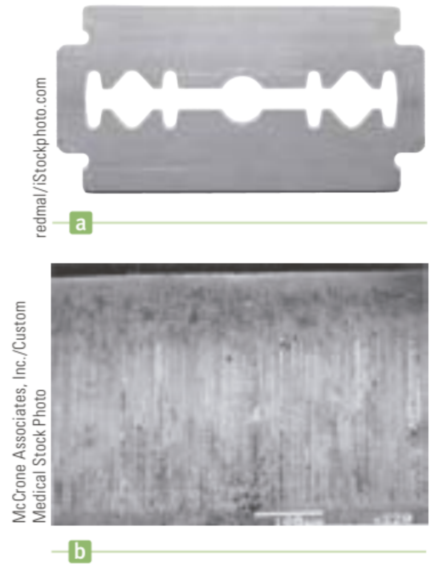
Trabajo y fuerzas disipativas

El *trabajo friccional* es en extremo importante en la vida cotidiana ya que es imposible realizar casi cualquier otra clase de trabajo sin él. El esquimal en el último caso, por ejemplo, depende de la fricción superficial para jalar su trineo. De lo contrario, la cuerda se deslizaría de sus manos y no ejercería fuerza sobre el trineo, mientras que sus pies se resbalarían y caería de bruces. Los automóviles no funcionarían sin fricción, ni las bandas transportadoras ni nuestro tejido muscular.

El trabajo que se realiza al empujar o jalar un objeto es la aplicación de una sola fuerza. La fricción, por otro lado, es un proceso complejo causado por numerosas interacciones microscópicas sobre toda el área de las superficies en contacto. Considere un bloque metálico que se desliza sobre una superficie metálica. Los "dientes" microscópicos en el bloque encuentran irregularidades igualmente microscópicas en la superficie subyacente. Al presionar entre sí, los dientes se deforman, se calientan y se sueldan a la superficie opuesta. Es preciso realizar un trabajo para romper estos enlaces temporales y eso ocasiona un gasto de energía de movimiento del bloque, que se analizará en la sección siguiente. La energía perdida por el bloque calienta tanto al bloque como a su entorno, con cierta energía convertida en sonido.

La fuerza de fricción de dos objetos en contacto y en movimiento relativo uno de otro siempre disipa energía en estas formas relativamente complejas. Para nuestros fines, la frase "trabajo realizado por fricción" denotará el efecto de estos procesos solo sobre la energía mecánica.



El borde de una navaja para rasurar parece liso a la vista, pero bajo un microscopio se confirma que tiene numerosas irregularidades.

Fuerzas conservativas y no conservativas

Hay dos categorías generales de fuerzas. La primera se denomina **fuerza conservativa**. La gravedad es probablemente el mejor ejemplo. Para comprender el origen del nombre, considere una clavadista que sube hasta la parte superior de una plataforma de 10 m. La clavadista tiene que realizar un trabajo contra la gravedad al subir. Una vez arriba, sin embargo, puede recuperar el trabajo como energía cinética al efectuar un clavado. Su rapidez justo antes de chocar con el agua le dará una energía cinética igual al trabajo que realizó contra la gravedad al subir la plataforma, menos el efecto de algunas fuerzas no conservativas, como la resistencia del aire y la fricción muscular interna.

Una **fuerza no conservativa** por lo general es disipadora, lo que significa que tiende a dispersar de forma aleatoria la energía de los cuerpos sobre los que actúa. Esta dispersión de energía con frecuencia toma la forma de calor o sonido. La fricción cinética y la resistencia al avance del aire son buenos ejemplos. Las fuerzas propulsoras, como la fuerza ejercida por un motor a reacción sobre un avión o por una hélice en un submarino, también son no conservativas.

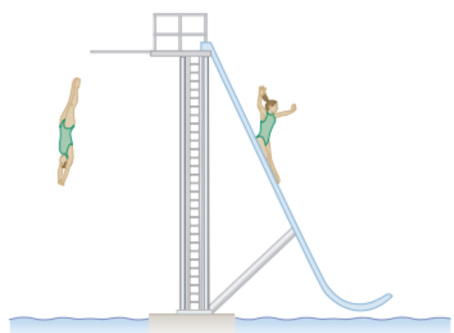


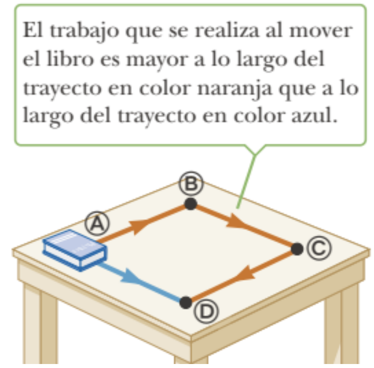
Figura 5.10 Dado que el campo gravitacional es conservativo, la clavadista vuelve a ganar como energía cinética el trabajo que realizó contra la gravedad al subir por la escalera. Al deslizarse por el tobogán sin fricción se tiene el mismo resultado.

El trabajo realizado contra una fuerza no conservativa no se puede recuperar con facilidad. Arrastrar los objetos sobre una superficie rugosa es una acción que requiere trabajo. Cuando el esquimal del ejemplo 5.2 arrastró el trineo por un terreno con coeficiente de fricción diferente de cero, el trabajo neto fue menor que en el caso sin fricción. La energía faltante se fue en calentar el trineo y su entorno. Como se verá en el estudio de la termodinámica, no es posible evitar esas pérdidas ni recuperar toda la energía; por lo tanto esas fuerzas se denominan no conservativas.

Otra forma de caracterizar las fuerzas conservativas y no conservativas es medir el trabajo realizado por una fuerza sobre un objeto que viaja entre dos puntos a lo largo de trayectorias diferentes. El trabajo realizado por la gravedad sobre alguien que se desliza por un tobogán sin fricción, como en la figura 5.10, es el mismo que el realizado sobre alguien que efectúa un clavado desde la misma altura. Esta igualdad no es válida para las fuerzas no conservativas. Por ejemplo, deslizar un libro directamente desde el punto Ⓐ al punto Ⓓ en la figura 5.11 requiere cierta cantidad de trabajo contra la fricción, pero deslizar el libro a lo largo de los otros tres trayectos del cuadrado, de Ⓐ a Ⓑ, Ⓑ a Ⓒ y por último de Ⓒ a Ⓓ, requiere tres veces más trabajo. Esta observación inspira la definición siguiente de fuerza conservativa:

Una fuerza es conservativa si el trabajo que realiza moviendo un objeto entre dos puntos es el mismo sin importar qué trayectoria se tome.

◀ Fuerza conservativa



Como hemos visto, las fuerzas no conservativas no tienen esta propiedad. El teorema del trabajo y la energía, la ecuación 5.7, se puede reescribir en términos del trabajo realizado por fuerzas conservativas W_c y del trabajo realizado por fuerzas no conservativas W_{nc} dado que el trabajo neto es solo la suma de estas dos:

$$W_{nc} + W_c = \Delta EC \qquad [5.8]$$

Resulta que las fuerzas conservativas tienen otra propiedad útil: el trabajo que realizan se puede tomar como algo llamado **energía potencial**, una cantidad que depende solo de los puntos inicial y final de una curva, no de la trayectoria tomada.

▲ **FIGURA 5.20 Fuerza no conservativa y pérdida de energía** La fricción es una fuerza no conservativa: cuando hay fricción y efectúa trabajo, no se conserva la energía mecánica. ¿Puede el lector deducir a partir de la imagen qué está sucediendo con el trabajo efectuado por el motor sobre la rueda de esmeril, después de que el trabajo se convierte en energía cinética de rotación? (Observe que prudentemente la persona se colocó una máscara, no tan sólo gafas como muchos sugieren.)

Energía total y fuerzas no conservativas

En los ejemplos anteriores, ignoramos la fuerza de fricción, que probablemente es la fuerza no conservativa más común. En general, tanto las fuerzas conservativas como las no conservativas pueden efectuar trabajo sobre objetos. Sin embargo, como vimos, cuando algunas fuerzas no conservativas efectúan trabajo, no se conserva la energía mecánica total. Se "pierde" energía mecánica a través del trabajo efectuado por fuerzas no conservativas, como la fricción.

El lector quizá piense que ya no vamos usar un enfoque de energía para analizar problemas en los que intervienen tales fuerzas no conservativas, ya que se perdería o se disiparía energía mecánica (◀figura 5.20). Sin embargo, en algunos casos podemos usar la energía total para averiguar cuánta energía se perdió en el trabajo efectuado por una fuerza no conservativa. Suponga que un objeto tiene inicialmente energía mecánica y que fuerzas no conservativas efectúan un trabajo W_{nc} sobre él. Partiendo del teorema trabajo-energía, tenemos

$$W = \Delta K = K - K_o$$

En general, el trabajo neto (W) podría efectuarse tanto con fuerzas conservativas (W_c) como por fuerzas no conservativas (W_{nc}), así que

$$W_c + W_{nc} = K - K_o \qquad (5.12)$$

Recordemos, sin embargo, que el trabajo efectuado por fuerzas conservativas es igual a $-\Delta U$, es decir, $W_{nc} = U_o - U$, y la ecuación 5.12 se convierte entonces en

$$W_{nc} = K - K_o - (U_o - U)$$
$$= (K + U) - (K_o + U_o)$$

Por lo tanto,

$$W_{nc} = E - E_o = \Delta E \qquad (5.13)$$

Así pues, el trabajo efectuado por las fuerzas no conservativas que actúan sobre un sistema es igual al cambio de energía mecánica. Cabe señalar que, en el caso de fuerzas disipadoras, $E_o > E$. Así, el cambio es negativo e indica una disminución de la energía mecánica. Esta condición coincide en cuanto al signo con W_{nc} que, en el caso de la fricción, también sería negativo. El ejemplo 5.14 ilustra este concepto.

Note que en un sistema no conservativo, la *energía total* (*no* la energía mecánica total) se conserva (incluidas las formas no mecánicas de energía, como el calor); pero no toda está disponible para efectuar trabajo mecánico. En un sistema conservativo, se obtiene lo que se aporta, por decirlo de alguna manera. Es decir, si efectuamos trabajo sobre el sistema, la energía transferida estará disponible para efectuar trabajo. Sin embargo, hay que tener presente que los sistemas conservativos son idealizaciones, porque hasta cierto punto todos los sistemas reales son no conservativos. No obstante, trabajar con sistemas conservativos ideales nos ayuda a entender la conservación de la energía.

La energía total siempre se conserva. En su estudio de la física, el lector conocerá otras formas de energía, como las energías térmica, eléctrica, nuclear y química. En general, en los niveles microscópico y submicroscópico, estas formas de energía se pueden describir en términos de energía cinética y energía potencial. Asimismo, aprenderá que la masa es una forma de energía y que la ley de conservación de la energía debe tomar en cuenta esta forma para aplicarse al análisis de las reacciones nucleares.

Se presenta un ejemplo de energía de conversión en la sección A fondo 5.2.

5.6 Potencia

OBJETIVOS: *a*) Definir potencia y *b*) describir la eficiencia mecánica.

Quizás una tarea específica requeriría cierta cantidad de trabajo, pero ese trabajo podría efectuarse en diferentes lapsos de tiempo o con diferentes tasas. Por ejemplo, suponga que tenemos que podar un césped. Esta tarea requiere cierta cantidad de trabajo, pero podríamos hacerlo en media hora o tardar una o dos horas. Aquí hay una distinción práctica. Por lo regular no sólo nos interesa la cantidad de trabajo efectuado, sino también cuánto tiempo tarda en realizarse; es decir, la rapidez con que se efectúa. *La rapidez con que se efectúa trabajo* se llama **potencia**.

La potencia media es el trabajo realizado dividido entre el tiempo que tomó realizarlo, es decir, el trabajo por unidad de tiempo:

$$\overline{P} = \frac{W}{t} \tag{5.14}$$

A FONDO 5.2 CONVERSIÓN DE ENERGÍA HÍBRIDA

Como ya aprendimos, la energía puede transformarse de una forma a otra. Un ejemplo interesante es la conversión que ocurre en los nuevos automóviles híbridos, los cuales tienen tanto un motor de gasolina (de combustión interna) como un motor eléctrico impulsado por una batería, y donde ambos se utilizan para suministrar energía al vehículo.

Un automóvil en movimiento tiene energía cinética y cuando usted oprime el pedal del freno para detener el vehículo, se pierde energía cinética. Por lo común, los frenos de un auto realizan ese frenado mediante fricción, y la energía se disipa en forma de calor (conservación de energía). Sin embargo, con los frenos de un automóvil híbrido, parte de esa energía se convierte en energía eléctrica y se almacena en la batería del motor correspondiente. Este proceso se conoce como *frenado por recuperación*. Es decir, en vez de utilizar frenos de fricción regular para detener el vehículo, se usa el motor eléctrico. Con tal sistema, el motor se desplaza en reversa y funciona como generador, al convertir la energía cinética que se pierde en energía eléctrica. (Véase la sección 20.2 para la operación de generadores.) La energía se almacena en la batería para su uso posterior (figura 1).

Los automóviles híbridos también deben incluir frenos de fricción regular para cuando sea necesario un frenado rápido. (Véase A fondo 20.2 de la página 666, para conocer más acerca de los híbridos.)

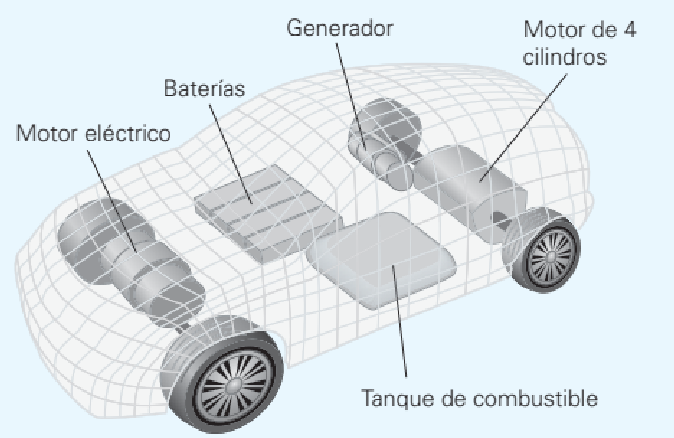


FIGURA 1 Automóvil híbrido Diagrama que muestra los principales componentes. Véase el texto para conocer su descripción.

Si nos interesa el trabajo efectuado por (y la potencia de) una fuerza constante de magnitud F que actúa mientras un objeto tiene un desplazamiento paralelo de magnitud d, entonces

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{Fd}{t} = F\left(\frac{d}{t}\right) = F\overline{v} \qquad (5.15)$$

Unidad SI de potencia: J/s o watt (W)

donde suponemos que la fuerza está en dirección del desplazamiento. Aquí, $\overline{v}$ es la magnitud de la velocidad media. Si la velocidad es constante, entonces $\overline{P} = P = Fv$. Si la fuerza y el desplazamiento no tienen la misma dirección, escribimos

$$\overline{P} = \frac{F(\cos\theta)d}{t} = F\overline{v}\cos\theta \qquad (5.16)$$

donde θ es el ángulo entre la fuerza y el desplazamiento.

Como puede verse por la ecuación 5.15, la unidad SI de potencia es joules por segundo (J/s), pero se da otro nombre a esta unidad: **watt (W)**:

$$1\ \text{J/s} = 1\ \text{watt (W)}$$

La unidad SI de potencia se llama así en honor de James Watt (1736-1819), un ingeniero escocés que desarrolló una de las primeras máquinas de vapor prácticas. Una unidad muy utilizada de potencia eléctrica es el *kilowatt* (kW).

La unidad inglesa de potencia es el pie-libra por segundo (ft · lb/s). Sin embargo, se usa con mayor frecuencia una unidad más grande, el **caballo de fuerza (hp)**:

$$1\ \text{hp} = 550\ \text{ft}\cdot\text{lb/s} = 746\ \text{W}$$

La potencia nos dice con qué rapidez se está efectuando trabajo o con qué rapidez se está transfiriendo energía. Por ejemplo, la potencia de un motor suele especificarse en caballos de fuerza. Un motor de 2 hp puede efectuar cierta cantidad de trabajo en la mitad del tiempo que tardaría en efectuarlo un motor de 1 hp, o puede efectuar el doble del trabajo en el mismo tiempo. Es decir, un motor de 2 hp es dos veces más “potente” que uno de 1 hp.

Nota: en la época de Watt, las máquinas de vapor estaban sustituyendo a los caballos que trabajaban en las minas y molinos. Para caracterizar el desempeño de su nueva máquina, que era más eficiente que las existentes, Watt usó como unidad la tasa media con que un caballo podía efectuar trabajo: un caballo de fuerza.

Eficiencia

Las máquinas y los motores son implementos de uso muy común en la vida cotidiana, y con frecuencia hablamos de su eficiencia. La eficiencia implica trabajo, energía y/o potencia. Todas las máquinas, sean simples o complejas, que efectúan trabajo tienen piezas mecánicas que se mueven, por lo que una parte de la energía aportada siempre se pierde por la fricción o alguna otra causa (quizá en forma de sonido). Por ello, no todo el aporte de energía se invierte en realizar trabajo útil.

En esencia, la eficiencia mecánica es una medida de lo que obtenemos a cambio de lo que aportamos, es decir, el trabajo *útil* producido en comparación con la energía aportada. La **eficiencia, ε,** se da como una fracción (o porcentaje):

$$\varepsilon = \frac{\text{trabajo producido}}{\text{energía aportada}}(\times 100\%) = \frac{W_{\text{sale}}}{E_{\text{entra}}}(\times 100\%) \qquad (5.17)$$

La eficiencia es una cantidad adimensional

Por ejemplo, si una máquina recibe 100 J (de energía) y produce 40 J (de trabajo), su eficiencia es

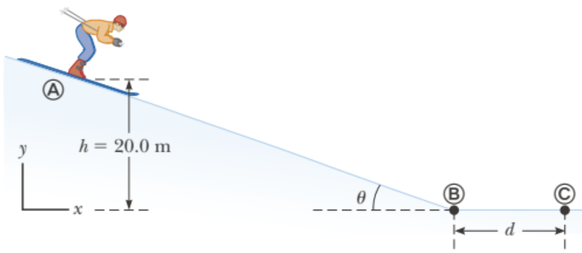
$$\varepsilon = \frac{W_{\text{sale}}}{E_{\text{entra}}} = \frac{40\ \text{J}}{100\ \text{J}} = 0.40\ (\times 100\%) = 40\%$$

Una eficiencia de 0.40, o del 40%, significa que el 60% de la energía aportada se pierde debido a la fricción o alguna otra causa y no sirve para lo que se requiere. Si dividimos ambos términos del cociente de la ecuación 5.17 entre el tiempo t, obtendremos $W_{\text{sale}}/t = P_{\text{sale}}$ y $E_{\text{entra}}/t = P_{\text{entra}}$. Así, escribimos la eficiencia en términos de potencia, P:

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{sale}}}{P_{\text{entra}}}(\times 100\%) \qquad (5.18)$$

PROBLEMA 1

Un esquiador parte del reposo en la cima de un plano inclinado con una altura de 20.0 m, como en la figura 5.19. En el fondo del plano, el esquiador encuentra una superficie horizontal donde el coeficiente de fricción cinética entre los esquíes y la nieve es 0.210. a) Encuentre la rapidez del esquiador en el fondo. b) ¿Qué tan lejos viaja el esquiador sobre la superficie horizontal antes de llegar al reposo? Ignore la resistencia del aire.

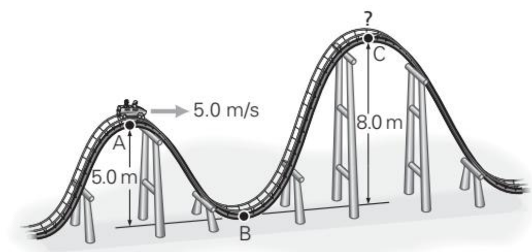


PROBLEMA 2

Un convoy de montaña rusa viaja sobre una vía sin fricción como se muestra en la figura.

a) Si su rapidez en el punto A es de 5.0 $^{m}/_{s}$, **¿qué rapidez tendrá en B?**

b) ¿Llegará al punto C?



PROBLEMA 3

Un estudiante anima a su profesor de (masa 80 kg) a realizar un salto de Bungee Jumping (en este caso, a dejarse caer desde un puente de 13,2 m de altura) atado a una cuerda elástica de longitud natural 3,2 m y constante elástica ke=400 N/m. Responde:

a) ¿El profe llega a tocar el suelo?

b) ¿Cuál es la velocidad máxima que alcanza el profesor durante la caída?

Despreciar el rozamiento del aire.