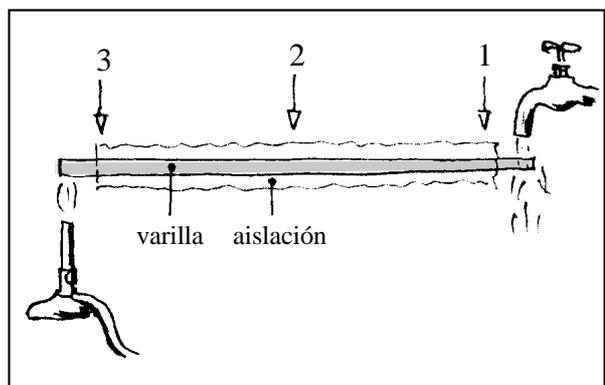


Fig. 6.42. En el extremo derecho de la barra sale más entropía de la que entra en el extremo izquierdo.

en ninguna parte de la barra existirá una acumulación de energía y la intensidad del flujo energético será la misma en todos los lugares:

$$P_3 = P_2 = P_1 \quad (3)$$

Sabemos que las intensidades del flujo energético P y de entropía I_S se relacionan a través de la ecuación

$$P = T \cdot I_S \quad (4)$$

Al reemplazar la intensidad del flujo energético de la ecuación (3) con la ecuación (4), tenemos:

$$T_3 \cdot I_{S3} = T_2 \cdot I_{S2} = T_1 \cdot I_{S1} \quad (5)$$

Sabemos que la temperatura T_3 es mayor que T_2 y T_2 mayor que T_1 , o sea,

$$T_3 > T_2 > T_1.$$

Concluimos que la validez de la ecuación (5) implica que

$$I_{S3} < I_{S2} < I_{S1}$$

o sea, que el flujo de entropía aumenta a medida que avanza hacia la derecha. En el lado derecho, donde está el agua de refrigeración, sale más entropía de la barra de la que entra en el lado izquierdo con la llama. Dentro de la barra debe ocurrir entonces un proceso de generación de entropía. ¿Cómo es posible esto?

En realidad esta afirmación no es tan sorprendente. Ya supimos antes que la entropía siempre se genera a través de una especie de roce, es decir, cuando alguna corriente fluye en contra de una resistencia. Éste es exactamente el caso de nuestro experimento. Lo que fluye aquí no es ningún líquido o gas, tampoco es ni momentum ni electricidad, es la misma entropía la que fluye dentro de la barra. Entonces, un flujo de entropía en contra de una resistencia genera, a su vez, entropía.

Imaginariamente podemos dividir la entropía saliente en el extremo derecho de la barra en dos partes: la parte que se entrega en el extremo izquierdo y la parte generada a través del flujo desde la izquierda hacia la derecha. De esta manera tenemos:

$$I_{S1} = I_{S3} + I_{S \text{ generada}}$$

donde $I_{S \text{ generada}}$ representa la entropía generada dentro de la barra en cada segundo.

F Al fluir la entropía en contra de una resistencia térmica, se genera entropía.

Ejemplo: El filamento de un calefactor de agua de 700 W, figura 6.43, está en 1000 K (727 °C). El flujo de entropía tiene una intensidad de

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{1000 \text{ K}} = 0,7 \text{ Ct/s}$$

En la superficie exterior, el calefactor tiene la misma temperatura que el agua, supongamos 350 K (77 °C). La intensidad del flujo de entropía en la su-

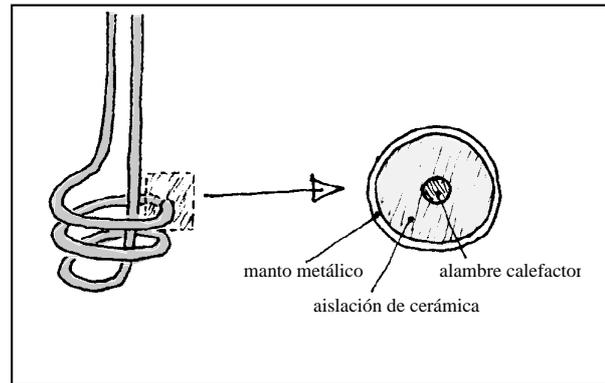


Fig. 6.43. Calefactor de agua por inmersión. A la derecha un corte simplificado y ampliado.

perficie exterior del calefactor es, entonces, de

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{350 \text{ K}} = 2 \text{ Ct/s}$$

En el corto trayecto desde el filamento a la superficie exterior del calefactor se generan, por lo tanto, $(2 - 0,7) \text{ Ct/s} = 1,3 \text{ Ct/s}$

A través de la corriente eléctrica se generan en el filamento 0,7 Ct/s. El flujo de entropía genera, entonces, mayor cantidad de entropía que la misma electricidad.

Ejercicios

1. Una casa es calefaccionada con 20 kW. La temperatura interior es de 20 °C y la exterior, -5 °C.

- ¿Qué intensidad tiene el flujo de entropía que fluye hacia afuera en la pared interior de la casa?
- ¿Y en la pared exterior?
- ¿Cuánta entropía adicional se genera a través de este flujo?

2. El filamento de una cocina eléctrica de 1000 W tiene una temperatura de 1000 K.

- ¿Cuánta entropía se produce en este filamento en cada segundo?
- En la cocina se calienta una olla con agua. La temperatura del agua es de 373 K. ¿Cuánta entropía se absorbe por el agua en cada segundo?
- ¿Cuánta entropía adicional se genera en el trayecto entre el filamento y el agua?

6.14 La pérdida de energía

La figura 6.44 nos muestra que en el camino desde la llave de agua al regador se pierde agua. La llave entrega 2 litros de agua en cada segundo; del regador salen sólo 1,8 l/s. La diferencia, 0,2 l/s, se ha escurrido a través del hoyo en la manguera. Tenemos una *pérdida* de 0,2 l/s. Se acostumbra expresar esta

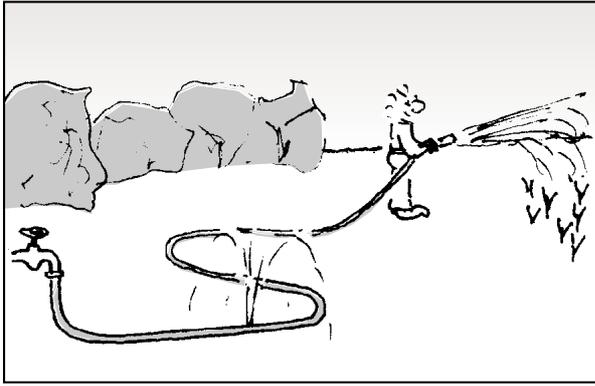


Fig. 6.44. Se pierde agua a través del hoyo de la manguera.

pérdida a través del porcentaje con respecto a lo inicialmente existente. Esta pérdida en % la llamamos V . En nuestro caso, tenemos entonces:

$$V = \frac{0,21 / s}{21 / s} \cdot 100\% = 10\%$$

En la mayoría de los artefactos que trabajan como transbordadores de energía y también en los conductores encargados de transportar la energía, tenemos que afrontar constantes pérdidas de energía. ¿Qué significa esto? ¿Sabemos que no se puede destruir la energía! La situación es similar a la del agua de la figura 6.44: Una parte de la energía no llega a su destino, se escurre lateralmente.

Casi siempre las pérdidas de energía se producen a través de producción de entropía. Observemos una turbina de agua: Hasta ahora siempre dibujamos el diagrama de flujo correspondiente, como lo muestra la figura 6.45 (y también 6.37). En realidad, este dibujo se refiere a una turbina ideal que no existe en la práctica. En cada turbina real se produce, en forma indeseada, entropía en diferentes partes: a través del roce del agua con las paredes de las tuberías, con el roce del agua consigo mismo (“roce interno”) y con el roce del eje de la turbina con sus soportes. Esta entropía generada abandona la turbina de diferentes maneras: en parte pasa al agua, en parte al aire del ambiente.

Junto con esta entropía, también perdemos energía.

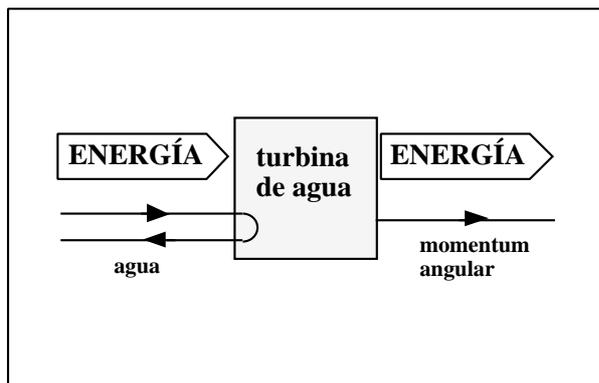


Fig. 6.45. Diagrama de flujo de una turbina de agua ideal

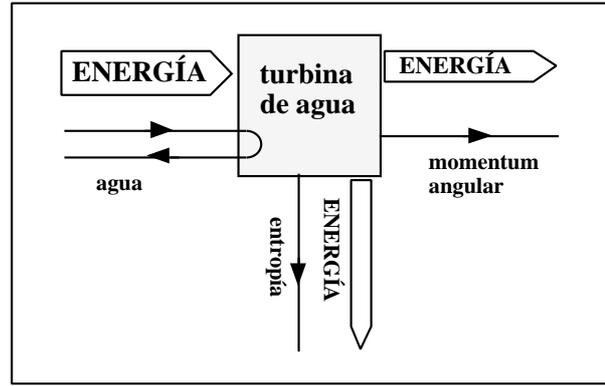


Fig. 6.46. Diagrama de flujo de una turbina de agua real

La figura 6.46 muestra el diagrama de flujo real de una turbina. El ancho de las flechas de energía indica la intensidad de los flujos energéticos correspondientes.

Llamemos P_V a la intensidad del flujo energético perdido. La relación entre la entropía generada y la pérdida es, entonces,

$$P_V = T \cdot I_S \text{ generada}$$

y la pérdida porcentual de la máquina es de

$$V = \frac{P_V}{P_{\text{entrada}}} \cdot 100\% \tag{6}$$

P_{entrada} es la intensidad del flujo energético que entra a la máquina.

La figura 6.47 muestra el diagrama de flujo de un motor eléctrico real, no idealizado. También en este caso se produce entropía indeseada. Una parte se forma en los alambres (siempre cuando fluye una corriente eléctrica en un alambre se produce entropía) y otra parte a través del roce mecánico.

También la pérdida de energía en un simple cable eléctrico se calcula según nuestra fórmula (6).

Acabamos de ver que las pérdidas de energía se deben a la generación de entropía. Obviamente, quisiéramos evitar estas pérdidas, por lo que debemos tener presente:

Evita la generación de entropía.

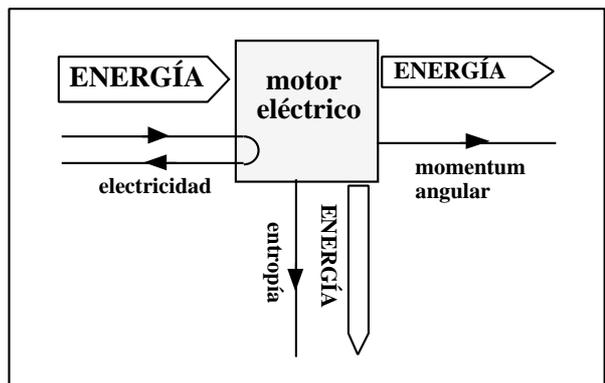


Fig. 6.47. Diagrama de flujo de un motor eléctrico real

Tabla 6.1. Pérdidas de energía típicas

	pérdida
Turbina de vapor grande	10 %
Motor eléctrico grande	10 %
Motor eléctrico de juguete	40 %
Célula fotoeléctrica	90 %
Planta termoeléctrica	57 %
Planta termonuclear	67 %

En algunos transbordadores de energía estas pérdidas son bastante considerables. La tabla 6.1 indica algunos valores típicos.

A lo mejor te llaman la atención las altas pérdidas de energía de las plantas energéticas; éstas no se deben tanto a las pérdidas de la turbina a vapor y del generador sino que se originan, fundamentalmente, en la generación de la entropía en la caldera o en el reactor. Pero, ¿cómo podemos hablar aquí de pérdidas? ¿Acaso no es indispensable la generación de entropía para que pueda funcionar la planta energética? ¡No necesariamente!

Existe la posibilidad de transbordar, directamente, la energía del carbón o del uranio a la electricidad, sin pasar por entropía y momentum angular. Los transbordadores correspondientes se llaman *células de combustión* y funcionan en forma similar a una batería. Son, en el fondo, baterías en que se vuelven a entregar, constantemente, las sustancias que se van consumiendo. Sin embargo, hasta ahora estos artefactos trabajan sólo con combustibles líquidos o gaseosos muy puros, y no pueden utilizar carbón. Además, su período de duración es aún demasiado restringido, como para poder competir seriamente con las plantas energéticas normales.

Ejercicios

1. El motor de un automóvil entrega, a través de su árbol, 20 kW. A las ruedas llegan sólo 18 kW, porque en los engranajes y soportes se genera entropía por roce. ¿Cuál es la pérdida en %?
2. Un motor eléctrico tiene una pérdida del 40 % y gasta 10 W. ¿Cuánta energía entrega por segundo con el momentum angular? ¿Cuánta entropía genera en cada segundo, siendo la temperatura ambiental de 300 K?
3. Un generador con una pérdida del 8 % entrega, con la electricidad, una corriente de entropía de 50 kW de intensidad. ¿Qué intensidad tiene el flujo energético que, a través del árbol, llega al generador? ¿Qué intensidad tiene el flujo energético de pérdida? Si la temperatura ambiental es de 300 K, ¿cuál es la intensidad del flujo de entropía que genera?

4. Calefaccionemos una casa con una bomba de calor o con una calefacción eléctrica. Para mantener la temperatura interior a 298 K, se necesitan 30 Ct/s. La temperatura exterior es de 273 K.

- (a) ¿Cuál es el gasto energético de la calefacción eléctrica?
- (b) ¿Y de la bomba de calor?

Consideramos como pérdida el gasto superior de la calefacción eléctrica con respecto a la bomba de calor.

- (c) ¿Cuál es el flujo de energía de pérdida?
- (d) ¿Cuál es la pérdida en % en relación al flujo energético de la calefacción eléctrica?

6.15 La relación entre contenido de entropía y temperatura

Si entregamos entropía a un cuerpo, su temperatura aumentará; así ocurre, al menos con los objetos estudiados hasta ahora (más tarde conoceremos casos diferentes).

¿De qué depende el calentamiento de un cuerpo al cual le entregamos entropía?

En primer término, evidentemente, del tamaño del cuerpo o, mejor dicho, de su masa. Expresado de otra manera: Tenemos dos cuerpos del mismo material, pero uno de doble masa que el otro. Para llevar ambos cuerpos a la misma temperatura final, partiendo de 0 K, al cuerpo más pesado habrá que entregarle la doble cantidad de entropía que la correspondiente al más liviano.

En segundo término, la cantidad de entropía requerida también depende del tipo de material. La figura 6.48 nos muestra cómo aumenta la temperatura con el contenido de entropía para un cuerpo de cobre y otro de aluminio. Los dos tienen una masa de 1 kg. El gráfico nos indica que necesitamos menos entropía para elevar la temperatura del cobre a un determinado valor que para el aluminio. En una temperatura de 300 K, por ejemplo, el cobre contiene unos 500 Ct y el aluminio 1000 Ct, es decir, el doble.

Por otro lado, el gráfico nos permite apreciar que, con una misma cantidad de entropía, el cobre se calienta más que el aluminio. Con 500 Ct, por ejemplo, el cobre alcanza una temperatura de 300 K y el aluminio, sólo de 150 K.

Si estamos interesados en saber únicamente lo que ocurre en torno a las temperaturas ambientales normales, conviene confeccionar gráficos, cuyas escalas no empiecen en cero, o sea, usamos una parte ampliada del gráfico original.

La figura 6.49 muestra este tipo de gráficos para 1 kg de cobre, hierro, aluminio, parafina y agua. Mientras más inclinada sea la curva, menos entropía se necesitará para obtener una variación de temperatura deseada.

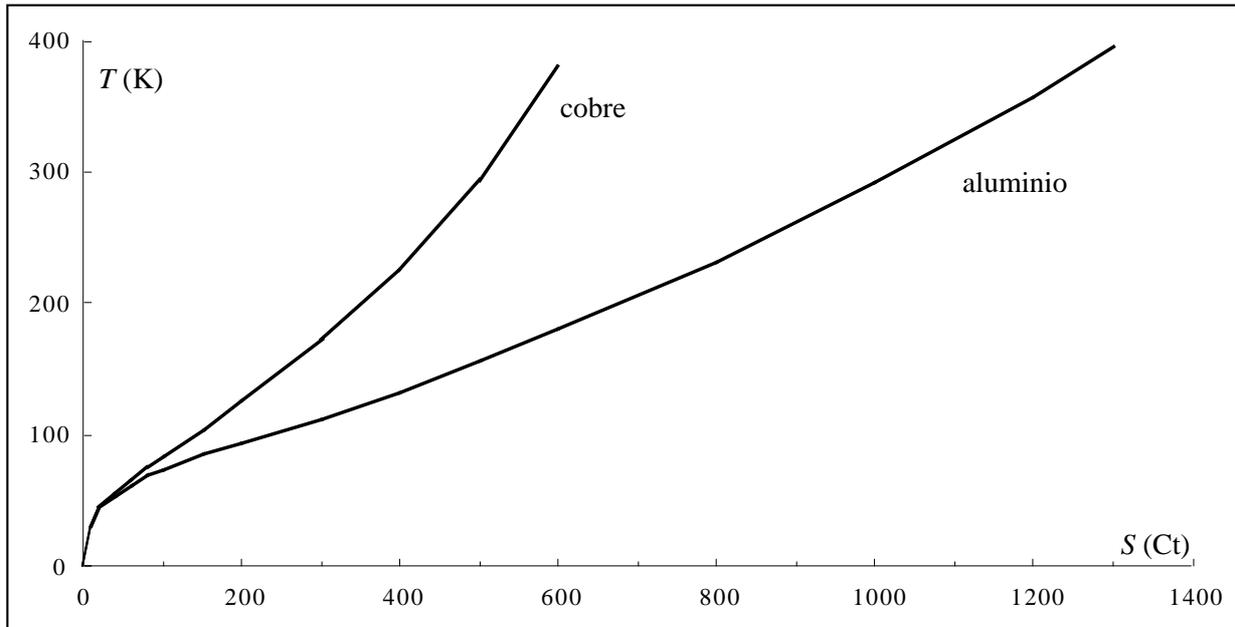


Fig. 6.48. Temperatura en función del contenido de entropía de 1 kg de cobre y 1 kg de aluminio

Ejercicios

1. A 1 kg de cobre y 1 kg de aluminio que están a la temperatura inicial de 25 °C les entregamos 80 Ct a cada uno. ¿Cuál de los dos metales se calienta más y en qué relación están las dos variaciones de temperatura?
2. ¿Cuánta entropía es necesaria para calentar 100 l de agua de 20 °C a 100 °C?

6.16 Relación entre la energía entregada y la variación de temperatura

Si queremos calentar agua tendremos que entregarle entropía. Pero, junto con ella le proporcionamos, también, energía. Generalmente la gente conoce bien este hecho: para calentar el agua tenemos que gastar dinero y éste es necesario para pagar la energía usada.

Desarrollaremos, ahora, una fórmula para calcular el gasto energético que requiere el calentamiento del agua. Llamemos ΔE la cantidad de energía entregada al agua durante el calentamiento. (No debemos confundirla con la energía total contenida en el agua). Para calentar 1 kg de agua de 20 °C a 100 °C, necesitamos una determinada cantidad de energía. Para calentar 2 kg de agua de 20 °C a 100 °C, necesitamos, obviamente, doble cantidad de energía, por lo que

$$\Delta E \sim m.$$

La energía necesaria para el calentamiento es proporcional a la masa del agua.

Pero la cantidad de energía requerida, ΔE , también depende de la cantidad de grados Celsius en que queremos incrementar la temperatura del agua. Si este incremento es de 20 °C, la cantidad de energía requerida es mayor que para 10 °C.

Al entregar, a una determinada cantidad de agua, energía mediante un calefactor por inmersión y midiendo el incremento de la temperatura ΔT en función de la energía entregada, ΔE , podemos constatar que ΔT es proporcional a ΔE :

$$\Delta E \sim \Delta T.$$

En realidad, esta relación ya no se cumple en temperaturas extremas muy altas o muy bajas, pero es absolutamente válida entre 0 °C y 100 °C. Junto con la proporcionalidad anterior, tenemos ahora

$$\Delta E \sim m \cdot \Delta T.$$

Para transformar esta relación de proporcionalidad en ecuación, tenemos que introducir el factor de proporcionalidad c :

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

c es el *calor específico*. Para que en ambos lados de la ecuación tengamos las mismas medidas, la unidad de medición de c tiene que ser J/(kg · K).

El valor de c depende de la clase de sustancia calentada o enfriada. Para el agua

$$c = 4,180 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}.$$

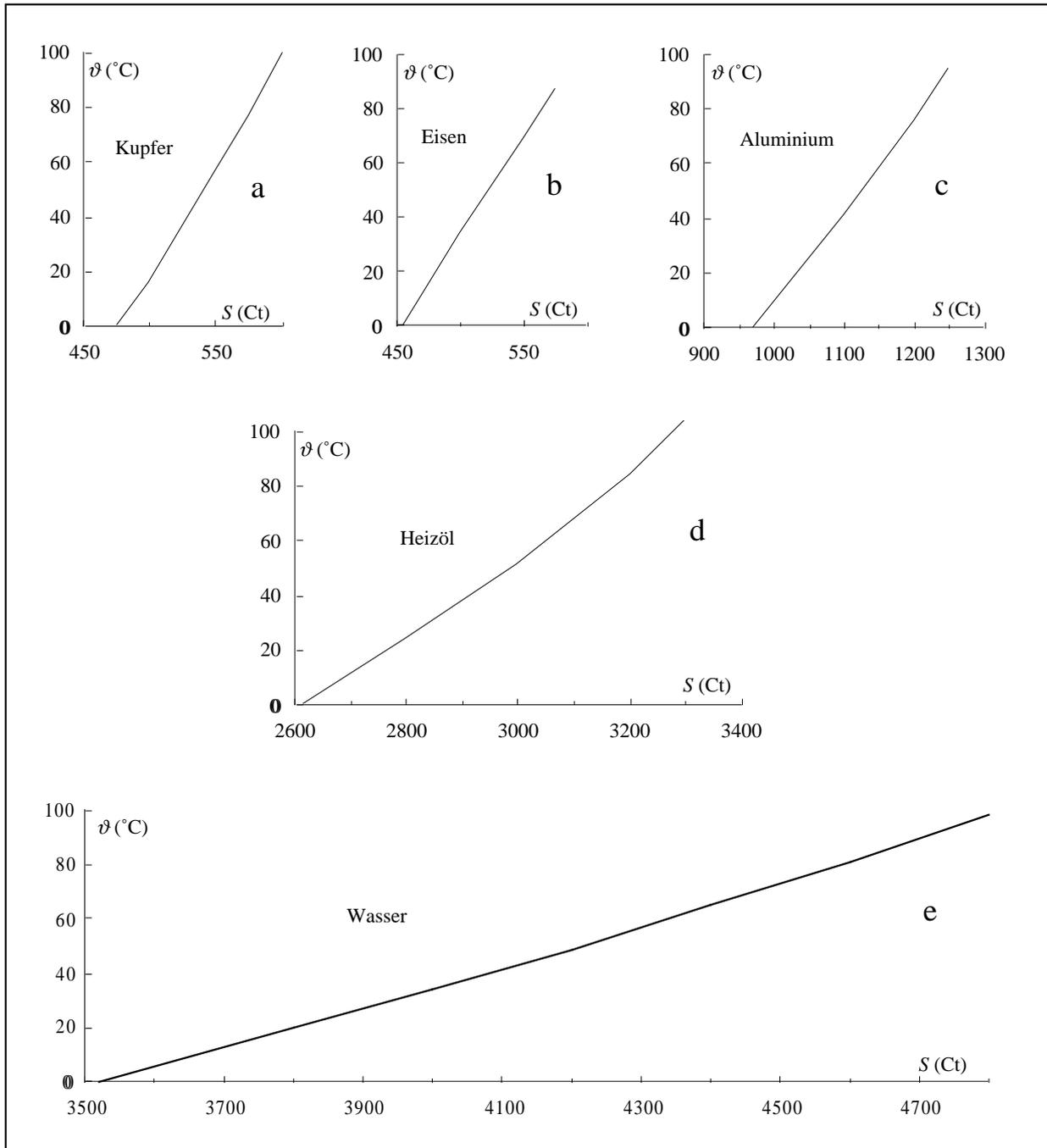


Fig. 6.49. Temperatura en función del contenido de entropía para (a) cobre, (b) hierro, (c) aluminio, (d) parafina y (e) agua. Las escalas de la entropía no empiezan con el cero absoluto sino con el punto cero de la escala Celsius.

Ejercicios

1. Con un calefactor de inmersión de 500 W calentamos medio litro de agua de 25 °C a 100 °C. ¿Cuánto tiempo necesitamos?

2. ¿Cuánta energía gastamos en una ducha de 5 minutos?

Calcula primero cuántos kg de agua caliente se gastan en 5 minutos. Suponemos que la ducha entrega en cada segundo 0,1 litros de agua y que, al entrar al califont, la temperatura del agua es de 15 °C y de 45 °C al salir.

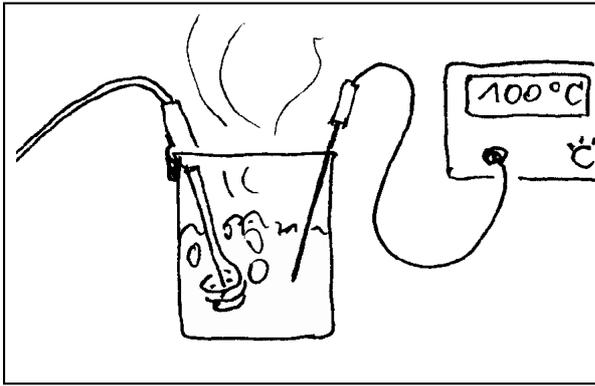


Fig. 6.50. A pesar del suministro constante de entropía, la temperatura no sigue subiendo.

6.17 Los cambios de estado físico de la materia

Calentemos el agua contenida en un vaso precipitado mediante un calefactor por inmersión y midamos su temperatura, fig. 6.50. Mientras el calefactor entregue entropía, la temperatura del agua aumentará, por lo menos al comienzo. Pero al final, cuando la temperatura ha alcanzado los 100 °C, el agua empieza a hervir y la temperatura no sigue aumentando, a pesar de que el calefactor mantiene su entrega de entropía. ¿Por qué?

Al hervir, el agua líquida se va transformando en agua gaseosa, en *vapor de agua*. Este vapor tiene la misma temperatura del agua hirviendo, es decir, 100 °C. La entropía entregada al agua que hierve se utiliza, entonces, para evaporar el agua. Concluimos que el vapor de agua contiene más entropía que el agua líquida.

Podemos seguir calentando el vapor de agua haciéndolo pasar por un tubo que se caliente desde el exterior, figura 6. 51.

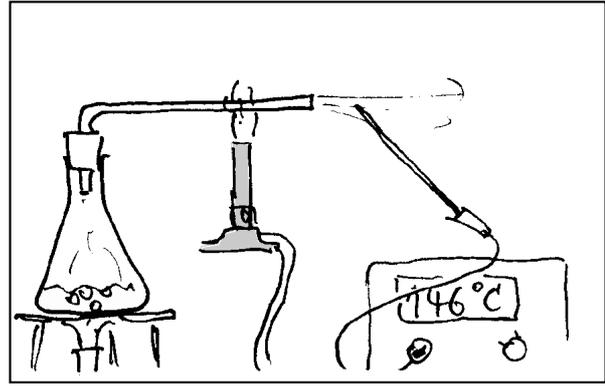


Fig. 6.51. Seguimos calentando el vapor de agua que está inicialmente a 100 °C.

La figura 6.52 muestra el gráfico correspondiente a la temperatura de 1 kg de agua en función de su contenido de entropía, utilizando una escala de temperatura más amplia que en la figura 6.49 (e). El gráfico nos indica que 1 kg de vapor de agua contiene unos 6000 Ct más de entropía que 1 kg de agua líquida.

1 kg de agua gaseosa contiene 6000 Ct más de entropía que 1 kg de agua líquida.

El diagrama muestra también, que un fenómeno similar se produce respecto a la transición sólido → líquido. El agua líquida contiene 1200 Ct más entropía, aproximadamente, que un kg de agua sólido, es decir de hielo. Para transformar 1 kg de hielo de 0 °C en 1 kg de agua líquida de 0 °C (para fundir 1 kg de hielo) debemos entregar una cantidad de entropía de 1200 Ct. De la misma manera tenemos: Para transformar 1 kg de agua líquida en 1 kg de hielo, debemos extraer 1200 Ct.

1 kg de agua líquida contiene 1200 Ct más de entropía que 1 kg de hielo.

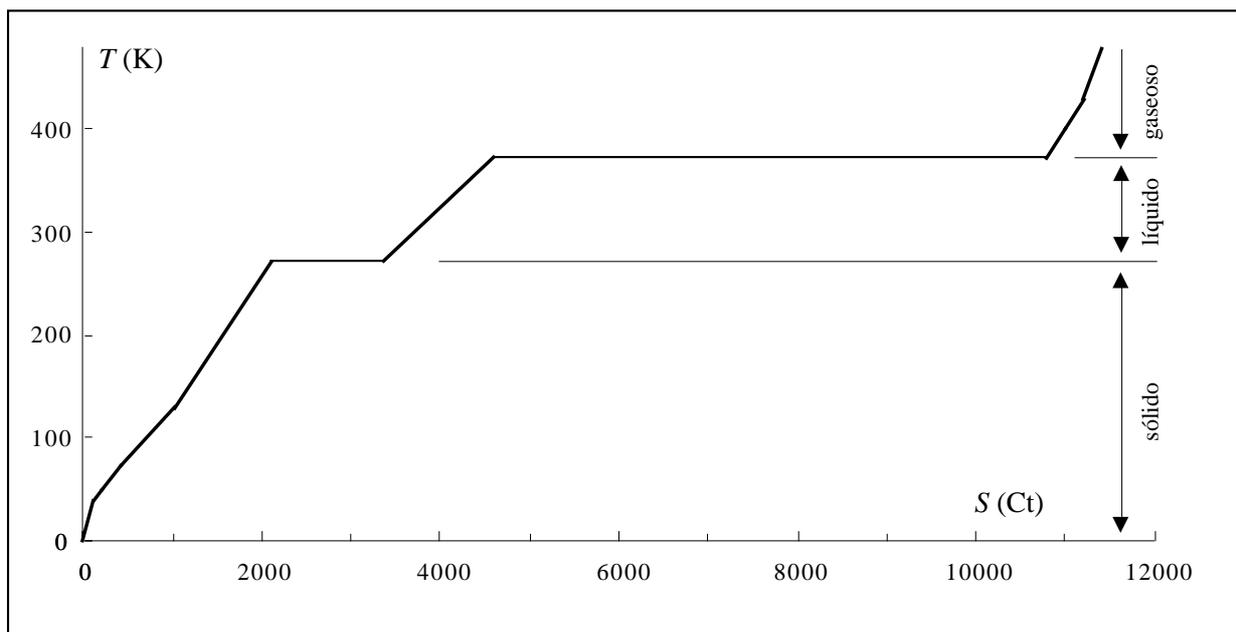


Fig. 6.52. Temperatura como función del contenido de entropía de 1 kg de agua.

En nuestra terminología decimos que una sustancia se presenta en diferentes estados físicos o *fases*. De esta manera el agua aparece en una fase sólida, líquida y gaseosa. La fase gaseosa también se llama *vapor*. Vapor de agua significa, entonces, agua en estado gaseoso. Para designar los cambios de estado físico o cambios de fase, utilizamos los siguientes conceptos:

sólido → líquido: fundir, fusión;
 líquido → sólido: solidificar, solidificación;
 líquido → gaseoso: vaporizar, vaporización, ebullición;
 gaseoso → líquido: condensar, condensación.

No solamente el agua, sino también muchas otras sustancias, presentan diferentes estados físicos o fases. Tú sabes que podemos fundir metales e incluso los podemos vaporizar. Todas las sustancias que en estado natural son gaseosas pueden ser transformadas a la fase líquida y sólida. La tabla 6.2 indica las *temperaturas de fusión y de ebullición* de algunas sustancias.

No existen únicamente las tres fases “sólido”, “líquido” y “gaseoso”, hay muchas otras fases posibles. Generalmente las sustancias tienen varias fases sólidas que se diferencian en muchas propiedades. Algunas sustancias también presentan varias fases líquidas con propiedades diferentes.

Ejercicios

1. Considerando la figura 6.52 indica la cantidad de entropía que contiene 1 kg de vapor de agua a 100 °C y 1 kg de agua líquida a 100 °C. ¿En qué relación matemática están estos valores?
2. ¿Cuánta entropía necesitamos para transformar 10 l de agua líquida a 90 °C en vapor de agua a 100 °C ?
3. Para fundir un pedazo de hielo, necesitamos 6000 Ct. ¿Qué masa tiene el pedazo de hielo ?
4. Un cuarto de litro de agua mineral (= agua) es enfriada mediante cubitos de hielo desde 20 °C a 0 °C. ¿Cuánto hielo se funde en este proceso?
5. Utilizando el chorro de vapor de una máquina “Express” calentamos un vaso de leche (0,2 l) de 15 °C a 60 °C. ¿Cuántos gramos de vapor necesitamos? (La leche consta principalmente de agua.)

Tabla 6.1. Algunas temperaturas de fusión y de ebullición

sustancia	temperatura de fusión (°C)	temperatura de ebullición (°C)
aluminio	660	2450
cobre	1083	2590
hierro	1535	2880
agua	0	100
etanol	- 114,5	78,3
oxígeno	- 218,8	- 183
nitrógeno	- 210	- 195,8
hidrógeno	- 259,2	- 252,2

6.18 Ebullición y evaporación

Vimos que el agua hierve a 100 °C. Sin embargo, puede pasar al estado gaseoso a temperaturas inferiores y en forma más lenta. Llamamos “evaporación” a este proceso. Revisemos los diferentes conceptos: El paso de la fase líquida a la fase gaseosa se llama, en forma general, vaporización. La vaporización rápida y que se realiza en la temperatura de ebullición se llama “ebullición”. Si ocurre lentamente y por debajo de la temperatura de ebullición, decimos que el agua se evapora.

¿Por qué es lenta la evaporación y rápida la ebullición? ¿En qué se diferencian los dos procesos? Observemos una superficie de agua a diferentes temperaturas, de acuerdo a la figura 6.53.

A una temperatura de 20 °C, el aire sobre la superficie de agua contiene poco vapor de agua. Para que pueda ocurrir el proceso de vaporización, este vapor de agua tiene que desplazarse hacia arriba, donde el aire contenga menos vapor. Un proceso de este tipo, en que un gas (en este caso vapor de agua) tiene que desplazarse a través de otro gas (el aire), se llama *difusión*. El segundo gas opone una gran resistencia al movimiento del primero, lo que, en nuestro caso, significa que el vapor de agua no puede alejarse fácilmente de la superficie de agua.

A una temperatura más alta, hay más vapor de agua sobre la superficie del agua. Existe un mayor impulso para que se realice el proceso de difusión y el vapor de agua pueda alejarse más fácilmente y más rápidamente. Por lo tanto, el agua líquida cambia de fase con mayor facilidad y el proceso de evaporización se hace más rápido.

Finalmente, a los 100 °C, sólo existe vapor de agua sobre la superficie del agua. Para poder alejarse, este vapor ya no tiene que desplazarse a través del aire. No tiene que realizar difusión, sino que puede fluir libremente, tal como lo hace el agua en una cañería o como el aire cuando sopla el viento. El vapor de agua se alejará tan rápidamente como el agua líquida pueda vaporizarse y esta rapidez de la vaporización del agua depende, a su vez, de la entrega de entropía por parte del sistema de calefacción.

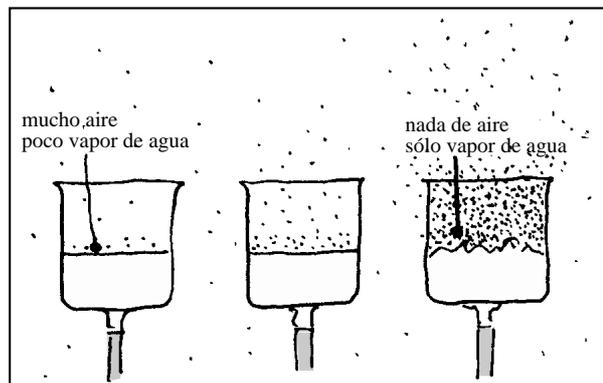


Fig. 6.53. Cuando el agua está hirviendo, el vapor de agua desplaza el aire en la superficie del agua.

Ahora podemos comprender, también otro fenómeno interesante: Con una presión atmosférica inferior a 1 bar, es decir, inferior a la normal, el agua hierve a temperaturas menores que $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con la menor presión atmosférica, el vapor de agua, proveniente de la superficie de agua líquida, puede desplazar el aire con mayor rapidez, es decir, a una menor temperatura.

Este fenómeno se observa, por ejemplo, en la cordillera: en los cerros altos, donde hay menos presión de aire, el agua hierve a temperaturas inferiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. A una altura de 5.400 m, la presión atmosférica es de unos 0,5 bar y la temperatura de ebullición del agua será de sólo $83\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.19 Cambios del estado físico en la naturaleza y en la técnica

Al pasar de un estado físico o fase a otro, la sustancia absorbe o desprende entropía (según el sentido en que se realice el proceso), pero la temperatura se mantiene constante. Esta situación explica una serie de fenómenos naturales y también se aprovecha frecuentemente en la técnica.

El frío de evaporación

Cuando tú sales de la piscina y el aire está en movimiento, sientes frío. El agua de tu piel se evapora y, para realizar este proceso, necesita entropía que extrae de tu cuerpo. Este proceso de evaporación será más rápido cuando el aire en movimiento se lleve el agua evaporada.

El vapor caliente es más peligroso que el agua caliente

No será tan grave cuando tu dedo entre en contacto con el agua a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, como cuando se trate de vapor de agua a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. En ambos casos, se traslada entropía a tu dedo, lo que puede provocar una quemadura. Pero el peligro es mucho mayor en el caso del vapor, porque éste se condensa en tu dedo, entregándole a través de este proceso, una cantidad considerable de entropía adicional.

Mezclas frigoríficas

El agua salada tiene una temperatura de fusión más bajo que el agua pura. Echemos a un vaso hielo machacado o nieve. Si medimos la temperatura, encontraremos, tal como esperábamos, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ahora agreguemos una buena cantidad de sal de mesa y revolvámosla bien. La temperatura bajará hasta unos $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al agregar sal, la temperatura de fusión de la mezcla baja. Una parte del hielo se funde y, para poder realizar este proceso, necesita entropía. Pero como no agregamos entropía desde afuera, la mezcla se enfriará. Más hielo se funde y la temperatura seguirá bajando hasta alcanzar el valor del punto de fusión correspondiente. En este momento, el proceso se detiene.

Acumuladores de entropía

Podemos acumular entropía calentando algún objeto. Al dejar salir nuevamente la entropía, el objeto volverá a enfriarse. Este es el método usado en las llamadas estufas acumuladoras, figura 6.54. Este artefacto contiene una gran cantidad de bloques de cerámica. Durante la noche y con energía barata, los bloques son cargados con entropía, calentándose hasta más de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante el día se vuelve a extraer la entropía acumulada soplando aire a través de los bloques.

También sería interesante poder acumular durante el verano la gran cantidad de entropía disponible para usarla en el invierno. Las estufas descritas anteriormente no sirven para este propósito, porque la cantidad de entropía acumulada en ellas es demasiado reducida.

Un método más promisorio aprovecharía una transformación de fase: Habría que buscar alguna sustancia que pase de sólido a líquido a una temperatura conveniente, digamos unos $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Un paso de líquido a gas no sirve, porque los gases ocupan demasiado volumen). Durante el verano, fundiríamos una gran cantidad de esta sustancia, usando la entropía (y energía) solar y durante el invierno podríamos aprovechar esta entropía para calefaccionar la casa.

Si en el futuro los precios de la energía suben mucho, este sistema de aprovechamiento de la energía solar podría volverse interesante.

Enfriar bebidas con hielo

Para que una bebida se enfríe, la podemos colocar al refrigerador; la bomba de calor del refrigerador extraerá su entropía. Pero cuando queremos enfriar la bebida en la misma mesa, le echamos algunos cubitos de hielo. ¿Y por qué no le echamos simplemente agua fría? El resultado no sería muy convincente. El hielo se funde y la entropía necesaria la extrae de la bebida. El proceso de fusión duraría hasta que la bebida alcance los 0 ° , siempre que haya suficiente hielo.

Nitrógeno líquido

Si queremos alcanzar temperaturas muy bajas y no disponemos de una máquina refrigeradora corre-

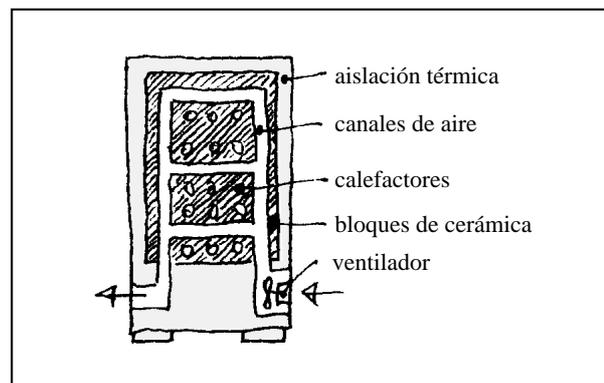


Fig. 6.54. Estufa acumuladora

spondiente, podemos utilizar el nitrógeno líquido, el que puede conseguirse a precios relativamente convenientes. La temperatura de ebullición del nitrógeno es de 77 K (-196 °C). ¿Cómo puede existir el nitrógeno líquido, si la temperatura ambiental es tanto más alta? Hay que guardarlo en un buen recipiente aislante. La poca entropía que logra filtrarse a través del sistema de aislación mantiene al nitrógeno en un lento proceso de ebullición continuo, pero el nitrógeno líquido mismo se mantiene en 77 K, tal como el agua en ebullición se mantiene a 100 °C. De esta manera, se puede guardar nitrógeno líquido durante varios días.

Transporte de entropía mediante cambios de estado físico

Ya vimos anteriormente que el transporte de entropía mediante convección es mucho más eficiente que la conducción del calor. Sin embargo, existe un sistema de transporte aún mejor:

La figura 5.55 muestra el esquema correspondiente. La sustancia contenida en la cañería se evapora en el lado izquierdo, mediante el uso de una fuente de entropía. En este proceso absorbe gran cantidad de entropía. Ahora fluye a través de la cañería superior hacia el lado derecho. En el serpentín, la sustancia se condensa entregando de nuevo la entropía absorbida anteriormente.

Antes se usaba este sistema en ciertos tipos de calefacción central. Pero tenían varios inconvenientes: No se podían regular fácilmente y la condensación del vapor en los radiadores producía ruidos desagradables.

Hoy se utiliza el sistema descrito en las bombas de calor, por ejemplo en el refrigerador: En el serpentín, al interior del refrigerador, el líquido refrigerante se evapora y absorbe entropía. En el serpentín exterior se condensa nuevamente y entrega la entropía al ambiente. (Para que pueda condensarse en el lugar más caliente y evaporarse en el lugar más frío, la compresora mantiene una presión mayor en el lugar más caliente.)

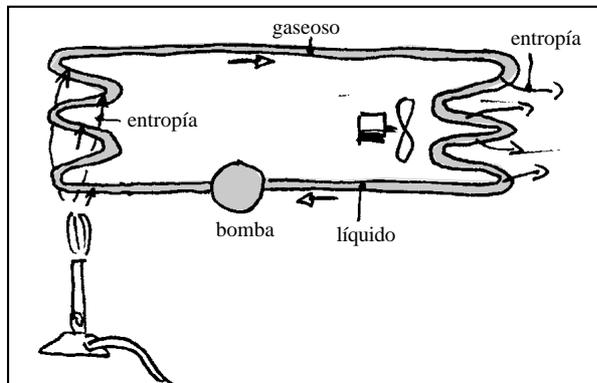


Fig. 6.55. En el lado izquierdo, la sustancia que se evapora absorbe gran cantidad de entropía. En el lado derecho esta misma entropía se vuelve a entregar al ambiente cuando la sustancia se condensa.

También la naturaleza aprovecha este sistema de transporte de entropía. En la atmósfera ocurren, constantemente, procesos de evaporación y de condensación. Cuando el agua se evapora, el lugar se enfría. El vapor es trasladado con el aire hacia otros lugares, donde se condensa, calentando el ambiente.

6.20 La densidad de las sustancias

“¿Qué pesa más 1 kg de hierro o 1 kg de madera?” Todos conocemos esta pregunta que sirve para “hacer lesos” a alguien. Evidentemente la respuesta correcta es que los dos pesan lo mismo. Pero el que no pone atención y no escucha el “kg”, probablemente dirá que el hierro pesa más.

Nos damos cuenta que las palabras “pesado” y “liviano” se pueden usar con dos significados ligeramente distintos. En primer término se refieren a un peso o una masa: 1,5 kg de azúcar pesan más que 0,8 kg de harina. Por otro lado, expresan una característica de las sustancias: Se dice que el hierro pesa más que la madera, porque un pedazo de hierro tiene mayor masa que uno de madera de igual volumen. Este segundo significado de “más pesado” y “más liviano” se expresa cuantitativamente mediante la *densidad* del cuerpo.

La densidad ρ de un cuerpo se define como el cociente entre la masa m y el volumen V o, más breve, como la masa de cada unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La medida SI (sistema internacional) de la densidad es kg/m³. La tabla 6.3 muestra la densidad de algunas sustancias.

Tabla 6.3
Densidad de algunas sustancias ($\rho = 1 \text{ bar}$, $\vartheta = 20^\circ\text{C}$)

sustancia	ρ (kg/m)
Madera de haya	600 – 900
Granito	2600
Aluminio	2700
Hierro	7800
Cobre	8960
Oro	19300
Bencina	720
Etanol (alcohol corriente)	790
Agua	998
Tricloroetileno	1460
Mercurio	13550
Hidrógeno	0,090
Nitrógeno	1,25
Aire	1,29
Oxígeno	1,43
Gas carbónico	1,98

Tenemos que fijarnos en un punto importante: Las sustancias gaseosas pueden ser fácilmente comprimidas, por lo que puede variar su densidad si cambiamos la presión o la temperatura. Al indicar el valor de una densidad tenemos que referirnos también a la presión y la temperatura correspondiente. En cuerpos sólidos y líquidos estas variaciones son muy pequeñas.

Los valores de tabla corresponden a *condiciones normales*, es decir $p = 1 \text{ bar}$ y $\vartheta = 20^\circ \text{C}$.

Llama la atención que los valores correspondientes a los gases son mucho más pequeños que los de los líquidos y sólidos. Podemos deducir, como regla general, lo siguiente:

En condiciones normales, la densidad de los líquidos y sólidos es aproximadamente 1000 veces superior a la de los gases.

Para determinar la densidad de un cuerpo, medimos la masa m y el volumen V de una cantidad cualquiera de esta sustancia y dividimos m por V .

A veces estas mediciones de m y V son muy fáciles de hacer, pero otras veces no tanto. Para determinar, por ejemplo, la densidad de la bencina, podemos medir el peso de 1 litro $= 0,001 \text{ m}^3$ de este líquido. El resultado es $m = 0,72 \text{ kg}$. Entonces la densidad será

$$\rho_{\text{bencina}} = \frac{0,72 \text{ kg}}{0,001 \text{ m}^3} = 720 \text{ kg/m}^3$$

En un cuerpo sólido de forma irregular, la determinación del volumen es más difícil. La figura 6.56 muestra el procedimiento correspondiente.

El cuerpo es sumergido en agua y se mide el volumen del agua desalojada.

Para determinar la densidad de un gas, la medición de la masa es el mayor problema. Si queremos conocer, por ejemplo, la densidad del aire, tenemos que pesar un recipiente de 1 litro de volumen que cierre herméticamente. Luego, con una bomba de vacío, extraemos el aire y volvemos a pesar el recipiente. La diferencia entre estos pesos corresponde a la masa del aire originalmente contenido en el recipiente.

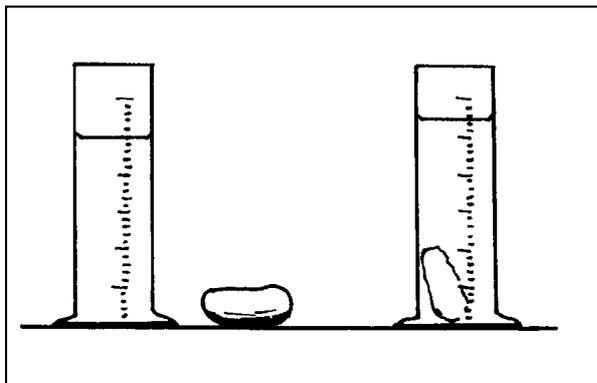


Fig. 6.56. Para medir el volumen de un cuerpo sólido se mide el volumen del agua desplazado por él.

Ejercicios

- 1,6 litros de un líquido pesa 1,3 kg. ¿Cuál es su densidad?
- Un adoquín de granito pesa 2,2 kg. ¿Qué volumen tiene?
- El estanque de bencina de un automóvil tiene una capacidad de 40 litros. ¿Cuánto pesa la bencina del estanque lleno?
- Una lámina de cobre con un largo de 120 cm y un ancho de 80 cm pesa 8,2 kg. ¿Cuál es su grosor?
- ¿Qué masa tiene el aire contenido en tu sala de clases?

6.21 Cuando un cuerpo flota y cuando se hunde

Un pedazo de madera, un poco de bencina o una gota de aceite flotan en el agua. Un pedazo de hierro, de cobre o de aluminio se hunde, se van al fondo. Y una gota de agua en el agua, ¿flota o se hunde? Una pregunta sin sentido, pensarás tú. ¡No se puede distinguir una gota de agua del agua restante! Sin embargo, no es tan difícil hacer distinguible la gota de agua: Simplemente se tiñe. El resultado nos indica que esta gota de agua ni flota ni se hunde: queda flotando “entre dos aguas”.

La flotación de un cuerpo depende de su peso. ¿Pero cómo debemos interpretar “pesado” y “liviano” en este caso? Seguramente, no nos referimos a la masa del cuerpo, porque un pedazo de madera flota en agua, cualquiera sea su masa. Lo importante debe ser la densidad. Un cuerpo flota en un líquido cuando su densidad es menor. Si su densidad es mayor, se hunde y, cuando las densidades son iguales, el cuerpo queda flotando entre dos aguas.

(Usamos el concepto de cuerpo en un sentido amplio, también puede tratarse de un líquido.)

Comprobemos nuestra afirmación con agua y bencina: Una gota de agua que se coloca en un recipiente con bencina se hunde. Al revés, una gota de bencina colocada en un recipiente con agua, se expande en la superficie. Obviamente, en los dos casos se trata del mismo fenómeno. Lo vemos muy claramente en el siguiente experimento: Echamos a un vaso precipitado varios líquidos de diferente densidad, por ejemplo, tricloroetileno, agua y bencina. Los tres líquidos se estratifican, de manera que el de mayor densidad queda en la parte de más abajo. Por encima se ubica el líquido con la densidad inmediatamente inferior, y así sucesivamente, figura 6.57.

Además podemos colocar en el mismo vaso un par de cuerpos sólidos: un cuerpo metálico se hunde totalmente; un cuerpo de goma dura ($\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$) flota en el tricloroetileno, pero no en el agua; un cuerpo de plástico más liviano ($\rho = 900 \text{ kg/m}^3$) flota en el agua, pero no en la bencina; un cuerpo de madera, finalmente, flota bien arriba en la bencina. De esta manera, los 7 cuerpos diferentes se ordenan de acuerdo a su densidad.

Por tener densidades muy inferiores, los gases “flotan” en todos los líquidos. Una burbuja de aire en

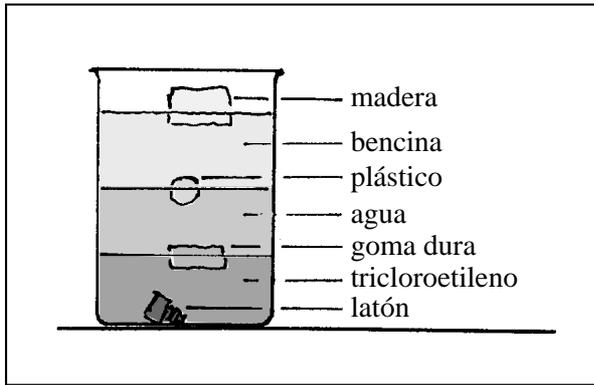


Fig. 6.57 Los 7 cuerpos (sólidos y líquidos) se ordenan de acuerdo a su densidad.

agua o una burbuja de gas carbónico en una bebida gaseosa suben hacia la superficie.

Hasta ahora estudiamos la flotación de los cuerpos en diferentes *líquidos*, pero podemos abordar el mismo problema con respecto a los *gases*. Por supuesto, todos los líquidos y todos los sólidos se hunden en los gases: Gotitas de agua o partículas sólidas caen en el aire, pero un gas puede “flotar” en otro gas. Se aprovecha este fenómeno en los globos aerostáticos: al llenar un globo con un gas de menor densidad que el aire, hidrógeno, por ejemplo, el globo sube (siempre que la envoltura no sea demasiado pesada, ya que tiene que ser levantada también por el hidrógeno). Los dirigibles usados a principios de este siglo funcionaban de acuerdo al mismo principio. En resumen:

Un cuerpo de menor densidad que el ambiente sube, un cuerpo de mayor densidad que el ambiente se hunde.

Ejercicios

1. ¿Existe algún líquido en el cual flote el hierro? Explica.
2. Se llena un globo con gas carbónico. ¿Subirá o bajará? Explica.

6.22 La relación entre la presión y la profundidad en líquidos y gases

Al sumergirnos en la piscina, sentimos una presión en los oídos. Lo mismo sucede cuando subimos o bajamos muy rápidamente por el ascensor de un edificio alto. En los dos casos, nos enfrentamos a una variación de la presión y nuestros oídos constituyen el órgano de sentido más sensible para este tipo de fenómenos.

Llenemos con agua un recipiente alto con tres perforaciones a diferentes alturas (figura 6.58). El agua sale a través de los tres orificios. La presión que la impulsa se llama presión gravitacional, porque se debe al peso del agua. En el orificio de más abajo, el agua saliente tiene el mayor alcance, pues la presión gravitacional en este lugar es mayor. El chorro de

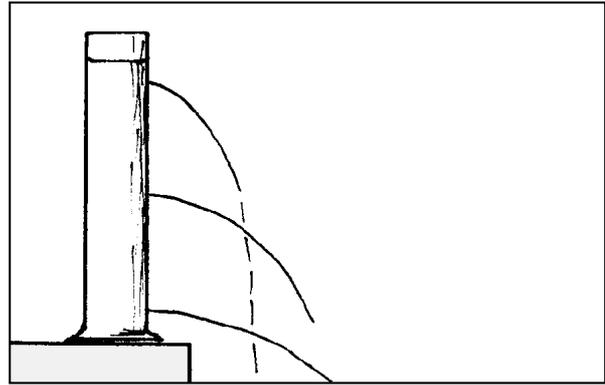


Fig. 6.58 La presión del agua aumenta con la profundidad.

más arriba tiene menor alcance, porque en este lugar, la presión es menor. La presión gravitacional del agua aumenta, por lo tanto, con la profundidad.

Al medir este aumento de presión, verificamos que, por cada 10 m de diferencia de profundidad del agua, la presión gravitacional aumenta en 1 bar. En el lugar de mayor profundidad en el mar, a unos 10.000 m, la presión será de 1000 bar. Es comprensible, entonces, que las cápsulas de buceo que se usan para alcanzar tales profundidades tengan las paredes muy gruesas.

Las plantas hidroeléctricas se construyen, frecuentemente, de acuerdo a la figura 6.59.

A grandes alturas, en la cordillera, existe un embalse que recoge el agua de varios ríos o riachuelos. Desde este embalse el agua es conducida a través de gruesas tuberías hacia la planta propiamente tal, donde las turbinas se mueven con los generadores. Si el embalse se encuentra 500 m más arriba que la planta, la presión en la entrada de las turbinas será de 50 bar.

Este mismo fenómeno de la variación de la presión con la altura se puede observar en la atmósfera u “océano de aire” que envuelve nuestra tierra. En el “fondo del mar”, es decir, en la superficie terrestre, la presión gravitacional es de 1 bar. Esta presión disminuye con la altura en, aproximadamente, 1 mbar por cada 10 m cerca de la superficie terrestre. Más arriba disminuye más la presión y también dismi-

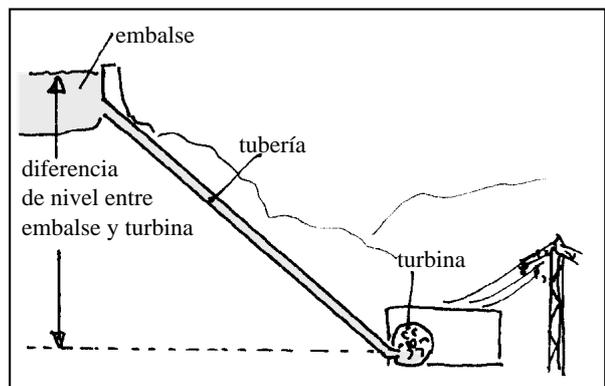


Fig. 6.59 La presión en la entrada de la turbina depende de la diferencia de altura entre el embalse y la turbina.

“Comprimir” significa disminuir el volumen de la sustancia, dejando su masa constante. De acuerdo a nuestra fórmula $\rho = m/V$, podemos deducir que, al ser comprimida, la densidad de la sustancia aumenta. Entonces, la densidad de una sustancia compresible puede ser aumentada incrementando la presión aplicada. En el caso de una sustancia no compresible, el aumento de la presión no provoca ninguna variación de la densidad. En resumen:

En los gases, un aumento de la presión produce un aumento de la densidad. En las sustancias condensadas esto no ocurre.

Este hecho tiene consecuencias interesantes: la densidad del agua de un lago, por ejemplo, prácticamente no aumenta con la profundidad, a pesar del aumento de la presión. Asimismo a grandes profundidades, el valor de la densidad del agua es siempre de unos 1000 kg/m³. Con el aire encima de la superficie terrestre ocurre algo totalmente distinto: La presión disminuye con la altura y, en consecuencia, también disminuye la densidad. Por esta razón, cuesta tanto respirar a grandes alturas en la cordillera.

La dilatación térmica

Los gases y las sustancias condensadas también reaccionan de diferente manera cuando se les entrega entropía. Al ser calentado un sólido, su volumen prácticamente no varía. Lo mismo vale para los líquidos. Pero con los gases ocurre algo distinto: Si calentamos el aire contenido en un recipiente abierto, figura 6.63 a, éste se expande y “rebalsa”. No podemos apreciarlo, porque el aire es invisible, pero usando el truco representado en la figura 6.63 b sí se puede ver.

Cuando se les entrega entropía, los gases se dilatan; las sustancias condensadas prácticamente no lo hacen.

Ejercicios

1. ¿Por qué se llenan con aire y no con agua los neumáticos de bicicletas y automóviles ?
2. La figura 6.64 muestra un globo de aire caliente. El globo está abierto en la parte inferior y el aire contenido en él se calienta con una llama de gas. ¿Por qué sube este globo?

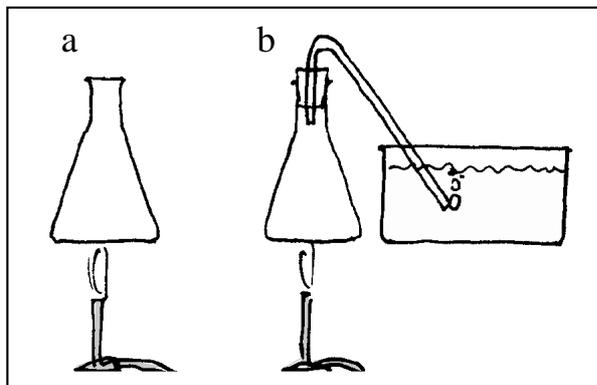


Fig. 6.63. Los gases se dilatan con la entrega de entropía. En el experimento b se hace visible el rebalse del recipiente.

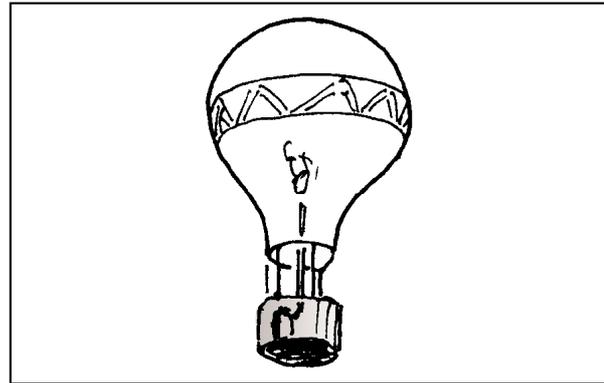


Fig. 6.64. Globo de aire caliente

6.24 Las propiedades térmicas de los gases

En el capítulo anterior comparamos gases y sustancias condensadas; a partir de ahora nos preocuparemos únicamente de los gases. Sus propiedades térmicas son mucho más interesantes que aquéllas de las sustancias condensadas.

Para comenzar, volvemos a entregarle entropía a un gas pero, al encerrarlo en un recipiente de volumen invariable, le impedimos que se expanda, figura 6.65. El manómetro nos indica que durante la entrega de entropía aumenta la presión.

Esta observación, junto con la última que hicimos en el capítulo anterior, la podemos resumir de la siguiente manera:

Al entregarle entropía a un gas, manteniendo constante la presión, su volumen aumentará.

Al entregarle entropía a un gas, manteniendo constante su volumen, la presión aumentará.

Evidentemente, en los dos casos, aumenta también la temperatura del gas.

Podemos describir, simbólicamente, estos procesos, indicando si cada una de las cuatro magnitudes (entropía, temperatura, volumen, presión) aumenta, disminuye o se mantiene constante:

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V \uparrow \quad p = \text{const} \quad (7)$$

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V = \text{const} \quad p \uparrow \quad (8)$$

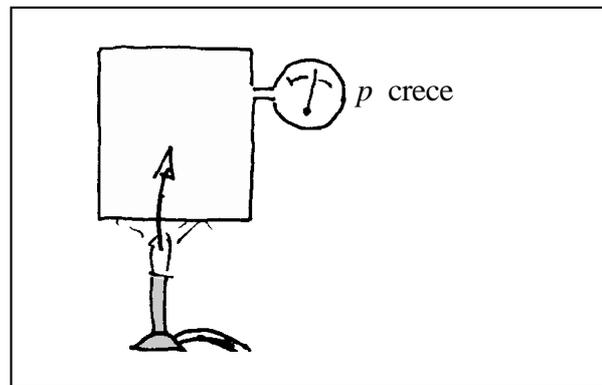


Fig. 6.65 Al entregarle entropía a un gas de volumen constante, su presión aumenta.

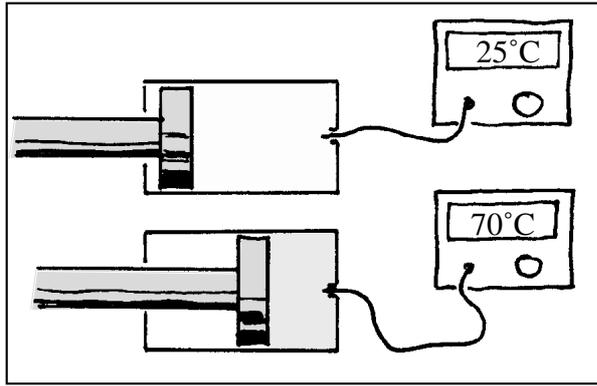


Fig. 6.66 Al ser comprimido un gas, su temperatura aumenta.

Comprimimos una vez más el aire dentro de un recipiente cilíndrico, pero ahora medimos su temperatura, fig. 6.66. Constatamos que la temperatura sube al comprimirse el gas. Si dejamos que el gas se expanda y su presión se normalice, la temperatura vuelve a bajar.

Este comportamiento de un gas es, en el fondo, bastante plausible: Al ser comprimido el gas, la entropía contenida en él también se comprime y se concentra en un menor volumen. Mucha entropía dentro de un volumen reducido significa, por lo tanto, alta temperatura.

Si reducimos el volumen de un gas, su temperatura aumentará.

Simbólicamente:

$$S = \text{const} \quad T \uparrow \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (9)$$

Las expresiones (7), (8) y (9) describen tres procesos posibles a que pueden ser sometidos los gases. En cada caso se puede establecer también la afirmación inversa, la afirmación inversa de (7), por ejemplo, sería:

$$S \downarrow \quad T \downarrow \quad V \downarrow \quad p = \text{const}$$

En cada uno de los procesos de (7) a (9) se mantiene constante una de las magnitudes: en (7) la presión, en (8) el volumen y en (9) la entropía. Ahora nos fal-

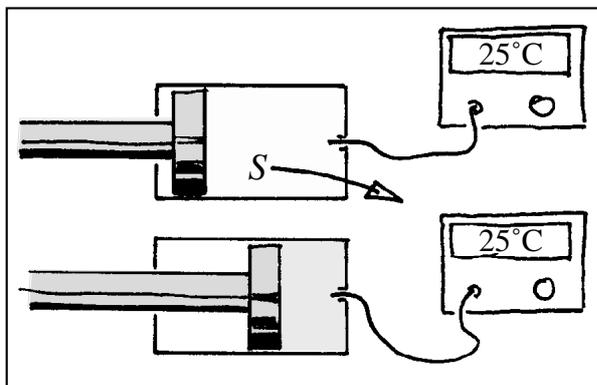


Fig. 6.67 Al introducir lentamente el émbolo dentro del cilindro, el gas desprende entropía.

$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V \uparrow$	$p = \text{const}$	(1a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V \downarrow$	$p = \text{const}$	(1b)
$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V = \text{const}$	$p \uparrow$	(2a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V = \text{const}$	$p \downarrow$	(2b)
$S = \text{const}$	$T \uparrow$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(3a)
$S = \text{const}$	$T \downarrow$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(3b)
$S \downarrow$	$T = \text{const}$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(4a)
$S \uparrow$	$T = \text{const}$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(4b)

Fig. 6.68 Representación simbólica de 4 procesos. En cada uno de ellos, una de las 4 magnitudes S , T , V y p se mantiene constante.

ta otro proceso en el que se mantenga constante la temperatura. Este proceso es fácilmente realizable: Basta que se comprima muy lentamente el gas de la figura 6.66, tal como lo muestra la figura 6.67.

En el fondo, la compresión debería producir un aumento de la temperatura, pero, al realizar una compresión muy lenta, la temperatura del gas se iguala constantemente con la temperatura ambiental. En este proceso, la entropía fluye desde el gas al ambiente y, al final, el gas contiene menos entropía que al comienzo.

Simbólicamente:

$$S \downarrow \quad T = \text{const} \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (10)$$

También esta afirmación es muy interesante, porque coincide con una experiencia anterior: Mientras mayor sea el volumen de una cierta cantidad de materia (a masa y temperatura constante), más entropía contiene. Constatamos este comportamiento al observar el cambio de la fase líquida a la gaseosa: El gas (de gran volumen) contiene más entropía que el líquido (de menor volumen) que está a la misma temperatura.

La figura 6.68 resume los 4 procesos de (7) a (10), así como sus respectivos procesos inversos.

Ejercicios

1. Necesitamos una botella que cierre bien, una fuente con agua caliente y otra con agua fría.

a) Enfriamos el aire de la botella abierta con la ayuda del agua fría. Después cerramos la botella y la hundimos dentro del agua caliente. Ahora soltamos un poco la tapa de la botella, de manera que ya no cierre herméticamente. ¿Qué pasa y por qué?

b) Calentamos el aire de la botella abierta con el agua caliente. Después cerramos la botella y la hundimos dentro del agua fría. Ahora soltamos un poco la tapa de la botella. ¿Qué pasa? ¿Por qué?

2. En dos recipientes tenemos la misma cantidad del mismo gas a la misma temperatura. Les entregamos a los dos la misma cantidad de entropía. En uno de los recipientes mantenemos constante el volumen, en el otro, la presión. ¿Son iguales las variaciones de la temperatura que se producen en los dos recipientes? Si no es así, ¿en cuál de los dos recipientes se verificará la mayor variación de temperatura? ¿Aumenta o disminuye la temperatura? Explica.

3. ¿Cómo se podría conseguir una disminución de la temperatura de un gas a pesar de que se le entregue entropía?

6.25 El funcionamiento de las máquinas térmicas

En el capítulo 6.11 vimos que en una máquina térmica la entropía baja de una alta temperatura a otra inferior y que, a través de este proceso, se puede impulsar algo, tal como se hace con el agua en una turbina de agua, al dejar que baje de una alta presión a otra inferior. Pero, ¿cómo conseguimos este paso de la entropía desde una temperatura alta a otra inferior y qué habrá que hacer para que, mediante este proceso, se pueda poner algo en movimiento?

No cuesta nada hacer pasar la entropía de alta a baja temperatura sin que se quiera impulsar algo. Generalmente, esto ocurre por sí solo: Dejamos que “baje” la entropía desde la alta a la baja temperatura a través de un conductor calórico (ver también capítulo 6.13). Pero en este proceso, la energía que, en el fondo, quisiéramos transbordar a un portador útil, como, por ejemplo, el momentum angular, simplemente se pierde con la entropía generada. La desperdiciamos.

¿Cómo podremos pasar, entonces, la entropía de la alta a la baja temperatura sin generar entropía adicional? Conociendo las propiedades térmicas de los gases, este proceso ya no debería causar grandes problemas.

En la fig. 6.69 podemos observar el procedimiento práctico: Traspasamos la entropía a un gas comprimido y, después, dejamos que este gas se expanda. Según línea (9b) de la figura 6.68, en este proceso la temperatura disminuye y, al mismo tiempo, el émbolo se mueve hacia afuera. La energía descargada por la entropía es conducida a través de un eje a un cigüeñal que, a su vez, pone en rotación a un árbol.

Una máquina térmica funciona a través de la dilatación de un gas. En este proceso disminuyen la presión y la temperatura del gas y el gas entrega energía.

Esta es la idea básica, según la cual funcionan las máquinas térmicas. En la práctica existe un gran número de realizaciones técnicas de esta idea: la máquina de vapor, la turbina de vapor, el motor de combustión interna, el Diesel, el de propulsión a chorro y otros más. Estudiaremos dos de estas máquinas en forma más detallada: en primer término la máquina de vapor por su importante rol

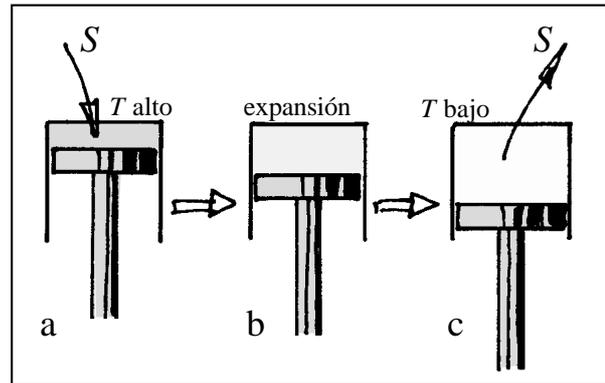


Fig. 6.69 Funcionamiento de una máquina térmica: (a) La entropía es entregada a un gas comprimido. (b) El gas se dilata; en este proceso la temperatura baja y se desprende energía. (c) A una temperatura más baja, la entropía vuelve a desprenderse.

historico, y, en segundo lugar, el motor de combustión interna, porque se utiliza en la mayoría de los automóviles.

La máquina de vapor

El mayor problema que tiene que enfrentarse en la construcción de una máquina que funcione de acuerdo al principio enunciado en la figura 6.69, consiste en poder entregar y sacar rápidamente la entropía. En ningún caso se podría hacer llegar la entropía al émbolo a través de una simple conducción calórica, tal como lo sugiere la figura 6.69. Este proceso sería demasiado lento. Pero ya conocemos un método que nos permite trasladar rápidamente la entropía de un lugar a otro: la

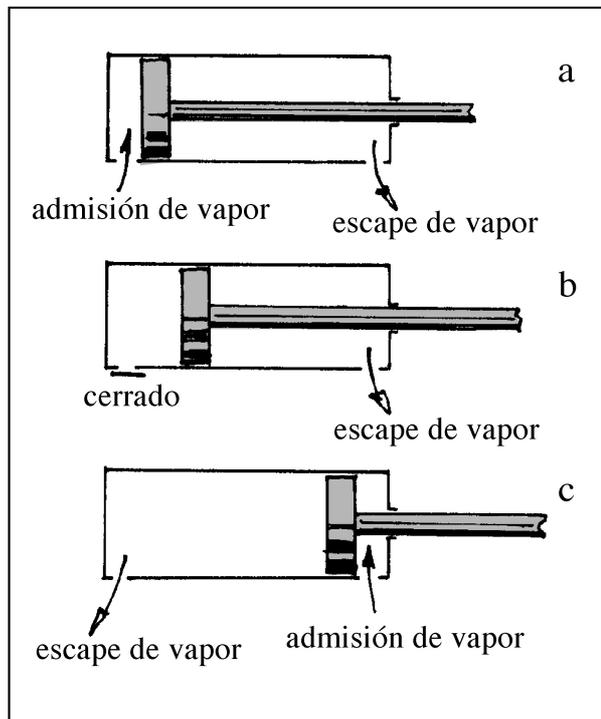


Fig. 6.70 Máquina de vapor en tres fases de su funcionamiento

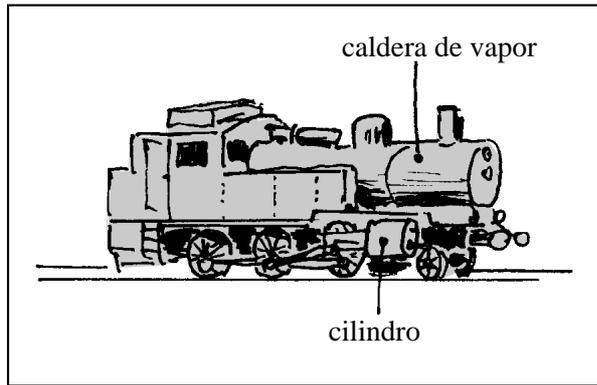


Fig. 6.71 Locomotora de vapor

convección. Y así se hace en la máquina a vapor. Se calienta el gas en el exterior, en una caldera, y se conduce después, junto con su entropía, al cilindro de la máquina. En este lugar, el gas se dilata y entrega su energía al émbolo. Después se le hace abandonar nuevamente el cilindro, siempre junto con su entropía.

La fig. 6.70 muestra el funcionamiento detallado de la máquina de vapor. Como gas de trabajo se utiliza vapor de agua. Este vapor se genera en una caldera y un juego de válvulas regula la entrada y salida del vapor al cilindro. Al principio, el émbolo se ubica en la parte izquierda (esquema a). Desde la izquierda entra vapor fresco a la parte izquierda del cilindro. El émbolo se mueve un poco hacia la derecha y la válvula de entrada se cierra (esquema b). El vapor, al dilatarse, presiona el émbolo hacia la derecha, y tanto su presión como su temperatura disminuyen. El émbolo alcanza el punto de retorno al lado derecho (esquema c) y empieza a devolverse. Entretanto, se ha abierto la válvula de salida y el vapor dilatado y enfriado es expulsado hacia el exterior.

Los mismos procesos ocurren en la parte derecha del cilindro. El vapor que entra en el lado derecho hace moverse el émbolo hacia la izquierda.

En una locomotora de vapor, figura 6.71, se pueden apreciar las diferentes partes mencionadas.

El motor de combustión interna (motor Otto)

En esta máquina, el método de traspasar rápidamente la entropía al cilindro consiste en producirla dentro del cilindro mismo a través de una combustión de una mezcla de bencina gaseosa y aire. Esta combustión se realiza en forma de explosión, es decir, muy rápidamente. En primer término, habrá que llenar, entonces, el cilindro con la mezcla combustible de bencina y aire y esto debería ocurrir en el momento en que el émbolo esté en su punto más alto dentro del cilindro. Por esta razón, se hace trabajar el motor durante su primera vuelta como bomba.

Cada media vuelta del cigüeñal se designa como "tiempo". La carga del motor con la mezcla combustible mediante el bombeo tiene, entonces, una duración de dos tiempos. Durante el "tiempo de aspiración" se aspira la mezcla al cilindro, figura 6.72 a. Durante el "tiempo de compresión", esta mezcla es comprimida, figura 6.72 b. El émbolo se encuentra ahora en el punto muerto superior y el cilindro está listo para trabajar, figura 6.72 c. Con la ayuda de una chispa eléctrica, producida por la bujía, la mezcla es encendida y se combustiona en forma prácticamente instantánea. En esta combustión, se produce entropía y la temperatura y la presión aumentan considerablemente. El gas caliente presiona sobre el émbolo y lo mueve hacia abajo. En este proceso, la presión y la temperatura disminuyen nuevamente. Este tiempo es el "tiempo de trabajo", figura 6.72 d. Después, durante el "tiempo de escape", los gases de escape son expulsados junto con su entropía, fig. 6.72 e.

Este tipo de motor de un solo cilindro trabaja, como se ve, solo durante una cuarta parte del tiempo de funcionamiento, es decir, en el "tiempo de trabajo". Durante los tres tiempos restantes, se sigue moviendo gracias al impulso adquirido. Un motor de combustión interna funcionará, por lo tanto, más suavemente cuando disponga de varios cilindros que trabajen en forma alternada.

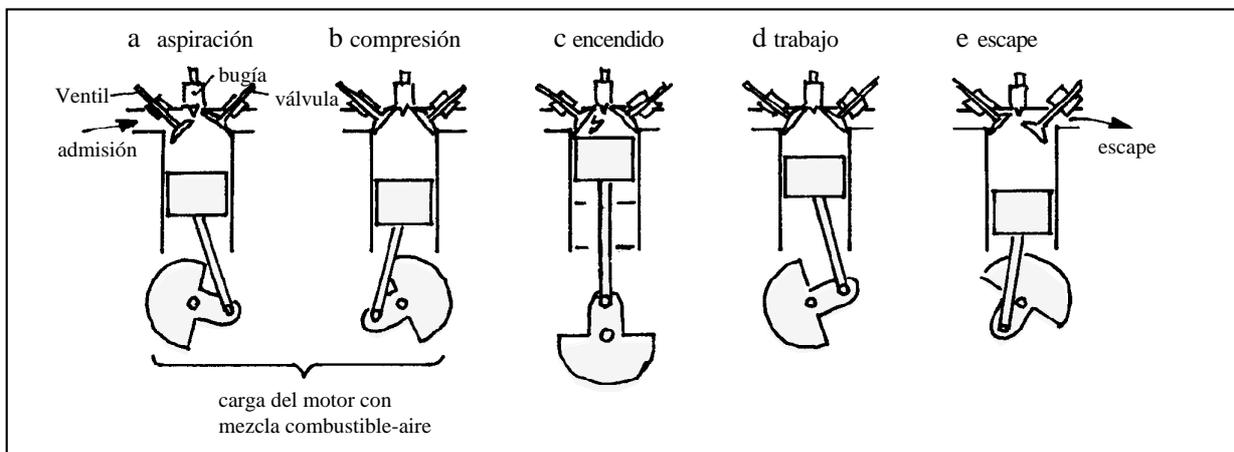


Fig. 6.72 Motor de combustión interna en 5 fases de su ciclo de trabajo

La mayoría de los motores tienen 4 cilindros. Al funcionar un motor de este tipo, siempre tendrá uno de sus cilindros en el “tiempo de trabajo”.

El motor de combustión interna se complementa con una serie de dispositivos adicionales:

- En el carburador se vaporiza la bencina y se mezcla con el aire.
- La bomba de bencina traslada la bencina desde el estanque al carburador.
- La bobina genera la alta tensión eléctrica necesaria para producir la chispa.
- El distribuidor entrega esta alta tensión eléctrica a la bujía correcta.

Ejercicios

1. Imagínate que la sustancia con que trabaja la máquina térmica de la figura 6.69 fuera un líquido en vez de gas. ¿Funcionaría la máquina? Explica.
2. El motor Diesel tiene una estructura muy similar al motor de combustión interna que acabamos de describir. La gran diferencia consiste en que no necesita bujías de ignición, porque la mezcla combustible - aire se inflama sola. ¿Cómo es posible esto?
3. En la máquina de vapor de la figura 6.70 existiría la posibilidad de dejar abierta la entrada del vapor hasta que el émbolo haya llegado al extremo derecho. La máquina sería más fuerte y entregaría mayor cantidad de energía. En las locomotoras a vapor se utilizaba este sistema durante la partida y para subir pendientes. ¿Qué inconvenientes tiene esta manera de funcionamiento?

6.26 ¿Por qué el aire se enfría con la altura?

En la cordillera hace más frío que en las zonas bajas. Mientras más alto lleguemos, más baja será la temperatura. Por cada 100 m de aumento de altura, la temperatura disminuye en 1 °C, aproximadamente. En el avión, el piloto nos comunica el valor impresionantemente bajo de la temperatura exterior: a una altura de 10.000 m es de, aproximadamente, -55 °C.

¿Cómo podemos explicar estas bajas temperaturas? ¿No deberían igualarse las diferencias de temperatura entre las partes altas y bajas, ya que, como sabemos, la entropía fluye desde los lugares de temperatura más alta hacia los de temperatura más baja? Sin embargo, existe un obstáculo importante: la entropía fluye solamente cuando la resistencia al flujo no es demasiado grande, y el aire es, justamente, un muy buen material aislante. Unos milímetros de aire entre los dos vidrios de una ventana doble ya son muy eficientes. Entre las partes inferior y superior de la atmósfera terrestre hay una capa de aire de varios kilómetros de grosor. Por esta razón la igualación de las temperaturas, por medio de conducción calórica, es prácticamente imposible.

Pero, ¿cómo llega a establecerse esta gran diferencia de temperatura? Tenemos que recurrir a nuestros conocimientos sobre las propiedades térmicas de los gases. El aire atmosférico se encuentra en constante movimiento. La explicación correspondiente se estudiará en el próximo capítulo. Por el momento, podemos imaginarnos a alguien que esté revolviendo constantemente el aire de la atmósfera. Consideremos una determinada porción de aire que se esté moviendo hacia abajo. Su volumen se contrae debido al constante aumento de la presión. Pero como su contenido de entropía es constante, la temperatura aumentará según línea (9a) de la figura 6.68. Con otra porción de aire que se esté moviendo hacia arriba ocurrirá lo contrario. Su temperatura disminuirá. Entonces, una determinada porción de aire, con su contenido de entropía respectivo, cambiará su temperatura según se esté moviendo hacia arriba o hacia abajo. A grandes alturas hará más frío, y más abajo hará más calor. A cada altura le corresponde una temperatura determinada.

6.27 La convección térmica

Todos sabemos que el aire caliente sube. Pero, ¿por qué? Para nosotros, expertos en asuntos relacionados con propiedades térmicas de los gases, la explicación se vuelve muy fácil. Consideremos el radiador se calienta y se expande (ver capítulo 6.24). Entonces, su densidad se hace inferior a la del aire circundante más frío. Por lo tanto, el aire caliente sube (ver capítulo 6.21) y lo fundamental queda aclarado.

Pero seguimos ahora observando este aire que va subiendo. Poco a poco va entregando su entropía al aire ambiental más frío y a los objetos de la habitación, enfriándose nuevamente. Su densidad vuelve a aumentar y el aire recién calentado que viene subiendo lo desplaza. Vuelve a bajar, entonces, para reemplazar el aire caliente que asciende. Se forma un circuito, figura 6.73. Este tipo de flujo continuo se llama *convección térmica*.

La convección térmica es responsable de una gran cantidad de transportes de energía en la naturaleza y

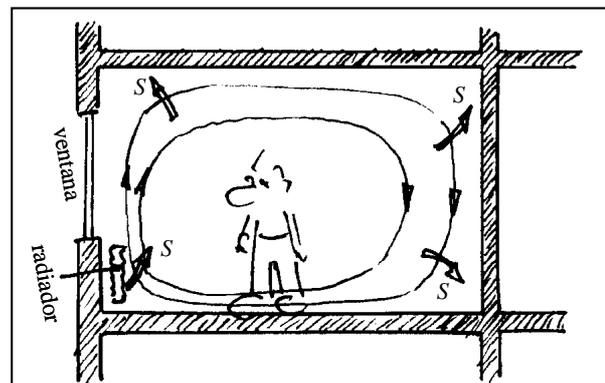


Fig. 6.73 Corriente de convección térmica en una pieza calefaccionada

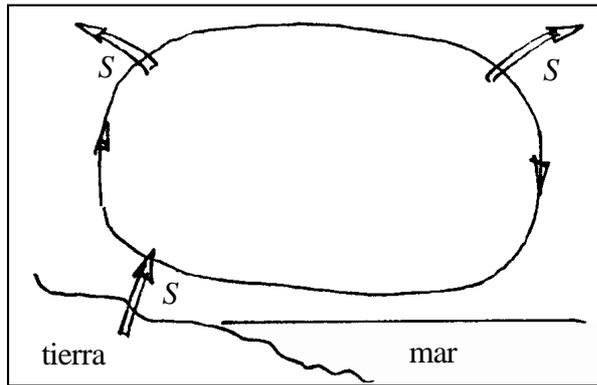


Fig. 6.74 La tierra firme es calentada fuertemente por el sol, no así el mar. Se origina una corriente de convección.

en la técnica. Acabamos de estudiar un ejemplo importante: debido a la convección térmica, la entropía entregada por el radiador se reparte en toda la habitación.

También en la generación de los vientos, la convección térmica juega un papel de gran importancia. Algunos sistemas de vientos se producen de manera muy complicada, pero, en algunos casos, la causa es simplemente la convección térmica.

Un ejemplo es el viento marino, es decir, el viento que durante el día sopla desde el mar hacia la tierra. La tierra es calentada fuertemente por el sol; el mar prácticamente no se calienta. Por lo tanto, el aire encima de la tierra se expande, disminuye su densidad y sube, figura 6.74. Desde el mar, donde no se expande, el aire fluye hacia la tierra. A una altura de algunos cientos de metros, el aire vuelve desde la tierra hacia el mar, donde baja nuevamente. La superficie terrestre calentada por el sol corresponde, entonces, al radiador en el caso estudiado anteriormente.

Este tipo de diferencias de temperatura que llevan a un distinto calentamiento del aire no existe únicamente entre el mar y la tierra y se pueden observar en muchas otras partes de la superficie terrestre. Siempre cuando en algún lugar la tierra se calienta más que los alrededores, se forma una corriente de aire ascendente, cuando se calienta menos, resulta una corriente descendente. Las corrientes ascendentes de aire caliente, las llamadas térmicas, son aprovechadas por los planeadores y las aves para ganar altura.

También los vientos alisios son un ejemplo de corrientes de convección térmica, figura 6.75. En las regiones ecuatoriales, el aire se calienta mucho. Sube y, a grandes alturas, fluye hacia el sur y el norte, es decir, hacia zonas más frías. A unos 30° de latitud sur y norte este aire baja y vuelve a desplazarse en dirección hacia el ecuador. Este reflujo del aire hacia el ecuador constituye los vientos alisios.

Observemos ahora la convección térmica desde un punto de vista diferente: a bajas alturas, el aire absorbe entropía y empieza a subir. La temperatura del aire disminuye con la altura, porque su densidad es cada vez menor. El aire ascendente entrega poco a poco, su entropía, porque su temperatura es mayor a

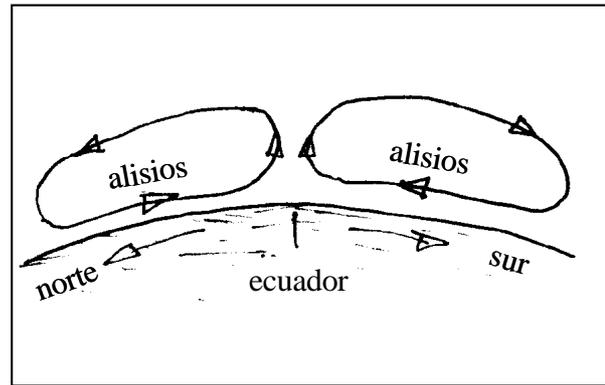


Fig. 6.75 El origen de los vientos alisios

la que lo circunda. Pero esta entropía se entrega a una temperatura más baja de la que existía al ser absorbida.

En consecuencia, con el aire pasa lo mismo como con el gas de trabajo en una máquina térmica: absorción de entropía en alta temperatura, entrega de entropía en una temperatura más baja. Podemos interpretar, por lo tanto, cualquier flujo de convección térmica como una máquina térmica. En este caso, no se mueve algún eje o árbol, pero se hace circular el aire.

En muchas oportunidades es aprovechada la energía del aire en movimiento o energía eólica: en molinos de viento, en turbinas de viento y en barcos de vela.

Ejercicios

1. Los líquidos se dilatan muy poco cuando absorben entropía, pero esta dilatación es suficiente para generar flujos de convección térmica. Nombra algún ejemplo. ¿En qué parte se le entrega entropía al líquido y en qué parte se la extrae nuevamente?
2. ¿Por qué sube la llama de una vela?

6.28 El transporte de entropía en el vacío

Por lo general, un cuerpo caliente se enfría por sí solo. Su entropía fluye hacia el ambiente, es decir, al aire o a la base en que se encuentra. Nos proponemos, ahora, impedir este enfriamiento. Muy simple: podríamos pensar que basta con colocar el objeto en el vacío, figura 6.76. La entropía ya no podrá escaparse a través del aire. Además, el objeto (llamado G en lo sucesivo) cuelga de unos hilos muy largos y finos, a través de los cuales no puede perderse mucho calor.

Sin embargo, ocurre algo muy curioso: En primer término, la campana de vacío se calienta ostensiblemente y, en segundo término, el objeto G se enfría. Lo podemos comprobar al sacar G nuevamente de la campana de vacío. Con otras palabras, la entropía ha

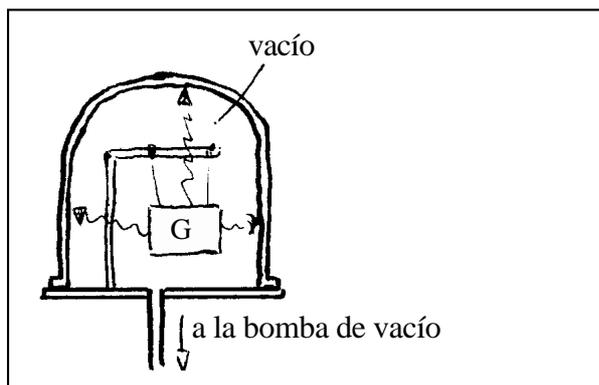


Fig. 6.76 El objeto G se enfría, a pesar de encontrarse en un vacío.

salido del objeto, a pesar de no existir conexión conductora de calor alguna.

Podríamos realizar el mismo experimento, colocando G en el vacío del espacio interplanetario. También, en este caso se enfría.

La entropía debe poder traspasar, entonces, el vacío a lo largo de alguna conexión invisible o mediante algún portador igualmente invisible. Podemos descubrir fácilmente cuál es esta conexión o este portador al calentar G más intensamente, hasta que se vuelva incandescente. En este momento emitirá algo que todos conocemos, la luz. La luz atraviesa el vacío con especial facilidad. Recorre, por ejemplo, los 150 millones de kilómetros entre el sol y la tierra, prácticamente sin sufrir pérdidas. La luz emitida por un objeto radiante lleva también entropía. El objeto radiante pierde entropía en forma permanente.

Sin embargo, nuestro problema original aún no está totalmente resuelto, porque inicialmente el objeto G no estaba incandescente. No emitía luz. ¿O sí? Primero tenemos que saber algo más acerca de la luz.

6.29 Clases de luz

Hagamos pasar un rayo delgado de luz solar o de luz artificial proveniente de una ampolla a través de un prisma y proyectémoslo sobre una pantalla blanca. Lo que se puede observar no es, como a lo mejor pensaste, simplemente una mancha blanca, sino una franja de varios colores, un *espectro luminoso*, figura 6.77.

La luz solar y la luz artificial de las ampollas está compuesta por varias clases de luz que, en nuestros ojos, provocan diferentes sensaciones de color. Si las diferentes clases de luz llegan juntas a nuestros ojos, la sensación correspondiente será "luz blanca".

El prisma produce una refracción distinta para cada clase de luz, es decir, descompone la luz. La luz roja es la que menos se desvía, después la luz naranja, amarilla, verde y azul. La luz violeta, finalmente es la que más se desvía. La luz captada por nuestros ojos constituye, sin embargo, sólo una pequeña par-

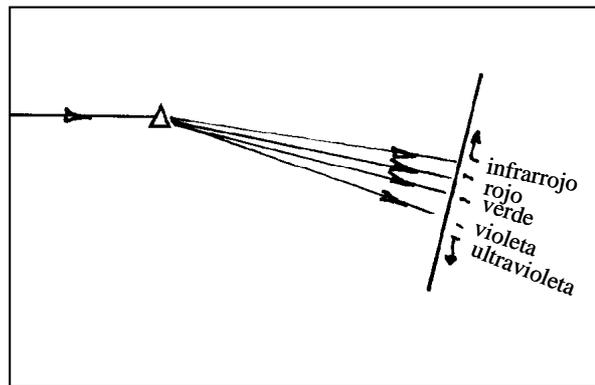


Fig. 6.77 Al pasar por un prisma de vidrio, la luz blanca se descompone formando los colores del arcoiris.

te de todas las diferentes clases de luz que existen en la naturaleza y que también pueden ser producidas mediante métodos técnicos. Al lado de la luz visible, existen muchas clases de luces diferentes, para las cuales no contamos con órganos receptores. A todas estas diferentes clases de radiación, visibles e invisibles, se les llama *ondas electromagnéticas*. También la luz solar y la luz de las ampollas contienen radiaciones invisibles que se desvían al pasar por un prisma. Con instrumentos de medición especiales podemos detectar su presencia. Existe una "luz" que se refracta más que la luz violeta, la *radiación ultravioleta*. Y también existe una "luz" que se refracta menos que la luz roja, la *radiación infrarroja*.

La clase y la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo dependen, fundamentalmente, de su temperatura. Un cuerpo irradiará más luz en cada segundo mientras más caliente esté, es decir, mientras más alta sea su temperatura. La irradiación sólo cesará completamente a la temperatura de 0 K.

Con la variación de la temperatura también cambiará la composición de la luz irradiada. El sol tiene, en su superficie, una temperatura de unos 5.800 K, y la luz que irradia es, fundamentalmente, luz visible. El filamento incandescente de una ampolla tiene una temperatura de unos 3.000 K y la parte correspondiente a la luz infrarroja es mucha mayor que la luz visible. Si la temperatura del cuerpo incandescente es de unos 1.100 K (800 °C aproximadamente), emite, dentro del espectro visible, prácticamente sólo luz roja, y la mayor parte de la radiación emitida es del tipo infrarrojo. Por debajo de los 900 K (600 °C aproximadamente), el cuerpo sólo emite luz infrarroja.

Mientras más caliente esté un cuerpo, mayor será la cantidad de radiación electromagnética que emite.

A la temperatura de la superficie del sol (5.800 K), la mayor parte de la radiación emitida corresponderá a luz visible. Mientras más baja sea la temperatura del cuerpo emisor, menor será la parte de luz visible emitida y mayor la parte correspondiente a luz infrarroja. Por debajo de los 900 K, sólo emitirá luz infrarroja.

6.30 Transporte de energía y de entropía mediante la luz

Volvamos ahora al cuerpo G que se enfría en el vacío. Constatamos que G emite luz, tanto visible como invisible, y que puede atravesar el vacío. La entropía desprendida por G – ya que se está enfriando – tiene que ser llevada a través de la luz.

Sabemos desde hace mucho tiempo, que la entropía es un portador de energía. Siempre cuando fluye entropía también fluye energía. El cuerpo que se está enfriando desprende, junto con la luz, tanto entropía como energía.

La luz (visible e invisible) transporta entropía y energía.

Sobre la base de estas consideraciones podríamos establecer una conclusión equivocada: Si el cuerpo colocado en el vacío irradia entropía mientras su temperatura sea mayor que 0 K, debería enfriarse constantemente hasta alcanzar los 0 K. Pero, obviamente, esto no ocurre. Al contrario: Si colocamos G, con una temperatura inferior a la del ambiente, dentro del vacío, no se enfriará sino que se calentará.

Se calienta, a pesar de irradiar entropía. ¿Como podemos explicar ésto? Se nos olvidó considerar un hecho importante:

No sólo G irradia entropía, sino también todos los objetos a su alrededor. G entrega entropía, junto con la irradiación emitida, pero también recibe entropía junto con la irradiación emitida por los objetos a su alrededor. Si la temperatura de G es superior a la ambiental, entregará más entropía al ambiente de la que recibe, figura 6.78a. Pero si su temperatura es inferior a la de los cuerpos a su alrededor, recibirá más entropía de la que entrega, figura 6.78b. En ambos casos existirá, por lo tanto, un “flujo neto de entropía” que va desde la temperatura superior hacia la inferior. Y también, en ambos casos, se alcanzará el mismo estado final: las temperaturas se igualan y se establece un equilibrio térmico.

Aunque haya transporte de entropía por radiación electromagnética, la corriente (neta) de entropía fluirá desde la temperatura mayor a la menor.

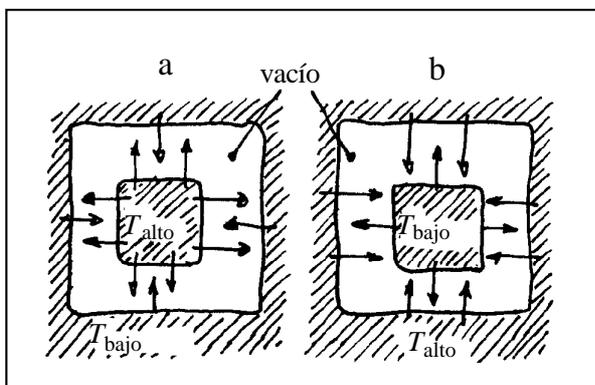


Fig. 6.78. En el vacío, se produce igualmente un equilibrio térmico entre los diferentes objetos.

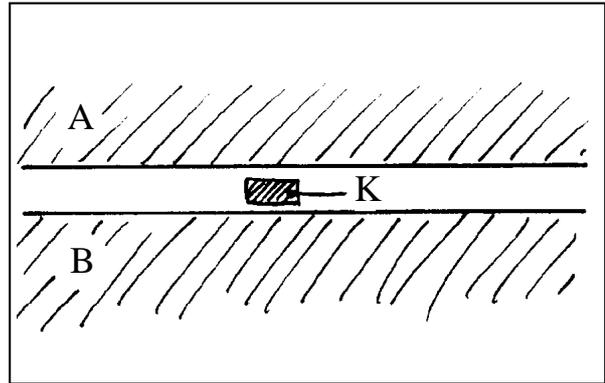


Fig. 6.79. Referente al ejercicio

Ejercicio

Coloquemos el objeto K entre dos paredes paralelas A y B que estén a temperaturas diferentes T_A y T_B , fig. 6.79. La temperatura T_A es mayor que T_B .

- ¿Qué puedes decir acerca de la temperatura alcanzada por K?
- ¿Qué puedes decir acerca de las corrientes de energía que se establecen entre las paredes mismas, así como entre las paredes y K?

6.31 El balance de la entropía y la energía en la tierra

La tierra recibe, constantemente, junto con la luz del sol entropía y también energía. La intensidad del flujo energético que proviene del sol e incide sobre cada m^2 de la superficie terrestre, constituye un valor muy importante y se puede recordar fácilmente: es de, aproximadamente, 1 kW. Se dice también que la *constante solar* es de 1 kW/ m^2 .

La superficie de de $1 m^2$, que estamos considerando, tiene que ser perpendicular a la dirección de los rayos solares, figura 6.80. Si está inclinada recibe, obviamente, menos que 1 kW. Además, el valor indicado corresponde al cielo despejado.

Constante solar = 1 kW/ m^2

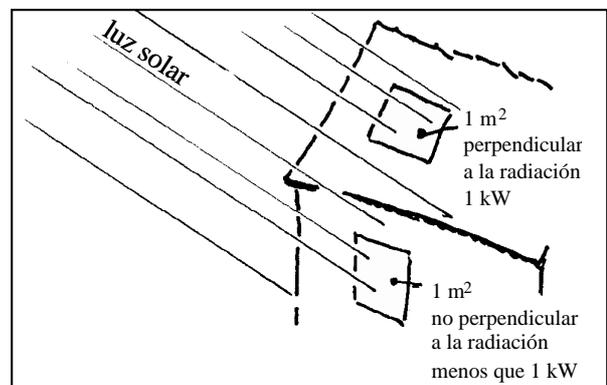


Fig. 6.80. La superficie de $1 m^2$ colocada perpendicularmente a la dirección de la luz solar recibe una corriente energética de 1 kW.

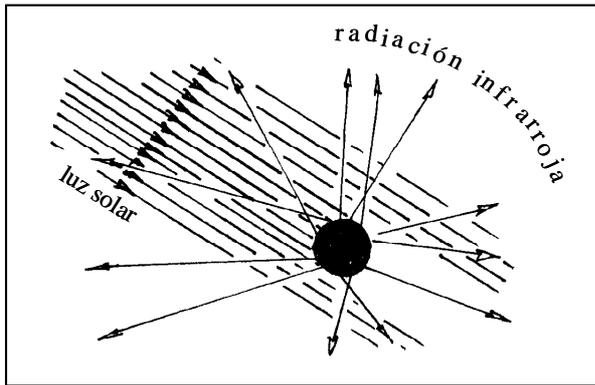


Fig. 6.81. La luz solar que recibe la tierra proviene de una zona de direcciones muy estrecha, pero la tierra, a su vez, irradia en todas las direcciones.

Si la tierra no desprendiera, a su vez, permanentemente entropía y energía, se calentaría cada vez más; pero ésto, evidentemente, no ocurre. Ya sabemos cómo lo hace la tierra para mantener constante su temperatura: porque no se encuentra a 0 K, irradia constantemente luz infrarroja y, junto con ella, entropía y energía.

Mientras que la luz solar llega a la tierra desde un solo lado, la tierra irradia en todas las direcciones, figura 6.81.

Ya que la tierra no se calienta ni se enfría, el flujo energético que sale tiene que tener la misma intensidad del que llega:

$$P_{\text{sale}} = P_{\text{llega}}$$

Con respecto a la entropía, las cosas no son tan simples. En la tierra se produce gran cantidad de entropía y la luz irradiada debe llevar más entropía que la luz solar que llega. La luz infrarroja irradiada debe llevar, hacia el espacio interplanetario, la entropía proveniente del sol más toda la entropía generada en la tierra. De esta manera, el contenido de entropía de la tierra se mantiene constante.

$$I_S \text{ sale} = I_S \text{ llega} + I_S \text{ generada}$$

El balance de energía y de entropía de la tierra se determina a través de las mismas ecuaciones que hemos establecido para la barra de la figura 6.42 del capítulo 6.13.

También podemos comparar la tierra con una casa calefaccionada: La estufa entrega constantemente una determinada corriente de entropía y también de energía. A través de los diferentes escapes toda esta corriente energética abandona nuevamente la casa, pero, junto con ella, no sale solamente la entropía entregada por la calefacción, sino también toda la entropía generada en la misma casa y en sus paredes.

Ejercicio

Un objeto está expuesto a la luz solar, que le llega sólo desde un ángulo muy estrecho. Desde todas las demás direcciones, al objeto le llega luz infrarroja proveniente de cuerpos relativamente fríos. Hay un método que permitiría que al objeto le lleguen los

rayos solares desde otras direcciones y que el cuerpo se vaya calentando. En el fondo, hasta podríamos lograr que la luz solar llegue desde todas las direcciones y que, teóricamente, el cuerpo alcance la temperatura del sol. ¿En qué consiste este método?

6.32 El efecto invernadero

Sabemos que la atmósfera es transparente para la luz visible. (Si no fuera así, sería oscuro también de día). La luz infrarroja, en cambio, tiene dificultades para atravesar la atmósfera. La culpa la tiene, fundamentalmente, el gas carbónico, contenido en pequeñas cantidades en la atmósfera. Este gas carbónico – CO₂ químicamente – constituye, entonces, una especie de material aislante para la radiación infrarroja. Examinemos, ahora, lo que ocurre, si por alguna razón, el contenido atmosférico de CO₂ aumenta:

La luz solar incidente no es afectada; la tierra se calienta como antes. La pérdida de calor, en cambio, se hace menor, ya que la irradiación se vuelve más difícil. Debido a este fenómeno, la temperatura aumenta. Pero una mayor temperatura significa mayor irradiación calórica. Por lo tanto, la irradiación de calor aumentará hasta que se vuelva a alcanzar el valor anterior, es decir, hasta que los flujos de energía incidente y saliente tengan la misma intensidad. La nueva situación se diferencia de la anterior (antes del aumento de la concentración de CO₂) en la temperatura: ésta se ha incrementado.

Mientras mayor sea la concentración de CO₂ en la atmósfera, mayor será la temperatura media de la tierra.

Para mayor claridad, comparemos nuevamente la tierra con una casa calefaccionada. Si mejoramos el aislamiento térmico de la casa, pero seguimos calefaccionando como antes, tendremos una mayor temperatura en su interior. En esta temperatura superior, la corriente energética que escapa de la casa tiene la misma intensidad de la que es entregada por los calefactores.

La concentración de CO₂ en la atmósfera es de, aproximadamente, 0,03 % (0,03 % de las moléculas del aire son moléculas de CO₂). Actualmente, el contenido de CO₂ atmosférico aumenta fuertemente: en las combustiones de carbón en las plantas termoelectricas, de parafina en las calefacciones y de los carburantes como bencina y diesel en los motores de auto, se produce CO₂. El gas carbónico es utilizado por las plantas verdes en la fotosíntesis y, en este proceso, se libera oxígeno. Pero esta utilización del CO₂ por parte de las plantas está disminuyendo actualmente a nivel mundial, debido a la creciente deforestación del planeta. Se piensa, por lo tanto, que en el curso de los próximos decenios, la temperatura de la tierra irá en aumento. Si bien este aumento será de pocos °C, sus consecuencias podrían ser dramáticas: se fundirían, por ejemplo,

gran parte de los hielos polares, lo que produciría un aumento del nivel del mar y la inundación de grandes regiones terrestres.

Este fenómeno de que la atmósfera deja pasar sin problemas la luz solar pero no así la radiación infrarroja proveniente de la superficie terrestre, se conoce como *efecto invernadero*. En los invernaderos se produce la misma situación, pero, en este caso, el vidrio hace las veces de la atmósfera. También el vidrio deja pasar la luz visible pero no la radiación infrarroja. De esta manera, se detiene la radiación in-

frarroja producida dentro del invernadero, lo que trae un aumento de la temperatura interior.

Ejercicio

Si cambia la concentración atmosférica del CO_2 , también cambia la temperatura terrestre. En el capítulo 5 encontramos una situación muy similar: Cambiando el roce del aire en un objeto, su velocidad de desplazamiento varía. ¿De qué fenómeno se trata? Compara las dos situaciones.

18. El campo magnético

18.1 Algunos experimentos sencillos con imanes y clavos.

Los imanes pueden atraerse mutuamente o repelerse. La atracción y la repulsión parten de los así llamados *polos*.

Si se cuelga un imán de barra mediante un hilo delgado de modo que permanezca en posición horizontal, al mismo tiempo que puede girar, el imán se orienta en dirección norte-sur. Un polo apunta al norte, el otro al sur. Debe haber, por lo tanto, dos clases de polos. Al polo que en nuestro experimento apunta hacia el norte lo llamamos polo norte, al otro lo llamamos polo sur.

La mayoría de los imanes tiene un solo polo norte y un solo polo sur. Algunos, sin embargo, tienen más polos, por ejemplo dos polos norte y dos sur. No hay imanes de un solo polo, p. ej. norte. La Fig. 18.1 muestra tres diferentes imanes.

Sólo se produce atracción entre dos polos magnéticos si uno es norte y el otro, sur. La repulsión se observa entre dos polos “de igual denominación”, u “opuestos”, es decir, entre dos polos norte y dos polos sur, Fig. 18.2. La atracción o repulsión es tanto mayor cuanto más cercanos estén ambos polos entre sí.

Polos de igual denominación se repelen, polos de distinta denominación se atraen.

Las observaciones hechas hasta ahora sólo se refieren a cómo reacciona un imán ante otro. Pero hay otro fenómeno que está íntimamente relacionado con el que acabamos de discutir, aunque difiere de él en un aspecto esencial, Fig. 18.3: un imán atrae objetos de hierro, p. ej. clavos, o clips para papel. El imán siempre atrae a los clavos,

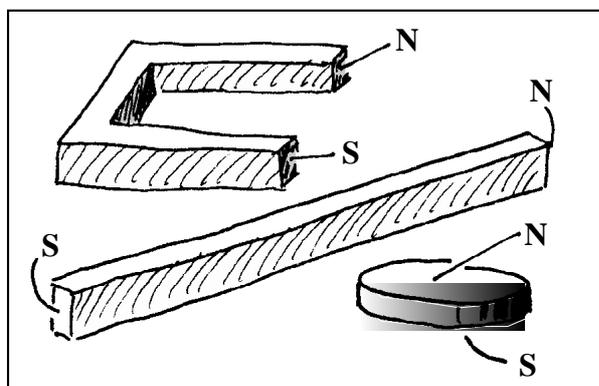


Fig. 18.1. Imán de herradura, imán barra y disco imán

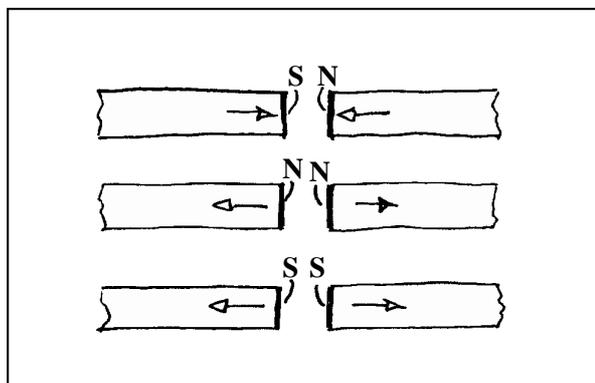


Fig. 18.2. Polos de distinta denominación se atraen, polos de igual denominación se repelen.

nunca los repele. Este comportamiento no contradice a la frase en negrita, más aún, puede explicarse mediante ella. También el hecho de que un clavo es atraído por un imán se debe a la atracción de polos opuestos: en efecto, el clavo, en proximidad a un polo magnético, se convierte a su vez en imán. P. ej. si se aproxima el clavo al polo norte de un imán, Fig. 18.4a, se produce en el lado del clavo próximo al polo norte del imán un polo sur. En la Fig. 18.4a el polo sur se produce entonces en la cabeza del clavo. En el otro extremo, en la punta del clavo, se produce un polo norte. Está claro que el clavo va a ser atraído ahora por el polo norte del imán.

Si se invierte el clavo en la Fig. 18.4a, el nuevo polo sur se produce nuevamente en el extremo próximo al polo norte del imán, es decir en la punta del clavo ahora, en tanto que la cabeza del clavo se convierte en polo norte.

Si el clavo se quita del imán, pierde sus polos.

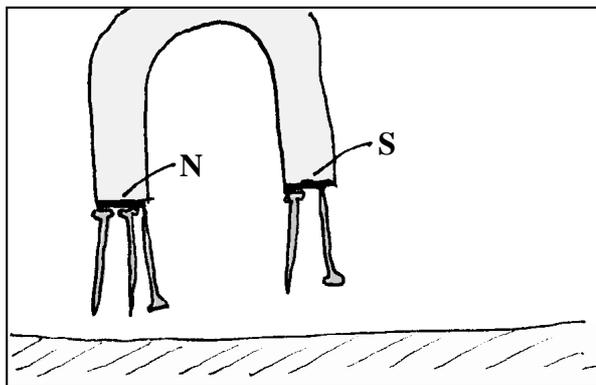


Fig. 18.3. Objetos de hierro dulce siempre son atraídos, nunca repelidos, por un imán.

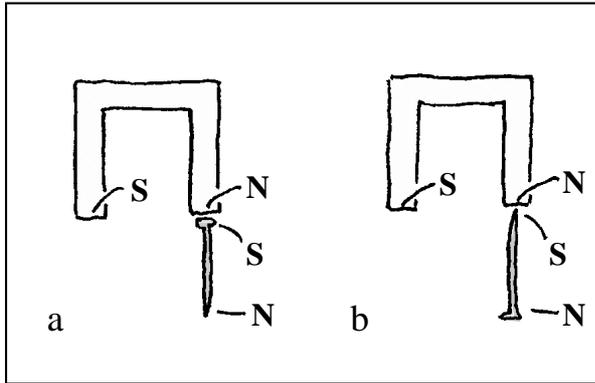


Fig. 18.4. En el extremo del clavo que está más próximo al polo norte del imán se forma un polo sur.

Ahora se comprende también el fenómeno de la Fig.18.5. El segundo clavo cuelga del nuevo polo norte formado en la punta del primer clavo.

Para subrayar que un “verdadero” imán no pierde sus polos con la facilidad con que lo hace un clavo, se le llama también “imán permanente”. El clavo no es un imán permanente.

La producción de polos magnéticos en un objeto se denomina *magnetización* o *imanación*. Cuando aproximamos el clavo al imán permanente lo que hicimos fue magnetizarlo. El imán permanente fue magnetizado por el fabricante.

Los materiales como el hierro del que está hecho el clavo se dicen *magnéticamente blandos*. Tales materiales se magnetizan al ser aproximados a un imán. Pueden magnetizarse muy fácilmente. Pero también pierden su magnetismo cuando se los aleja del imán.

El material con que se hacen los imanes permanentes se dice *magnéticamente duro*.

También los materiales magnéticamente duros pueden perder su magnetismo. Sólo hay que aplicar un poco de “violencia”. Si un imán permanente se calienta a unos 800 °C, pierde su magnetismo. Los polos magnéticos desaparecen y no vuelven a aparecer si se enfría el imán. Ensáyalo tú mismo(a) si dispones de un imán que puedas sacrificar.

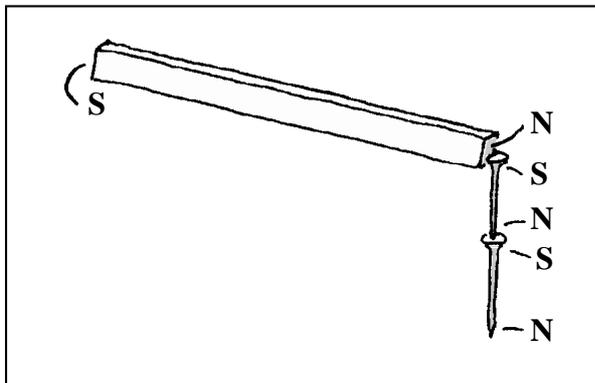


Fig. 18.5. El clavo inferior cuelga con su polo sur del polo norte del clavo superior.

Un típico material magnéticamente blando es el “hierro dulce”. Es la clase de hierro con que se hacen los clavos, por ejemplo. Los materiales magnéticamente duros tienen una composición complicada, pero también ellos contienen generalmente hierro.

También hay sustancias que en términos de sus propiedades se encuentran entre estos dos casos extremos. Un ejemplo de ello es el acero. Un trozo de acero forma también polos si se le acerca a un imán. Si después se le aleja, los polos no desaparecen totalmente, sin embargo.

Por lo tanto el acero puede ser imantado permanentemente, es decir, se le puede hacer imán. Puedes ensayarlo también tú, p. ej. con un palillo de acero para tejer. La magnetización es particularmente efectiva si pasas el polo de un imán potente a lo largo del palillo, repetidamente, siempre en la misma dirección.

Se usa este efecto para el almacenamiento, o archivo, de datos, p. ej. en cintas de audio y de video, en discos de computación y en tarjetas de crédito. En el portador, es decir la cinta, el disco o placa, hay una capa muy delgada de un material de fácil magnetización, y que conserva su magnetismo. Se almacenan los datos magnetizando, a lo largo de una línea sobre la capa del portador, un determinado patrón o muestra.

Tarea

Alguien afirma que no hay dos, sino cuatro distintos tipos de polos magnéticos. Te da dos imanes: uno normal, con polos norte y sur, y otro, que se supone que tiene un polo A y un polo B. ¿Qué experimentos puedes hacer para demostrarle que sus afirmación es equivocada?

18.2 Polos magnéticos

Hasta ahora nuestras afirmaciones sobre polos magnéticos eran aún algo vagas en cierto sentido. ¿Dónde exactamente están esos polos en un imán? ¿Dónde empiezan, dónde terminan?

Hacemos un experimento muy sencillo con dos potentes imanes en herradura, exactamente iguales. Para empezar, levantamos con uno de ellos un pesado bloque de hierro, Fig. 18.6. Después juntamos los dos imanes, de modo que el polo norte de uno se junta con el sur del otro, y el sur con el norte, Fig.18.7. Ahora intentamos levantar nuestro bloque de hierro con el anillo así formado. Pero no se puede, el bloque no se sujeta. De modo que el efecto de los polos desapareció. También podemos decir que los polos han desaparecido, que “se han compensado” mutuamente.

Vamos a describir estas observaciones de modo algo más preciso. En el polo de un imán hay algo que llamaremos *carga magnética*. Esta carga

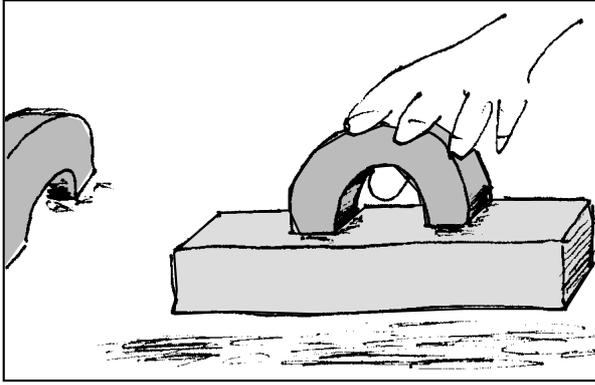


Fig. 18.6. El bloque de hierro se puede levantar con uno solo de los imanes herradura.

magnética se encuentra en la superficie del imán, en el caso de las herraduras de Fig.18.6 en las superficies terminales.

Del hecho de que las cargas de polo norte y polo sur se compensan podemos concluir que la carga magnética se presenta con dos signos distintos. Da igual cuál de las dos cargas, la norte o la sur, se designa como positiva o como negativa. Solamente hay que convenirlo una vez por todas. Se ha definido arbitrariamente como positiva la carga de polo norte y como negativa la de polo sur.

Si se junta igual cantidad de carga positiva y negativa de polo magnético se produce una carga total nula, las cargas positivas y negativas se compensan mutuamente. (Es como si tuvieras \$ 1000.- de deudas y \$ 1000.- a tu haber. Entonces eres propietario de \$ 0.-.)

El experimento de Fig.18.7 se explica ahora fácilmente: en cada una de las superficies de contacto se juntó igual cantidad de carga magnética positiva y negativa.

De este experimento podemos sacar aún otra conclusión muy sencilla: un imán por si solo contiene iguales cantidades de carga magnética positiva y negativa.

Un imán contiene igual cantidad de carga magnética positiva y de carga negativa.

Esta afirmación vale para cualquier imán, p. ej.

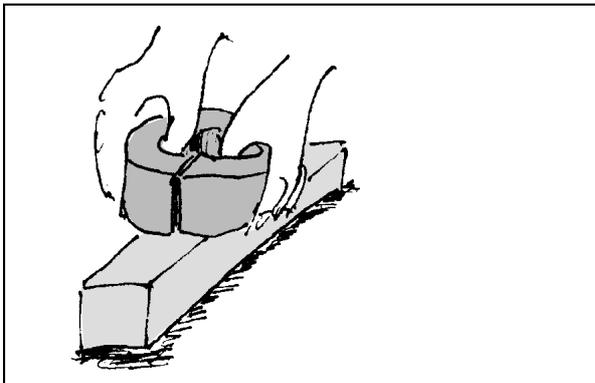


Fig. 18.7. Los imanes herradura forman un anillo. El bloque de hierro no se sujeta del anillo.

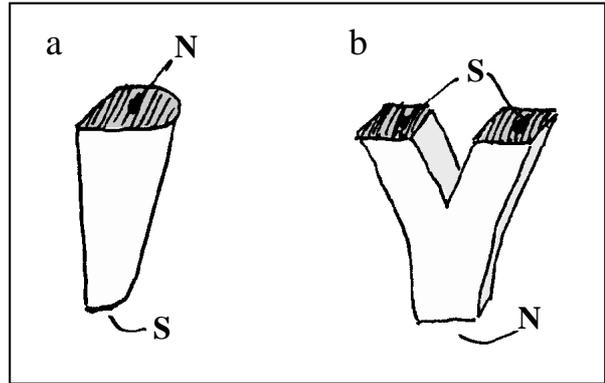


Fig. 18.8. También para estos imanes poco usuales la carga de polo norte es igual a la carga de polo sur.

también para el nada simétrico imán de Fig.18.8a. La carga magnética reside aquí en las superficies terminales. Como el polo norte ocupa mayor superficie que el sur, la carga en el polo sur debe estar más concentrada que la del polo norte. La Fig.18.8b muestra otro imán, algo inusual: tiene un polo norte pero dos polos sur. Pero nuevamente la carga de polo norte es igual a la carga total de polo sur.

18.3 Líneas de magnetización

Ahora ya no es difícil explicar otro fenómeno conocido. Si se quiebra un imán barra aparecen dos nuevos polos magnéticos, Fig.18.9. Se puede repetir el proceso de fractura, es decir, quebrar nuevamente los primeros fragmentos, tantas veces como se quiera: siempre se obtienen imanes completos, y cada fragmento tiene igual carga de polo norte que de polo sur.

Si se quiebra un trozo no imantado de acero no hay cargas de polo magnético en la fractura. Si, por el contrario, se quiebra un trozo imantado, se obtienen polos. De esto concluimos que en la magnetización de un trozo de hierro el trozo *entero* se modifica, y no sólo los lugares en que están los polos.

Como toda otra sustancia también el hierro está formado por partículas muy, muy pequeñas, los átomos. Resulta que en el hierro cada átomo mismo es magnético, es decir, cada átomo es un

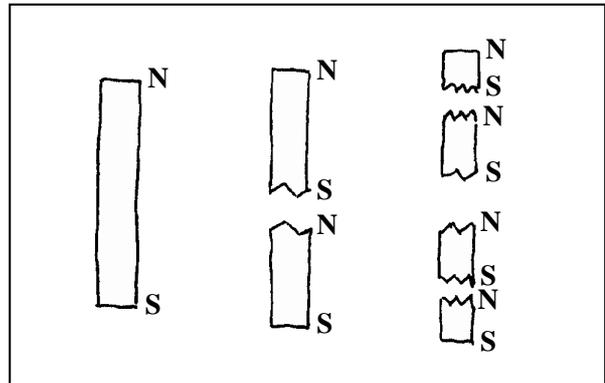


Fig. 18.9. Si se quiebra un imán barra, en la fractura aparecen dos nuevos polos.

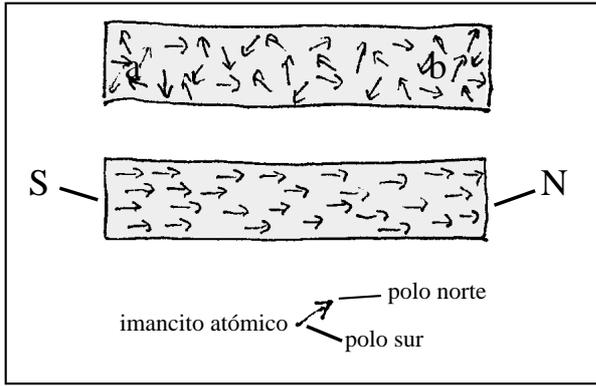


Fig. 18.10. (a) En un trozo no imantado de hierro las direcciones de los imancitos atómicos están desordenadas. (b) En un trozo imantado de hierro los imancitos atómicos están orientados. En la cara izquierda del imán se ha formado un polo sur, en la cara derecha un polo norte.

pequeñísimo imán. En tanto el hierro no está magnetizado, sin embargo, los imancitos atómicos están orientados en forma desordenada. Como consecuencia, el trozo de hierro en conjunto no muestra magnetización, Fig. 18.10a. Los efectos de los imancitos individuales se compensan mutuamente.

En un imán permanente, o en un trozo imantado de hierro dulce, los imanes atómicos están orientados en forma regular, como p. ej. en Fig. 18.10b. Como consecuencia, en la cara izquierda del imán hay carga pura de polo magnético sur (carga magnética negativa), y en la cara derecha carga pura de polo magnético norte (carga magnética positiva).

La Fig. 18.10b. muestra también cómo puede representarse gráficamente la magnetización de un objeto. Pero esta representación se puede hacer en forma aún más práctica. En vez de indicar los imanes atómicos mediante muchas flechas individuales, se dibujan líneas continuas, *las líneas de magnetización*. Se las dibuja de tal manera que su dirección da la orientación de los imanes atómicos. A cada una de estas líneas se les pone una flecha, y de tal manera que la línea corre del polo sur al polo norte, Fig. 18.11a.

Las líneas de magnetización describen el estado

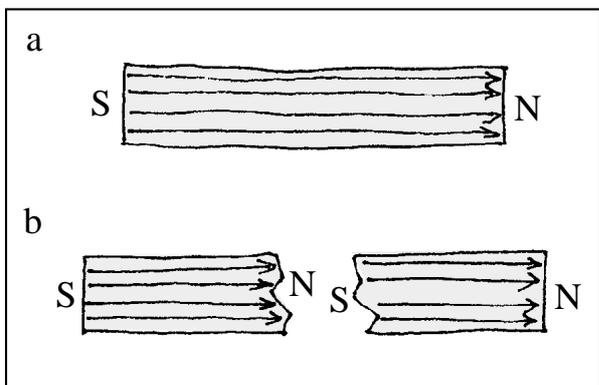


Fig. 18.11. (a) Representación gráfica del estado de magnetización con ayuda de las líneas de magnetización. (b) Al quebrar un imán se forman nuevos polos.

de magnetización de la materia. Estas líneas empiezan en cargas magnéticas negativas (cargas de polo sur) y terminan en cargas magnéticas positivas (cargas de polo norte).

La imagen de las líneas de magnetización es altamente descriptiva: nos dice exactamente dónde están las carga magnéticas en un imán: allí donde empiezan las líneas hay carga negativa, donde terminan, hay carga magnética positiva. La imagen también nos dice qué pasa cuando se quiebra un imán. Si, p. ej., se quiebra el imán de Fig.18.11a, como se muestra en Fig.18.11b, en la cara derecha del fragmento izquierdo terminan líneas de magnetización. Por tanto, aquí hay ahora un nuevo polo norte. En la cara izquierda del fragmento derecho hay líneas de magnetización que empiezan. Aquí se ha formado un nuevo polo sur.

Se puede imantar un trozo de hierro de diversas maneras. Consideremos un imán algo inusual, Fig.18.12a. En fig.18.12b se muestra cómo fue imantado durante su fabricación. La imagen de las líneas de magnetización nos dice qué pasa si quebramos este imán. En las caras de arriba se forman polos, en las de abajo, no Fig. 18.12c.

Ya ves que las líneas de magnetización nos dicen dónde están los polos. ¿Es cierto esto también a la inversa? ¿Podemos dibujar las líneas de magnetización si nos dicen dónde están los polos? Consideremos Fig.18.13a. El imán tiene cuatro polos, todos a un mismo lado. ¿Cómo fluyen las líneas de magnetización? Se ve fácilmente que hay varias soluciones: se puede fabricar imanes con los

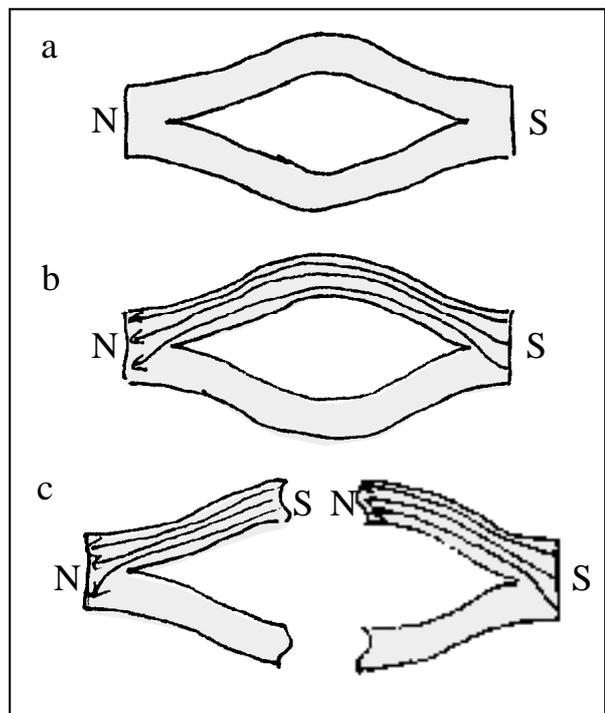


Fig. 18.12. (a) Un imán inusual. (b) No se ve desde afuera que las líneas de magnetización corren por el brazo superior. (c) Al quebrar el imán se forman polos en las caras de arriba, pero no en las de abajo.

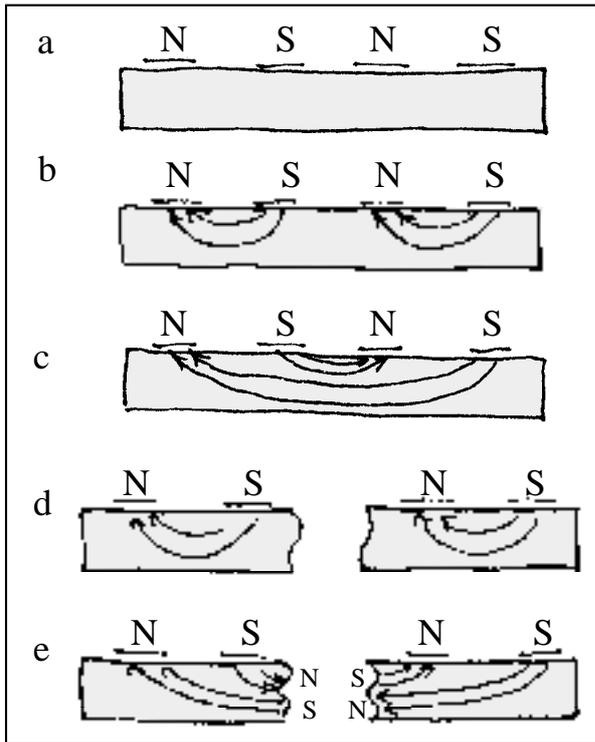


Fig. 18.13. (a) Imán con cuatro polos en un mismo lado. (b) y (c) Hay varias posibilidades de magnetización. (d) y (e) Se aprecia la diferencia entre b y c cuando se quiebra el imán por la mitad.

polos dispuestos según Fig.18.13a de diversas maneras. Figs. 18.13b y 18.13c muestran dos posibilidades. Por afuera no puede verse cómo es realmente la magnetización. Un método para distinguir entre ambas posibilidades consiste en quebrar el imán de Fig.18.13b no se forman nuevos polos, Fig.18.13d. Si por el contrario quebramos el imán de Fig.18.13c, se forma en cada fractura un polo norte y un polo sur, Fig.18.13e.

Tarea

1. ¿Cómo podrían fluir las líneas de magnetización en un imán herradura?
2. ¿Cómo podrían fluir las líneas de magnetización en el imán de Fig.18.14a?
3. ¿Cómo podrían fluir las líneas de magnetización en el imán de Fig.18.14b? Indica dos soluciones.
4. Sea un imán en forma de disco cilíndrico. Este imán tiene tres polos sur y tres polos norte en su manto cilíndrico, dispuestos en forma alternada, uniformemente sobre el perímetro del cilindro. ¿Cómo podría ser la magnetización del cilindro? Indica dos soluciones.
5. Te pasan un anillo de acero y te dicen que está magnetizado, y de tal manera que las líneas de magnetización siguen la forma del anillo y son circulares. Así, el imán no tiene polos. ¿Cómo puedes verificar si la afirmación es correcta?

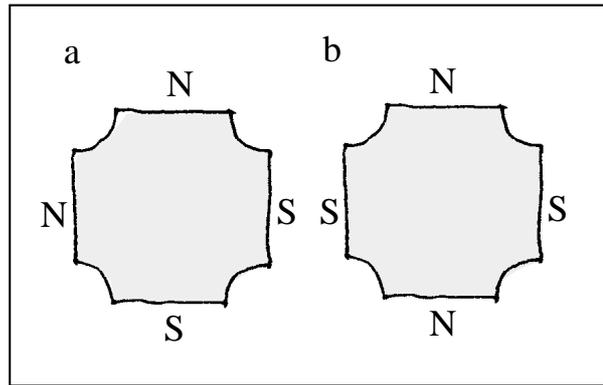


Fig. 18.14. Acompaña las tareas 2 y 3. ¿Cómo fluyen las líneas de magnetización?

18.4 El campo magnético

Ahora nos ocuparemos brevemente de otro problema. Los dos carros de Fig. 18.15a se aproximan, porque la persona tira de la cuerda. Los carros de Fig.18.15b se separan por la presión del resorte. Fig.18.15c muestra dos pistones en un cilindro. Alguien presiona el pistón izquierdo, lo que hace moverse al pistón derecho.

Las tres situaciones de Fig.18.15 tienen algo en común: en cada caso un objeto empieza a moverse a expensas de otro (un objeto recibe momentum de otro).

Lo que nos interesa por ahora es la siguiente observación: para que un objeto A pueda presionar a

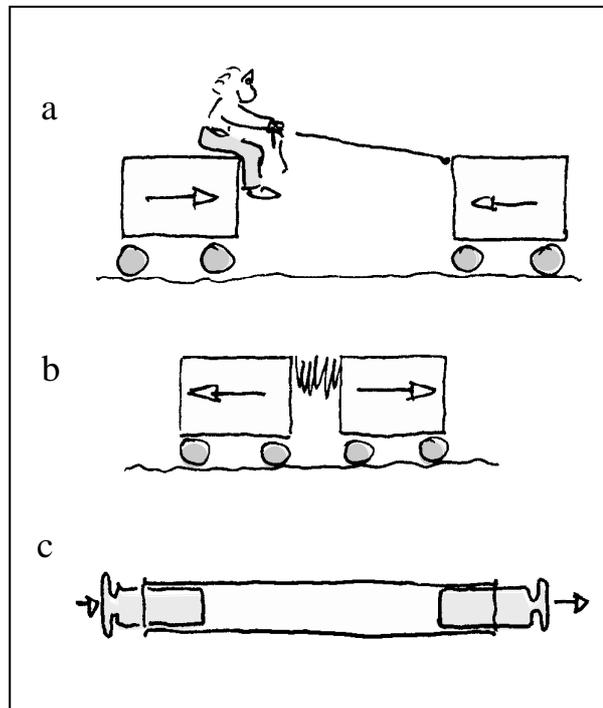
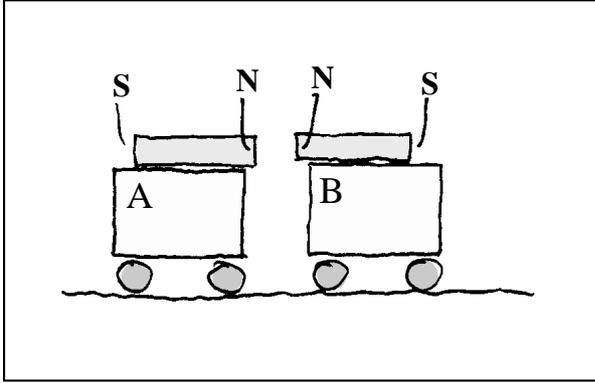


Fig. 18.15. Los dos carros de la Fig. a están unidos por una cuerda, los carros de Fig.b por un resorte y los pistones de Fig. c por aire.



18.16. Ambos imanes están unidos entre sí por su campo magnético.

un objeto B, o tirar de un objeto B, debe existir una conexión entre A y B. (Para que fluya momentum de A a B, o de B a A, debe existir una conexión).

En el primer ejemplo de Fig. 18.15 la conexión es la cuerda, en el segundo lo es el resorte y en el tercero lo es el aire. Queremos destacar este resultado que parece de Perogrullo:

Cuando un objeto aleja o atrae a otro, debe existir una conexión entre ambos.

Volvamos al magnetismo: montamos imanes en dos carros, Fig.18.16, y se aproxima el carro A al carro B. Aún antes de que los carros o los imanes se toquen, el carro B empieza a moverse.

Por supuesto, dirás tú. Ya nos ocupamos en detalle de este fenómeno. El polo norte de la izquierda repele al polo norte de la derecha. Ahora, si tomamos en serio la frase en negrita, podemos sacar una nueva conclusión: entre ambos polos norte de Fig.18.16 debe haber una conexión, una conexión a través de la cual el polo norte izquierdo empuja al derecho. Está claro que esta conexión es invisible (como lo es, por lo demás, el aire en Fig. 18.15c). Denominamos *campo magnético* a la entidad que une entre sí los polos norte en Fig.18.16.

Toma dos imanes potentes, acerca polos de igual denominación, empújalos uno contra el otro. Sientes el campo magnético que trata de mantener separados los polos.

Hay un campo magnético en ambos polos de un imán. Si acercamos dos polos de dos distintos imanes, el campo total entre los dos polos se comporta como un resorte elástico.

Del mismo modo que un resorte puede empujar o tirar, el campo empuja o tira. De modo que no hay dos clases de campo. Después de leer la sección siguiente, comprenderás mejor cómo es que el campo a veces empuja y a veces tira.

Por ahora el campo ya nos ayuda a formular de manera más precisa una regla conocida. Dijimos antes que “polos de igual denominación se repelen, polos de distinta denominación se atraen”. Estudia otra vez la situación de Fig. 18.15b. ¿Dirías que

ambos carros se repelen? Claro que no. Resulta mejor explicar que “la presión del resorte hace que los carros se separen”. En concordancia con esa idea vamos a mejorar la formulación de nuestra regla sobre los imanes:

Imanes de igual denominación son repelidos mutuamente por su campo, los de distinta denominación son atraídos mutuamente.

18.5 Representación gráfica de campos magnéticos

El efecto del campo magnético de un polo se hace más débil hacia afuera, es decir, cuando uno se aleja de él. Esto se debe a que el campo es más denso cerca del polo y que su densidad disminuye hacia afuera, en forma parecida a como disminuye la densidad del aire sobre la Tierra con la altura. No podemos decir, por lo tanto, que el campo alcanza desde el polo hasta una cierta distancia bien definida. El campo no tiene borde, no tiene un límite preciso, de igual modo que el aire sobre la Tierra no tiene un límite preciso.

Si ahora queremos representar el campo magnético en un dibujo, podemos expresar su densidad variable dibujando el campo cerca del polo en gris oscuro y aclarando el gris a medida que nos alejamos, Fig.18.17. Otro método consiste en señalar el campo con puntos, poniendo una mayor densidad de puntos cerca del polo que más lejos, Fig.18.18.

Se puede mejorar aún la representación. Para entenderlo debemos hacer algunos experimentos adicionales. Para empezar ponemos una brújula – esto es, un imán pequeño dispuesto de tal manera que puede girar – cerca de un imán más grande, nuestro imán principal, digamos. La dirección que toma la brújula depende del lugar en que la ponemos. A cada posición en el campo del imán principal corresponde una cierta dirección de la brújula. Decimos también que el campo del imán principal “tiene” en cada lugar una dirección determinada.

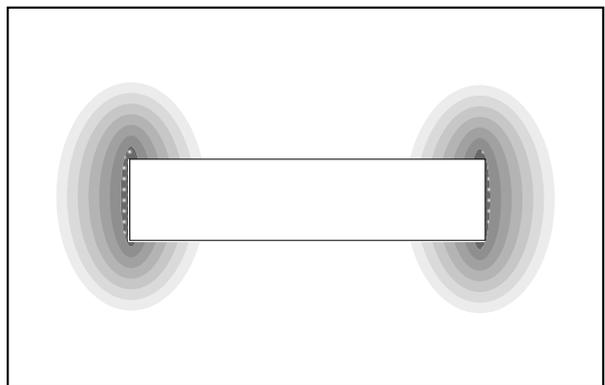


Fig. 18.17. Expresamos la densidad del campo magnético mediante una tonalidad gris variable.

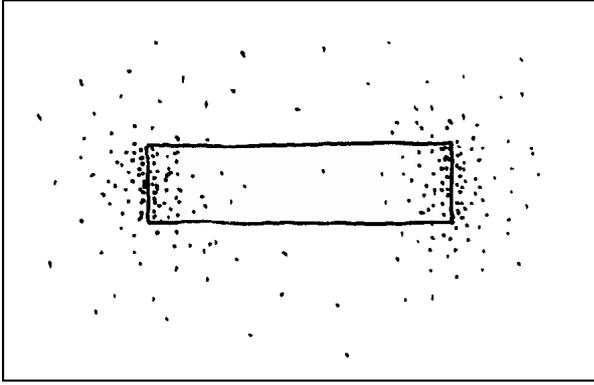


Fig. 18.18. La densidad del campo magnético se expresa mediante una densidad variable de puntos.

No es inusual encontrar que a cada punto de algún objeto masivo se le pueda adjudicar una determinada dirección. Que la madera presente dibujos no significa otra cosa que la existencia, en cada punto, de una dirección según la cual es especialmente fácil partirla, Fig.18.19. Ya vimos en la sección anterior que también en el hierro se distinguen direcciones, a saber cuando el hierro está imantado.

Las direcciones en puntos aislados de un campo magnético pueden hacerse todas visibles simultáneamente de manera muy sencilla. Preguntémonos, p. ej., por las direcciones del campo de una barra imán.

Cubrimos el imán con una placa de material no magnético, preferiblemente de vidrio. La placa no hace cambiar al campo. Ahora regamos limaduras de hierro sobre la placa y le damos unos suaves golpecitos a la placa. Las limaduras se ordenan, encadenándose. Las cadenas indican en cada punto del campo la dirección que tomaría una aguja imantada (o brújula). De modo que indican la dirección del campo en cada punto.

Volvamos al problema de la representación gráfica del campo. Hemos visto que cada “pedacito” del campo tiene una dirección determinada. Para expresar esta dirección en un dibujo podemos proceder como lo indica Fig.18.20: en vez de los

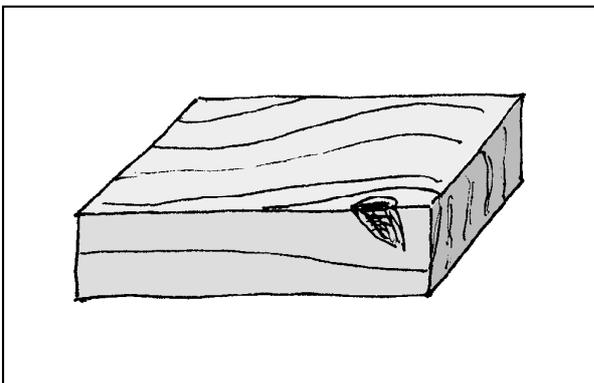


Fig. 18.19. El dibujo de la madera nos dice en qué dirección es más fácil partirla.

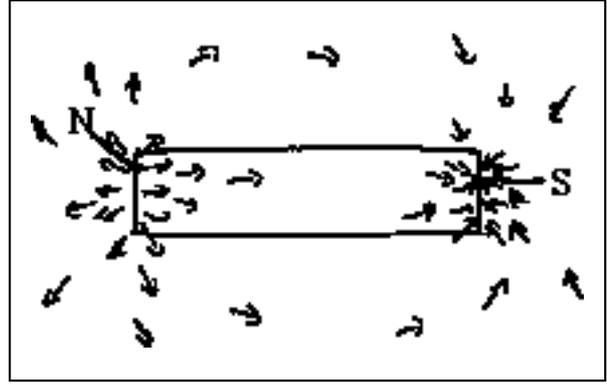


Fig. 18.20. La dirección de las flechas representa la dirección del campo, su densidad es una medida de la densidad del campo.

puntos (en Fig. 18.18) dibujamos flechitas – muchas allí donde el campo es denso, pocas donde es menos denso. Las puntas de las flechas las dibujamos en el extremo que se aleja del polo norte del imán principal.

Aún más elegante es el método de las *líneas de campo*, Fig.18.21. En vez de las flechitas individuales de Fig.18.20 trazamos líneas continuas. La dirección de las líneas nos dice la dirección del campo. La separación lateral entre líneas nos dice cuán denso es el campo. Allí donde las líneas están muy juntas el campo es denso, donde su separación es grande el campo está muy debilitado. Sobre las líneas se dibujan también flechas, a saber, de tal manera que las líneas parten de un polo norte y terminan en un polo sur.

En la Fig.18.21 se ve:

Las líneas de campo magnético parten de cargas magnéticas positivas (polo norte) y terminan en las negativas (polo sur).

No confundas las líneas de campo con las líneas de magnetización. Ambos tipos de líneas nos señalan direcciones. En tanto que las líneas de magnetización nos informan del estado de magnetización del hierro (visible), las líneas de campo describen el estado del campo (invisible).

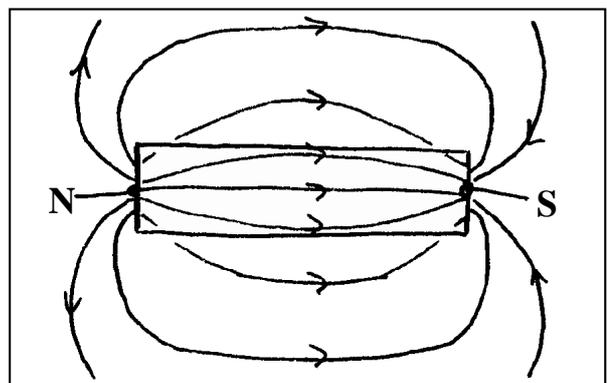


Fig. 18.21. Dibujo de líneas de campo. Mientras más juntas las líneas, tanto más denso el campo.

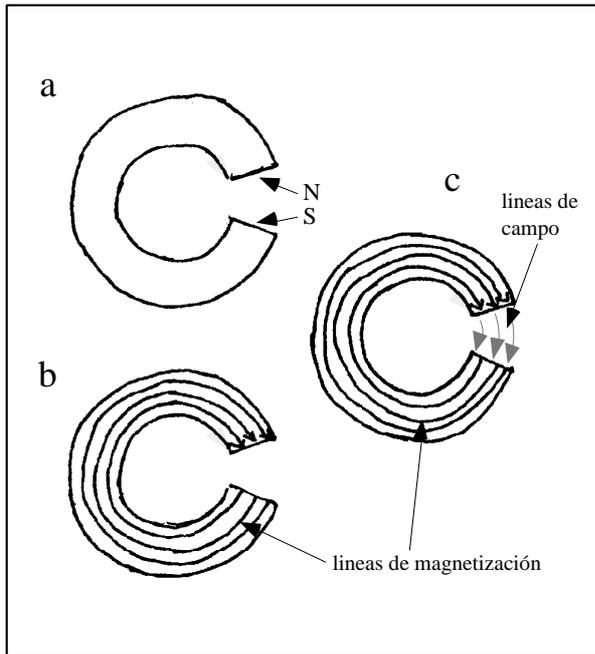


Fig. 18.22. (a) Imán anular con polos. (b) Imán anular con polos y líneas de magnetización. (c) Imán anular con polos, líneas de magnetización y líneas de campo

18.6 Líneas de magnetización y líneas de campo

Hemos visto que tanto el estado de magnetización de la materia como el campo magnético pueden representarse gráficamente. Ahora vamos a emplear ambos procedimientos en una misma figura. Recordamos para ello las reglas: las líneas de magnetización empiezan en el polo sur y terminan en el polo norte, las líneas de campo magnético empiezan en el polo norte y terminan en el polo sur. Podemos resumir estas reglas:

Allí donde terminan las líneas de magnetización empiezan las líneas de campo magnético, y a la inversa.

Cuando se representan las líneas de magnetización y de campo en una misma figura, lo mejor es usar colores diferentes.

Consideremos un imán en forma de anillo al que se ha sacado un pedazo. La Fig. 18.22a muestra el imán con sus polos. ¿Cómo podrían correr las líneas de campo magnético? La respuesta más simple viene dada en la Fig. 18.22b. Si ahora se investiga el campo mediante pequeñas agujas magnetizadas, se encuentra el trazado de las líneas de campo, Fig. 18.22c.

Tarea

La Fig. 18.23 muestra un arreglo de un imán en herradura y un trozo de hierro dulce. (a) ¿En qué puntos del hierro dulce se forman polos? ¿De qué polos (positivos o negativos) se trata? (b) ¿Dónde hay campo magnético? Esboza las líneas de campo. (c) Dibuja las líneas de magnetización en el imán y en el hierro dulce.

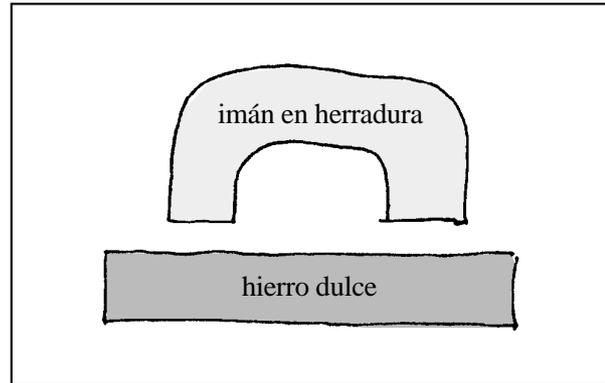


Fig. 18.23. Ver tarea

18.7 Campo magnético y materia

Todavía no nos hemos ocupado de una propiedad fascinante de los imanes. Los imanes pueden empujar o tirar a través de otros cuerpos. Vamos a estudiar este fenómeno más de cerca.

Colgamos un clavo mediante un hilo delgado y lo acercamos a un imán potente de tal manera que el imán lo atrae, pero sin que el clavo llegue a tocarlo, Fig. 18.24. Ahora interponemos entre el clavo y el imán placas de distintos materiales.

En la mayoría de los casos el clavo se mantiene en su posición colgante, “no se da cuenta” de la presencia de la placa extraña. Esto pasa con hojas de cartón, placas de madera, de vidrio, los más diversos plásticos, pero también con la mayoría de los metales, como aluminio, cobre y plomo. Esos materiales son justamente aquéllos que no son atraídos por el imán, que no pueden, por lo tanto, ser magnetizados.

El campo magnético simplemente atraviesa estos materiales. Los penetra como si no existieran. ¿Te parece raro? ¿Acaso es posible que en un mismo lugar del espacio existan dos cosas distintas, a saber, materia y campo? En realidad esta comprobación no es tan sorprendente. Todos conocemos otro ejemplo en que dos “substancias” se encuentran en un mismo lugar: cuando la luz atraviesa una plancha de vidrio, en un mismo lugar hay luz y hay vidrio.

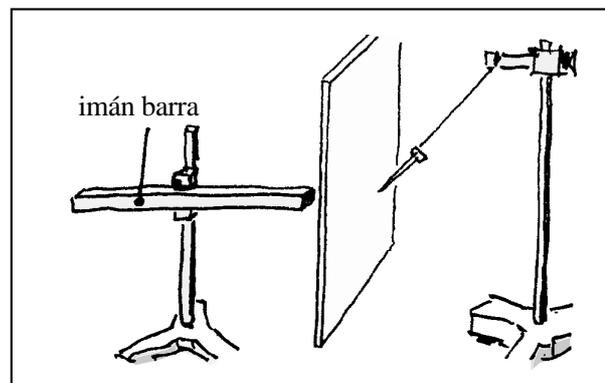


Fig. 18.24. Entre clavo e imán se interponen placas de distintos materiales.

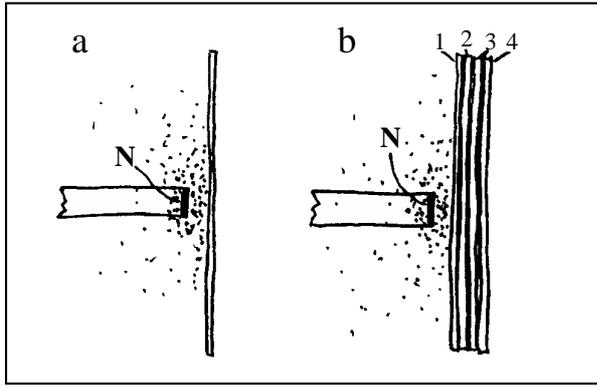


Fig. 18.25. El campo no atraviesa la placa delgada de hierro, figura a. Por lo tanto no puede penetrar en las placas 2, 3 y 4 de la figura b.

Del mismo modo pueden encontrarse en un mismo lugar campo magnético y cobre, p.ej.

Algo muy distinto ocurre ahora si entre clavo e imán (ver Fig. 18.24) interponemos una placa de material magnéticamente blando, p. ej. de hierro: el imán suelta el clavo, el clavo queda colgando verticalmente.

Así que la placa de hierro no deja pasar el campo magnético. Podemos formular esta afirmación de manera más precisa. Hagamos primero otro experimento más. Interponemos una placa delgada de hierro entre imán y clavo. El clavo cae. Después interponemos dos placas delgadas de hierro, después tres, después cuatro. Por supuesto, el clavo cae en cada caso, queda vertical. Ahora bien, podemos imaginar las varias placas como una sola placa gruesa, Fig.18.25. Y de esta placa gruesa podemos decir no solamente que el campo no sale por la derecha (por el otro lado), sino también que el campo ni siquiera la penetra – por lo menos, no la penetra más que el espesor de la primera placa delgada. Con esto hemos hecho otro descubrimiento importante:

El campo magnético no penetra profundamente en materiales magnéticos blandos.

El hecho de que los cuerpos magnéticamente blandos forman polos cuando se los introduce en un campo magnético significa que reaccionan al

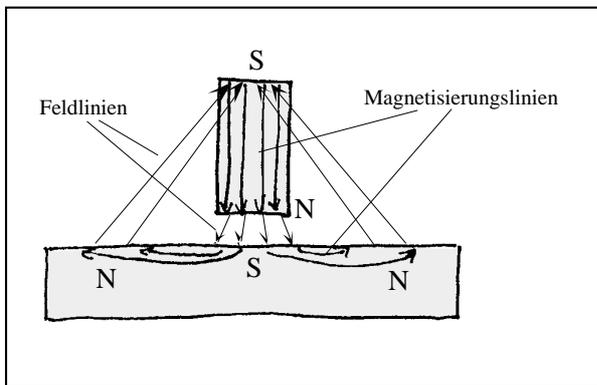


Fig. 18.26. El polo norte del hierro dulce está compuesto de dos partes separadas por el polo sur.

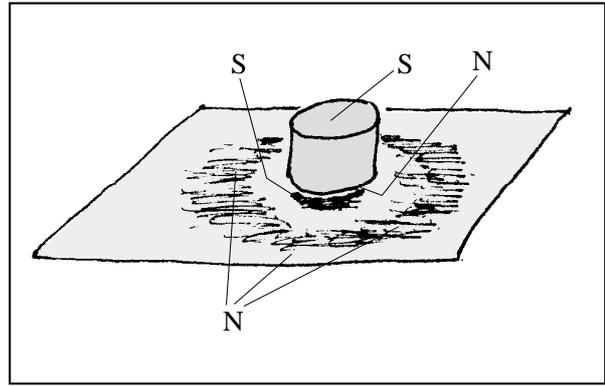


Fig. 18.27. El polo norte de la placa de hierro dulce rodea, como anillo, al polo sur.

campo magnético magnetizándose. En el caso del experimento de Fig.18.25, la magnetización queda restringida, sin embargo, a una delgada zona bajo la superficie de la placa.

Vamos a investigar en qué lugar se forman los polos en el caso de nuestra placa. Lo mejor para ello es usar una disposición “bidimensional”, Fig.18.26, de modo que el campo se puede visualizar con limaduras de hierro. Se comprueba: en la barra de hierro dulce se forma un polo sur cerca del polo norte del imán. A alguna distancia de este polo sur, y a cada lado, se forman polos norte. Aquí la carga magnética esta más diluida que en el polo sur central. ¿Cómo se ve ahora la distribución de los polos en nuestra disposición original, cuando teníamos una placa extensa en vez de la barra, frente al imán? El polo sur se forma directamente frente al polo norte del imán. El polo norte de la placa de hierro dulce es de forma anular en este caso, Fig.18.27.

Tarea

Dibuja líneas de magnetización y de campo para el imán de Fig.18.28a. Al centro del campo se introduce una pequeña placa de hierro dulce, Fig.18.28b. ¿Ahora, cómo se ven las líneas de magnetización y de campo?

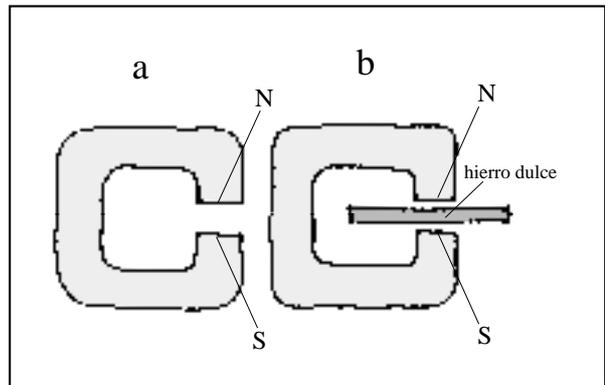


Fig. 18.28. ¿Cómo corren las líneas de magnetización y de campo antes y después de meter la placa de hierro dulce?

18.8 La energía del campo magnético

Para separar dos imanes potentes sujetos el uno del otro hay que hacer fuerza, hay que gastar energía. ¿Adónde va esa energía?

Hay un potente imán sujeto en la mesa y a poca distancia está un segundo imán similar. El primer imán atrae al segundo. Este imán en movimiento puede mover algo, durante un breve tiempo, p. ej. una dínamo. Para esto se necesita energía. ¿De dónde viene esta energía?

Compara ambas situaciones. En el primer caso se gasta energía (lo hace la persona que separa los imanes) y se produce campo magnético. En el segundo caso se entrega energía (a la dínamo) y desaparece campo magnético. Concluimos que en el campo magnético hay energía contenida.

El campo magnético contiene energía.

18.9 Corriente eléctrica y campo magnético

Se cuelga un alambre largo como lo muestra Fig.18.29. El alambre se puede conectar a una batería de auto, de modo que por él pase una corriente eléctrica: en la parte derecha hacia abajo y en la parte izquierda hacia arriba. Se puede cerrar el circuito sólo por un tiempo muy corto, pues la resistencia del alambre es muy pequeña y circula una corriente de más de 50 A. Fijamos un extremo del alambre en uno de los polos de la batería. Ahora observamos las secciones colgantes del alambre y tocamos brevemente el otro polo de la batería con el extremo libre del alambre: los alambres colgantes se separan bruscamente. Algo los ha empujado, separándolos.

Repetimos el experimento, pero de tal manera que la corriente circula por las secciones verticales colgantes del alambre en el mismo sentido, Fig.18.30. En este caso los alambres se juntan bruscamente.

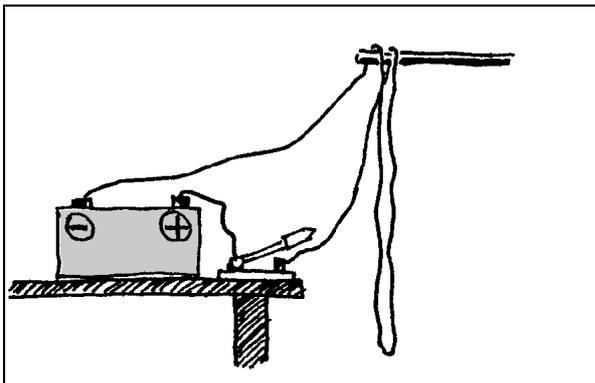


Fig. 18.29. Al cerrar el circuito eléctrico los alambres se separan bruscamente.

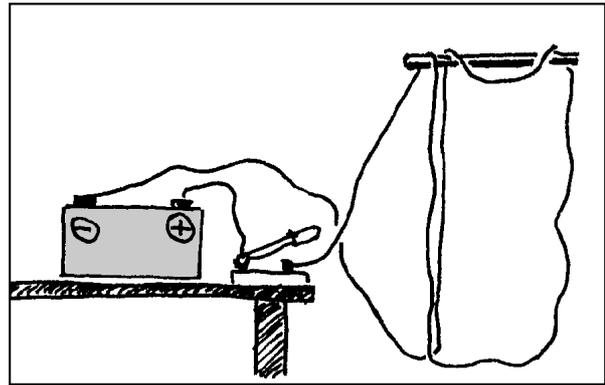


Fig. 18.30. Al cerrar el circuito los alambres se juntan bruscamente.

¿Cuál es la conexión por la que uno de los alambres empuja o tira al otro?

Es fácil encontrar la respuesta. Acercamos una aguja imán (brújula) a un alambre único, por el que puede pasar una corriente eléctrica intensa. Apenas se conecta la corriente eléctrica la aguja se orienta en una dirección determinada, Fig.18.31. Si se interrumpe la corriente la aguja vuelve, oscilando, a su posición inicial. Aparentemente el alambre está rodeado por un campo magnético mientras circule por él una corriente eléctrica.

Investigamos la dirección y la densidad del campo moviendo la aguja imán en torno al alambre. Se observa que en todas partes la dirección del campo es perpendicular a la dirección del alambre. Además, cada flechita de línea de campo se encuentra sobre una circunferencia cuyo centro está sobre el eje del alambre.

La densidad del campo disminuye hacia afuera, es decir, cuando uno se aleja del alambre. La Fig.18.32a muestra el campo en la representación de puntos, la Fig.18.32b con flechitas, y la Fig.18.32c con líneas de campo. Se ve que el campo no llega al alambre con puntas o colas de flechas, sino con los lados (con el cuerpo) de las flechas. De modo que no necesitamos buscar polos magnéticos aquí – no puede haberlos.

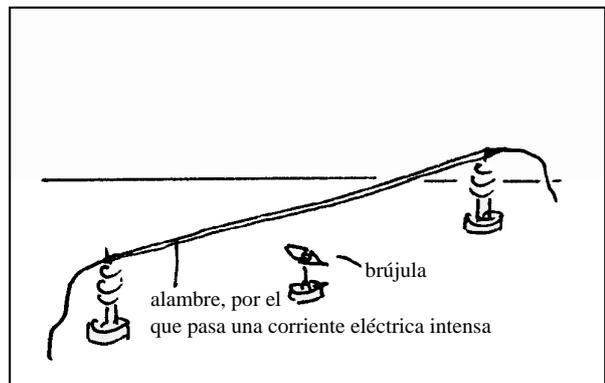


Fig. 18.31. Al hacer pasar corriente eléctrica la aguja imán cambia de dirección.

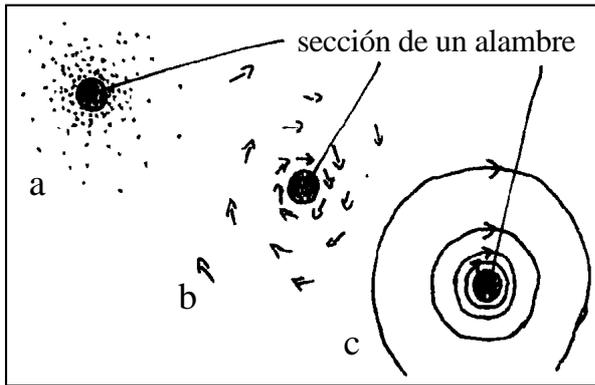


Fig. 18.32. Tres representaciones diferentes del campo magnético en el entorno de una corriente eléctrica.

De todos modos habría sido extraño encontrar polos en el alambre, que es de cobre, un material no magnetizable.

Una corriente eléctrica está rodeada de un campo magnético. Cuando en dos alambres paralelos fluyen corrientes eléctricas en el mismo sentido, el campo tira de los alambres, juntándolos. Si las corrientes fluyen en sentidos opuestos, el campo empuja a los alambres de modo que se separan.

La atracción y repulsión entre corrientes eléctricas ha encontrado aplicaciones tecnológicas muy importantes. Antes de que éstas fueran posibles hubo que encontrar modo de que los efectos de atracción y repulsión fuesen más fuertes. Si con una corriente de 50 A apenas se puede hacer mover unos alambres colgantes, el costo en relación al efecto logrado es, simplemente, demasiado alto.

Ahora bien, los campos magnéticos creados por corrientes eléctricas pueden hacerse mucho más densos mediante un truco: se hace pasar un mismo alambre varias veces por un mismo lugar, o mejor, se le enrolla en forma de *bobina*.

En la Fig. 18.33 se hizo dar 100 vueltas al alambre. Si por el alambre fluye 1 A, entonces por la sección dibujada en la figura fluye una corriente total de 100 A de intensidad. En consecuencia, en el entorno

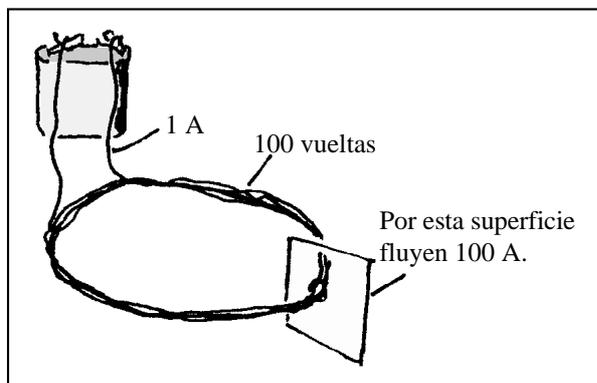


Fig. 18.33. El campo del enrollado es tan denso como el de un alambre por el que fluyen 100 A.

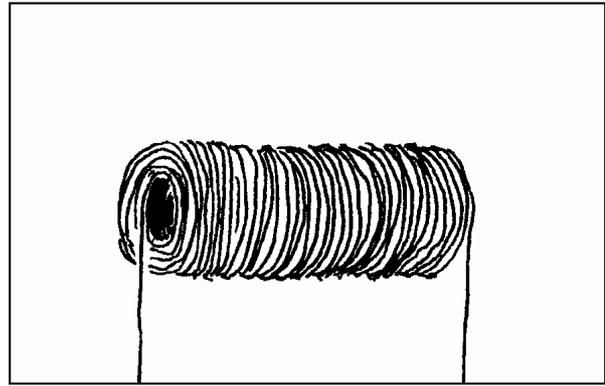


Fig. 18.34. Bobina cilíndrica

de este conjunto de alambres tenemos un campo magnético que es tan denso como el campo de un alambre solo por el que fluyen 100 A.

Un dispositivo muy útil es una bobina cilíndrica. Aquí el alambre se enrolla en forma cilíndrica en muchas capas, una sobre otra, Fig. 18.34. (El alambre debe estar aislado, por supuesto – de otro modo, la corriente encuentra un camino más corto.)

Investigamos dirección y densidad del campo de una bobina, p. ej. mediante limaduras de hierro. El resultado se muestra en Fig. 18.35. El campo es más denso al interior de la bobina. Allí tiene siempre la dirección del eje del cilindro.

Tareas

1. ¿Cómo hay que enrollar una bobina para que no se produzca campo magnético al pasar una corriente eléctrica por ella?
2. ¿En qué dirección empuja el campo de una bobina a los alambres de la misma? ¿Cómo se relaciona esta presión con el sentido de la corriente eléctrica en la bobina?

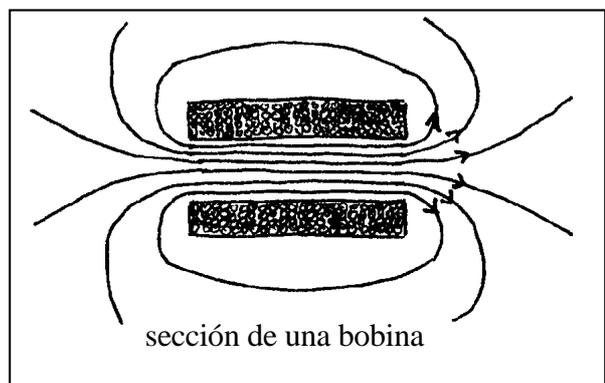


Fig. 18.35. Campo de una bobina cilíndrica

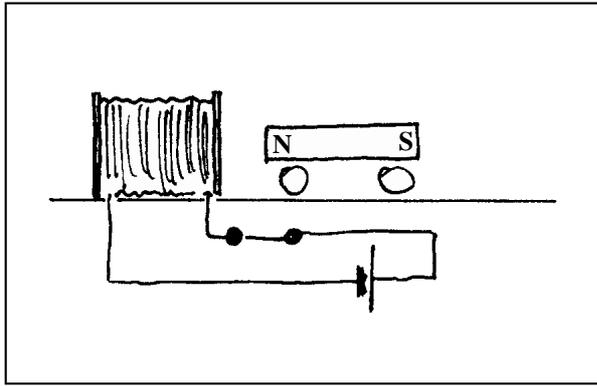


Fig. 18.36. El campo empuja al imán hacia la derecha.

18.10 El electroimán

Se monta un imán sobre un carrito. El carrito se coloca frente a una bobina, como lo muestra la Fig.18.36. Al cerrar el circuito eléctrico de la bobina, el carrito con su imán es atraído o repelido por la bobina – según el sentido de la corriente eléctrica en la misma.

Dejamos fluir la corriente de modo que el campo aleja al carrito y ponemos al mismo a tal distancia de la bobina que justo deja de actuar la repulsión, Fig.18.37. Ahora metemos por la izquierda un trozo de hierro dulce, un *núcleo de hierro* como se le llama, en la bobina. Como resultado el carrito nuevamente se pone en movimiento, repelido a mayor distancia de la bobina.

¿Cómo es que pasa esto? Recordamos lo que ocurre cuando se mete un trozo de hierro dulce en un campo magnético:

- el hierro dulce se magnetiza y se forman polos;
- el campo resulta desplazado.

En nuestro caso el campo es desplazado hacia fuera de la bobina. Según esto, es más denso en ambos extremos de núcleo de hierro, Fig.18.38. Los polos se forman en las caras del núcleo. La Fig.18.39.

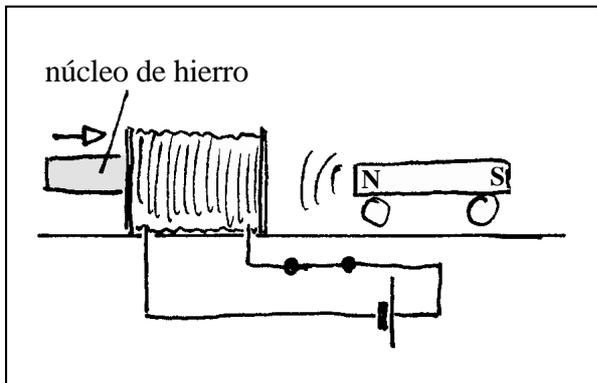


Fig. 18.37. Si se mete un núcleo de hierro en la bobina, el imán es repelido más hacia la derecha.

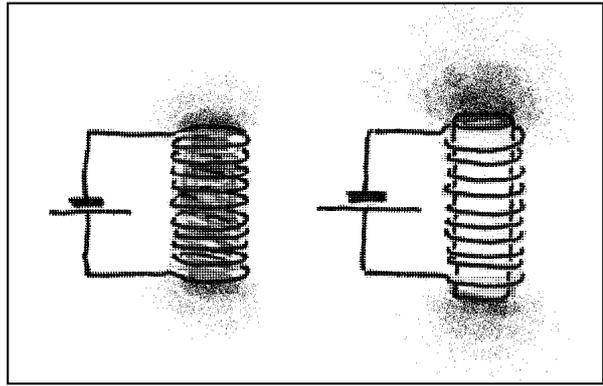


Fig. 18.38. El campo magnético es desplazado fuera de la bobina por el núcleo de hierro.

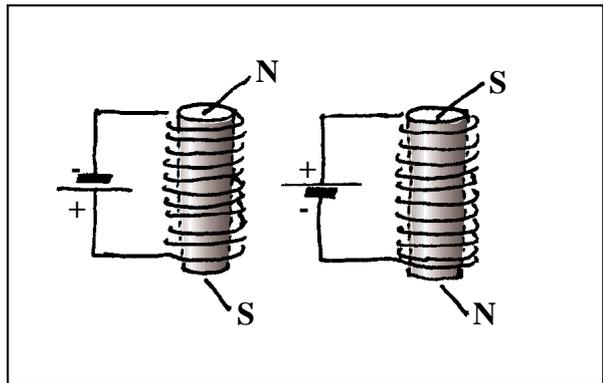


Fig. 18.39. Si se invierte el sentido de la corriente en la bobina, se intercambian los polos del imán.

muestra la relación entre la dirección de magnetización y el sentido en que fluye la corriente por la bobina.

De modo que hemos convertido nuestro trozo de hierro dulce en un imán. El núcleo y la bobina en conjunto constituyen un electroimán.

La gran ventaja de los electroimanes en comparación con los imanes permanentes es que se los puede conectar y desconectar. Incluso se pueden hacer potentes o débiles, y se les puede cambiar la polaridad.

Las figuras 18.40 a 18.42 muestran algunos ejemplos de cómo, con ayuda de electroimanes, se puede lograr atracción y repulsión.

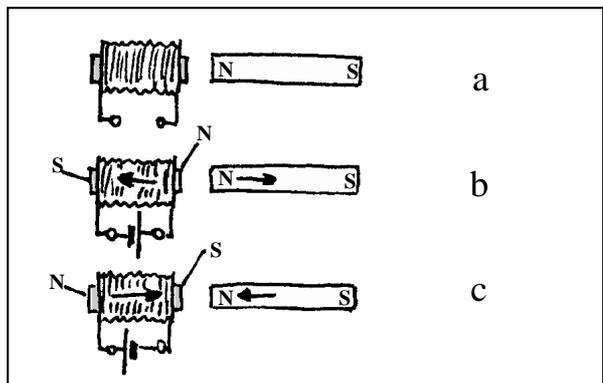


Fig. 18.40. Electroimán e imán permanente

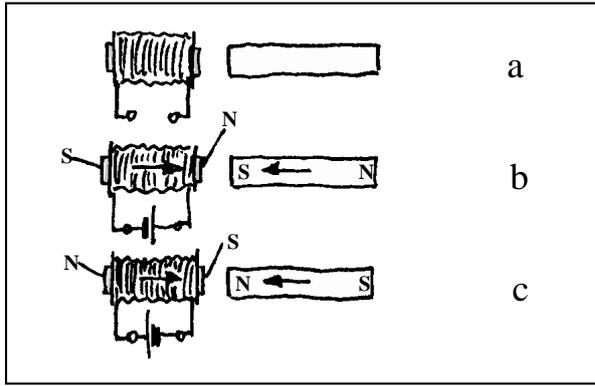


Fig. 18.41. Electroimán y hierro dulce

En la Fig.18.40a el electroimán está aún desconectado. En Fig.18.40b el polo norte del electroimán repele, con ayuda del campo, al imán permanente. En Fig.18.40c se invirtió el sentido de la corriente en la bobina. Donde antes estaba el polo norte del electroimán está ahora el polo sur. El polo sur del electroimán, con ayuda del campo, atrae al polo norte del imán permanente.

En Fig.18.41 se pone un trozo de hierro dulce delante del electroimán, en vez del imán permanente. Mientras el electroimán permanece desconectado, Fig.18.41a, no pasa nada, no hay polos magnéticos. Ahora conectamos el electroimán, Fig.18.41b. En el extremo derecho del electroimán se forma un polo norte, en el extremo izquierdo del hierro un polo sur. Estos polos se mueven, acercándose mutuamente. Ahora hacemos fluir la corriente en sentido opuesto, Fig. 18.41c. Se intercambian los polos del electroimán, pero también los del hierro. Por lo tanto, nuevamente tenemos atracción.

En Fig.18.42 se muestran, finalmente, dos posibilidades de combinación de dos electroimanes. En la primera parte tenemos repulsión, en la segunda, atracción.

Se han encontrado muchas aplicaciones para los electroimanes. La principal es el motor eléctrico. En la sección siguiente nos ocupamos de él en forma detallada. Veamos antes algunos dispositivos más sencillos que funcionan con electroimanes.

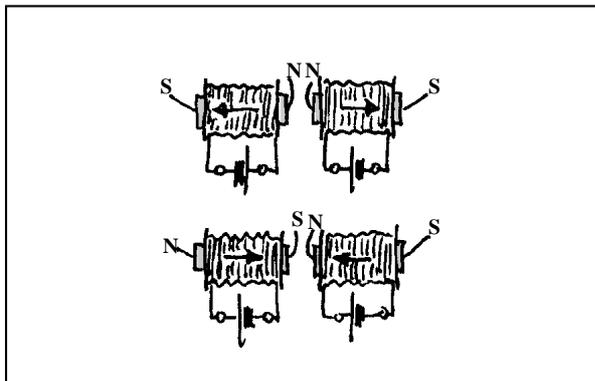


Fig. 18.42. Dos electroimanes

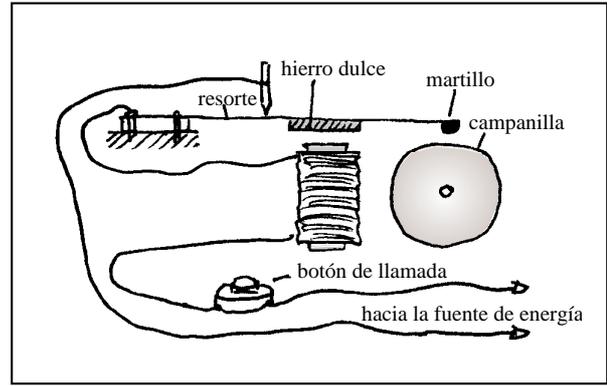


Fig. 18.43. El timbre eléctrico

El timbre eléctrico

Cuando se pulsa el timbre en primer lugar se cierra el circuito eléctrico, Fig.18.43. El electroimán atrae al cuerpo de hierro dulce, el martillo golpea contra la campanilla. Sin embargo, el movimiento (por atracción) del hierro interrumpe el circuito. El electroimán suelta al hierro, el circuito se cierra nuevamente, y así sucesivamente. De modo que el martillo golpea en rápida sucesión contra la campanilla. La bocina del auto funciona de manera parecida.

El portero automático

En el marco de la puerta, en los sacados para los pestillos, hay un electroimán. Al cerrar el circuito del imán, éste libera el pestillo, que desde dentro se puede abrir a mano. Ahora se puede abrir la puerta empujando desde fuera.

El reloj eléctrico

En los relojes que no se leen por cristales líquidos hay un electroimán. Por este imán pasa periódicamente, p. ej. cada segundo, un breve impulso de corriente eléctrica. Con cada impulso el imán hace avanzar los punteros del reloj.

Los Amperímetros

Un electroimán tira o empuja tanto más fuerte cuanto más intensa es la corriente eléctrica que pasa por él. Esto se aprovecha para medir intensidades de corriente. La Fig.18.44 muestra cómo podría funcionar un amperímetro. El resorte tira del imán permanente, que está montado de modo que puede girar, contra el tope. Si ahora fluye corriente por ambos electroimanes, en las caras de éstos se formarán polos. El campo magnético atrae ahora al polo norte del imán permanente hacia el polo sur del electroimán de la derecha, y al polo sur del imán permanente al polo norte del electroimán de la izquierda. Mientras más intensa la corriente, tanto mayor la carga de polos en los electroimanes y tanto mayor la atracción ejercida por el campo. Y mientras más tira el campo, tanto más gira el imán permanente y la aguja del instrumento.

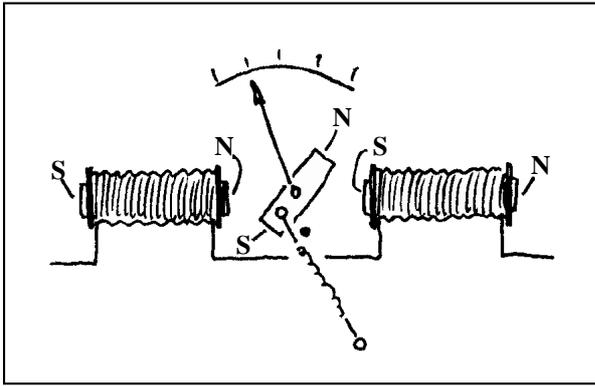


Fig. 18.44. Funcionamiento del amperímetro

Un verdadero amperímetro está construido de modo algo diferente, pero el principio de su funcionamiento es el mismo que el de nuestro primitivo instrumento de la Fig.18.44.

Interruptores automáticos

Los interruptores de protección domiciliaria deben abrir un circuito en cuanto la corriente se hace demasiado intensa. Un interruptor automático funciona de la siguiente manera: la corriente (en el circuito protegido) se hace pasar por la bobina de un electroimán. Cuando la corriente llega a un cierto valor, la fuerza del imán alcanza para accionar un conmutador que abre el circuito.

El relé

A veces se quiere controlar una corriente intensa mediante una corriente débil. Una posibilidad está dada por el relé, Fig.18.45. Si se cierra el conmutador S, en el circuito del electroimán fluye una débil corriente. El imán tira de un trozo de hierro dulce y cierra un circuito por el que puede circular una corriente muy intensa.

A lo mejor ya conoces esta aplicación del relé: cuando se gira la llave de contacto del auto hasta el tope, empieza a funcionar el motor de arranque. (El motor de arranque es un motor eléctrico que “echa a andar” el motor a bencina del auto. La energía le viene de la batería.) Por el motor de arranque pasa

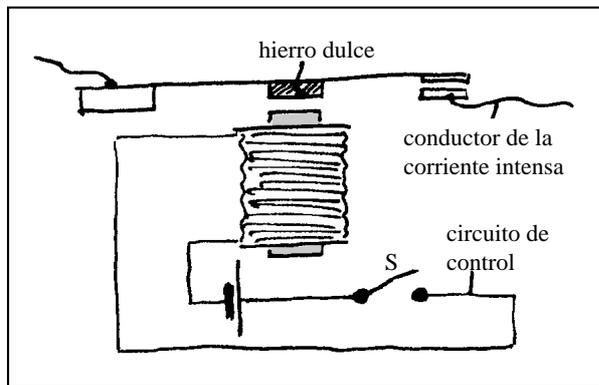


Fig. 18.45. Relé o relevador

una corriente muy intensa, de unos 100 A. Para una corriente tan intensa se necesita un conmutador grande y robusto. Tal conmutador sería demasiado grande para montarlo junto con la llave de contacto. Por ello, la corriente de arranque se conmuta mediante un relé. La débil corriente del relé se conmuta con un pequeño dispositivo incorporado junto a la llave de contacto.

Tareas

1. ¿En cuáles aparatos se usan electroimanes? Agrega aparatos que no estén señalados en el texto.
2. Inventa un timbre que funcione sólo con corriente alterna.
3. ¿Cómo responde el amperímetro de Fig.18.44 a la corriente alterna?. Inventa un amperímetro de corriente alterna.

18.11 El motor eléctrico

Nos vamos a construir un motor eléctrico. Empezamos con una versión muy primitiva. Nuestro motor se va a parecer al amperímetro de Fig.18.44.

La Fig. 18.46 muestra el motor visto desde arriba. A ambos lados hay un electroimán. Entre ellos está un imán permanente, en montaje giratorio. Conectamos la corriente. En las caras de los electroimanes se forman polos. La barra imán al centro gira entonces de tal manera que los polos de distinta denominación se acercan lo más posible. En cuanto el imán permanente se ha colocado en posición paralela a los electroimanes, invertimos la polaridad de la batería. Se intercambian entonces

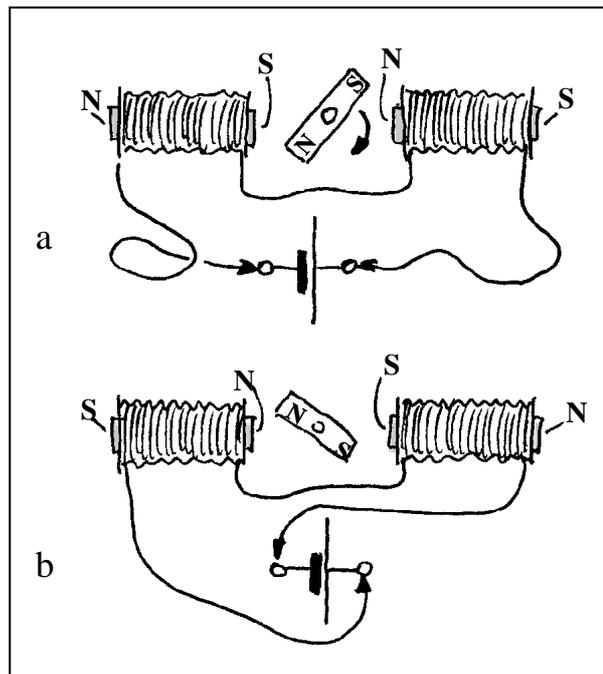


Fig. 18.46. Funcionamiento del motor eléctrico

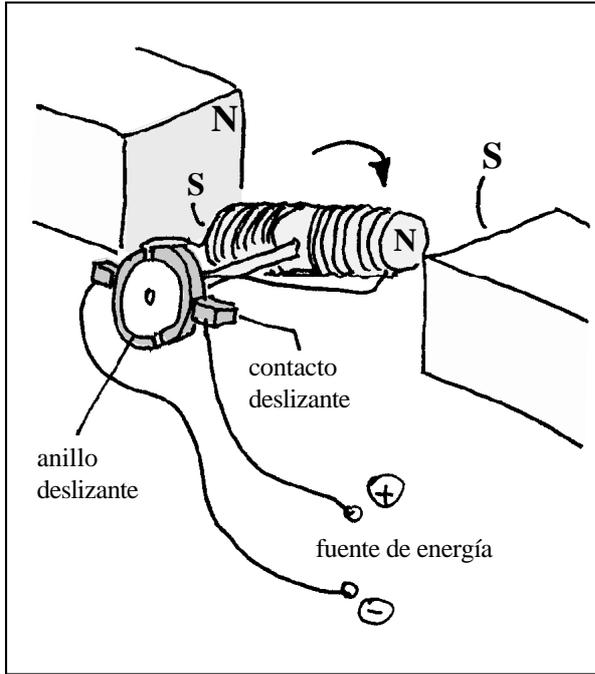


Fig. 18.47. Motor eléctrico

todos los polos de los electroimanes. Ahora los campos empiezan a separar a los polos vecinos, de modo que el giro de la barra imán continúa, Fig.18.46b. Después de otro medio giro debemos invertir nuevamente la polaridad de batería, y así sucesivamente. Los campos mantienen así en constante rotación al imán permanente.

Comprobarás, sin embargo, que es muy difícil hacer el cambio de polaridad en el instante justo. Es fácil perder el paso. Además, no es mucho lo que se puede hacer con semejante motor controlado a mano. Necesitamos un motor autocontrolado, un motor que automáticamente invierta el sentido de la corriente en sus bobinas después de cada medio giro.

Resulta que no es problema armar un control automático. Sólo necesitamos montar en el eje del motor un conmutador accionado por la misma rotación del eje.

Es especialmente cómodo efectuar la inversión de polaridad cuando intercambiamos los papeles del imán permanente y del electroimán: hacemos que el electroimán gire y dejamos fijo el imán permanente, Fig.18.47. Se dice que el electroimán es el rotor del motor. La corriente llega al rotor por dos contactos eléctricos deslizantes y un anillo de contacto partido en dos secciones aisladas eléctricamente entre sí. A estas secciones se conecta el electroimán.

Después de cada medio giro del rotor las secciones del anillo se cambian de uno a otro contacto deslizante: el terminal del electroimán conectado al polo positivo pasa ahora al polo negativo, el que estaba conectado al polo negativo pasa al positivo. De tal modo el sentido de la corriente en el electroimán cambia en el instante necesario.

Muchos auténticos motores eléctricos funcionan según este principio. Pero existe toda una serie de trucos adicionales que se usan en la construcción de motores eléctricos. Todos estos motores tienen una cosa en común: siempre es el campo magnético el que empuja o tira del rotor.

Tareas

1. El "motor" de Fig.18.46 se puede usar como motor de corriente alterna. Entonces no hay que cambiar la polaridad a mano. Tal motor se denomina motor sincrónico. ¿Qué problemas se presentan?
2. Diseña un motor eléctrico en el que ambos imanes, el rotor y el que queda fijo, son electroimanes.

18.12 El campo magnético de la tierra

Ya lo habíamos visto antes: si se cuelga una barra imán de tal modo que puede girar con facilidad en torno a un eje vertical, entonces el imán toma aproximadamente la dirección norte-sur. Uno de sus polos apunta al norte, el otro al sur, Fig.18.48. Denominamos polo norte al extremo del imán que apunta al norte, y polo sur al otro.

Toda brújula se basa en este efecto. La aguja de la brújula es, sencillamente, un imán permanente ligero y muy bien montado.

De hecho, una brújula no toma exactamente la dirección norte-sur. Además, la discrepancia entre ambas direcciones es distinta en distintos lugares de la Tierra. Y, además, varía lentamente con el tiempo.

En todo caso podemos concluir que la Tierra está rodeada de un campo magnético. Se ha comprobado que este campo penetra al interior de la Tierra.

¿De dónde viene este campo? Para empezar, puede haber dos causas. O la Tierra misma es un gigantesco imán permanente, o en la Tierra fluyen corrientes eléctricas. Antes se creía en la primera de estas hipótesis, que la Tierra era un gran imán permanente. En ese caso, la carga de polo norte de la

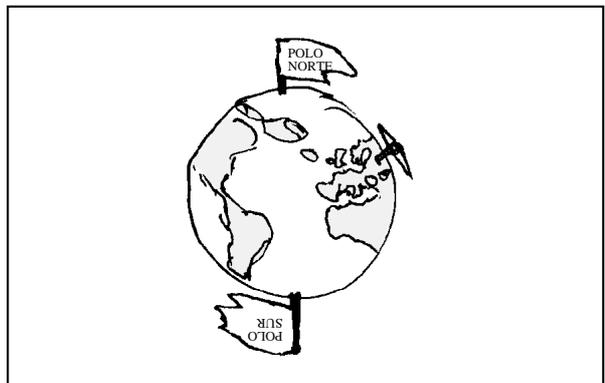


Fig. 18.48. Un imán en montaje giratorio toma la dirección norte-sur.

Tierra debería estar cerca del polo sur (geográfico), y la carga de polo sur cerca del polo norte (geográfico), puesto que la carga de polo norte de un imán viene atraída hacia el norte.

Sin embargo, ya en el siglo pasado se comprendió que esta hipótesis tenía que estar equivocada. Resulta que el interior de la Tierra está tan caliente que cualquier material perdería su magnetización. De manera que la causa del campo magnético terrestre sólo puede encontrarse en corrientes eléctricas. Hay diversas teorías para explicar cómo se originan estas corrientes. Aún hoy en día no está decidido cuál es la teoría correcta.

Tareas

1. ¿Por qué la brújula da indicaciones incorrectas al haber objetos de hierro en las cercanías?
2. Se montan dos brújulas (agujas imantadas) muy próximas una de otra. ¿En qué dirección apuntan?

18.13 Inducción

Se conecta un voltímetro a una bobina. Cuando se mete un imán permanente a la bobina, Fig. 18.49, el voltímetro marca – eso sí, solamente mientras el imán se mueve. Si se saca el imán, el voltímetro marca nuevamente, pero ahora en sentido contrario al anterior.

El sentido de la lectura del voltímetro también depende de si se mete el polo norte o el sur en la bobina.

Con el movimiento del imán se altera el campo magnético al interior de la bobina. Esta variación es la causa de la tensión entre terminales de la bobina.

Preguntémonos todavía qué pasa si cortocircuitamos la bobina durante el experimento. Lo hacemos, pero incluimos un amperímetro en el circuito con que puenteamos los terminales de la bobina. Resultado: al meter el imán el amperímetro marca, y otra vez al sacarlo (tú esperabas esto, probablemente).

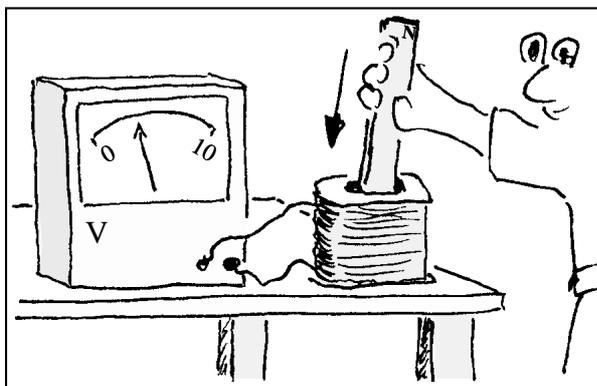


Fig. 18.49. El voltímetro marca mientras el imán se mueve.

A estos fenómenos se las llama *inducción*. Se dice que al mover el imán se *induce* una tensión o una corriente eléctrica.

Mientras más cambia el campo en la bobina, tanto mayor es la tensión inducida. Intentamos ahora producir una tensión inducida lo más alta posible. Tenemos que lograr que el campo en la bobina cambia lo más rápidamente, lo más intensamente posible.

Primero observamos que la tensión es tanto más alta cuanto más rápidamente movemos el imán. Finalmente, un movimiento muy, muy rápido ya no aumenta la lectura del instrumento de medición. Claro que esto se debe a que el instrumento “ya no se la puede”, tiene demasiada inercia. Si observamos mediante un osciloscopio vemos que con movimientos muy rápidos la tensión sí ha aumentado.

Para continuar, hacemos más intensa la variación del campo metiendo dos imanes en vez de uno en la bobina, y de tal manera que juntamos polos iguales, Fig. 18.50.

Un tercer método para intensificar el efecto de inducción consiste en usar una bobina con mayor número de vueltas.

Sin embargo, hay aún otra manera muy diferente de lograr la variación del campo en la bobina – a saber, sin que nada se mueva: colocando junto a la bobina un electroimán de tal manera que el campo penetre en la bobina, Fig. 18.51. Si se conecta o desconecta el electroimán, cambia también el campo al interior de la bobina, y se induce una tensión.

Si varía el campo magnético en una bobina, se produce entre los terminales de la misma una tensión eléctrica. Si el circuito está cerrado, fluye una corriente eléctrica. A este fenómeno se le llama inducción.

Finalmente ejecutamos una variante más del experimento de inducción. Metemos un núcleo de hierro dulce en la bobina y prolongamos este núcleo en forma de U. Ahora en la bobina no puede penetrar campo magnético. ¿No hay, entonces, inducción? Acercamos un imán permanente a los extremos del

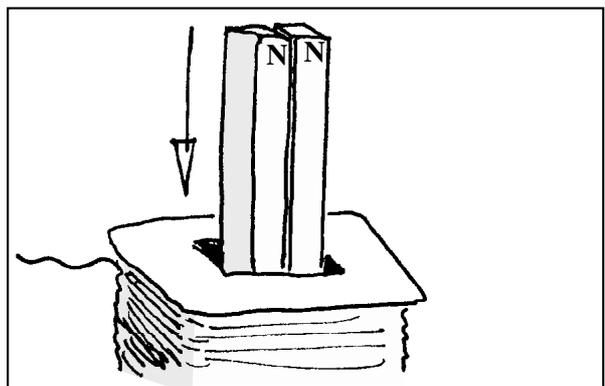


Fig. 18.50. Mientras más denso es el campo magnético, tanto mayor es la tensión inducida.

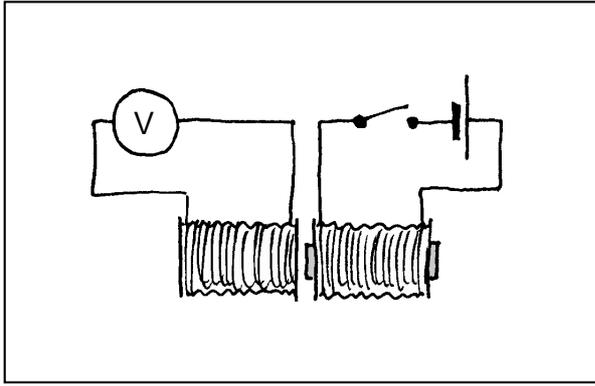


Fig. 18.51. Si se conecta o desconecta el electroimán, cambia la densidad del campo magnético en la bobina, y se induce una tensión.

núcleo de hierro, Fig.18.52, hasta que los polos del imán tocan estos extremos. Observación: el voltímetro marca. ¿Cómo es posible? Si en la bobina no ha pasado nada. ¡Pues sí, algo ha pasado! El núcleo de la bobina ha sido magnetizado, su magnetización cambió.

Invertimos ahora el imán permanente, de modo que su polo norte queda donde antes estaba el polo sur, y el polo sur donde antes estaba el norte. También en este proceso se induce una tensión en la bobina. El resultado del experimento es, en consecuencia:

También cuando varía la magnetización del material dentro de la bobina se induce una tensión (una corriente).

El funcionamiento de algunos importantes aparatos se basa en la inducción. A continuación conoceremos algunos de estos aparatos.

Tareas

1. Se trata de inducir una tensión en una bobina empleando un imán permanente. ¿Qué es lo que hay que hacer para lograr una tensión máxima? Señala tres procedimientos diversos.
2. Se sujeta una bobina de manera que su eje esté vertical, y así poder dejar caer objetos por el interior de la bobina. Se conecta un osciloscopio a los terminales de la bobina. Ahora se deja caer, a lo largo, una barra imán por la bobina. ¿Qué indica el osciloscopio?

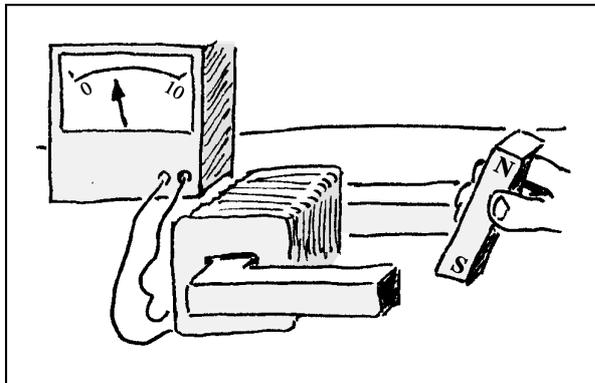


Fig. 18.52. También el cambio de la magnetización al interior de la bobina causa una tensión inducida.

18.14 El generador

Un generador hace justamente lo contrario de un motor eléctrico. En tanto que un motor recibe energía con el portador electricidad y la entrega con el portador momentum angular, Fig.18.53a, el generador recibe energía con el portador momentum angular y la entrega otra vez con la electricidad, Fig.18.53b.

Por lo tanto, la construcción de un generador no difiere, en principio, de la construcción de un motor eléctrico. Podemos emplear el motor esbozado en Fig.18.47 como generador. Sólo tenemos que reemplazar la fuente de energía por un receptor de energía, p. ej. por una ampolleta. Si ahora se hace girar muy rápidamente el eje, la ampolleta empieza a iluminarse. La explicación del funcionamiento del generador no es difícil: el núcleo de hierro de la bobina giratoria cambia de dirección de magnetización dos veces por vuelta por la acción del imán permanente fijo. En cada inversión se induce una tensión entre los terminales de la bobina. El signo de la tensión cambia dos veces por vuelta. Los contactos deslizantes y el anillo seccionado se encargan de que en los terminales del generador se obtenga una tensión del mismo signo siempre. (El valor de esta tensión no es, sin embargo, constante en el tiempo; es decir, esto no es una verdadera tensión continua.)

Es más sencillo aún armar un generador de tensión alterna. ¿Sabes cómo?

El generador es una de las máquinas más importantes en una central eléctrica.

A menudo los generadores se llaman por otros nombres: en la bicicleta, dínamo, en el auto, alternador.

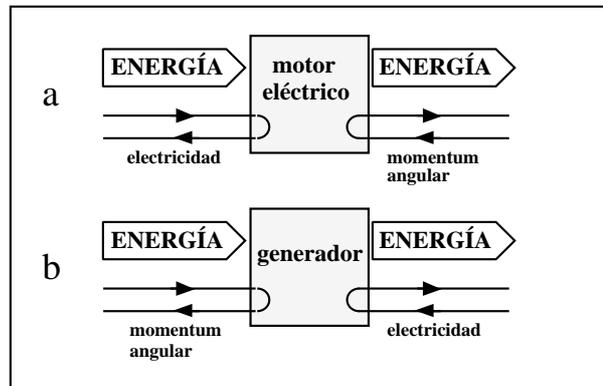


Fig. 18.53. Diagramas de flujo del motor eléctrico y del generador

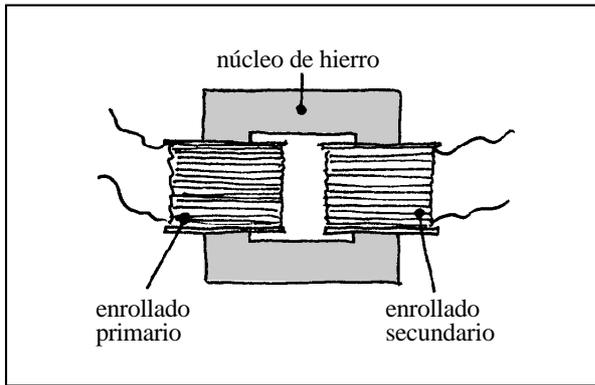


Fig. 18.54. Construcción del transformador

18.15 El transformador

Muchos aparatos eléctricos, p. ej. radios a transistores, tocacintas y motores de juguetes tienen que funcionar con una tensión mucho más baja que los 220 V del enchufe. Si se quiere conectar estos aparatos a la red, hay que bajar o “transformar” la tensión de 220 V a un valor más bajo. Para esto se conecta entre aparato y enchufe un *transformador*.

Un transformador consiste en un núcleo de hierro y dos bobinas, Fig.18.54. Una de las bobinas, denominada primario, se conecta al enchufe; a la otra, el secundario, se conectan el receptor de energía, es decir, el aparato que se quiere hacer funcionar.

Vamos a familiarizarnos con el funcionamiento del transformador. Conectamos una de las bobinas a una ampolla, la otra a una batería, pasando por un conmutador, Fig.18.55. Al cerrar el conmutador la ampolla se enciende brevemente. Al abrir el conmutador, la ampolla nuevamente se enciende por breve tiempo. Podemos explicarlo fácilmente: tanto al cerrar como al abrir el conmutador cambia la magnetización en todo el núcleo de hierro. Como cambia también, en particular, al interior del secundario, en esta bobina se induce una tensión.

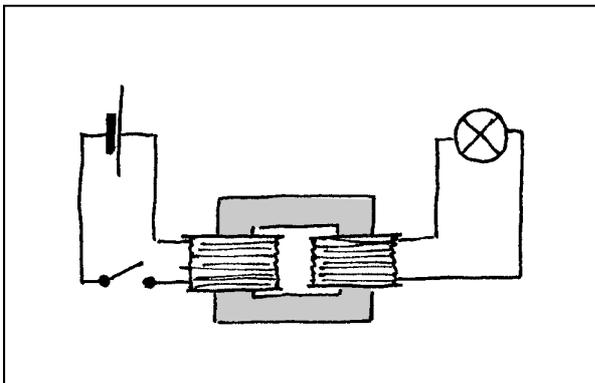


Fig. 18.55. Al cerrar o abrir el conmutador la ampolla se enciende brevemente.

Para que la ampolla permanezca encendida habría que conmutar la corriente en el primario permanentemente, en rápida sucesión. En vez de eso se puede sencillamente conectar el primario con una fuente de tensión alterna. Por cierto, la tensión inducida en el secundario también es alterna. Vemos así que un transformador funciona solamente con tensión alterna.

¿Cómo se hace para bajar o subir una tensión mediante un transformador? La cuantía de la tensión inducida depende del número de vueltas de ambas bobinas. Vamos a investigar en qué forma depende.

Para eso armamos transformadores con bobinas de variados números de vueltas. Comprobamos primero que si ambas bobinas, el primario y el secundario, tienen el mismo número de vueltas, entonces las tensiones en ambas bobinas son las mismas. Si el secundario tiene el doble del número de vueltas que el primario, entonces la tensión secundaria es el doble de la primaria. En general vale:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

donde U_1 , U_2 son las tensiones en las bobinas primario y secundario y n_1 , n_2 los correspondientes números de vueltas.

Mientras la corriente eléctrica fluye en circuitos separados en el transformador, Fig.18.56a, la energía fluye del primario al secundario, Fig.18.56b.

La intensidad P_1 de la corriente de energía que fluye al transformador es igual, salvo pequeñas pérdidas, a la intensidad P_2 de la corriente de energía que sale del transformador. Por lo tanto

$$P_1 = P_2$$

y debido a

$$P = U \cdot I$$

debe verificarse

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

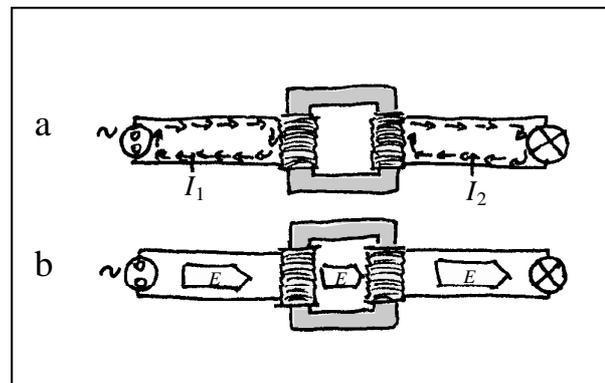


Fig. 18.56. Caminos de la corriente eléctrica (a) y de la corriente de energía (b)

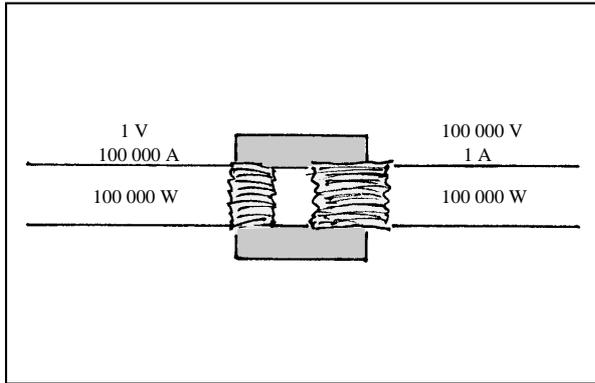


Fig. 18.57. Ver tarea 4

U_1, U_2, I_1, I_2 son las tensiones e intensidades de corriente da bobina primario y secundario, respectivamente.

De la última ecuación se deduce que al bajar la tensión en el transformador debe aumentar la intensidad de corriente en el mismo factor. De la misma manera, con un aumento de tensión está aparejada una disminución de la intensidad de corriente.

Tareas

1. Las bobinas de un transformador tienen 1000 y 2000 vueltas, respectivamente. Se dispone de una tensión alterna de 220 V. ¿Qué tensiones podemos obtener con el transformador?
2. El primario de un transformador está conectado a un enchufe. En el secundario se mide una tensión de 11 V. ¿Qué es lo que puede afirmarse de las bobinas del transformador? En el secundario circula una corriente de 2 A. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que circula en el primario?
3. Un transformador tiene un primario de 1000 vueltas y un secundario de 10 000 vueltas. El primario se conecta al enchufe. La corriente en el primario es de 100 mA. ¿Cuáles son los valores de tensión y de corriente en el secundario?
4. Por el transformador de Fig. 18.57 pasa una corriente de energía de 100 kW. ¿Qué exigencias debemos hacerle a los conductores que alimentan el primario, que salen del secundario? ¿Por qué el transporte eléctrico de energía se hace de preferencia a alta tensión?

18.16 El campo magnético de corrientes inducidas

Revisa nuevamente la sección 18.10. Allí vimos que un electroimán

- puede atraer o repeler a un imán permanente, Fig.18.44;
- puede atraer o repeler a otro electroimán, Fig. 18.46;
- en cambio, siempre atrae a un trozo de hierro dulce, Fig.18.45.

Hacemos ahora algunos experimentos muy parecidos a los descritos en la sección 18.10, Fig. 18.58. Primero colocamos junto a un electroimán una bobina, a saber, de tal manera que pueda moverse y que por lo tanto pueden observarse atracción o repulsión – si es que se producen. Conectamos el electroimán y no pasa nada – como probablemente lo esperabas. En fin de cuentas, una bobina en que no fluye corriente no es un imán, y tampoco es un trozo de hierro.

Ahora variamos el experimento sólo un poquito: puenteamos los terminales de la bobina. Otra vez conectamos el electroimán. Resultado: hay repulsión de la bobina. ¿Cómo es que pasa esto?

Sólo puede explicarse admitiendo que en la bobina circuló una corriente. Pero, ¿cómo se forma esta corriente en la bobina? Por inducción, naturalmente. Al conectar el electroimán cambia el campo magnético en la bobina, de modo que en la misma se induce una corriente. Esta corriente a su vez causa un campo magnético. Ambos campos en conjunto – el del imán y el de la bobina – producen la repulsión. La repulsión, sin embargo, desaparece

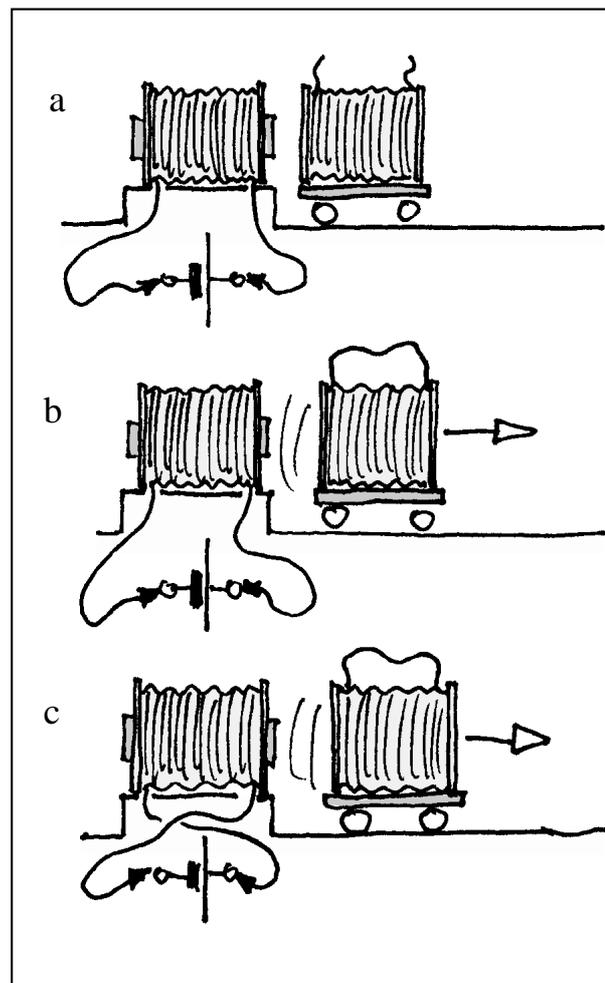


Fig. 18.58. (a) Una bobina en circuito abierto no experimenta ni atracción ni repulsión. (b) y (c) Una bobina puenteada (o "cortocircuitada") es siempre repelida al conectar el electroimán, sin importar el sentido en que fluye la corriente.

24. Cantidad reaccionante y potencial químico

Iniciemos con una sencilla definición de qué es la Química: la química se ocupa de las transformaciones de las sustancias. Por ejemplo describe la reacción en la cual la gasolina y el oxígeno se transforman en dióxido de carbono y agua, es decir, la combustión de la gasolina:

gasolina, oxígeno \rightarrow dióxido de carbono, agua

Esta definición de la Química es aún provisional, ya que por una parte los químicos no sólo se ocupan de reacciones y por otra existen transformaciones de sustancias que no pertenecen a la Química sino a la Física nuclear. Pero para empezar esta definición es suficiente.

La Química es un pariente próximo de la Física, en general sería razonable considerar la Química y la Física como un campo único de las ciencias. La razón de que exista distinción entre Física y Química, de que existan dos asignaturas diferentes en la escuela y en la universidad, y de que la profesión de químico no sea idéntica a la de físico, es más bien práctica. Una materia común “Química + Física” sería simplemente demasiado amplia; una sola persona no la podría dominar.

Muchos de los métodos de trabajo de los físicos y los químicos son similares, en Química también se utilizan las mismas herramientas teóricas que en Física: se pueden describir reacciones químicas por medio de magnitudes físicas y de las relaciones entre ellas. Esta parte de la Química que se orienta más a la Física se llama *Fisicoquímica*.

Ya conoces algunas de las magnitudes que se utilizan en la Fisicoquímica: la temperatura, la presión y la entropía. Pero conocerás algunas magnitudes nuevas.

En termodinámica para medir la *cantidad* de calor se introduce una magnitud llamada entropía S , tabla 24.1. En electricidad se trabaja con una magnitud que mide la *cantidad* de electricidad: la carga eléctrica Q . En mecánica se utiliza una magnitud que mide la *cantidad* de movimiento: el momento p . Así mismo, en Química es necesaria una magnitud que mida la *cantidad* de cualquier sustancia, se ha llamado *cantidad de sustancia* y se representa por el símbolo n .

En cada uno de los campos mencionados se tiene que ver con otra magnitud característica, cuyos valores indican de dónde a donde fluye la *cantidad* correspondiente.

Así, por ejemplo, los valores de la temperatura indican en qué dirección fluye la entropía: de la temperatura más alta a la más baja. El potencial eléctrico muestra la direc-

ción en que fluye la carga eléctrica, y las velocidades de dos cuerpos indican la dirección de la corriente de momento en un proceso de fricción.

Análogamente se tiene una magnitud “química”, que indica la dirección de una reacción química, dicha magnitud es el *potencial químico*, representado por la letra griega μ . El potencial químico muestra por ejemplo si la siguiente reacción ocurre por sí sola de izquierda a derecha o de derecha a izquierda:

hidrógeno, nitrógeno \leftrightarrow amoníaco,

Es decir, si el hidrógeno y el nitrógeno se transforman en amoníaco, o si el amoníaco se descompone en hidrógeno y nitrógeno.

24.1 Cantidad de sustancia y corriente de cantidad de sustancia

El nombre de la magnitud n indica claramente su significado: es una medida para la cantidad de sustancia, su unidad es el mol. Un mol contiene $6,022 \cdot 10^{23}$ partículas más pequeñas de la sustancia considerada. En general no es fácil decidir cuales son las “partículas más pequeñas” de una sustancia.

A menudo las partículas más pequeñas son las moléculas, por ejemplo, un mol de hidrógeno gaseoso contiene $6,022 \cdot 10^{23}$ moléculas de H_2 . Para algunas sustancias las partículas más pequeñas son los átomos, es el caso del helio gaseoso, cuyo mol contiene $6,022 \cdot 10^{23}$ átomos de helio. La situación no es tan sencilla para las sustancias sólidas. En principio se podría considerar un cristal de sal común como una sola “molécula” gigantesca, el cristal se compondría de una única “partícula más pequeña”. Sin embargo, en este caso es habitual tomar como partícula más pequeña un ión sodio (Na^+) más un ión cloruro (Cl^-), conformando la llamada unidad fórmula o fórmula unitaria $NaCl$. En adelante al hacer referencia a 1 mol de sal

Tabla 24.1. Sinopsis de algunas magnitudes de la Física y de la Química

Mecánica	p = momentum (cantidad de movimiento)
Electricidad	Q = carga eléctrica (cantidad de electricidad)
Termodinámica	S = entropía (cantidad de calor)
Química	n = cantidad de sustancia

común se estará indicando $6,022 \cdot 10^{23}$ de dichas unidades fórmula.

En lugar de afirmar que una sustancia se compone de partículas más pequeñas, se puede decir que existe una cantidad de sustancia mínima, la cual se puede expresar en mol. Dicha cantidad mínima recibe el nombre de *cantidad elemental*.

Entonces

$$\begin{aligned} 6,022 \cdot 10^{23} \text{ partículas: } & 1 \text{ mol} \\ 1 \text{ partícula: } & \frac{1}{6,022 \cdot 10^{23}} \text{ mol} \\ & = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ mol} \end{aligned}$$

Es decir, la cantidad elemental es igual a $1,66 \cdot 10^{-24}$ mol.

Los químicos miden la cantidad de una sustancia en mol, ¿pero por qué? ¿Por qué no la miden en kilogramos o en litros como otros? En Química muchas cosas se simplifican al utilizar la magnitud “cantidad de sustancia” en lugar de la masa o el volumen.

Para entender esto recreemos el dialogo que podrían tener un músico, un físico y una química:

Se tiene un tubo de ensayo con hierro pulverizado, y otro con azufre.

Músico: ¿Qué es? ¿Hierro y azufre?

Físico: Cierto, se ve.

Músico: Ah sí. Hay más azufre que hierro, como dos veces más. Esto también se ve.

Físico: ¡No! Tómalo en la mano. ¿No sientes que el hierro es más pesado? Mira, la balanza lo indica: 14 g de hierro y solamente 8 g de azufre.

Química: ¿Cómo decían? (sorpresa) Yo lo veo de un modo diferente. Miren esto... (*Mezcla las dos sustancias y las calienta por medio del mechero de gas. Al arder la mezcla se produce una reacción química.*) De la reacción no queda ni hierro ni azufre, lo cual prueba que había la misma cantidad de hierro y de azufre. Era 1/4 de mol de cada una de las sustancias.

De esta conversación se observa que la clasificación en las categorías “más” o “menos” depende de cuál magnitud se emplea para medir una cantidad.

Para comprender mejor la anterior conversación, analicemos la reacción que la química ha realizado:



Esta ecuación tiene una interpretación muy sencilla sobre el balance de la reacción, siempre y cuando las cantidades de las sustancias se midan en mol. La ecuación muestra que la cantidad de hierro que reacciona es igual a la de azufre, e indica que la cantidad de sustancia de sulfuro de hierro que se forma es igual a la de hierro que desaparece, así como también a la de azufre.

Si partimos de 1 mol de hierro, entonces se tiene que:



Si, por el contrario, se miden las porciones de las sustancias en kg, es decir, si se miden sus masas, el balance se hace más complicado. Por ejemplo, al reaccionar 1 kg de hierro se consumen en dicho proceso 0,5741 kg de azufre, para formar 1,5741 kg de sulfuro de hierro:



Se ve que la masa del azufre y la del sulfuro de hierro admiten valores no enteros.

Veamos otro ejemplo para comprender mejor el significado de una ecuación de reacción: la reacción de hidrógeno con oxígeno, en la cual se produce agua, ecuación muy conocida de la clase de Química:



Esta ecuación indica las proporciones entre las cantidades de las diversas sustancias que participan en la reacción, a condición de que las cantidades se midan en mol (y no en kg o litros). Se tiene que:

$$n(\text{H}_2) : n(\text{O}_2) : n(\text{H}_2\text{O}) = 2 : 1 : 2 .$$

La ecuación (1) nos da información solamente sobre las *proporciones* entre las magnitudes $n(\text{H}_2)$, $n(\text{O}_2)$ y $n(\text{H}_2\text{O})$. Dicha ecuación corresponde no sólo a la reacción:



sino que también puede corresponder a reacciones tales como:



o



Ya que la ecuación de reacción expresa las proporciones entre las cantidades de sustancia, se puede escribir de muchas maneras distintas, por ejemplo así:



Las ecuaciones (1), (2) y (3) contienen la misma información, sin embargo, en general se acostumbra escribir la ecuación de reacción de tal manera que antecediendo a los símbolos de las sustancias figuren números enteros y que estos sean lo más pequeños posible. En nuestro caso la ecuación (1) corresponde a dicha forma, la cual se ha llamado *forma normal* de la ecuación de reacción.

En adelante se empleará la magnitud n para medir la cantidad de una sustancia; sin embargo, hay que anotar que para ello no se dispone de un instrumento tan sencillo como el que sirve para determinar el valor de la masa (una balanza). Para determinar el valor de la cantidad de sustancia n , se debe dar un rodeo. En la Tabla Periódica (véase p. 25) se encuentra la masa de un mol para cada elemento, el segundo de los números representa la masa por cantidad de sustancia, es decir, el cociente m/n , cuyo valor se da en g/mol.

Así, por ejemplo, para el cobre figura:



Quiere decir que para el cobre $m/n = 63,5 \text{ g/mol}$, lo cual significa que la masa de 1 mol de cobre es igual a 63,5 g.

Para determinar la masa de un mol de un compuesto químico cualquiera, sencillamente se efectúa la suma de los valores m/n de los elementos que forman el compuesto. Si en una molécula, un átomo aparece dos, tres, o más veces, los valores de m/n se sumarán también dos, tres, o más veces.

Ejemplo:

¿Cuál es la masa de un mol de Fe_2O_3 ?

En la tabla periódica se encuentra para el hierro:



y para el oxígeno



Por consiguiente, la masa de un mol de Fe_2O_3 es

$$m = 2 \cdot 55,8 \text{ g} + 3 \cdot 16,0 \text{ g} \approx 159,6 \text{ g} .$$

A menudo, una reacción química ocurre de manera continua, por ejemplo la reacción de combustión en la llama de una vela o en un quemador de la calefacción; la mayoría de las reacciones en la industria química son reacciones continuas. Para determinar si en una reacción de ese tipo se produce mucho o poco de cierta sustancia, no es conveniente indicar el valor de la cantidad de sustancia n , ya que dicha cantidad aumenta continuamente para los productos de la reacción. Una magnitud más apropiada en este caso es la cantidad de sustancia por tiempo, es decir, el número de mol que en cada segundo se forma, o el número de mol que en cada segundo se obtiene del dispositivo de reacción.

Esta magnitud se llama la *corriente de sustancia* I_n , teniendo entonces que:

$$I_n = \frac{n}{t} .$$

La unidad de medición de la corriente de sustancia es el mol/s.

Ejercicios

1. ¿Cuál es la masa de 1 mol de las siguientes sustancias?

H_2O (agua), O_2 (oxígeno), CO_2 (dióxido de carbono), Ag_2S (sulfuro de plata), $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (nitrato de plomo), $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ (azúcar de caña).

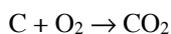
2. ¿Cuántos mol de azúcar contienen 100 g de caramelos? (Caramelos son prácticamente en un 100 % azúcar de caña.)

3. ¿Cuál es la cantidad de sustancia de 1 litro de agua?

4. Un recipiente contiene 12 kg de propano (C_3H_8). ¿Cuántos mol son?

24.2 Cantidad reaccionante y tasa de reacción

Analicemos la siguiente reacción, que se producirá con dos cantidades diferentes:



La primera vez se quemó 1 mol de carbono, obteniendo que:



La segunda se quemó 5 mol de C, es decir:

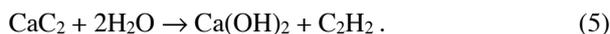


Se observa que la segunda vez han reaccionado cantidades de sustancia mayores, se dice que la *cantidad reaccionante* ha sido 5 veces mayor.

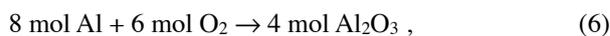
Comparemos ahora dos reacciones distintas, la oxidación de aluminio:



y la producción de etino y hidróxido de calcio a partir de carburo de calcio y agua



Supongamos que en el primer caso se han oxidado 8 mol de aluminio, es decir



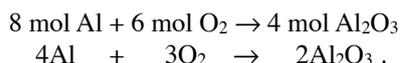
y en el segundo se han producido 3 mol de etino:



¿En cuál de los dos casos se presenta más „cantidad reaccionante“? Buscamos una medida para una „cantidad reaccionante“. Al comparar las sustancias iniciales, resulta que en la primera reacción – ecuación (6) – intervinieron un total de 14 mol, mientras en la segunda – ecuación (7) – solamente 9 mol. Si por el contrario se comparan los productos de las dos reacciones, se obtiene que la „cantidad“ de la segunda reacción es mayor: 6 mol contra 4 mol.

Se ve que es necesario definir una „cantidad reaccionante“ que no permita dicha ambigüedad.

Analicemos nuevamente la reacción (6), escribiendo primero la ecuación con el número de moles, y debajo la *forma normal* de la ecuación:



Ahora tomemos cualquiera de las sustancias, por ejemplo el aluminio, y dividamos la cantidad de sustancia por el número que antecede al símbolo Al en la forma normal:

$$\frac{8 \text{ mol}}{4} = 2 \text{ mol} .$$

Al efectuar la misma operación con las demás sustancias, se obtiene siempre el mismo resultado. Para el oxígeno:

$$\frac{6 \text{ mol}}{3} = 2 \text{ mol}$$

y para la alumina

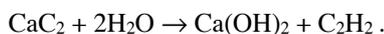
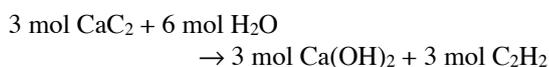
$$\frac{4 \text{ mol}}{2} = 2 \text{ mol} .$$

Este resultado, obtenido por tres vías diferentes, se llama la *cantidad reaccionante*, y se representa con el símbolo $n(\text{R})$. Se tiene entonces que:

$$n(\text{R}) = \frac{\text{cantidad de sustancia de X}}{\text{número que antecede a X en la forma normal}}$$

Donde X representa cualquiera de las sustancias que participan en la reacción.

Empleemos la anterior definición en la reacción (7):



Para determinar la cantidad reaccionante, se toma una sustancia, el H_2O por ejemplo, obteniendo:

$$n(\text{R}) = 6 \text{ mol}/2 = 3 \text{ mol} .$$

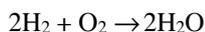
Con cualquier otra sustancia de la ecuación se obtiene el mismo resultado. Se puede concluir que la cantidad reaccionante de la reacción (7) es mayor (3 mol) que la de la reacción (6) (2 mol).

Al comparar dos reacciones continuas, ya no se puede considerar la cantidad reaccionante $n(\text{R})$, puesto que ella está creciendo sin cesar. Se debe comparar la cantidad reaccionante por tiempo, o *tasa de reacción* $I_{n(\text{R})}$, cuya unidad de medición es mol/s:

$$I_{n(\text{R})} = \frac{n(\text{R})}{t} .$$

La unidad de medición es el mol/s.

Supongamos que la reacción



se realiza con una tasa de reacción de

$$I_{n(\text{R})} = 0,02 \text{ mol/s} .$$

Al multiplicar la ecuación en su forma normal por 0,02 mol/s, se obtiene:



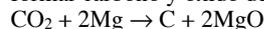
Lo cual significa que en cada segundo 0,04 mol de hidrógeno reaccionan con 0,02 mol de oxígeno para formar 0,04 mol de agua.

Ejercicios

1. Completa la siguiente ecuación de reacción y calcula la cantidad reaccionante:



2. El dióxido de carbono puede reaccionar con el magnesio para formar carbono y óxido de magnesio:



a) Si se forman 4 g de carbono, escribe la ecuación de reacción con las cantidades de sustancia correspondientes.

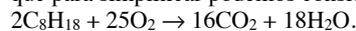
b) ¿Cuántos gramos de dióxido de carbono y cuántos de magnesio reaccionan?

c) ¿Cuántas moléculas de CO_2 desaparecen?

d) ¿Cuál es la cantidad reaccionante?

3. En una llama de metano se forma 0,1 mol de agua por segundo. ¿Cuál es la tasa de reacción?

4. En los cilindros de un motor de automóvil se quema gasolina, que para simplificar podemos considerar como octano puro:

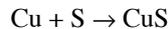


Si se forman 10 l de agua mientras el coche recorre una distancia de 100 km, con una velocidad de 50 km/h. ¿Cuál es la tasa de reacción?

24.3 El potencial químico

Se dice que las sustancias A1, A2, A3, etc. pueden “reaccionar en principio”, de modo que se formen las sustancias B1, B2, B3, etc., cuando la reacción no está prohibida por la ecuación de reacción.

Así la reacción

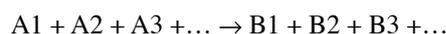


no está prohibida, mientras que en la reacción



el balance del cobre no es correcto.

Consideremos la reacción:



O, en forma abreviada:



donde



y



Si la reacción (8) no está prohibida por la ecuación de reacción, entonces la reacción en sentido opuesto tampoco lo es:



Pero, ¿cuál de las dos reacciones (8) ó (9) se produce en realidad? ¿Se transforma la sustancia A en B, o viceversa? ¿En qué dirección se desarrolla la reacción



de izquierda a derecha, o de derecha a izquierda?

Para tener información sobre la dirección de una reacción se emplea una nueva magnitud física: el *potencial químico* μ . Para cada uno de los conjuntos de sustancias A y B, μ tiene cierto valor. Si el potencial químico de las sustancias A $-\mu(A)$ es mayor que el potencial de las sustancias B $-\mu(B)$, la reacción ocurre hacia la derecha, es decir, de A a B. Si $\mu(A)$ es menor que $\mu(B)$ la reacción se producirá de derecha a izquierda, y si $\mu(A)$ y $\mu(B)$ son iguales la reacción no puede darse, se dice entonces que las sustancias se encuentran en estado de *equilibrio químico*.

$\mu(A) > \mu(B)$: desaparición de A, aparición de B;

$\mu(A) < \mu(B)$: desaparición de B, aparición de A;

$\mu(A) = \mu(B)$: no hay reacción, equilibrio químico

O, en términos menos exactos, pero posiblemente más sencillos de aprender, se dice que:

Una reacción ocurre por sí sola del potencial químico más alto al más bajo.

Lo cual también se puede expresar así:

La diferencia del potencial químico es la fuerza motriz de una reacción.

La unidad de medición del potencial químico es el *Gibbs*, abreviado G, en memoria de Josiah Willard Gibbs (1839-1903), científico que introdujo dicha magnitud en la Física.

Para cada sustancia el potencial químico a un valor determinado. Preguntamos primero por los potenciales de sustancias puras, es decir no de los conjuntos de sustancias.

Para cada sustancia el potencial químico tiene un valor determinado; los potenciales químicos de las sustancias puras, se encuentran en tablas. El potencial químico cambia con la temperatura y la presión de la sustancia. En general las tablas contienen el potencial en *condiciones normales*, entendiéndose por éstas una presión de 10^5 Pa y una temperatura de 25 °C. La tabla que figura en el apéndice (página 27) contiene los potenciales químicos para cerca de 800 sustancias.

La medición del potencial químico puede ser dispendiosa, más adelante se verá como se pueden obtener dichos valores, por el momento bastará con la mencionada tabla.

Para encontrar, por ejemplo, el potencial químico del etanol C_2H_5OH (alcohol etílico), se busca por su fórmula molecular (C_2H_6O), encontrando:

$$\mu(C_2H_6O) = -174,89 \text{ kG},$$

donde kG significa kilogibbs. Para el caso del agua, figura como:

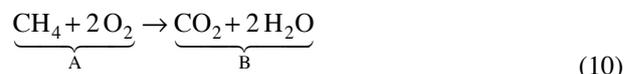
$$\mu(H_2O) = -237,18 \text{ kG}.$$

Los potenciales de las sustancias puras de por sí no son muy útiles; al tratar de definir si un conjunto de sustancias se puede transformar en otro conjunto, lo que hace falta es el potencial químico del conjunto de sustancias

($A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$), el cual es fácil de calcular si se conocen los potenciales de las sustancias puras A_1, A_2, A_3 , etc. Se tiene que:

$$\mu(A) = \mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(A_3) + \dots$$

Si la sustancia de un conjunto figura en la ecuación con un determinado factor, éste se debe tener en cuenta en la suma. Veamos como ejemplo la combustión del metano (componente principal del gas natural):

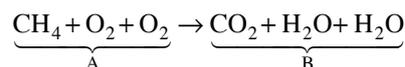


$$\begin{aligned} \mu(A) &= \mu(CH_4) + 2 \mu(O_2) \\ &= -50,81 \text{ kG} + 2 \cdot 0 \text{ kG} \\ &= -50,81 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(B) &= \mu(CO_2) + 2 \mu(H_2O) \\ &= -394,36 \text{ kG} + 2(-237,18) \text{ kG} \\ &= -868,72 \text{ kG} \end{aligned}$$

Los valores de $\mu(CH_4)$, $\mu(O_2)$, $\mu(CO_2)$ y $\mu(H_2O)$ se han obtenido de la tabla.

Se ve claramente que es necesario tener en cuenta los factores numéricos de la ecuación de reacción en la fórmula para el potencial químico. La ecuación de reacción (10) puede escribirse así:



Al calcular los potenciales químicos $\mu(A)$ y $\mu(B)$, sumando los potenciales de los componentes de A y de B, se obtiene el mismo resultado anterior:

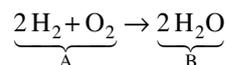
$$\begin{aligned} \mu(A) &= \mu(CH_4) + \mu(O_2) + \mu(O_2) \\ &= \mu(CH_4) + 2 \mu(O_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(B) &= \mu(CO_2) + \mu(H_2O) + \mu(H_2O) \\ &= \mu(CO_2) + 2 \mu(H_2O) \end{aligned}$$

Ahora se puede proceder a definir en qué dirección se puede efectuar una reacción química, tomemos nuevamente la reacción (10). ¿Se transforma el metano y el oxígeno en dióxido de carbono y agua, o al contrario? Se mostró que el potencial químico del conjunto A es superior al del conjunto B, por lo cual la reacción se desarrolla de A a B, es decir, de izquierda a derecha.

Para familiarizarse con el método, apliquémoslo a algunas reacciones, en las cuales se conoce la dirección en que transcurren.

Reacción de gas detonante



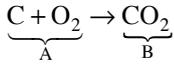
$$\mu(A) = 2\mu(H_2) + \mu(O_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = 2 \mu(H_2O) = 2(-237,18) \text{ kG} = -474,36 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 474,36 \text{ kG}$$

Como se sabía, la reacción ocurre de izquierda a derecha, es decir, el hidrógeno se oxida produciendo agua.

Combustión de carbono



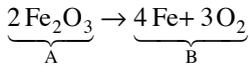
$$\mu(A) = \mu(C) + \mu(O_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = \mu(CO_2) = -394,36 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 394,36 \text{ kG}$$

El cálculo muestra que esta reacción también se desarrolla de izquierda a derecha, lo cual no sorprende.

Oxidación del hierro



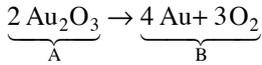
$$\mu(A) = 2\mu(Fe_2O_3) = 2(-742,24) \text{ kG} = -1484,48 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = 4\mu(Fe) + 3\mu(O_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = -1484,48 \text{ kG}$$

El potencial de A es inferior al de B, la reacción se efectúa hacia la izquierda, es decir, el hierro se oxida, como ya se sabía.

El oro no se oxida



$$\mu(A) = 2\mu(Au_2O_3) = 2 \cdot 163,30 \text{ kG} = 326,60 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = 4\mu(Au) + 3\mu(O_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 326,60 \text{ kG}$$

La reacción se produce de izquierda a derecha; el óxido de oro se descompone por sí mismo, el oro no se oxida.

El punto cero del potencial químico

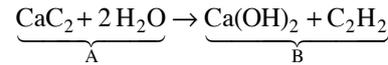
Al buscar valores del potencial químico en la tabla probablemente has notado que algunos elementos químicos tienen potencial igual a 0 kG, lo cual no es una coincidencia, y se debe a una definición. Así como se puede fijar arbitrariamente el punto cero del potencial eléctrico, de la temperatura o la velocidad, también se puede definir el punto cero del potencial químico. Lo particular en este caso es que hay tantos puntos cero como elementos químicos.

En dicho contexto se debe tener en cuenta lo siguiente: el potencial químico de un elemento es 0 kG cuando la sustancia se encuentra en su forma más estable; por ejemplo, para el hidrógeno monoatómico no se encuentra que

$\mu(H) = 0$, ya que éste es sumamente inestable, sin embargo se tiene que $\mu(H_2) = 0$.

Producción de sustancias con potencial químico alto a partir de sustancias con potencial bajo

Una reacción se efectúa por sí misma del potencial alto al bajo, es decir, "se va bajando la montaña del potencial". Por consiguiente, se podría pensar que cada sustancia inicial debe tener un potencial mayor a cada sustancia final (producto). El siguiente ejemplo muestra que esta afirmación no es correcta: la producción de etino a partir de carburo de calcio y de agua.



$$\mu(A) = \mu(CaC_2) + 2\mu(H_2O)$$

$$= -67,78 \text{ kG} + 2(-237,18) \text{ kG} = -542,14 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = \mu(Ca(OH)_2) + \mu(C_2H_2)$$

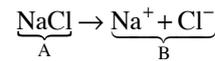
$$= -896,76 \text{ kG} + 209,20 \text{ kG} = -687,56 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 145,42 \text{ kG}$$

El potencial químico del conjunto A es superior al del B, la reacción se produce de izquierda a derecha. Sin embargo, una de las sustancias producto tiene un potencial superior a los potenciales de ambas sustancias iniciales. Este potencial muy alto es compensado por el potencial muy bajo de la otra sustancia producto, el hidróxido de calcio.

La disolución como reacción

La disolución de una sustancia en otra también es una reacción química, por ejemplo la disolución de sal de cocina en agua:



La tabla mencionada también contiene potenciales químicos de iones, lo cual permite calcular la diferencia de potenciales de un proceso de disolución. Hay que anotar que el potencial químico de los iones disueltos depende de su concentración, y que los valores de la tabla se refieren a una solución unimolar en agua. Por lo tanto solamente es posible constatar la posibilidad de realizar una determinada solución unimolar en agua.

Para la solución de sal de cocina se tiene:

$$\mu(A) = \mu(NaCl) = -384,04 \text{ kG}$$

$$\mu(B) = \mu(Na^+) + \mu(Cl^-) = 0 \text{ kG}$$

$$= -261,89 \text{ kG} + (-131,26) \text{ kG} = -393,15 \text{ kG}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 9,11 \text{ kG}$$

$\mu(A)$ es mayor que $\mu(B)$, por lo cual es posible realizar una solución unimolar de sal de cocina en agua: 1 mol de NaCl en 1 litro de solución. Naturalmente también es posible disolver menos cantidad de sal, pero con los datos de la tabla no se puede afirmar si es posible disolver más.

Ejercicios

1. Calcular la diferencia de los potenciales químicos de las siguientes reacciones y definir cuáles reacciones se pueden producir en condiciones normales.

- $2\text{Mg (sólido)} + \text{O}_2 \text{ (gaseoso)} \rightarrow 2 \text{MgO (sólido)}$
- $2\text{Hg (líquido)} + \text{O}_2 \text{ (gaseoso)} \rightarrow 2 \text{HgO (rojo, sólido)}$
- $\text{C}_3\text{H}_{12} \text{ (líquido)} + 8\text{O}_2 \text{ (gaseoso)} \rightarrow 5\text{CO}_2 \text{ (gaseoso)} + 6\text{H}_2\text{O (líquido)}$
- $12\text{CO}_2 \text{ (gaseoso)} + 11\text{H}_2\text{O (líquido)} \rightarrow \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \text{ (sólido)} + 12\text{O}_2 \text{ (gaseoso)}$
- $\text{CuO (sólido)} + \text{Zn (sólido)} \rightarrow \text{Cu (sólido)} + \text{ZnO (sólido)}$

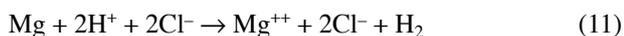
2. Indique reacciones en las cuales se reduce el CuO. Calcular la diferencia de los potenciales químicos.

3. ¿Con cuáles de las siguientes sustancias se puede realizar una solución unimolar?

I_2 , KOH, NH_4Cl , NH_3 , AgCl.

24.4 El potencial químico y la tasa de reacción

Analícemos ahora tres reacciones relacionadas: disolver tres metales de la misma valencia en ácido clorhídrico.



Veamos las diferencias de los potenciales químicos:

$$(11) \quad \mu(A) - \mu(B) = 456,01 \text{ kG}$$

$$(12) \quad \mu(A) - \mu(B) = 147,03 \text{ kG}$$

$$(13) \quad \mu(A) - \mu(B) = -65,62 \text{ kG}$$

Para la primera reacción la diferencia es grande, más pequeña para la segunda, y negativa para la tercera.

Ahora, analícemos dichas reacciones por las burbujas de hidrógeno que se forman. El magnesio se disuelve y se observa la formación rápida y abundante de hidrógeno. La disolución del zinc es más lenta, y la producción del hidrógeno más pausada que en el caso precedente. Con el cobre no se observa nada. Se puede concluir que:

La tasa de reacción es tanto más grande, cuanto mayor sea la diferencia del potencial químico.

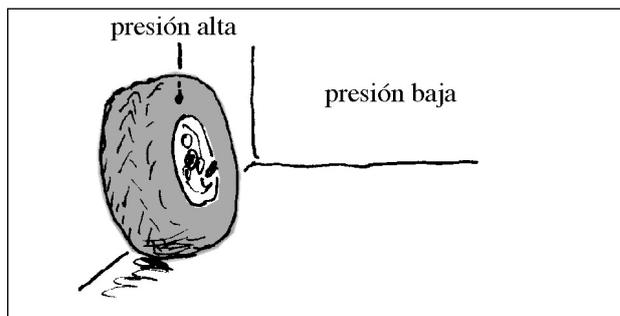


Fig. 24.1. El aire no fluye del lugar con presión alta (interior del neumático) al lugar con presión baja (exterior).

Esto es correcto, pero puede llevar a falsas conclusiones, ya que no es completa, es decir, la tasa de reacción no depende solamente de la diferencia de potencial químico. Así como la corriente eléctrica no depende solamente de la diferencia de potencial eléctrico, o la corriente de entropía de la diferencia de temperatura.

24.5 La resistencia de reacción

Muy a menudo una reacción no ocurre, a pesar de que debería, por lo menos en cuanto hace a los potenciales químicos. Se puede tener gasolina en un recipiente abierto sin que combustione. Se puede mezclar hidrógeno y oxígeno, sin que se produzca un estallido en el gas. “Claro”, se dirá, “hay que encenderlo para hacerlo estallar”. Es correcto, pero ¿por qué las sustancias no reaccionan sin encenderlas? ¿Por qué la reacción no ocurre del potencial químico alto al bajo?

Se ve que no es suficiente que exista una fuerza motriz para producir una reacción. Al fin y al cabo esto no es sorprendente, hubiera debido esperarse desde el comienzo. El aire en un neumático (normalmente) no sale del neumático, a pesar de que la presión exterior es menor que la interior, a pesar de que existe una fuerza motriz. La pared del neumático lo impide, fig. 24.1.

La electricidad del conductor de la izquierda, fig. 24.2, tampoco fluye hacia donde debiera fluir, es decir, al con-

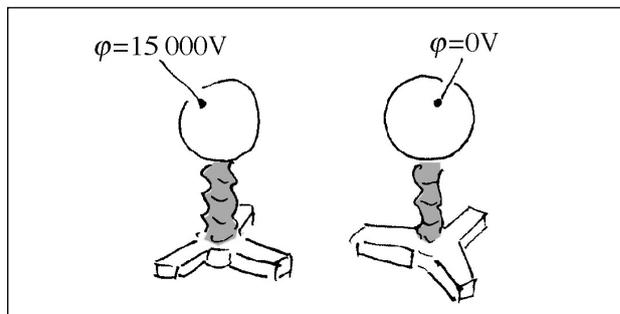


Fig. 24.2. La carga eléctrica no fluye del lugar con potencial alto (conductor de la izquierda) al lugar con potencial bajo (conductor de la derecha).

ductor de la derecha. La resistencia del aire entre los conductores es demasiado grande.

El hecho de que una reacción química no ocurra a pesar de que exista una diferencia del potencial químico también se debe a la existencia de una resistencia. Se dice que la *resistencia de reacción* es demasiado grande o que la reacción está *inhibida*. La resistencia de reacción puede ser mayor o menor, o puede ser muy grande o muy pequeña. Dos reacciones con la misma diferencia de potenciales químicos pueden ocurrir con velocidades muy distintas, es decir, las tasas de reacción pueden ser muy diferentes, de acuerdo con la resistencia de reacción.

Cuanto mayor sea la resistencia de reacción, tanto menor será la tasa de reacción.

Simplificando un poco, se puede describir la actividad de los químicos así: los químicos procuran producir ciertas reacciones e impedir otras.

Uno de los medios para controlar el transcurso de una reacción es influir en su resistencia de reacción, aumentándola o disminuyéndola según la necesidad.

Una tarea semejante se plantea en electrotécnica; se establecen conexiones con materiales que tienen poca resistencia eléctrica, y se impiden corrientes eléctricas por medio de materiales aislantes.

Pero, ¿de qué depende la resistencia de una reacción? ¿Cómo se puede influir en ella?

La figura 24.3a muestra un vaso de precipitados con ácido clorhídrico y al lado un trozo de magnesio. Si solamente importara la diferencia de los potenciales químicos, las dos sustancias deberían reaccionar. Naturalmente no lo hacen, la reacción está inhibida. En este caso es fácil disminuir la resistencia de reacción, basta con juntar las dos sustancias, es decir, introducir el trozo de magnesio en el vaso, fig. 24.3b, o verter el ácido sobre el magnesio.

Se puede disminuir aún más la resistencia de reacción mejorando el contacto entre las sustancias iniciales, o moliendo y mezclando las sustancias. Un gran cristal de NaCl, puesto en el agua, se disuelve muy lentamente, ya que la resistencia de reacción es muy grande. Si pulveri-

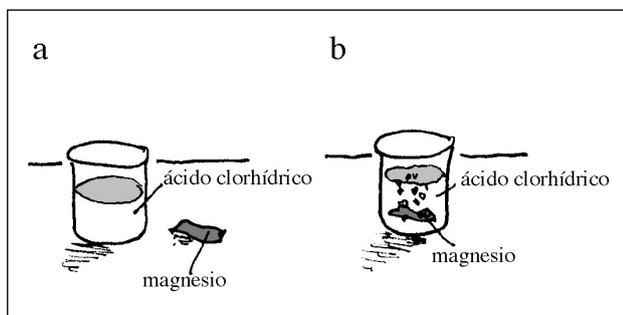
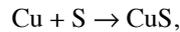


Fig. 24.3. (a) El magnesio y al ácido clorhídrico no reaccionan, la reacción está inhibida. (b) El magnesio y al ácido clorhídrico reaccionan.

zamos el cristal, vertemos el polvo en el agua y agitamos, la resistencia de la “reacción” (en este caso una disolución) resulta mucho más pequeña, la tasa de reacción aumenta.

El mezclar disminuye la resistencia de reacción.

A veces mezclar no sirve. La reacción



que tiene una diferencia de potenciales químicos positiva, no se produce aunque se mezclen las dos sustancias iniciales. Pero se puede iniciar la reacción por otro método: aumentando la temperatura. Para hacer esto basta con “encender” las sustancias iniciales en un punto. En cuanto la reacción se ha iniciado en dicho punto se produce entropía, la cual hace que la temperatura en los alrededores del punto inicial aumente, y la reacción se inicia también allí. Así la reacción se propaga por sí misma. Se puede concluir que:

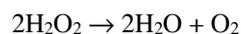
Al aumentar la temperatura disminuye la resistencia de reacción.

Existen muchas reacciones como esta, es decir, reacciones que comienzan solamente después de haberlas “encendido”. Corresponden a dicha clase de reacciones la combustión de conocidos combustibles como: gasóleo o diésel, carbón, gasolina, gas natural, o hidrógeno.

Además de los métodos mencionados para aumentar la tasa de reacción, existen otros más “sofisticados”: a las sustancias que deben reaccionar se agrega un *catalizador*. El catalizador hace que la reacción ocurra, pero su cantidad se mantiene constante. En otros términos: agregando el catalizador la reacción se pone en marcha, al quitarlo la reacción se detiene.

Un catalizador disminuye la resistencia de reacción.

Un ejemplo: la diferencia de los potenciales químicos de la reacción



es positiva; el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) tendría que descomponerse por sí solo, si dependiera solamente de los potenciales químicos. En realidad no lo hace, la reacción está inhibida. Pero si a un tubo de ensayo con peróxido de hidrógeno se agrega un poco del llamado “catalizador de tres vías” para motores de gasolina, inmediatamente comienza la producción de un gas, fig. 24.4; la prueba con un tizón muestra que se trata de oxígeno. La cantidad de catalizador no cambia en la reacción, y ésta ocurre hasta que ya no quede casi nada del peróxido de hidrógeno.

Los gases de escape de un motor a gasolina contienen sustancias nocivas para el medio ambiente: monóxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO) y gasolina no quemada, y esto ocurre básicamente porque no se ha terminado la combustión en los cilindros del motor. Si las

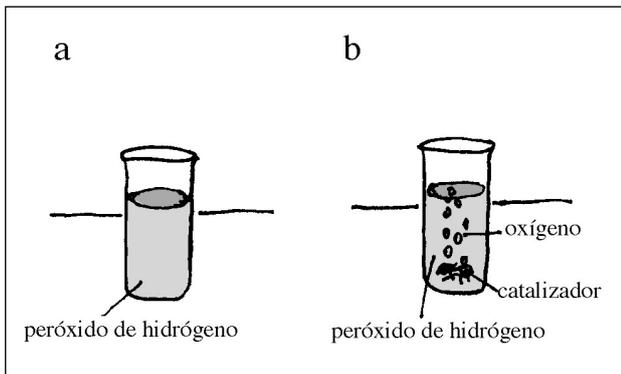
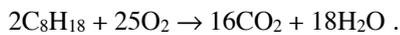
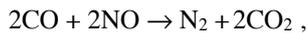


Fig. 24.4. (a) El peróxido de hidrógeno no se descompone. (b) Agregando un catalizador se pone en marcha la reacción.

reacciones químicas se terminaran en el motor no tendríamos dichas sustancias en los gases de escape. Por ello se hacen pasar los gases a través o encima del catalizador. Esto por una parte produce la combustión de los restos de gasolina:



(el octano C_8H_{18} es la componente principal de la gasolina), por otra, da inicio a la reacción



en la cual las sustancias tóxicas CO y NO se transforman en sustancias no-tóxicas N_2 y CO_2 . Sin embargo, el CO_2 también tiene efectos perjudiciales para el ambiente: contribuye al calentamiento de la atmósfera terrestre.

Los catalizadores desempeñan un papel muy importante en los sistemas biológicos, en los cuales pueden tener lugar millares de reacciones distintas. Si solamente se tuvieran en cuenta los potenciales químicos, todas estas reacciones se producirían y al cabo de poco tiempo el organismo se convertiría casi totalmente en dióxido de carbono y agua. Pues bien, la mayoría de esas reacciones están inhibidas, y por lo tanto no tienen lugar; se las pue-

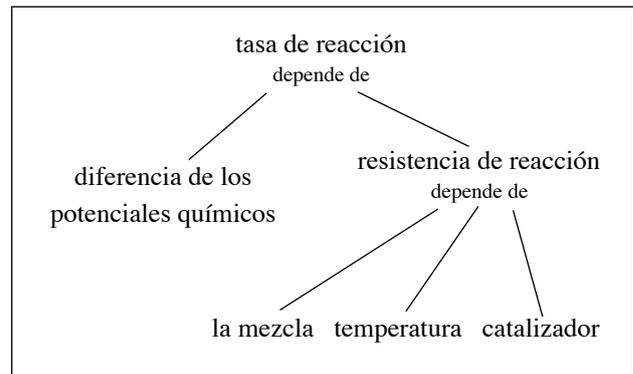


Fig. 24.5. Relación entre tasa de reacción, diferencia de los potenciales químicos y resistencia de reacción

de activar por medio de catalizadores. Cada una de dichas reacciones necesita un catalizador biológico, los cuales se llaman *enzimas*; éstas regulan o controlan las reacciones bioquímicas, actuando como un sistema complejo de interruptores o conmutadores químicos.

A manera de resumen se puede decir que la tasa de reacción depende de dos cosas: de la diferencia de los potenciales químicos, y de la resistencia de reacción. Se ha analizado de qué depende la resistencia de reacción. En la figura 24.5 se resumen esquemáticamente estas relaciones.

Ejercicios

1. Mencione reacciones que tengan alta resistencia de reacción, aún cuando las sustancias iniciales están bien mezcladas.
2. Mencione reacciones que tengan una pequeña resistencia, cuando se ponen las sustancias iniciales en contacto.
3. Un explosivo es una sustancia que se puede descomponer en otras, su potencial químico es mayor que el de los productos. ¿Qué se puede afirmar de la resistencia de dicha reacción?

25. Cantidad de sustancia y energía

25.1 Bombas de reacción

Se ha mostrado que: “Una reacción ocurre por sí sola del potencial químico más alto al más bajo”. Sin embargo, a menudo se quiere que la reacción se efectúe en la dirección opuesta, es decir, se quiere que la reacción transcurra de modo que el potencial químico del conjunto de las sustancias producidas sea mayor que el potencial del conjunto de las sustancias iniciales.

Así por ejemplo, al querer descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, la reacción (1) debe ocurrir de izquierda a derecha, es decir, contra su tendencia natural:



O bien, si se quiere producir sodio a partir del cloruro de sodio



se sabe que la reacción transcurre por sí sola de derecha a izquierda, pero se pide que transcurra en sentido contrario.

En principio, esta clase de problemas son conocidos; a veces es necesario que el aire fluya, en contra de su tendencia natural, de la presión baja a la alta, lo cual se consigue por medio de una bomba de aire, fig. 25.1. O, se desea transferir entropía de una temperatura baja a una alta, lo cual se puede lograr con una bomba de calor, fig. 25.2. Lo que hace falta para producir una reacción química del potencial químico bajo al alto, también es una especie de bomba, que llamaremos *bomba de reacción*.

Tales bombas existen y desempeñan un papel importante en la técnica química, se llaman *células electroquímicas*.

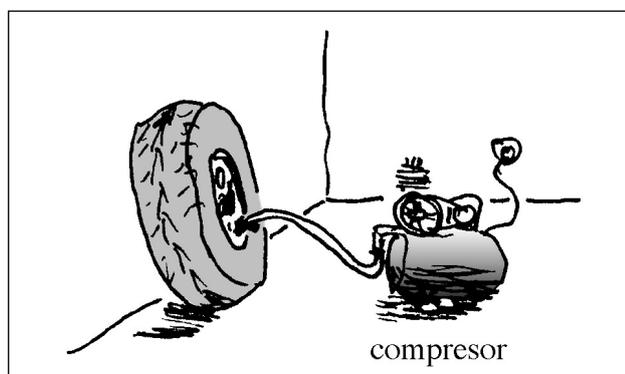


Fig. 25.1. La bomba de aire (el compresor) transfiere el aire de la presión baja a la alta.

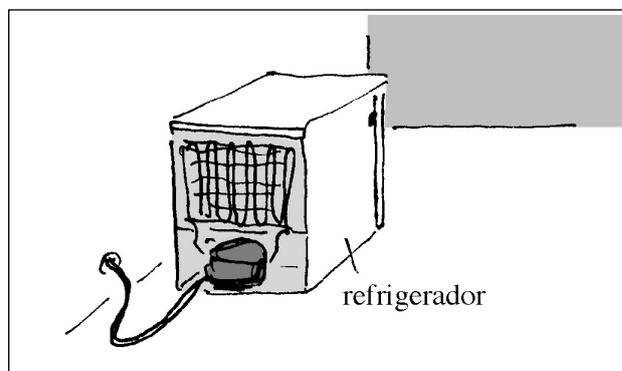


Fig. 25.2. La bomba de calor transfiere la entropía de la temperatura baja a la alta.

La figura 25.3 muestra una célula electroquímica con la cual se puede descomponer el agua, es decir, una bomba para producir la reacción (1). El proceso de descomposición de una sustancia empleando una bomba de reacción se llama *electrólisis*.

Para que pueda funcionar una bomba de reacción tiene que conectarse a una fuente de energía eléctrica, igual que la bomba de aire o la bomba de calor.

25.2 Tasa de reacción y corriente de energía

En la figura 25.4 se muestra el diagrama del flujo energético de la célula electroquímica de la figura 25.3. A manera de comparación, la figura 25.5 muestra el diagrama para una bomba de agua, y en la figura 25.6 se observa el

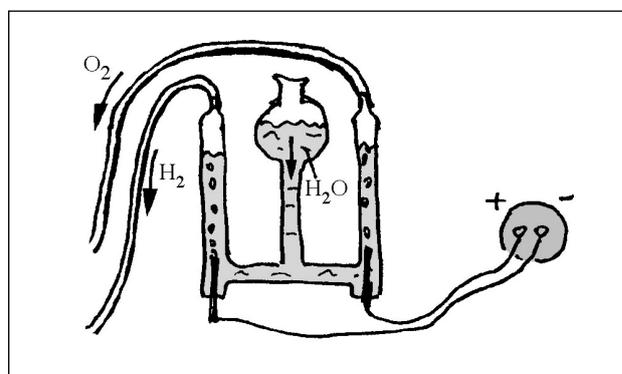


Fig. 25.3. La célula electroquímica trabaja como una bomba de reacción.

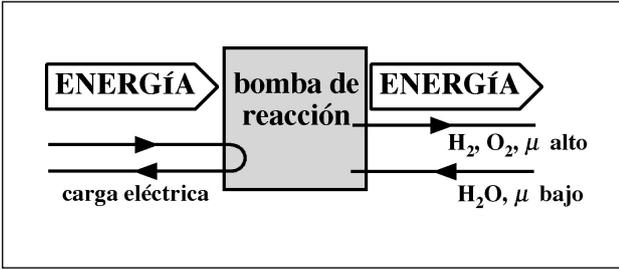


Fig. 25.4. Diagrama de flujo energético de una bomba de reacción

diagrama de una bomba de calor. Se puede decir que una bomba de reacción es un transbordador de energía, que recibe energía con el portador carga eléctrica y la entrega con los productos de la reacción.

En la célula electroquímica también entra energía, lo hace con las sustancias iniciales, pero sale mayor cantidad de energía con los productos. La diferencia es la energía que conlleva la carga eléctrica.

Es claro que las cantidades de sustancia que reaccionan en la célula serán mayores cuanto mayor sea la energía suministrada, y dado que la energía que entra también sale se puede afirmar que: cuanto más energía atraviesa la célula electroquímica, tanto mayor es la cantidad reaccionante.

La afirmación anterior se puede formular cuantitativamente. En la figura 25.7a se muestra una célula electroquímica, la cual es atravesada por cierta corriente de energía y tiene cierta tasa de reacción. En la figura 25.7b se presentan dos células conectadas en paralelo, cada una de ellas es idéntica a la de la figura 25.7a. La corriente de energía total a través de las dos células es el doble de la corriente de la única célula de la figura 25.7a, y lo análogo es válido para la tasa de reacción, de tal forma que se puede considerar las dos células como una sola célula más grande, figura 25.7c. Comparando la pequeña célula, fig. 25.7a, con la grande, fig. 25.7c, es posible concluir que la corriente de energía es proporcional a la tasa de reacción:

$$P \sim I_{n(R)} \quad (2)$$

Hace falta definir el factor de proporcionalidad, para lo cual se pueden analizar dos células en las cuales se producen diferentes reacciones. En la primera se descompo-

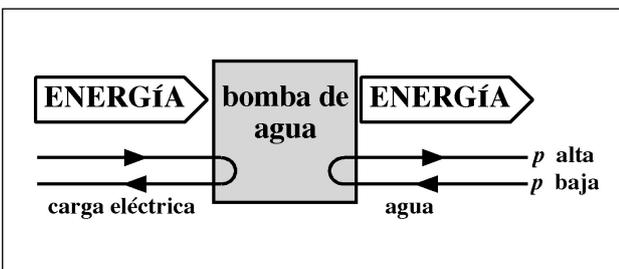


Fig. 25.5. Diagrama de flujo energético de una bomba de agua

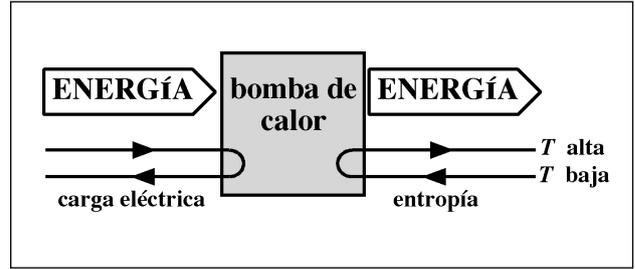


Fig. 25.6. Diagrama de flujo energético de una bomba de calor

ne agua, y en la segunda se produce hidrógeno y cloro a partir de ácido clorhídrico. Al hacer funcionar las células de tal manera que las tasas de reacción sean iguales, se constata que los consumos energéticos de las dos células no lo son: para $I_{n(R)}$ idénticas, P es distinto. Aparentemente el factor de proporcionalidad que se busca depende del tipo de reacción que se desarrolla en la célula, es decir, tiene valores distintos según la reacción.

Se puede decir que las diversas reacciones se distinguen por las diferencias de sus potenciales químicos; en efecto la relación entre la corriente de energía y la tasa de reacción sencillamente es:

$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} \quad (3)$$

Es decir, el factor de proporcionalidad es la diferencia de los potenciales químicos. La sencillez de este resultado se debe a que el potencial químico, o más exactamente la diferencia de dos potenciales químicos, se define por la ecuación (3). Esto significa que se puede utilizar la ecuación (3) para medir la diferencia de potenciales químicos:

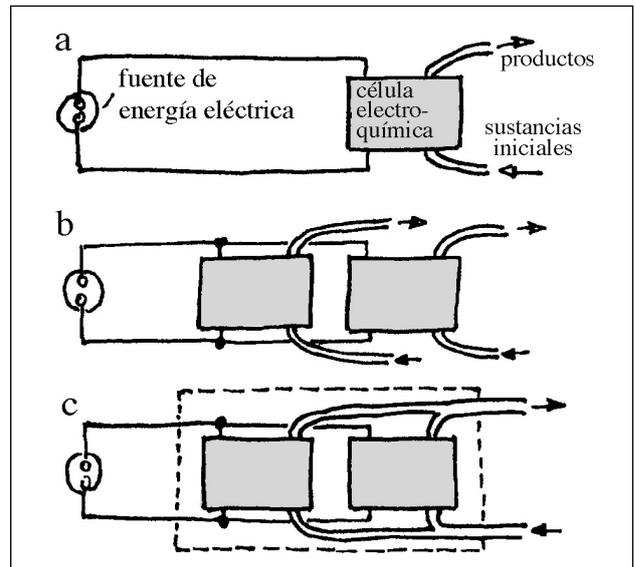


Fig. 25.7. (a) Célula electroquímica. (b) En dos células en paralelo la tasa de reacción y la corriente de energía son el doble de lo que son en una única célula. (c) Las dos células se pueden considerar como una única célula que es más grande.

se mide la corriente de energía P , se mide la tasa de reacción $I_{n(R)}$ y se divide el primer valor en el segundo:

$$\mu(A) - \mu(B) = \frac{P}{I_{n(R)}} .$$

Donde $\mu(A)$ es el potencial mayor y $\mu(B)$ el menor.

Si se conoce la diferencia de los potenciales químicos, se puede emplear la ecuación (3) para calcular el traslado energético, es decir, cuánta energía pasa de la carga eléctrica a los productos de la reacción.

Sustituyendo P e $I_{n(R)}$ en la ecuación (3):

$$P = \frac{E}{t}$$

$$I_{n(R)} = \frac{n(R)}{t}$$

se obtiene que:

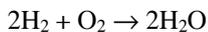
$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R) .$$

Esta ecuación muestra cuánta energía se necesita por mol para hacer que se produzca la reacción $A \leftrightarrow B$ en contra de su tendencia natural.

Ejemplo:

¿Cuánta energía se necesita para descomponer 1 kg de agua?

Debemos „bombear“ la reacción



de derecha a izquierda. Para el agua

$$m/n = 0,018 \text{ kg/mol} .$$

Por tanto 1 kg de agua contiene 55,56 mol, y la cantidad reaccionante será

$$n(R) = n(H_2O)/2 = 55,56 \text{ mol}/2 = 27,78 \text{ mol} .$$

La diferencia de los potenciales químicos, ya se había calculado

$$\mu(A) - \mu(B) = 474,36 \text{ kG} .$$

Reemplazando finalmente en

$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R) ,$$

se obtiene que la energía necesaria es

$$E = 13\,178 \text{ kJ} \approx 13 \text{ MJ} .$$

En otra parte del curso se ha utilizado una fórmula muy similar a la ecuación (3) para calcular la energía transferida de la carga eléctrica a la entropía en una bomba de calor:

$$P = (T(A) - T(B)) \cdot I_S ,$$

siendo T la temperatura absoluta, y I_S la corriente de entropía. Así mismo, existe otra ecuación similar para calcular la energía transmitida en un cable eléctrico:

$$P = (\varphi(A) - \varphi(B)) \cdot I ,$$

donde φ es el potencial eléctrico, e I la corriente eléctrica.

Ejercicios

1. ¿Cuánta energía se necesita para obtener 1 kg de sodio a partir de sal de cocina?

2. ¿Cuánta energía se necesita para obtener 2 mol de plomo a partir de cloruro de plomo?

25.3 La inversión de la bomba de reacción

En una bomba de reacción se transfiere energía, entra en la célula con la carga eléctrica y sale con los productos de la reacción. Así como para cada transbordador de energía (dispositivo que sirve para que la energía cambie de portador) existe el dispositivo inverso, también lo hay para la bomba de reacción, éste se conoce muy bien bajo diversos nombres: batería, pila, acumulador, pila o célula de combustible, etc.

Estos artefactos también se llaman células electroquímicas, es decir una célula electroquímica puede funcionar en dos direcciones: como bomba de reacción –ver el párrafo precedente– o bien como “bomba de electricidad”.

En la figura 25.8 a y b están representados los diagramas de flujo energético de dos células electroquímicas, la 25.8a funciona como bomba de reacción para la reacción $B \rightarrow A$, y la de la figura 25.8b trabaja como bomba de electricidad. En ella la reacción ocurre de A a B, es decir, en su dirección natural, mientras la carga eléctrica va del potencial eléctrico bajo al alto.

Lamentablemente para estas bombas químicas de electricidad existen nombres distintos.

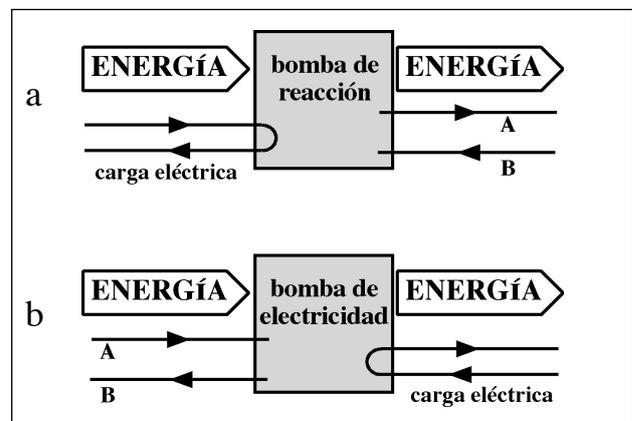


Fig. 25.8. Diagramas de flujo energético (a) de una bomba de reacción y (b) de una bomba de electricidad

Pila de combustible

Si el suministro de las sustancias iniciales y la extracción de los productos se realizan de manera continua, la célula se llama pila de combustible. Un ejemplo es la pila de hidrógeno, en la cual el hidrógeno y el oxígeno reaccionan produciendo agua.

Una pila de combustible hace esencialmente lo mismo que una central térmica de carbón, es decir, recibe energía con el conjunto de sustancias “combustible + oxígeno” y la entrega con la carga eléctrica. Pero la pila tiene ventajas con respecto a la central térmica, tiene menos pérdidas energéticas y funciona sin producir ningún ruido. A pesar de esto, todavía no se pueden emplear a gran escala para la obtención de energía eléctrica, ya que no se pueden hacer funcionar con carbón o gasolina, qué son los combustibles más comunes y relativamente fáciles de obtener.

Célula Botón (Batería o Pila Botón)

Las sustancias iniciales se encuentran dentro de las células y las sustancias producidas no se extraen de las mismas. Cuando las sustancias iniciales se han agotado, la célula deja de funcionar, ya no sirve. A menudo estas células son llamadas baterías o pilas, expresiones que no son correctas como se verá más adelante.

Acumulador

El acumulador es una célula que se puede operar en dos direcciones: como bomba de reacción y como bomba de electricidad. Las sustancias iniciales y las producidas quedan dentro del acumulador, lo cual permite utilizarlo como depósito o almacén de energía. Al cargarlo se provoca una reacción química en dirección opuesta a su tendencia natural, del potencial químico bajo al alto. Al descargarlo la reacción ocurre del potencial químico alto al bajo, en este proceso la carga eléctrica es transferida del potencial eléctrico bajo al alto. El acumulador más conocido es el de plomo empleado en los automóviles y popularmente llamado “batería”.

Baterías

Generalmente se habla de batería cuando varias células están conectadas en serie; por ejemplo, la batería de automóvil de 12 V consiste en seis células de 2 V cada una,

conectadas en serie. La “clásica” de 4,5 V se compone de tres células de 1,5 V cada una. Lo anterior se aplica igualmente a la “pila”.

Para las bombas químicas de electricidad la relación entre la corriente energética y la tasa de reacción es la misma que para las bombas de reacción:

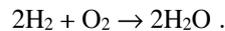
$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} ,$$

donde nuevamente $\mu(A)$ es el potencial más alto y $\mu(B)$ el más bajo, P es la corriente de energía que entra con las sustancias y sale con la electricidad. Acá también es válida la relación:

$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R) .$$

Ejemplo

Analizando la reacción que ocurre en la célula de hidrógeno:



determine cuánta energía eléctrica se obtiene al producir 1 kg de agua.

En la sección anterior, al calcular la energía necesaria para descomponer 1 kg de agua, se hizo el cálculo respectivo, obteniendo que $E = 13 \text{ MJ}$.

Ejercicios

1. En una pila de combustible el metano reacciona con oxígeno para producir agua y dióxido de carbono. ¿Cuántos J/s entrega la célula si la tasa de reacción es 1 mol/s?

2. En un acumulador de plomo se produce la siguiente reacción:

$$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O},$$

de derecha a izquierda al cargar la batería, y en sentido contrario al descargarla.

a) ¿Cuál es la tasa de reacción si la batería entrega 100 J/s?

b) Al cargar la batería 2 kg de sulfato de plomo se transforman en plomo y óxido de plomo. ¿Cuánta energía se almacena en dicho proceso?

26. Balance calórico de las reacciones

26.1 Producción de entropía en las reacciones químicas

Analicemos la reacción



que ocurre de manera continua; habiendo elegido las sustancias A y B de tal forma que $\mu(A)$ sea mayor que $\mu(B)$. Se sabe que con esta reacción se puede ganar energía, ya que al ocurrir la transformación de las sustancias A en las B queda un remanente de ésta. La corriente energética correspondiente es

$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} .$$

Con esta energía se puede hacer una de dos cosas: O bien se la utiliza para bombear algo de un potencial bajo a uno más alto, por ejemplo la electricidad, como lo discutimos en la sección anterior. O bien se da vía libre a la reacción, sin “bombear” algo, en cuyo caso toda la energía se emplea para producir entropía. Para producir una corriente de entropía de intensidad $I_{S \text{ prod}}$, es necesaria una corriente de energía

$$P = T \cdot I_{S \text{ prod}} .$$

Si se emplea (o mejor dicho, gasta) toda la energía suministrada por una reacción química para producir entropía, se tiene que:

$$(\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} = T \cdot I_{S \text{ prod}} .$$

De donde se puede calcular la entropía producida por segundo:

$$I_{S \text{ prod}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} I_{n(R)} .$$

Teniendo que

$$I_{S \text{ prod}} = S_{\text{prod}}/t ,$$

y que

$$I_{n(R)} = n(R)/t$$

se obtiene:

$$\frac{S_{\text{prod}}}{t} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot \frac{n(R)}{t} .$$

Al multiplicar por t resulta que:

$$S_{\text{prod}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot n(R) . \quad (1)$$

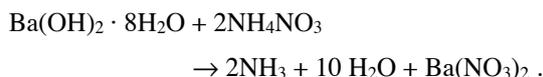
Esta ecuación muestra cuánta entropía se produce cuando la cantidad reaccionante es $n(R)$.

De una reacción en la cual toda la energía “disponible” se emplea para la producción de entropía se dice que se desarrolla libremente.

En cada reacción que ocurre libremente se produce entropía.

Se podría suponer que en una reacción de este tipo, es decir, que ocurre libremente, los productos estarían más calientes, debido al siguiente postulado: cuando aumenta la entropía se incrementa la temperatura. Sin embargo esta conclusión no es correcta, como se verá con el siguiente experimento.

Se mezclan dos sustancias sólidas: hidróxido de bario (que contiene gran cantidad de agua de cristalización) y nitrato de amonio, al reaccionar se forma amoníaco gaseoso, agua líquida y nitrato de bario:



Lo sorprendente es que las sustancias producidas están muy frías, encontrando temperaturas inferiores a -10°C . ¿Qué pasó? ¿Acaso la reacción ocurre en la dirección equivocada, del potencial bajo al alto? ¿O se ha aniquilado la entropía? Esto último sería sensacional, pero no es el caso.

Para comprender lo ocurrido se debe estudiar el balance entrópico de las reacciones con más detenimiento.

Ejercicios

1. ¿Cuánta entropía se produce al quemar de 1 kg de gasolina? (Hacer el cálculo para el octano C_8H_{18} , principal constituyente de la gasolina.)
2. ¿Cuánta entropía se genera al oxidar de 1 kg de hierro?

26.2 El balance entrópico de las reacciones químicas

Hasta el momento no se ha tenido en cuenta un punto importante. Analicemos la reacción



suponiendo que no se presenta producción de entropía (tal como ocurre en una célula electroquímica); en dicha

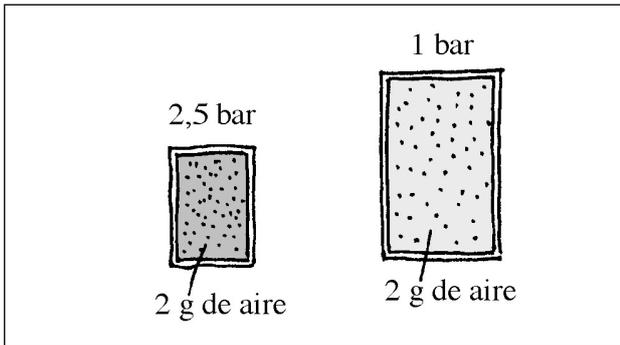


Fig. 26.1. La misma cantidad de aire tiene presiones distintas en dos recipientes distintos.

reacción las sustancias iniciales desaparecen, apareciendo las sustancias producidas.

Las sustancias iniciales contienen cierta cantidad de entropía, de acuerdo a su temperatura, y durante la reacción dicha entropía debe ser absorbida por las sustancias producidas. Sin embargo, con esta entropía las sustancias producidas no tendrán la misma temperatura que las sustancias iniciales. En algunas reacciones la temperatura de las sustancias producidas será inferior y en otras superior a la temperatura de las sustancias iniciales.

Algo similar ocurre al transferir aire de un recipiente A a otro B, que inicialmente se encuentra vacío; en general el aire no tendrá la misma presión antes y después de dicho proceso, fig. 26.1.

En la última columna de la tabla al final de este texto, se encuentra el contenido entrópico para varias sustancias a temperatura normal, los valores se refieren a un mol de sustancia. En otros términos, la tabla contiene los valores de la magnitud S/n . Para el agua, por ejemplo, se encuentra que

$$S/n = 69,91 \text{ Ct/mol},$$

es decir, 1 mol de agua contiene, a temperatura normal, una entropía igual a 69,91 Carnot.

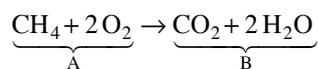
Para el dióxido de carbono

$$S/n = 213,64 \text{ Ct/mol},$$

lo cual significa que 1 mol de CO_2 contiene, a temperatura normal, una entropía de 213,64 Ct.

Con lo visto se puede establecer el balance entrópico completo de una reacción, presentándose tres casos diferentes. Veamos un ejemplo de cada caso, tomando siempre 1 mol de sustancia.

Primer caso



De la tabla se obtiene la cantidad de entropía de las sustancias iniciales y finales a temperatura normal (25 °C):

$$\begin{aligned} S(A) &= S(\text{CH}_4) + 2S(\text{O}_2) \\ &= 186,10 \text{ Ct} + 2 \cdot 205,03 \text{ Ct} = 596,16 \text{ Ct} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(B) &= S(\text{CO}_2) + 2S(\text{H}_2\text{O}) \\ &= 213,64 \text{ Ct} + 2 \cdot 69,91 \text{ Ct} = 353,46 \text{ Ct} \end{aligned}$$

Se observa que para la misma temperatura las sustancias finales contienen menos entropía que las iniciales. Si las sustancias iniciales tienen –antes de comenzar la reacción– una temperatura de 25°C, las finales deberían tener una entropía de 596,16 Ct. Sin embargo, con dicha entropía su temperatura sería mayor que la inicial, ya que a 25°C contendrían solamente 353,46 Ct. Se puede decir que sobra cierta cantidad de entropía igual a:

$$S(A) - S(B) = 596,16 \text{ Ct} - 353,46 \text{ Ct} = 242,7 \text{ Ct}.$$

Pero no se ha tenido en cuenta el hecho de que en la reacción se ha producido entropía, la cual se puede calcular por medio de la ecuación (1).

$$S_{\text{prod}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot n(R).$$

Para el caso analizado

$$\mu(A) - \mu(B) = 817,91 \text{ kG}.$$

y teniendo en cuenta las condiciones inicialmente planteadas de

$$n(R) = 1 \text{ mol y } T = 298 \text{ K},$$

se obtiene que:

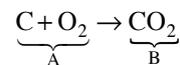
$$S_{\text{prod}} = \frac{817,91 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 2744,7 \text{ Ct}.$$

Es decir, al efectuarse la reacción se producen 2744,7 Ct. Esta entropía se debe sumar a la entropía calculada antes, obteniendo el remanente total de entropía:

$$S(A) - S(B) + S_{\text{prod}} = 242,7 \text{ Ct} + 2744,7 \text{ Ct} = 2987,4 \text{ Ct}.$$

La entropía sobrante causa el calentamiento de las sustancias producidas.

Segundo caso



$$\begin{aligned} S(A) &= S(\text{C}) + S(\text{O}_2) \\ &= 5,74 \text{ Ct} + 205,03 \text{ Ct} = 210,77 \text{ Ct} \end{aligned} \quad S(B) = 213,64 \text{ Ct}$$

$$S(B) = 213,64 \text{ Ct}$$

$$S(A) - S(B) = -2,87 \text{ Ct}.$$

En este caso el contenido de entropía en la sustancia final, a temperatura normal, es mayor que en las sustancias iniciales, es decir, no sobra sino que falta entropía. Al no producirse entropía adicional las sustancias finales tendrían una temperatura inferior a la inicial, pero no hay que olvidar que se debe agregar la entropía producida. En esta ocasión

$$\mu(A) - \mu(B) = 394,36 \text{ kG}$$

obteniendo:

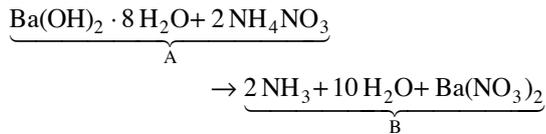
$$S_{\text{prod}} = \frac{394,36 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 1323,36 \text{ Ct}.$$

Para el balance total se obtiene que:

$$S(A) - S(B) + S_{\text{prod}} = -2,87 \text{ Ct} + 1323,36 \text{ Ct} = 1320,5 \text{ Ct}.$$

Como se ve, nuevamente sobra entropía y por lo tanto la temperatura de los productos será superior a la de las sustancias iniciales.

Tercer caso



$$S(A) = S(\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}) + 2S(\text{NH}_4\text{NO}_3) \\ = 426,77 \text{ Ct} + 2 \cdot 151,08 \text{ Ct} = 728,93 \text{ Ct}$$

$$S(B) = 2S(\text{NH}_3) + 10S(\text{H}_2\text{O}) + S(\text{Ba(NO}_3)_2) \\ = 2 \cdot 192,34 \text{ Ct} + 10 \cdot 69,91 \text{ Ct} + 213,80 \text{ Ct} \\ = 1297,58 \text{ Ct}$$

$$S(A) - S(B) = -568,58 \text{ Ct}.$$

El contenido entrópico de las sustancias finales, a temperatura normal, es mucho mayor que el de las sustancias iniciales. Sin producción de entropía la temperatura de las sustancias finales debería ser inferior a la temperatura de las iniciales.

Veamos si la falta de entropía puede ser compensada por la entropía producida. Esta vez

$$\mu(A) - \mu(B) = 38,46 \text{ kG}$$

con lo cual se obtiene que:

$$S_{\text{prod}} = \frac{38,46 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 129,1 \text{ Ct}$$

El balance total muestra que:

$$S(A) - S(B) + S_{\text{prod}} = -568,65 \text{ Ct} + 129,1 \text{ Ct} = -439,55 \text{ Ct}$$

Para llevar los productos de la reacción a la temperatura inicial hacen falta 439,55 Ct, por lo cual la temperatura de los productos es muy inferior a la temperatura de las sustancias iniciales.

Este último caso no es muy frecuente, aún cuando $S(A)$ sea inferior a $S(B)$, en general la entropía producida es suficiente para compensar la diferencia $S(A) - S(B)$, de manera que en total casi siempre sobra entropía.

Las reacciones en las cuales sobra entropía (casos 1 y 2) son llamadas *exotérmicas*, y aquellas en las cuales falta entropía, y por consiguiente se presenta una disminución de temperatura (caso 3), se llaman *endotérmicas*.

Ejercicios

1. Al oxidarse el hierro: ¿se absorbe o se emite entropía? ¿qué cantidad es absorbida o emitida?
2. Se agrega cierta cantidad de CaCl_2 a una solución acuosa unimolar de CaCl_2 , disolviéndolo completamente. ¿Aumenta o disminuye la temperatura?
3. Se agrega cierta cantidad de NaBr a una solución acuosa unimolar de NaBr , disolviéndolo completamente. ¿Aumenta o disminuye la temperatura?
4. Se agrega cierta cantidad de KNO_3 a una solución acuosa unimolar de KNO_3 , disolviéndolo completamente. ¿Aumenta o disminuye la temperatura?

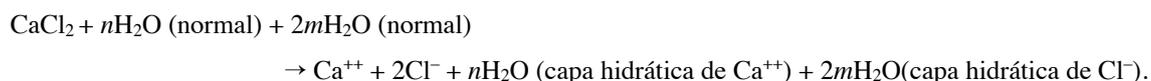
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII										
1	H 1 1,0							He 2 4,0										
2	Li 3 6,9	Be 4 9,0						Ne 10 20,2										
3	Na 11 23,0	Mg 12 24,3						Ar 18 39,9										
4	K 19 39,1	Ca 20 40,1	III A	IV A	V A	VIA	VII A	VIII A	IX A	X A	XI A	XII A						
5	Rb 37 85,5	Sr 38 87,6	Sc 21 45,0	Ti 22 47,9	V 23 50,9	Cr 24 52,0	Mn 25 54,9	Fe 26 55,8	Co 27 58,9	Ni 28 58,7	Cu 29 63,5	Zn 30 65,4	Ga 31 69,7	Ge 32 72,6	As 33 74,9	Se 34 79,0	Br 35 79,9	Kr 36 83,8
6	Cs 55 132,9	Ba 56 137,3	Y 39 88,9	Zr 40 91,2	Nb 41 92,9	Mo 42 95,9	Tc 43 97	Ru 44 101,1	Rh 45 102,9	Pd 46 106,4	Ag 47 107,9	Cd 48 112,4	In 49 114,8	Sn 50 118,7	Sb 51 121,8	Te 52 127,6	I 53 126,9	Xe 54 131,3
7	Fr 87 223	Ra 88 226	La 57 138,9	Hf 72 178,5	Ta 73 180,9	W 74 183,9	Re 75 186,2	Os 76 190,2	Ir 77 192,2	Pt 78 195,1	Au 79 197,0	Hg 80 200,6	Tl 81 204,4	Pb 82 207,2	Bi 83 209,0	Po 84 209	At 85 210	Rn 86 222
			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">C ← abreviación masa/cantidad de sustancia en g/mol ↑ 12,0 ← número atómico</p> </div>															
			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">Lantánidos</p> </div>															
			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p style="text-align: center;">Actínidos</p> </div>															
			Ce 58 140,1	Pr 59 140,9	Nd 60 144,2	Pm 61 145	Sm 62 150,4	Eu 63 152,0	Gd 64 157,3	Tb 65 158,9	Dy 66 162,5	Ho 67 164,9	Er 68 167,3	Tm 69 168,9	Yb 70 173,0	Lu 71 175,0		
			Th 90 232	Pa 91 231	U 92 238	Np 93 237	Pu 94 244	Am 95 243	Cm 96 247	Bk 97 247	Cf 98 251	Es 99 254	Fm 100 257	Md 101 258	No 102 259	Lr 103 260		

Tabla de potenciales químicos y entropía molares

Los valores de la siguiente tabla han sido tomados para sustancias en condiciones normales, entendiendo por éstas una presión de 10^5 Pa y una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$. Para sustancias disueltas se ha tomado una solución unimolar, es decir, 1 litro de la solución contiene 1 mol de la sustancia.

Nota

Para algunas sustancias disueltas las entropías molares son negativas, por ejemplo para Ca^{++} : $S/n = -55,23$ Ct/mol. En realidad no existen entropías negativas, el valor reportado en la tabla es solamente el resultado de un “truco de cálculo”: los iones en una solución acuosa están rodeados de la llamada capa hidratada (a cada ión se ha “agregado” cierto número de moléculas de agua). El ión y la capa hidratada representan una especie de molécula grande. Al disolver, por ejemplo, CaCl_2 se produce la siguiente reacción:



El CaCl_2 se transforma en iones Ca^{++} y iones Cl^- , y el agua “normal” se transforma en agua de las capas hidratada. Se suele escribir esta reacción de modo simplificado así:



es decir, se suprime el agua en ambos lados de la ecuación de reacción. Para que el balance de entropía sea correcto, se añade la entropía emitida durante la formación de la capa hidratada a la entropía de los iones. En la tabla para el Ca^{++} figura en realidad la entropía molar de:



y para el Cl^- , la entropía molar de:



Con estos valores se puede establecer el balance entrópico utilizando la ecuación de reacción simplificada. Teniendo en cuenta que la entropía molar del agua normal es mucho mayor que la del agua de capa hidratada, puede ocurrir que el valor de la entropía atribuido a un ión sea negativo.

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
Ag	gaseoso	245,68	172,89	Ar	sol. ac.	16,32	59,41
Ag	sólido	0	42,55	As	gaseoso	261,08	174,1
Ag ⁺	sol. ac.	77,12	72,68	As	sólido	0	35,15
AgBr	sólido	-96,9	107,11	AsCl ₃	gaseoso	-248,95	327,06
AgCl	sólido	-109,8	96,23	AsCl ₃	líquido	-259,41	216,31
AgI	sólido	-66,19	115,48	AsF ₃	líquido	-909,14	181,21
AgNO ₂	sólido	19,08	128,2	AsI ₃	sólido	-59,41	213,05
AgNO ₃	sólido	-33,47	140,92	As ₂ O ₃	sólido	-577,02	117,15
AgN ₃	sólido	376,14	104,18	As ₂ O ₅	sólido	-782,41	105,44
Ag ₂ CO ₃	sólido	-436,81	167,36	As ₂ S ₃	sólido	-168,62	163,59
Ag ₂ O	sólido	-11,21	121,34	As ₄ O ₆	sólido	-1152,52	214,22
Ag ₂ O ₂	sólido	27,61	117,15	Au	gaseoso	326,36	180,39
Ag ₂ O ₃	sólido	121,34	100,42	Au	sólido	0	47,4
Ag ₂ S	orthorromb.	-40,67	144,01	Au ₂ O ₃	sólido	163,3	125
Ag ₂ SO ₄	sólido	-618,48	200,41	B	gaseoso	511,67	153,34
Al	gaseoso	285,77	164,45	B	líquido	19,35	14,78
Al	líquido	6,61	35,23	B	sólido	0	5,87
Al	sólido	0	28,32	BBr ₃	gaseoso	-232,46	324,13
Al ⁺⁺⁺	sol. ac.	-485,34	-321,75	BBr ₃	líquido	-238,49	229,7
AlBr ₃	sólido	-505,01	184,1	B(CH ₃) ₃	gaseoso	-35,98	314,64
Al(CH ₃) ₃	líquido	-10,04	209,41	BCl ₃	gaseoso	-387,98	290,07
AlCl ₃	gaseoso	-570,05	314,29	BCl ₃	líquido	-387,44	206,27
AlCl ₃	sólido	-630,06	109,29	BF ₃	gaseoso	-1120,35	254,01
AlF ₃	gaseoso	-1192,75	276,77	BN	sólido	-228,45	14,81
AlF ₃	sólido	-1431,15	66,48	BO ₂ H	monoclínico	-723,41	37,66
AlI ₃	sólido	-300,83	158,99	BO ₂ H	orthorrombico	-721,74	50,21
AlN	sólido	-287,02	20,17	BO ₃ H ₃	gaseoso	-928,43	295,14
Al(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	sólido	-2203,88	467,77	BO ₃ H ₃	sólido	-969,01	88,83
AlO(OH)	sólido	-912,95	48,45	B ₂ Cl ₄	gaseoso	-460,66	357,31
AlO(OH)	sólido	-920,48	35,27	B ₂ Cl ₄	líquido	-464,84	262,34
Al(OH) ₃	sólido	-1143,91	70,12	B ₂ F ₄	gaseoso	-1410,43	317,15
AlPO ₄	sólido	-1601,22	90,79	B ₂ O ₃	gaseoso	-822,58	283,67
Al ₂ Cl ₆	gaseoso	-1220,47	489,53	B ₂ O ₃	líquido	-1180,37	78,4
Al ₂ O ₃	líquido	-1483,14	99,28	B ₂ O ₃	sólido	-1193,7	53,97
Al ₂ O ₃	α , sólido	-1581,88	50,94	B ₂ O ₃	amorfo	-1182,4	77,82
Al ₂ O ₃	γ , sólido	-1563,94	52,51	B ₃ N ₆ H ₆	líquido	-392,79	199,58
Al ₂ (SO ₄) ₃	sólido	-3100,13	239,32	B ₄ C	sólido	-71,13	27,11
Al ₂ (SO ₄) ₃ · 6H ₂ O	sólido	-4622,57	469,03	Ba	gaseoso	144,77	170,28
Al ₂ SiO ₅	sólido	-2597,43	93,22	Ba	sólido	0	66,94
Al ₂ SiO ₅	sólido	-2596,17	83,81	Ba ⁺⁺	sol. ac.	-560,66	12,55
Al ₂ SiO ₅ · 2H ₂ O	sólido	-2625,88	96,19	BaCO ₃	sólido	-1138,88	112,13
Al ₂ Si ₂ O ₇ · 2H ₂ O	sólido	-3759,32	203,34	BaCl ₂	sólido	-810,86	125,52
Al ₂ Si ₂ O ₇ · 2H ₂ O	sólido	-3778,15	202,92	BaF ₂	sólido	-1148,51	96,23
Al ₄ C ₃	sólido	-196,23	88,95	BaI ₂	sólido	-598	167,4
Al ₆ Si ₂ O ₁₃	sólido	-6441,94	274,89	Ba(NO ₃) ₂	sólido	-794,96	213,8
Ar	gaseoso	0	154,73	BaO	sólido	-528,44	70,29

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	sólido	-2793,24	426,77	CH ₂ O ₂	sol. ac.	-372,38	163,18
BaS	sólido	-456,06	78,24	CH ₃	gaseoso	147,92	194,05
BaSO ₄	sólido	-1353,11	132,21	CH ₃ Br	gaseoso	-25,94	246,27
Be	gaseoso	289,66	136,17	CH ₃ Cl	gaseoso	-62,95	234,26
Be	líquido	9,96	16,54	CH ₃ NO ₂	gaseoso	-6,92	275
Be	sólido	0	9,54	CH ₃ NO ₂	líquido	-14,55	171,9
BeCl ₂	gaseoso	-366,1	251,04	CH ₃ NO ₃	líquido	-40,52	217
BeCl ₂	α , sólido	-446,26	82,68	CH ₄	gaseoso	-50,81	186,1
BeF ₂	gaseoso	-800,54	227,44	CH ₄ N ₂ O	sólido	-196,82	104,6
BeF ₂	sólido	-979,38	53,35	CH ₄ O	gaseoso	-162,52	239,7
Be(OH) ₂	gaseoso	-625,37	247,69	CH ₄ O	líquido	-166,34	126,7
Be(OH) ₂	α , sólido	-814,51	49,37	CO	gaseoso	-137,15	197,56
Bi	gaseoso	168,2	186,9	CO ₂	gaseoso	-394,36	213,64
Bi	sólido	0	56,74	CO ₂	sol. ac.	-386	113
BiClO	sólido	-322,17	120,5	CO ₃ ²⁻	sol. ac.	-527,9	-56,90
BiCl ₃	sólido	-315,06	176,98	CO ₃ H ⁻	sol. ac.	-586,85	91,21
Bi ₂ O ₃	sólido	-493,71	151,46	CS	gaseoso	184,1	210,46
Bi ₂ S ₃	sólido	-140,58	200,41	CS ₂	gaseoso	66,91	237,79
Br	gaseoso	82,43	174,91	CS ₂	líquido	65,27	151,34
Br ⁻	sol. ac.	-103,97	82,42	C ₂ Cl ₂	gaseoso	198,41	271,96
BrCl	gaseoso	-0,96	239,99	C ₂ Cl ₄	gaseoso	21,56	343,31
BrF	gaseoso	-109,16	228,86	C ₂ Cl ₆	gaseoso	-50	397,77
BrF ₃	gaseoso	-229,45	292,42	C ₂ H ₂	gaseoso	209,2	200,83
BrF ₃	líquido	-240,58	178,24	C ₂ H ₄	gaseoso	68,12	219,45
BrF ₅	gaseoso	-350,62	320,08	C ₂ H ₄ O	gaseoso	-132,92	264,2
BrF ₅	líquido	-351,87	225,1	C ₂ H ₄ O	gaseoso	-11,84	243,7
BrH	gaseoso	-53,43	198,59	C ₂ H ₄ O ₂	gaseoso	-378,95	282,5
Br ₂	gaseoso	3,14	245,35	C ₂ H ₄ O ₂	líquido	-389,95	159,83
Br ₂	líquido	0	152,23	C ₂ H ₄ O ₂	sol. ac.	-396,56	178,66
C	gaseoso	669,58	157,99	C ₂ H ₅ Cl	gaseoso	-60,46	275,89
C	diamante	2,9	2,38	C ₂ H ₅ Cl	líquido	-59,41	190,79
C	grafito	0	5,74	C ₂ H ₅ O ₂ N	sólido	-367,02	109,2
CBr ₄	gaseoso	66,94	357,94	C ₂ H ₆	gaseoso	-32,62	229,5
CBr ₄	sólido	47,7	212,55	C ₂ H ₆ O	gaseoso	-114,07	266,6
CCl ₂ O	gaseoso	-204,6	283,42	C ₂ H ₆ O	gaseoso	-168,57	282
CCl ₄	gaseoso	-60,63	309,74	C ₂ H ₆ O	líquido	-174,89	160,67
CCl ₄	líquido	-65,27	216,4	C ₂ H ₆ O ₂	líquido	-327,07	179,5
CF ₄	gaseoso	-878,64	261,5	C ₃ H ₄	gaseoso	202,38	234,9
CH	gaseoso	560,75	182,92	C ₃ H ₄	gaseoso	194,16	248,1
CHCl ₃	gaseoso	-70,41	295,51	C ₃ H ₆	gaseoso	74,66	226,9
CH ₂	gaseoso	371,87	181,04	C ₃ H ₆	gaseoso	104,11	237,9
CH ₂	polietileno	4,4	25,34	C ₃ H ₆ O	gaseoso	-151,82	294,9
CH ₂ Cl ₂	gaseoso	-68,97	270,18	C ₃ H ₆ O	líquido	-154,83	200
CH ₂ O	gaseoso	-112,97	218,66	C ₃ H ₈	gaseoso	-23,43	269,9
CH ₂ O ₂	gaseoso	-350,03	251,6	C ₄ H ₈	gaseoso	72,03	307,4
CH ₂ O ₂	líquido	-359,57	129	C ₄ H ₈ O ₂	líquido	-323,19	259

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
C ₄ H ₁₀	gaseoso	-15,62	310	Ca ₃ (PO ₄) ₂	α , sólido	-3889,86	241
C ₄ H ₁₀	gaseoso	-17,92	294,6	Ca ₃ (PO ₄) ₂	β , sólido	-3899,49	235,98
C ₅ H ₁₀	gaseoso	38,67	292,9	Cd	gaseoso	77,45	167,64
C ₅ H ₁₀	líquido	36,49	204,1	Cd	sólido	0	51,76
C ₅ H ₁₂	gaseoso	-8,11	348,4	Cd ⁺⁺	sol. ac.	-77,58	-73,22
C ₅ H ₁₂	líquido	-9,21	262,7	CdBr ₂	sólido	-296,31	137,24
C ₆ H ₅ Cl	líquido	93,65	194,1	CdCO ₃	sólido	-669,44	92,47
C ₆ H ₅ NO ₂	líquido	141,62	224,3	CdCl ₂	sólido	-343,97	115,27
C ₆ H ₆	gaseoso	129,73	269,2	CdF ₂	sólido	-647,68	77,4
C ₆ H ₁₂	gaseoso	31,75	298,2	CdI ₂	sólido	-201,38	161,08
C ₆ H ₁₂	líquido	26,83	204,1	CdO	sólido	-228,45	54,81
C ₆ H ₁₄	gaseoso	0,3	386,8	CdS	sólido	-156,48	64,85
C ₆ H ₁₄	líquido	-4,26	296	CdSO ₄	sólido	-822,78	123,04
C ₇ H ₈	gaseoso	122,39	319,7	CdSO ₄ · 8/3 H ₂ O	sólido	-1457,98	229,7
C ₇ H ₈	líquido	110,61	219	Cl	gaseoso	105,03	165,1
C ₈ H ₁₈	gaseoso	17,44	463,7	Cl ⁻	sol. ac.	-131,26	56,48
C ₈ H ₁₈	líquido	6,41	361,2	ClF	gaseoso	-55,94	217,78
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	sólido	-1543,52	360	ClF ₃	gaseoso	-123,01	281,5
Ca	gaseoso	145,53	154,78	ClF ₅	gaseoso	-146,77	310,62
Ca	líquido	8,19	50,65	ClH	gaseoso	-95,3	186,79
Ca	α , sólido	0	41,55	ClO ₂	gaseoso	120,5	256,73
Ca	β , sólido	0,22	42,47	Cl ₂	gaseoso	0	222,97
Ca ⁺⁺	sol. ac.	-553,04	-55,23	Cl ₂	sol. ac.	6,9	121,34
CaBr ₂	sólido	-656,05	129,7	Co	gaseoso	380,33	179,41
CaCO ₃	aragonito	-1127,71	88,7	Co	α , sólido	0	30,04
CaCO ₃	calcito	-1128,76	92,88	Co	β , sólido	0,25	30,71
CaC ₂	sólido	-67,78	70,29	Co ⁺⁺	sol. ac.	-54,39	-112,97
CaCl	gaseoso	-130,96	241,42	Co ⁺⁺⁺	sol. ac.	133,89	-305,43
CaCl ₂	gaseoso	-479,18	289,95	CoCl ₂	sólido	-269,87	109,16
CaCl ₂	líquido	-732,16	123,88	CoF ₂	sólido	-647,26	81,96
CaCl ₂	sólido	-750,19	113,8	CoFe ₂ O ₄	sólido	-1032,61	134,72
CaCrO ₄	sólido	-1277,38	133,89	CoO	sólido	-214,22	52,97
CaF ₂	gaseoso	-793,27	273,68	CoSO ₄	sólido	-782,41	117,99
CaF ₂	sólido	-1161,9	68,87	Co ₃ O ₄	sólido	-774,04	102,51
CaH ₂	sólido	-149,79	41,84	Cr	gaseoso	351,87	174,39
CaI ₂	sólido	-529,69	142,26	Cr	sólido	0	23,77
Ca(NO ₃) ₂	sólido	-741,99	193,3	CrCl ₂	sólido	-356,06	115,31
CaO	sólido	-604,17	39,75	CrCl ₂ O ₂	líquido	-510,87	221,75
Ca(OH) ₂	sólido	-896,76	76,15	CrCl ₃	sólido	-486,18	123,01
CaPO ₄ H	sólido	-1679,88	87,86	CrF ₃	sólido	-1087,84	93,89
CaS	sólido	-477,39	56,48	Cr ₂ O ₃	sólido	-1058,13	81,17
CaSO ₄	sólido	-1320,3	98,32	Cs	gaseoso	49,72	175,49
CaSO ₄ · 2H ₂ O	sólido	-1795,73	193,97	Cs	líquido	0,03	92,07
CaSiO ₃	α sólido	-1495,36	87,45	Cs	sólido	0	85,15
CaSiO ₃	β sólido	-1498,71	82,01	Cs ⁺	sol. ac.	-282,04	133,05
Ca ₃ N ₂	sólido	-368,61	104,6	CsBr	sólido	-383,25	121,34

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
CsCl	gaseoso	-257,85	255,96	FeCr ₂ O ₄	sólido	-1343,9	146,02
CsCl	sólido	-414,37	101,18	FeO	gaseoso	217,66	241,84
CsClO ₄	sólido	-306,6	175,27	FeO	sólido	-245,14	57,49
CsF	gaseoso	-373,35	243,09	Fe(OH) ₂	gaseoso	-306,63	282,75
CsF	sólido	-525,39	88,28	Fe(OH) ₂	sólido	-492,03	87,86
CsH	gaseoso	101,67	214,43	Fe(OH) ₃	sólido	-705,56	104,6
CsI	sólido	-333,46	129,7	FeS	sólido	-100,42	60,29
Cu	gaseoso	298,61	166,27	FeSO ₄	sólido	-820,9	107,53
Cu	líquido	8,37	36,25	FeS ₂	sólido	-166,94	52,93
Cu	sólido	0	33,11	Fe ₂ O ₃	sólido	-742,24	87,4
Cu ⁺	sol. ac.	50	40,58	Fe ₂ (SO ₄) ₃	sólido	-2263,05	307,52
Cu ⁺⁺	sol. ac.	65,52	-99,58	Fe ₂ SiO ₄	sólido	-1379,05	145,18
CuBr	sólido	-100,83	96,11	Fe ₃ C	sólido	20,08	104,6
CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	sólido	-893,7	186,19	Fe ₃ O ₄	sólido	-1015,46	146,44
CuCl	gaseoso	63,5	237,09	Ga	gaseoso	238,91	168,95
CuCl	sólido	-119,87	86,19	Ga	sólido	0	40,88
CuCl ₂	sólido	-175,73	108,07	Ga ⁺⁺⁺	sol. ac.	-158,99	-330,54
CuI	sólido	-69,45	96,65	GaBr ₃	sólido	-359,82	179,91
CuN ₃	sólido	344,76	100,42	GaCl ₃	sólido	-454,8	142,26
CuO	gaseoso	216,93	234,6	GaF ₃	sólido	-1085,33	83,68
CuO	sólido	-129,7	42,63	Ga(OH) ₃	sólido	-831,36	100,42
Cu(OH) ₂	sólido	-372,74	108,37	Ga ₂ O ₃	sólido	-998,3	84,98
CuS	sólido	-53,56	66,53	Ge	gaseoso	335,98	167,79
CuSO ₄	sólido	-661,91	108,78	Ge	sólido	0	31,09
CuSO ₄ · H ₂ O	sólido	-918,22	146,02	GeBr ₄	líquido	-331,37	280,75
CuSO ₄ · 3H ₂ O	sólido	-1400,18	221,33	GeCl ₄	gaseoso	-457,31	347,61
CuSO ₄ · 5H ₂ O	sólido	-1880,06	300,41	GeCl ₄	líquido	-462,33	245,6
Cu ₂ O	sólido	-146,02	93,14	GeH ₄	gaseoso	113,39	217,02
Cu ₂ S	α , sólido	-86,19	120,92	GeI ₄	sólido	-144,35	271,12
F	gaseoso	61,92	158,64	GeO	sólido	-237,23	50,21
F ⁻	sol. ac.	-278,82	-13,81	GeO ₂	sólido	-497,06	55,27
FH	gaseoso	-273,22	173,67	GeS	sólido	-71,55	71,13
FH	sol. ac.	-296,85	88,7	H	gaseoso	203,26	114,60
F ₂	gaseoso	0	202,67	H ⁺	sol. ac.	0	0
F ₂ O	gaseoso	-4,6	247,32	H ₂	gaseoso	0	130,57
Fe	gaseoso	370,7	180,38	H ₂	sol. ac.	18	49
Fe	líquido	11,05	34,29	He	gaseoso	0	126,04
Fe	α , sólido	0	27,28	He	sol. ac.	19,25	55,65
Fe ⁺⁺	sol. ac.	-78,87	-137,65	Hg	gaseoso	31,85	174,85
Fe ⁺⁺⁺	sol. ac.	-4,6	-315,89	Hg	líquido	0	76,02
FeCO ₃	sólido	-666,72	92,88	Hg ⁺⁺	sol. ac.	164,43	-32,22
Fe(CO) ₅	líquido	-705,42	338,07	HgBr ₂	sólido	-153,13	171,54
FeCl ₂	gaseoso	-159,62	287,48	HgCl ₂	sólido	-178,66	146,02
FeCl ₂	sólido	-302,34	117,95	HgI ₂	rojo, sólido	-101,67	179,91
FeCl ₃	gaseoso	-247,87	344,1	HgO	rojo, sólido	-58,56	70,29
FeCl ₃	sólido	-334,05	142,26	HgO	amarillo, sólido	-58,43	71,13

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
HgS	rojo, sólido	-50,63	82,42	KClO ₃	sólido	-289,91	142,97
HgS	negro, sólido	-47,7	88,28	KClO ₄	sólido	-304,18	151,04
Hg ₂ ⁺⁺	sol. ac.	153,55	84,52	KF	gaseoso	-344,8	226,5
Hg ₂ Br ₂	sólido	-181,08	217,57	KF	sólido	-533,13	66,57
Hg ₂ CO ₃	sólido	-468,19	179,91	KF ₂ H	sólido	-852,41	104,27
Hg ₂ Cl ₂	sólido	-210,78	192,46	KI	gaseoso	-165,9	258,17
Hg ₂ I ₂	sólido	-111	233,47	KI	sólido	-322,29	104,35
Hg ₂ SO ₄	sólido	-625,88	200,66	KIO ₃	sólido	-425,51	151,46
Hf	gaseoso	576,56	186,78	KH	sólido	-34,04	50,21
Hf	sólido	0	43,56	KMnO ₄	sólido	-713,79	171,71
HfCl ₄	sólido	-901,32	190,79	KNO ₂	sólido	-306,6	152,09
HfF ₄	sólido	-1830,5	112,97	KNO ₃	sólido	-393,13	132,93
HfO ₂	sólido	-1027,17	59,33	KOH	gaseoso	-235,46	244,35
I	gaseoso	70,28	180,68	KOH	líquido	-317,87	98,4
I ⁻	sol. ac.	-51,59	111,29	KOH	sólido	-379,05	79,29
ICl	gaseoso	-5,44	247,44	KSO ₄ H	sólido	-1031,36	138,07
ICl ₃	sólido	-22,34	167,36	K ₂ CO ₃	líquido	-1049,44	170,37
IF	gaseoso	-118,49	236,06	K ₂ CO ₃	sólido	-1064,59	155,52
IF ₇	gaseoso	-818,39	346,44	K ₂ O	sólido	-322,11	94,14
IH	gaseoso	1,72	206,48	K ₂ O ₂	sólido	-429,79	112,97
I ₂	gaseoso	19,36	260,58	K ₂ CrO ₄	sólido	-1295,78	200,12
I ₂	líquido	3,32	150,36	K ₂ PtCl ₆	sólido	-1109,18	333,88
I ₂	sólido	0	116,14	K ₂ SO ₄	sólido	-1316,37	175,73
I ₂	sol. ac.	16,4	137,24	Kr	gaseoso	0	163,97
In	gaseoso	208,74	173,68	Kr	sol. ac.	15,06	61,5
In	sólido	0	57,82	La	gaseoso	330,54	182,3
In ⁺⁺⁺	sol. ac.	-106,27	150,62	La	sólido	0	57,32
InBr	sólido	-169,03	112,97	La ⁺⁺⁺	sol. ac.	-723,41	-184,10
InI	sólido	-120,5	129,7	Li	gaseoso	128,04	138,67
In(OH) ₃	sólido	-761,49	104,6	Li	líquido	0,93	33,94
In ₂ O ₃	sólido	-830,73	104,18	Li	sólido	0	29,1
In ₂ (SO ₄) ₃	sólido	-2439,27	271,96	Li ⁺	sol. ac.	-293,8	14,23
Ir	gaseoso	617,98	193,47	LiCl	gaseoso	-217,26	212,81
Ir	sólido	0	35,48	LiCl	sólido	-384,03	59,3
IrF ₆	sólido	-461,66	247,69	LiF	gaseoso	-361,57	200,16
K	gaseoso	61,17	160,23	LiF	sólido	-588,67	35,66
K	líquido	0,26	71,45	LiH	gaseoso	117,84	170,8
K	sólido	0	55,81	LiH	sólido	-68,46	20,04
K ⁺	sol. ac.	-283,26	102,51	LiI	gaseoso	-134,22	232,12
KAl(SO ₄) ₂	sólido	-2235,47	204,6	LiI	sólido	-269,66	85,77
KBF ₄	sólido	-1785	133,89	LiOH	gaseoso	-252,42	217,57
KBr	sólido	-379,2	96,44	LiOH	sólido	-438,73	42,78
KBrO ₃	sólido	-243,51	149,16	Li ₂ CO ₃	sólido	-1132,44	90,37
KCl	gaseoso	-233,41	238,99	Li ₂ CO ₃	líquido	-1105,55	127,29
KCL	líquido	-395,11	86,65	Li ₂ O	gaseoso	-187,31	229
KCl	sólido	-408,32	82,68	Li ₂ O	sólido	-562,11	37,89

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
Mg	gaseoso	113,07	148,55	NF ₃	gaseoso	-83,26	260,62
Mg	líquido	6,1	42,51	NH ₃	gaseoso	-16,48	192,34
Mg	sólido	0	32,69	NH ₃	sol. ac.	-26,57	111,29
Mg ⁺⁺	sol. ac.	-456,01	-117,99	NH ₄ ⁺	sol. ac.	-79,37	113,39
MgCO ₃	sólido	-1029,26	65,69	NH ₄ Cl	α , sólido	-203,19	94,98
MgCl ₂	gaseoso	-398,8	276,91	NH ₄ NO ₃	sólido	-184,01	151,08
MgCl ₂	líquido	-563,96	129,49	NH ₄ H ₂ PO ₄	sólido	-1214,35	151,9
MgCl ₂	sólido	-592,12	89,63	(NH ₄) ₂ SO ₄	sólido	-899,9	220,3
MgF ₂	gaseoso	-731,5	258,3	NO	gaseoso	86,57	210,65
MgF ₂	sólido	-1071,12	57,24	NOCl	gaseoso	66,11	261,63
MgI ₂	sólido	-358,15	129,7	NO ₂	gaseoso	51,3	239,95
Mg(NO ₃) ₂	sólido	-588,4	164,01	NO ₂ ⁻	sol. ac.	-37,24	140,16
MgO	gaseoso	-21,48	221,29	NO ₂ H	cis, gaseoso	-42,97	248,66
MgO	líquido	-502,46	50,35	NO ₂ H	trans, gaseoso	-45,27	249,12
MgO	sólido	-568,96	26,94	NO ₃ ⁻	sol. ac.	-111,34	146,44
Mg(OH) ₂	gaseoso	-542,06	273,63	NO ₃ H	gaseoso	-74,77	266,27
Mg(OH) ₂	sólido	-833,69	63,18	NO ₃ H	líquido	-80,79	155,6
MgS	sólido	-341,72	46,02	N ₂	gaseoso	0	191,5
MgSO ₄	sólido	-1147,51	91,4	Na	gaseoso	77,3	153,61
MgSiO ₃	líquido	-1415,39	92,52	Na	líquido	0,5	57,85
MgSiO ₃	sólido	-1462,07	67,77	Na	sólido	0	51,45
Mg ₂ SiO ₄	líquido	-2003,19	123,04	Na ⁺	sol. ac.	-261,89	58,99
Mg ₂ SiO ₄	sólido	-2057,93	95,14	NaBH ₄	sólido	-127,11	101,39
Mn	gaseoso	238,49	173,59	NaBr	gaseoso	-177,78	241,12
Mn	a, sólido	0	32,01	NaBr	sólido	-349,26	86,82
Mn ⁺⁺	sol. ac.	-228,03	-73,64	NaCO ₃ H	sólido	-851,86	102,09
MnCO ₃	sólido	-816,72	85,77	NaC ₂ H ₃ O ₂	sólido	-608,84	123,1
MnCl ₂	sólido	-440,53	118,24	NaCl	gaseoso	-201,32	229,7
MnO	sólido	-362,92	59,71	NaCl	líquido	-365,68	95,06
MnO ₂	sólido	-465,18	53,05	NaCl	sólido	-384,04	72,13
Mn(OH) ₂	amorfo	-615,05	99,16	NaClO ₄	sólido	-254,32	142,26
MnS	sólido	-218,4	78,24	NaF	gaseoso	-309,74	217,5
MnSO ₄	sólido	-957,42	112,13	NaF	sólido	-545,09	51,21
MnSiO ₃	sólido	-1240,56	89,12	NaI	sólido	-284,57	98,32
Mn ₂ O ₃	sólido	-881,15	110,46	NaNO ₃	sólido	-365,89	116,32
Mn ₂ SiO ₄	sólido	-1632,18	163,18	NaOH	gaseoso	-215,93	236,4
Mn ₃ O ₄	sólido	-1283,23	155,64	NaOH	líquido	-375,13	74,17
Mo	gaseoso	612,54	181,84	NaOH	sólido	-380,19	64,43
Mo	sólido	0	28,66	NaSO ₄ H	sólido	-992,86	112,97
Mo(CO) ₆	sólido	-877,8	325,93	Na ₂ CO ₃	líquido	-1031,88	155,39
MoF ₆	líquido	-1473,1	259,66	Na ₂ CO ₃	sólido	-1048,08	138,78
MoO ₂	sólido	-533,04	46,28	Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	sólido	-3428,2	564
MoO ₃	sólido	-668,02	77,74	Na ₂ Cl ₂	gaseoso	-565,94	325,52
MoS ₂	sólido	-225,94	62,59	Na ₂ O	sólido	-379,11	75,04
N	gaseoso	455,58	153,19	Na ₂ O ₂	sólido	-449,66	94,81
NFO	gaseoso	-51,04	247,99	Na ₂ S	sólido	-361,36	97,91

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
Na ₂ SO ₃	sólido	-1002,07	146,02	O ₂ H ₂	líquido	-120,42	109,62
Na ₂ SO ₄	sólido	-1269,35	149,62	O ₂ H ₂	sol. ac.	-134,1	143,93
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	sólido	-3647,4	592,04	O ₃	gaseoso	163,18	238,82
Na ₂ S ₂ O ₃	sólido	-1028,01	154,81	Os	gaseoso	744,75	192,46
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	líquido	-2227,72	438,69	Os	sólido	0	32,64
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	sólido	-2230,07	372,38	OsO ₄	amarillo, sólido	-305,01	149,93
Na ₂ SiO ₃	sólido	-1467,38	113,85	OsO ₄	blanco, sólido	-303,76	167,78
Na ₂ Si ₂ O ₅	sólido	-2324,25	164,05	P	gaseoso	280,02	163,09
Na ₃ AlF ₆	sólido	-3114,1	238	P	líquido	0,09	42,89
Na ₃ PO ₄	sólido	-1787,16	173,64	P	rojo, sólido	-12,13	22,8
Nb	gaseoso	681,16	186,15	P	blanco, sólido	0	41,09
Nb	sólido	0	36,4	PBr ₃	líquido	-175,73	240,16
NbBr ₅	sólido	-510,45	259,41	PCl ₃	gaseoso	-267,78	311,67
NbC	sólido	-136,82	35,4	PCl ₃	líquido	-272,38	217,15
NbCl ₃	sólido	-518,82	146,44	PCl ₃ O	gaseoso	-514,32	325,39
NbCl ₃ O	sólido	-782,41	142,26	PCl ₃ O	líquido	-520,91	222,46
NbCl ₄	sólido	-606,68	184,1	PCl ₅	gaseoso	-305,01	364,47
NbCl ₅	sólido	-683,25	210,46	PF ₃	gaseoso	-897,47	273,13
NbF ₅	sólido	-1699,12	160,25	PF ₅	gaseoso	-1520,72	300,7
NbN	sólido	-205,85	34,52	PH ₃	gaseoso	13,39	210,12
NbO	sólido	-378,65	48,12	PO ₄ ⁻⁻⁻	sol. ac.	-1018,8	-221,75
NbO ₂	sólido	-740,57	54,52	PO ₄ H ⁻⁻⁻	sol. ac.	-1089,26	-33,47
Nb ₂ O ₅	sólido	-1766,07	137,24	PO ₄ H ₂ ⁻	sol. ac.	-1130,39	90,37
Ne	gaseoso	0	146,22	PO ₄ H ₃	líquido	-1118,43	146,44
Ne	sol. ac.	19,25	66,11	PO ₄ H ₃	sólido	-1119,22	110,5
Ni	gaseoso	384,51	182,08	PO ₄ H ₃	sol. ac.	-1142,65	158,16
Ni	sólido	0	29,87	P ₄ O ₆	gaseoso	-2084,94	345,6
Ni ⁺⁺	sol. ac.	-45,61	-128,87	P ₄ O ₁₀	gaseoso	-2669,85	403,76
NiCO ₃	sólido	-605,83	87,9	P ₄ O ₁₀	sólido	-2697,84	228,86
Ni(CO) ₄	gaseoso	-587,27	410,45	Pb	gaseoso	161,92	175,26
Ni(CO) ₄	líquido	-588,27	313,38	Pb	líquido	2,22	71,72
NiCl ₂	sólido	-259,06	97,65	Pb	sólido	0	64,81
NiF ₂	sólido	-604,17	73,6	Pb ⁺⁺	sol. ac.	-24,39	10,46
NiO	sólido	-211,71	37,99	PbBr ₂	sólido	-261,92	161,5
Ni(OH) ₂	sólido	-447,27	87,86	PbCO ₃	sólido	-625,51	130,96
NiS	sólido	-79,5	52,97	PbCl ₂	sólido	-314,13	135,98
NiSO ₄	sólido	-759,81	92,05	PbCl ₄	gaseoso	-276,2	384,51
Ni ₃ S ₂	sólido	-197,07	133,89	PbF ₂	sólido	-617,14	110,46
O	gaseoso	231,75	160,95	PbI ₂	sólido	-173,64	174,85
OH ⁻	sol. ac.	-157,29	-10,75	Pb(N ₃) ₂	monoclínico	624,67	148,11
OH ₂	gaseoso	-228,59	188,72	Pb(N ₃) ₂	ortorrómbico	622,16	149,37
OH ₂	líquido	-237,18	69,91	PbO	gaseoso	26,36	239,94
OH ₂	sólido	-236,59	44,77	PbO	líquido	-171,19	85,96
OH ₃ ⁺	sol. ac.	-237,18	69,91	PbO	amarillo, sólido	-187,9	68,7
O ₂	gaseoso	0	205,03	PbO	rojo, sólido	-188,95	66,53
O ₂ H ₂	gaseoso	-105,6	232,63	PbO ₂	sólido	-217,36	68,62

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
Pb(OH) ₂	sólido	-421,07	88	SO ₃ H ⁻	sol. ac.	-527,81	139,75
PbS	sólido	-98,74	91,21	SO ₃ H ₂	sol. ac.	-537,9	232,21
PbSO ₄	sólido	-813,2	148,57	SO ₄ ²⁻	sol. ac.	-744,63	20,08
PbSiO ₃	sólido	-1062,15	109,62	SO ₄ H ⁻	sol. ac.	-756,01	131,8
Pb ₃ O ₄	sólido	-601,24	211,29	SO ₄ H ₂	gaseoso	-656,09	289,11
Pd	gaseoso	339,74	166,94	SO ₄ H ₂	líquido	-690,06	156,9
Pd	sólido	0	37,57	S ₂ Cl ₂	gaseoso	-31,8	331,37
Pd ⁺⁺	sol. ac.	176,56	-117,15	Sb	gaseoso	222,17	180,16
PdCl ₂	sólido	-125,1	104,6	Sb	sólido	0	45,69
PdI ₂	sólido	-62,76	150,62	SbBr ₃	sólido	-239,32	207,11
PdS	sólido	-66,94	46,02	SbCl ₃	gaseoso	-301,25	337,69
PdS ₂	sólido	-74,48	79,5	SbCl ₃	sólido	-323,72	184,1
Pt	gaseoso	520,49	192,3	SbCl ₅	gaseoso	-334,34	401,83
Pt	sólido	0	41,63	SbCl ₅	líquido	-350,2	301,25
PtS	sólido	-76,15	55,06	Sb ₂ O ₃	sólido	-626,55	123,01
PtS ₂	sólido	-99,58	74,68	Sb ₂ O ₄	sólido	-795,8	127,19
Rb	gaseoso	55,86	169,99	Sb ₂ O ₅	sólido	-829,27	125,1
Rb	sólido	0	69,45	Sb ₂ S ₃	sólido	-173,64	182
Rb ⁺	sol. ac.	-282,21	124,26	Sb ₂ Te ₃	sólido	-55,23	234,3
RbBr	sólido	-378,15	108,28	Sb ₄ O ₆	sólido	-1268,17	220,92
RbI	sólido	-325,52	118,03	Sc	gaseoso	336,06	174,68
Re	gaseoso	724,67	188,83	Sc	sólido	0	34,64
Re	sólido	0	36,86	ScF ₃	sólido	-1555,61	92,05
ReCl ₃	sólido	-188,28	123,85	Sc(OH) ₃	sólido	-1233,44	100,42
ReO ₂	sólido	-368,19	72,8	Sc ₂ O ₃	sólido	-1819,41	77,4
Re ₂ O ₇	sólido	-1066,08	207,11	Se	gaseoso	187,07	176,61
Rh	gaseoso	510,87	185,7	Se	sólido	0	42,44
Rh	sólido	0	31,51	SeF ₆	gaseoso	-1016,71	313,76
Ru	gaseoso	595,8	186,4	SeH ₂	gaseoso	15,9	218,91
Ru	sólido	0	28,53	SeO	gaseoso	26,82	233,89
RuO ₄	gaseoso	-139,75	289,95	Si	gaseoso	411,29	167,86
RuO ₄	líquido	-152,3	183,26	Si	líquido	40,83	44,46
RuO ₄	sólido	-152,3	146,44	Si	sólido	0	18,83
S	gaseoso	238,28	167,71	SiBr ₄	gaseoso	-431,79	377,77
S	líquido	0,39	35,31	SiBr ₄	líquido	-443,92	277,82
S	rómbico	0	32,07	SiC	α , sólido	-60,25	16,48
S	monoclinico	0,04	32,75	SiC	β , sólido	-62,76	16,61
S ²⁻	sol. ac.	85,77	-14,64	SiCl ₄	gaseoso	-617,01	330,62
SF ₆	gaseoso	-1105,41	291,71	SiCl ₄	líquido	-619,9	239,74
SH ₂	gaseoso	-33,56	205,69	SiF ₄	gaseoso	-1572,68	282,38
SH ₂	sol. ac.	-27,87	121,34	SiH ₄	gaseoso	56,9	204,51
SO	gaseoso	-19,84	221,84	SiO	gaseoso	-126,36	211,5
SO ₂	gaseoso	-300,19	248,11	SiO ₂	gaseoso	-306,93	228,86
SO ₃	gaseoso	-371,08	256,65	SiO ₂	líquido	-850,21	47,93
SO ₃	β , sólido	-368,99	52,3	SiO ₂	α cristobalito	-853,67	50,05
SO ₃ ²⁻	sol. ac.	-486,6	-29,29	SiO ₂	β cristobalito	-854,54	43,4

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)	Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
SiO ₂	α cuarzo	-856,67	41,84	Tl	sólido	0	64,18
SiO ₂	β cuarzo	-856,48	41,46	Tl ⁺	sol. ac.	-32,38	125,52
SiO ₃ H ₂	sólido	-1092,44	133,89	Tl ⁺⁺⁺	sol. ac.	214,64	-192,46
SiO ₄ H ₄	sólido	-1333,02	192,46	TlBr	sólido	-167,36	120,5
Si ₂ O ₅ H ₂	sólido	-1943,47	192,46	TlCl	sólido	-184,93	111,25
Si ₂ O ₇ H ₆	sólido	-2425,88	330,54	TlI	sólido	-125,39	127,61
Si ₃ N ₄	sólido	-642,66	101,25	TlNO ₃	sólido	-152,46	160,67
Sn	gaseoso	267,36	206,03	TlOH	sólido	-195,76	87,4
Sn	α sólido	0,13	44,14	Tl ₂ CO ₃	sólido	-614,63	155,23
Sn	β sólido	0	51,55	Tl ₂ O	sólido	-147,28	125,52
SnBr ₄	gaseoso	-331,37	411,83	Tl ₂ S	sólido	-93,72	150,62
SnBr ₄	sólido	-350,2	264,43	Tl ₂ SO ₄	sólido	-830,48	230,54
SnCl ₄	gaseoso	-432,21	365,68	U	gaseoso	478,82	198,52
SnCl ₄	líquido	-440,16	258,57	U	sólido	0	50,33
SnH ₄	gaseoso	188,28	227,57	U ⁺⁺⁺	sol. ac.	-520,49	-125,52
SnO	sólido	-256,9	56,48	U ⁺⁺⁺⁺	sol. ac.	-579,07	-326,35
SnO ₂	sólido	-519,65	52,3	UBr ₄	sólido	-788,68	242,67
Sn(OH) ₂	gefällt	-491,62	154,81	UC ₂	sólido	-175,73	58,58
SnS	sólido	-98,32	76,99	UCl ₄	sólido	-962,32	198,32
Sr	gaseoso	110,04	164,54	UCl ₆	sólido	-1010,44	285,77
Sr	sólido	0	54,39	UF ₄	sólido	-1761,46	151,04
Sr ⁺⁺	sol. ac.	-557,31	-39,33	UF ₆	sólido	-2033,42	227,82
SrCO ₃	sólido	-1137,63	97,49	UI ₄	sólido	-527,6	271,96
SrCl ₂	sólido	-781,15	117,15	UN	sólido	-313,8	75,31
SrO	sólido	-559,82	54,39	UO ₂	sólido	-1075,29	77,82
SrSO ₄	sólido	-1334,28	121,75	UO ₃	sólido	-1184,07	98,62
Te	gaseoso	157,11	182,63	V	gaseoso	453,21	182,19
Te	sólido	0	49,71	V	sólido	0	28,91
TeO ₂	sólido	-270,29	79,5	V ⁺⁺	sol. ac.	-217,57	-129,70
Ti	gaseoso	425,09	180,19	V ⁺⁺⁺	sol. ac.	-242,25	-230,12
Ti	sólido	0	30,63	VCl ₂	sólido	-405,85	97,07
TiBr ₃	sólido	-523,84	176,56	VCl ₃	sólido	-511,28	130,96
TiBr ₄	sólido	-589,53	243,51	VCl ₃ O	líquido	-668,6	244,35
TiC	sólido	-180,75	24,23	VCl ₄	líquido	-503,75	255,22
TiCl ₂	sólido	-464,42	87,45	VF ₅	líquido	-1373,19	175,73
TiCl ₃	sólido	-653,54	139,75	VN	sólido	-191,21	37,28
TiCl ₄	líquido	-737,22	252,34	VO	sólido	-404,17	38,91
TiF ₄	amorfo	-1559,38	133,97	VSO ₄	sólido	-1169,85	108,78
TiH ₂	sólido	-80,33	29,71	V ₂ O ₃	sólido	-1139,3	98,32
TiI ₄	sólido	-371,54	249,37	V ₂ O ₄	α , sólido	-1318,38	102,51
TiN	sólido	-309,62	30,25	V ₂ O ₅	sólido	-1419,63	130,96
TiO	α , sólido	-494,97	34,77	W	gaseoso	807,09	173,84
TiO ₂	anatasio, sólido	-884,5	49,92	W	líquido	43,07	45,7
TiO ₂	rutilo, sólido	-889,52	50,33	W	sólido	0	32,64
Ti ₂ O ₃	sólido	-1434,28	78,78	WCl ₆	α , sólido	-455,65	238,49
Tl	gaseoso	147,44	180,85				

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
WF ₆	gaseoso	-1632,18	340,95
WF ₆	líquido	-1631,47	251,46
WO ₂	sólido	-533,92	50,54
WO ₃	sólido	-764,08	75,9
Xe	gaseoso	0	169,57
Xe	sol. ac.	13,39	65,69
Zn	gaseoso	95,18	160,87
Zn	sólido	0	41,63
Zn ⁺⁺	sol. ac.	-147,03	-112,13
ZnBr ₂	sólido	-312,13	138,49
ZnCO ₃	sólido	-731,57	82,42
ZnCl ₂	sólido	-369,43	111,46
ZnF ₂	sólido	-713,37	73,68

Fórmula	Fase	μ (kJ)	S/n (Ct/mol)
ZnI ₂	sólido	-208,95	161,08
ZnO	sólido	-318,32	43,64
Zn(OH) ₂	sólido	-555,13	81,59
ZnS	sólido	-201,29	57,74
ZnSO ₄	sólido	-874,46	119,66
Zr	gaseoso	566,51	181,25
Zr	sólido	0	38,99
ZrC	sólido	-199,58	32,17
ZrCl ₄	sólido	-889,94	181,59
ZrF ₄	β , monoclinico	-1810	104,6
ZrH ₂	sólido	-128,87	35,02
ZrN	sólido	-336,39	38,87