Capítulo 4
La conservación de la energía

Contenido:

¿Qué es la energía?
Energía potencial gravitatoria
Energía Cinética
Otras formas de energía

¿Qué es la energía?

Una vez acabada nuestra descripción de las cosas en general, iniciamos en este capítulo nuestro estudio más detallado de los diferentes aspectos de la física. Para ilustrar las ideas y el tipo de razonamientos que podrían utilizarse en física teórica vamos a examinar ahora una de las leyes más básicas de la física, la ley de conservación de la energía.

Hay un hecho, o si ustedes prefieren, una *ley,* que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No hay excepción conocida a esta ley: es exacta hasta donde sabemos. Se denomina ley de *conservación de la energía. Establece* que hay una cierta magnitud, que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que sufre la naturaleza. Esta es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; dice que hay una magnitud numérica que no cambia cuando algo sucede. No es una descripción de un mecanismo, o algo concreto; se trata sólo del extraño hecho de que podemos calcular cierto número, y que si lo volvemos a calcular después de haber estado observando a la naturaleza haciendo sus trucos, este número es el mismo. (Algo parecido al alfil en una casilla blanca que, después de varias jugadas cuyos detalles se desconocen-, sigue estando en una casilla blanca. Es una ley de este tipo.) Puesto que es una idea abstracta, ilustraremos su significado con una analogía.

Imaginemos a un niño, quizá «Daniel el Travieso», que tiene unos bloques que son absolutamente indestructibles y no pueden dividirse en piezas. Cada uno de ellos es igual que los otros. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre le ha dejado por la mañana con sus 28 bloques en una habitación. Al caer la tarde, sintiendo curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado y descubre una ley fenoménica: haga él lo que haga con los bloques, ¡siempre sigue habiendo 28! Esto continúa durante varios días, hasta que un día sólo hay 27 bloques; pero tras una pequeña búsqueda la madre encuentra que hay uno bajo la alfombra; ella debe mirar en todas partes para estar segura de que el número de bloques no ha variado. Un día, sin embargo, el número parece haber cambiado: hay sólo 26 bloques. Una investigación cuidadosa pone de manifiesto que la ventana estaba abierta, y al buscar fuera aparecen los otros dos bloques. Otro día, un recuento cuidadoso indica que ¡hay 30 bloques! Esto provoca una consternación considerable, hasta que la madre cae en la cuenta de que Bruce vino de visita trayendo sus propios bloques, y dejó algunos en casa de Daniel. Una vez que ella se ha deshecho de los bloques extra, cierra la ventana, no deja que entre Bruce, y entonces todo sigue correcto… hasta que en cierto momento cuenta y encuentra sólo 25 bloques. Sin embargo, hay una caja en la habitación, una caja de juguetes; la madre va a abrir la caja de juguetes pero el niño dice: «No, no abras mi caja de juguetes», y chilla. La madre tiene prohibido abrir la caja de juguetes. Como es extraordinariamente curiosa y algo ingeniosa, ¡ella inventa una treta! Sabe que cada bloque pesa 100 gramos, así que pesa la caja en un instante en que ella ve 28 bloques y el peso de la caja es de 600 gramos. Cada nueva ocasión en que quiere hacer la comprobación, pesa de nuevo la caja, resta 600 gramos y lo divide por 100. Descubre lo siguiente:

Número de bloques vistos + (peso de la caja - 600 g) / 100 g = constante
(4.1)

En otras ocasiones parece que hay algunas nuevas desviaciones, pero un cuidadoso estudio indica que el nivel del agua sucia de la bañera está cambiando. El niño está arrojando bloques al agua y la madre no puede verlos porque el agua está muy sucia, pero puede descubrir cuántos bloques hay en el agua añadiendo otro término a su fórmula. Puesto que la altura original del agua era de 15 centímetros y cada bloque eleva el agua medio centímetro, esta nueva fórmula sería:

Número de bloques vistos + (peso de la caja - 600 g) / 100 g +
+ (altura del agua - 15 cm / 0,5 cm = constante
(4.2)

A medida que aumenta la complejidad de su mundo, la madre encuentra toda una serie de términos que representan formas de calcular cuántos bloques hay en los lugares donde ella no puede mirar. Como resultado, encuentra una fórmula compleja, una magnitud que *debe ser calculada,* que siempre tiene el mismo valor.

¿Qué analogía hay entre esta historia y la conservación de la energía? El aspecto más notable que debe abstraerse de esta imagen es que *no hay bloques.* Quitemos los primeros términos en 4.1 y 4.2 y nos encontraremos calculando cosas más o menos abstractas. La analogía abarca los puntos siguientes. En primer lugar, cuando estamos calculando la energía, a veces parte de ella sale del sistema y se pierde, o a veces algo de ella entra. Para verificar la conservación de la energía debemos tener cuidado en no introducir ni quitar nada. En segundo lugar, la energía tiene muchas *formas diferentes,* y hay una fórmula para cada una. Estas son: energía gravitatoria, energía cinética, energía térmica, energía elástica, energía eléctrica, energía química, energía radiante, energía nuclear, energía de masa. Si sumamos las fórmulas para cada una de estas contribuciones, la suma no cambiará, salvo que entre o salga energía.

Es importante darse cuenta de que en la física actual no tenemos conocimiento de qué *es* la energía. No tenemos una imagen en la que la energía aparezca en pequeñas gotas de un tamaño definido. *No* es así. Sin embargo, existen fórmulas para calcular cierta magnitud numérica, y cuando las sumamos dan «28»: siempre el mismo número. Es algo abstracto en cuanto que no nos dice el mecanismo o las razones para las diversas fórmulas.

Energía potencial gravitatoria

La conservación de la energía sólo puede entenderse si disponemos de las fórmulas para todas sus formas. Quiero discutir la fórmula para la energía gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra, y quiero derivar esta fórmula de una manera que no tiene nada que ver con la historia, sino que es simplemente una línea de razonamiento concebida para esta lección concreta a fin de ofrecerles una ilustración del hecho notable de que muchas cosas acerca de la naturaleza pueden extraerse de unos pocos hechos y por razonamiento riguroso. Es una ilustración del tipo de trabajo en que se ven envueltos los físicos teóricos. Está estructurado siguiendo un excelente razonamiento del señor Carnot sobre la eficiencia de las máquinas de vapor[3].

Consideremos máquinas para levantar pesos: máquinas que tienen la propiedad de que levantan un peso mediante el descenso de un segundo peso. Hagamos también una hipótesis: que *no hay nada semejante a un movimiento perpetuo* en estas máquinas de levantar pesos. (De hecho, el que no hay movimiento perpetuo en absoluto es un enunciado general de la ley de la conservación de la energía.) Debemos tener cuidado al definir el movimiento perpetuo. Hagámoslo, en primer lugar, para las máquinas de levantar pesos. Si, una vez que hemos elevado y bajado muchos pesos y restituido la máquina a la condición original, encontramos que el resultado neto consiste en haber *levantado un peso,* entonces tenemos una máquina de movimiento perpetuo porque podemos utilizar dicho peso levantado para mover alguna otra cosa. Esto es, *siempre y cuando* la máquina que levantó el peso sea devuelta a su *condición original* exacta, y que además sea completamente *autocontenida:* que no haya recibido la energía para levantar el peso de alguna fuente externa, como los bloques de Bruce.

Una máquina de levantar pesos muy sencilla se muestra en la figura 4.3. Esta máquina levanta pesos de tres unidades de «fuerza». Colocamos tres unidades en un plato de una balanza, y una unidad en el otro plato. Sin embargo, para hacer que realmente funcione debemos quitar un peso pequeño del plato izquierdo. Recíprocamente, podríamos levantar un peso de una unidad bajando un peso de tres unidades si hacemos una pequeña trampa quitando un pequeño peso del otro plato. Por supuesto, nos damos cuenta de que en cualquier máquina de levantar pesos *real* debemos añadir algo extra para hacerla funcionar. Pasaremos esto por alto, *por el momento.* Las máquinas ideales, aunque no existen, no requieren nada extra. Una máquina que realmente usamos puede ser, en cierto modo, *casi* reversible: es decir, si levantásemos un peso de tres bajando un peso de uno,

---

[3] Nuestro interés aquí no es tanto el resultado (4.3), que de hecho ustedes quizá ya conozcan, como la posibilidad de llegar al mismo mediante razonamiento teórico.

entonces también levantaríamos la misma altura el peso de uno bajando el peso de tres.

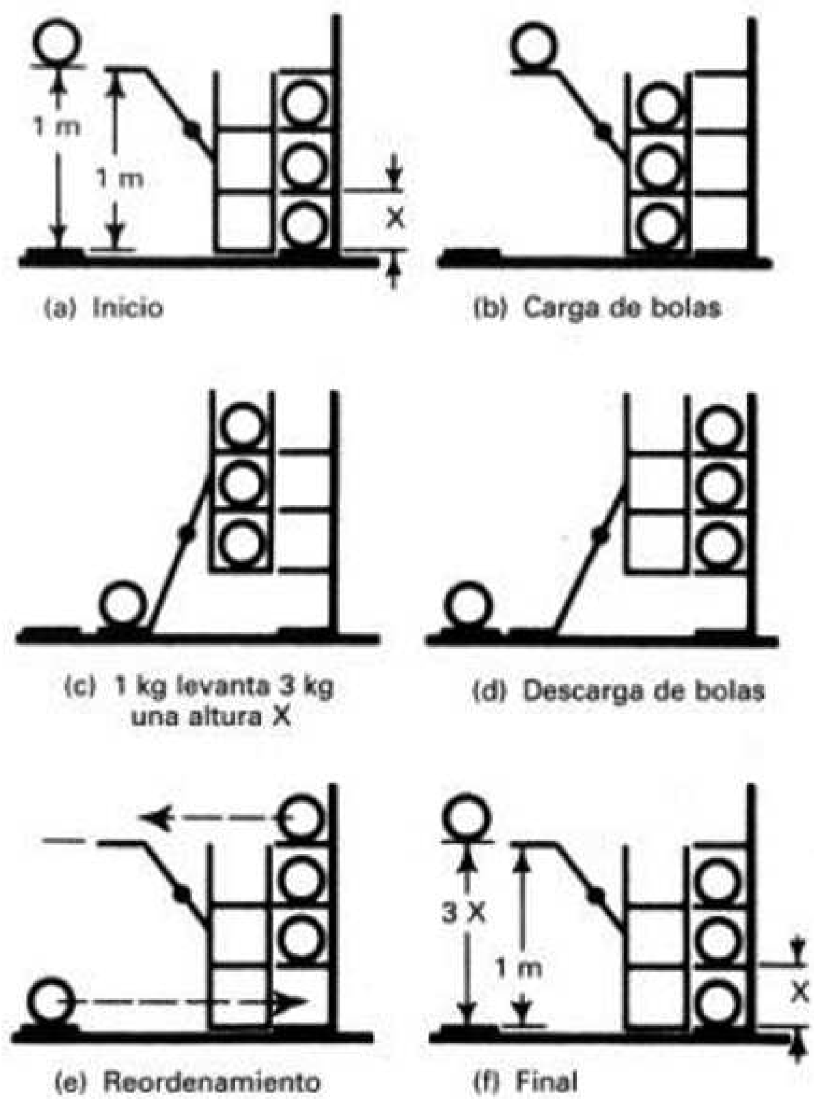
4.3 Máquina simple para levantar pesos.

Imaginemos que hay dos clases de máquinas, las que no son reversibles, que incluyen todas las máquinas reales, y las que son reversibles, que por supuesto no son realmente alcanzables por muy cuidadosos que seamos en nuestro diseño de los engranajes, brazos, etc. Supondremos, sin embargo, que existe tal cosa una máquina reversible que hace descender una unidad de peso (un kilo o cualquier otra unidad) una unidad de distancia, y al mismo tiempo levanta un peso de tres unidades. Llamemos Máquina A a esta máquina reversible. Supongamos que esta máquina reversible particular levanta el peso de tres unidades una distancia *X* . Supongamos además que tenemos otra máquina, la Máquina B, que no es necesariamente reversible, que también hace descender un peso unidad una unidad de distancia pero que eleva tres unidades de peso a una distancia *Y* . Podemos ahora probar que *Y* no está más alto que *X*; es decir, es imposible construir una máquina que levante un peso a *una altura mayor* que la que sería levantado por una máquina reversible. Veamos por qué. Supongamos que *Y* fuera mayor que *X*. Tomemos un peso de una unidad y hagámoslo descender una altura unidad con la Máquina B, lo que hace que se eleve el peso de tres unidades a una distancia *Y*. Entonces podríamos bajar el peso desde *Y* hasta *X* , *obteniendo potencia libre, y* utilizar luego la Máquina A reversible, funcionando al revés, para hacer descender el peso de tres unidades una distancia *X* y elevar el peso de una unidad a una altura unidad. ¡Esto volvería a situar el peso de una unidad donde estaba antes, y dejaría ambas máquinas listas para ser utilizadas de nuevo! Tendríamos entonces movimiento perpetuo si *Y* estuviera más alto que *X*, pero habíamos supuesto que el movimiento perpetuo era imposible. Con estas hipótesis deducimos que *Y no está más alto que X,* de modo que, de todas las máquinas que pueden ser diseñadas, la máquina reversible es la mejor.

Podemos ver también que todas las máquinas reversibles deben levantar el peso *exactamente a la misma altura.* Supongamos que B fuese también realmente reversible. El argumento de que *Y* no está más alto que *X* sigue siendo, por supuesto, igual de bueno que lo era antes, pero también podemos seguir nuestro argumento al revés, utilizando las máquinas en el orden contrario, y probar que *X no está más alto que Y.* Esta es una observación muy notable porque nos permite analizar la altura a la que diferentes máquinas van a levantar algo *sin mirar el mecanismo interior.* Inmediatamente sabemos que si alguien construye un sistema de palancas enormemente elaborado que levanta tres unidades de peso una cierta distancia al tiempo que hace descender una unidad de peso en una distancia unidad, y lo comparamos con una balanza simple que hace lo mismo y es fundamentalmente reversible, su máquina no levantará más alto, sino probablemente a menos altura. Si su máquina es reversible, sabemos también exactamente a *qué* altura levantará. Para resumir: cualquier máquina reversible, independientemente de cómo opere, que baja un kilogramo un metro y con ello eleva un peso de tres kilogramos, lo eleva siempre la misma distancia, *X* . Esta es evidentemente una ley universal de gran utilidad. La siguiente pregunta es, por supuesto, ¿cuánto vale *X*?

Supongamos que tenemos una máquina reversible que va a levantar esta distancia *X*, con la misma proporción de pesos tres a uno. Coloquemos tres bolas en una estantería fija, como se muestra en la figura 4.4. Una bola se mantiene en una plataforma a una distancia de un metro sobre el nivel del suelo. La máquina puede levantar tres bolas, haciendo descender una bola una distancia 1.

Ahora bien, hemos dispuesto que la estantería móvil que sostiene las tres bolas tiene un suelo y dos baldas más, exactamente espaciadas una distancia *X*, y, además, que las baldas de la estantería fija también están espaciadas una distancia *X*, (a).



4.4 Una máquina reversible.

En primer lugar hacemos rodar las bolas horizontalmente desde la estantería fija a las baldas de la estantería móvil, (b), y supongamos que esto no necesita energía porque no cambiamos la altura. Entonces entra en acción la máquina reversible: baja la bola individual al suelo y levanta la estantería móvil una distancia *X*, (c). La estantería móvil está dispuesta ingeniosamente de modo que dichas bolas están de nuevo niveladas con las baldas fijas. Entonces descargamos las bolas de la estantería móvil en la fija, (d); habiendo descargado las bolas, podemos devolver la máquina a su situación original. Ahora tenemos tres bolas en las tres baldas superiores y una bola en el suelo. Pero lo curioso es que, en cierto modo, no hemos levantado dos de ellas en absoluto porque, después de todo, antes ya había bolas en las baldas 2 y 3. El efecto neto resultante ha sido el de levantar *una bola* a una distancia 3 *X*. Ahora bien, si 3 *X* excediera de un metro, podríamos *bajar* la bola para devolver la máquina a la situación inicial, (f), y podríamos volver a poner en marcha el aparato. Por lo tanto, 3 *X* no puede ser mayor que un metro, pues si lo fuera podríamos tener movimiento perpetuo. Análogamente, podemos probar que *un metro no puede ser mayor que 3X* haciendo que toda la máquina funcione al revés, puesto que es una máquina reversible. Por lo tanto, 3 *X* no es *ni mayor ni menor que un metro,* y descubrimos así, mediante puro razonamiento, la ley según la cual X = 1/3 de metro. La generalización es clara: un kilogramo desciende una cierta distancia al operar una máquina reversible; luego la máquina puede elevar p kilogramos a esta misma distancia dividida por p. Otra forma de poner el resultado es que tres kilogramos multiplicado por la altura elevada, que en nuestro problema era *X* , es igual a un kilogramo multiplicado por la distancia descendida, que es un metro en este caso. Si tomamos todos los pesos y los multiplicamos por las alturas a las que están inicialmente sobre el nivel del suelo, dejamos operar la máquina, y luego volvemos a multiplicar todos los pesos por todas las nuevas alturas, *no habrá cambio.* (Tenemos que generalizar el ejemplo en el que movíamos sólo un peso al caso en el que, cuando bajamos uno, elevamos varios pesos diferentes, pero esto es fácil.)

La suma de los productos de los pesos por sus alturas se denomina *energía potencial gravitatoria:* es la energía que tiene un objeto debido a su posición en el espacio con respecto a la Tierra. Así, la fórmula para la energía gravitatoria, siempre que no estemos demasiado lejos de la Tierra (la fuerza se debilita a medida que subimos más alto) es

Energía potencial gravitatoria de un objeto = peso x altura

(4.5)

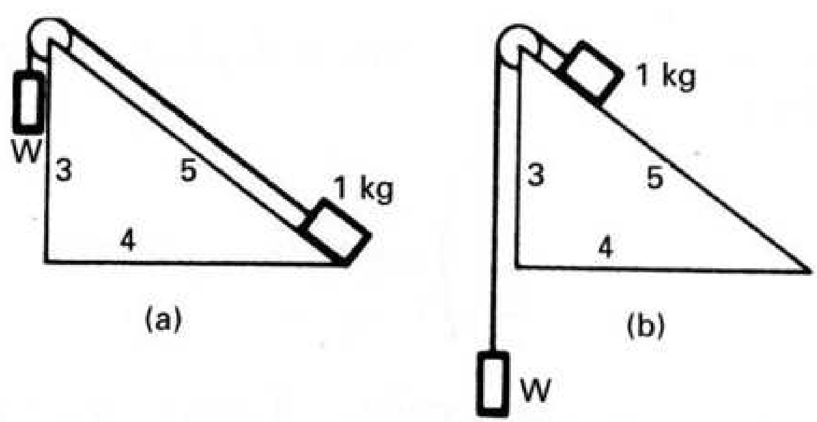
Esta es una bella línea de razonamiento. El único problema es que quizá no sea verdadera. (Después de todo, la naturaleza no *tiene* que ir a la par con nuestro razonamiento.) Por ejemplo, quizá el movimiento perpetuo sea de hecho posible.

Algunas de las hipótesis pueden ser falsas, o quizá hayamos cometido un error en el razonamiento, de modo que siempre es necesario comprobarlo. De hecho, *experimentalmente resulta* ser verdadero.

El nombre genérico de la energía que tiene que ver con la posición con respecto a alguna otra cosa se denomina energía *potencial.* En este caso particular, por supuesto, la llamamos *energía potencial gravitatoria.* Si en lugar de trabajar contra fuerzas gravitatorias es contra fuerzas eléctricas contra las que estamos trabajando, si estamos «elevando» cargas alejándolas de otras cargas mediante un montón de palancas, entonces la energía contenida se denomina *energía potencial eléctrica.* El principio general es que el cambio en la energía es la fuerza multiplicada por la distancia que se desplaza dicha fuerza; en general

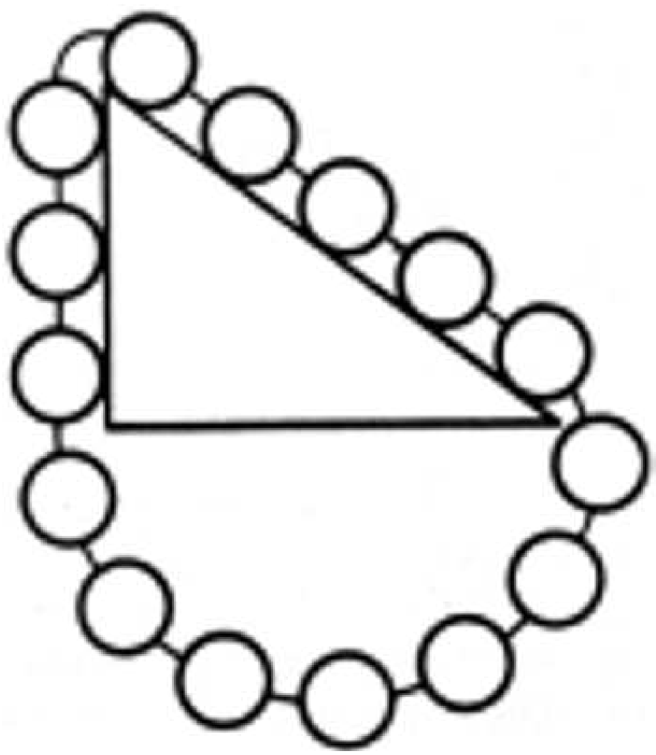
Cambio en energía = fuerza x distancia a lo largo de la que actúa la fuerza (4.6)

Volveremos a muchos de estos otros tipos de energía a medida que avancemos en el curso.



4.7 Plano inclinado.

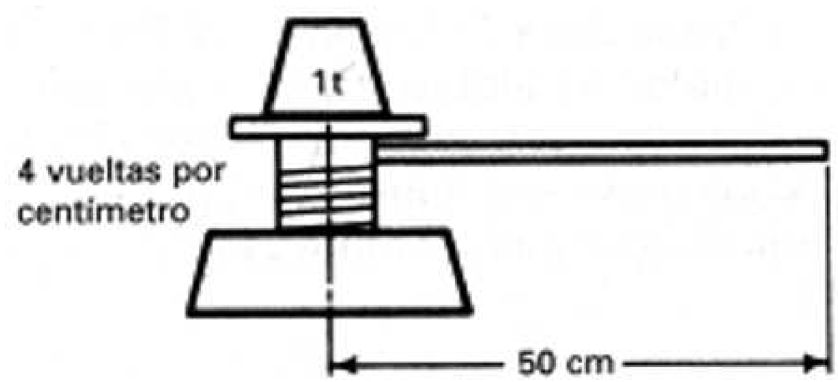
El principio de la conservación de la energía es muy útil para deducir lo que sucederá en diversas circunstancias. En la escuela secundaria aprendimos muchas leyes sobre poleas y palancas utilizadas de diferentes maneras. Podemos ahora ver que *todas* estas «leyes» *son la misma,* y que no había necesidad de memorizar 75 reglas para descubrirla. Un ejemplo simple lo constituye un plano inclinado liso que es, afortunadamente, un triángulo rectángulo de lados tres-cuatro-cinco (figura 4.7). Colguemos un peso de un kilogramo en el plano inclinado con una polea, y en el otro extremo de la polea colguemos un peso W. Queremos saber cuánto debe pesar W para equilibrar el peso de un kilogramo en el plano inclinado. ¿Cómo podemos descubrir la respuesta? Si decimos que está exactamente equilibrado, el sistema es reversible y por lo tanto puede subir y bajar, y podemos considerar la situación siguiente. En la situación inicial, (a), el peso de un kilogramo está en el extremo inferior del plano inclinado y el peso W está arriba. Una vez que W se ha deslizado hacia abajo de modo reversible, tenemos un peso de un kilogramo en la parte superior y el peso W ha descendido una distancia igual a la longitud del plano inclinado, (b), es decir, cinco metros, desde el nivel en el que estaba antes. Hemos *elevado* el peso de un kilogramo sólo *tres metros* y hemos hecho descender cinco metros el peso de W kilogramos. Por lo tanto, W = 3/5 de kilogramo. Nótese que dedujimos esto a partir de la *conservación de la energía,* y no a partir de componentes de fuerzas. La astucia, sin embargo, es relativa.



4.8 El epitafio de Stevinus

Puede deducirse de un modo que es incluso más brillante, descubierto por Stevinus y grabado en su tumba. La figura 4.8 explica que tiene que ser 3/5 de kilogramo, porque la cadena no desliza y no da vueltas. Es evidente que la parte más baja de la cadena está equilibrada por sí misma, de modo que la tracción de los cinco pesos en un lado debe compensar la tracción de los tres pesos en el otro, o cualquiera que sea la proporción de los brazos. Mirando este diagrama ven ustedes que W debe ser 3/5 de kilogramo. (Si ustedes consiguen un epitafio como este en su tumba, están en el buen camino.)

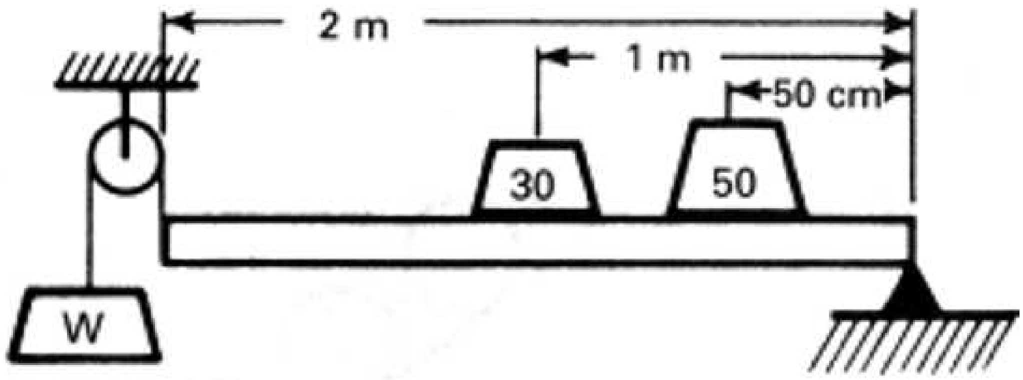
Ilustremos ahora el principio de la energía con un problema más complicado, el tornillo elevador mostrado en la figura 4.9 Para girar el tornillo, que tiene un paso de rosca de 4 vueltas por centímetro, se utiliza una manivela de medio metro de longitud. Nos gustaría saber cuánta fuerza habría que aplicar a la manivela para levantar una tonelada (1.000 kilogramos).



4.9 Un tornillo elevador.

Si queremos elevar la tonelada un centímetro, pongamos por caso, debemos dar cuatro vueltas completas a la manivela. Cuando ésta da una vuelta completa recorre aproximadamente 3,14 metros. Por lo tanto, la manivela debe recorrer un total de 12,5 metros, y si utilizásemos un sistema de poleas, etc., estaríamos levantando la misma tonelada con un peso menor W desconocido aplicado al extremo de la manivela. Así es como encontramos que W es aproximadamente 0,8 kilogramos. Esto es un resultado de la conservación de la energía.

Tomemos ahora el ejemplo algo más complicado mostrado en la figura 4.10. Una varilla o barra de 2 metros de longitud está apoyada en un extremo. En mitad de la barra hay un peso de 30 kilo gramos, y a una distancia de medio metro del apoyo hay un peso de 50 kilogramos. ¿Qué fuerza debemos aplicar hacia arriba en el extremo libre de la barra para mantenerla equilibrada, suponiendo que el peso de la propia barra es despreciable? Imaginemos que ponemos una polea en un extremo y colgamos un peso de la polea.



4.10 Barra con pesos apoyada en un extremo

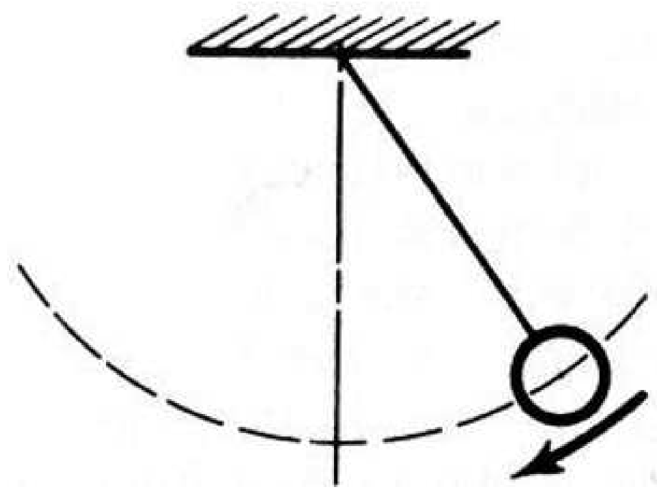
¿Cuál tendría que ser el peso W para mantener la barra equilibrada? Supongamos que el peso desciende una distancia arbitraria -para hacerlo fácil, supongamos que desciende 10 centímetros-, ¿a qué altura deberían subir los dos pesos de carga? El centro se eleva 5 centímetros, y el punto que está a un cuarto de la distancia desde el extremo fijo se eleva 2,5 centímetros. Por lo tanto, el principio de que la suma de las alturas multiplicadas por los pesos no cambia nos dice que el peso W multiplicado por 10 centímetros hacia abajo, más 30 kilogramos multiplicados por 5 centímetros hacia arriba, más 50 kilogramos multiplicados por 2,5 centímetros tiene que sumar cero:

$$-10W + (5)(30) + (2{,}5)(50) = 0 \rightarrow W = 27{,}5\ Kg \tag{4.11}$$

Así pues, debemos colgar un peso de 27,5 kilogramos para equilibrar la barra. De esta forma podemos calcular las leyes del «equilibrio»: la estática de puentes complicados, y demás. Este tratamiento se denomina *principio de los trabajos virtuales,* porque para aplicar este argumento tuvimos que *imaginar* que la estructura se mueve un poco; incluso si *en realidad* no se está moviendo o ni siquiera es *móvil.* Utilizamos el pequeñísimo movimiento imaginario para aplicar el principio de conservación de la energía.

Energía Cinética

Para ilustrar otro tipo de energía consideremos un péndulo (figura 4.11). Si tiramos de la masa hacia un lado y luego la soltamos, oscilará de un lado a otro. En su movimiento pierde altura cuando va de cualquiera de los extremos hasta el centro. ¿Dónde va a parar la energía potencial? Desaparece energía gravitatoria cuando la masa está abajo del todo; pero, en cualquier caso, volverá a subir. La energía gravitatoria debe haber ido a otra forma de energía. Evidentemente es en virtud de su *movimiento* por lo que es capaz de subir de nuevo, de modo que tenemos conversión de energía gravitatoria en alguna otra forma de energía cuando llega al fondo.



4.11. Péndulo.

Debemos obtener una fórmula para la energía de movimiento. Ahora, recordando nuestros argumentos sobre máquinas reversibles, podemos ver fácilmente que en el movimiento cuando la masa está en el fondo debe haber una cantidad de energía que le permite subir a una cierta altura, y que no tiene nada que ver con el *me* canismo por el que actúa o con la trayectoria por la que sube. Así que tenemos una fórmula equivalente, algo similar a la que escribimos para los bloques del niño. Tenemos otra forma para representar la energía. Es fácil decir cuál es. La energía cinética en el fondo es igual al peso multiplicado por la altura a la que podría subir de acuerdo con su velocidad: $E_C = WH$. Lo que necesitamos es la fórmula que nos dice la altura mediante alguna regla que tenga que ver con el movimiento de objetos. Si partimos de algo con una cierta velocidad, digamos hacia arriba, llegará a una cierta altura; todavía no sabemos cuál es, pero depende de la velocidad; hay una fórmula para eso. Entonces para encontrar la fórmula para la energía cinética de un objeto en movimiento con velocidad V, debemos calcular la altura que podría alcanzar y multiplicarla por el peso. Descubriremos pronto que podemos escribirla de este modo:

$$E_c = WV^2 / 2g \tag{4.12}$$

Por supuesto, el hecho de que el movimiento tenga energía no tiene nada que ver con el hecho de que estemos en un campo gravitatorio. No importa *de dónde* proceda el movimiento. Esta es una fórmula general para diversas velocidades. Tanto (4.5) como (4.12) son fórmulas aproximadas, la primera porque es incorrecta cuando las alturas son grandes, es decir, cuando las alturas son tan altas que la gravedad se debilita; la segunda, debido a la corrección relativista a altas velocidades. Sin embargo, cuando obtenemos finalmente la fórmula exacta para la energía, la ley de conservación de la energía es correcta.

Otras formas de energía

Podemos continuar de este modo para ilustrar la existencia de otras formas de energía. En primer lugar, consideremos la energía elástica. Para comprimir verticalmente un muelle debemos hacer algún trabajo, pues cuando lo tenemos comprimido podemos levantar pesos con él. Por lo tanto, en su condición comprimida tiene una posibilidad de hacer algún trabajo. Si calculásemos la suma de los productos de los pesos por las alturas, ésta no cuadraría: debemos añadir algo más para dar cuenta del hecho de que el muelle está bajo tensión. La energía elástica es la fórmula para un muelle cuando está comprimido. ¿Cuánta energía es? Si lo soltamos, la energía elástica se convierte en energía cinética cuando el muelle pasa por el punto de equilibrio, y pasa alternativamente de una forma a otra, entre compresiones o estiramientos del muelle y la energía cinética de movimiento. (Hay también alguna energía gravitatoria que entra y sale, pero podemos hacer este experimento «en horizontal» si queremos.) Sigue así hasta que todo se para: ¡Ajá! Hemos trampeado todo el rato colocando pequeños pesos para mover cosas, o diciendo que las máquinas son reversibles o que siguen actuando indefinidamente, pero ahora podemos ver que las cosas llegan a pararse. ¿Dónde está la energía cuando el muelle ha dejado de subir y bajar? Esto nos lleva a *otra* forma de energía: *la energía térmica*.

En el interior de un muelle o una palanca hay cristales que están formados por montones de átomos; con gran cuidado y delicadeza en la disposición de las partes podemos tratar de ajustar las cosas de modo que, cuando algo rueda sobre alguna otra cosa, ninguno de los átomos se agite en absoluto. Pero hay que ser muy cuidadosos. Normalmente, cuando las cosas ruedan hay un bamboleo y una agitación debidos a las irregularidades del material, y los átomos empiezan a vibrar en su interior. De este modo perdemos la pista de dicha energía; una vez que el movimiento se ha detenido, encontramos que los átomos están vibrando en el interior de un modo aleatorio y confuso. Sigue habiendo energía cinética, por supuesto, pero no está asociada con movimiento visible. ¡Qué imaginación! ¿Cómo *sabemos* que sigue habiendo energía cinética? Resulta que con termómetros es posible descubrir que el muelle o la palanca están *más caliente,* y que realmente hay un aumento de energía cinética en una cantidad precisa. Llamamos a esta forma de energía, *energía térmica,* pero sabemos que no es realmente una forma nueva: es simplemente energía cinética, movimiento interno. (Una de las dificultades con todos estos experimentos que hacemos con materia a gran escala es que no podemos demostrar realmente la conservación de la energía y no podemos hacer realmente nuestras máquinas reversibles, porque cada vez que movemos un gran montón de materia los átomos no quedan absolutamente imperturbables, y de este modo entra en el sistema atómico cierta cantidad de movimiento aleatorio. No podemos verlo, pero podemos medirlo con termómetros, etc.)

Hay otras muchas formas de energía, y por supuesto no podemos describirlas ahora con más detalle. Hay energía eléctrica, que tiene que ver con las atracciones y repulsiones de cargas eléctricas. Hay energía radiante, la energía de la luz que sabemos que es una forma de energía eléctrica porque la luz puede representarse como oscilaciones del campo electromagnético. Hay energía química, la energía que se libera en las reacciones químicas. En realidad, la energía elástica es, en cierta medida, similar a la energía química, porque la energía química es la energía de la atracción mutua de los átomos, y por lo tanto es energía elástica. Nuestra comprensión moderna es la siguiente: la energía química tiene dos partes, energía cinética de los electrones dentro de los átomos, de modo que una parte es cinética, y energía eléctrica de interacción entre electrones y protones, de modo que el resto es energía eléctrica. A continuación llegamos a la energía nuclear, la energía implicada en la disposición de las partículas dentro del núcleo, y tenemos fórmulas para ella aunque no tenemos las leyes fundamentales. Sabemos que no es eléctrica ni gravitatoria, ni puramente química, pero no sabemos qué es. Parece ser una forma adicional de energía. Finalmente, asociada con la teoría de la relatividad hay una modificación de las leyes de la energía cinética, o como quiera que ustedes prefieran llamarla, de modo que la energía cinética se combina con otra cosa llamada *energía de masa.* Un objeto tiene energía por su sola *existencia.* Si yo tengo un positrón y un electrón quietos sin hacer nada prescindiendo de la gravedad, prescindiendo de cualquier cosa y se juntan y desaparecen, se liberará energía radiante en una cantidad definida, que puede ser calculada. Todo lo que necesitamos saber es la masa del objeto. No depende de qué objeto sea: hacemos que dos cosas desaparezcan y obtenemos una cierta cantidad de energía. La fórmula fue descubierta por primera vez por Einstein; es

$$E = mc^2.$$

Resulta obvio de nuestra discusión que la ley de la conservación de la energía es enormemente útil para hacer análisis, tal como hemos ilustrado en algunos ejemplos sin conocer todas las fórmulas. Si tuviéramos todas las fórmulas para todos los tipos de energía podríamos analizar cuántos procesos deberían estar en acción sin tener que entrar en detalles. Por lo tanto, las leyes de conservación son muy interesantes. Naturalmente surge la cuestión de qué otras leyes de conservación hay en física. Hay otras dos leyes de conservación que son análogas a la conservación de la energía. Una se denomina conservación del momento lineal. La otra se denomina conservación del momento angular. Descubriremos más cosas sobre estas leyes más adelante. En última instancia, no entendemos en profundidad las leyes de conservación. No entendemos la conservación de la energía. No entendemos la energía como un cierto número de pequeñas gotas. Quizá ustedes hayan oído decir que los fotones vienen en gotas y que la energía de un fotón es la constante de Planck multiplicada por la frecuencia. Esto es cierto pero, puesto que la frecuencia de la luz puede ser cualquiera, no hay ninguna ley que diga que la energía tiene que ser una cierta cantidad definida. A diferencia de los bloques de Daniel, puede haber cualquier cantidad de energía, al menos tal como se entiende actualmente. Así pues, por ahora no entendemos esta energía como el recuento de algo, sino sólo como una magnitud matemática, lo que es una circunstancia abstracta y bastante peculiar. En mecánica cuántica resulta que la conservación de la energía está muy íntimamente relacionada con otra importante propiedad del mundo: las cosas *no dependen del tiempo absoluto.* Podemos montar un experimento en un instante dado y hacerlo, y luego hacer el mismo experimento en un instante posterior, y se comportará exactamente de la misma forma. Si esto es estrictamente cierto o no, no lo sabemos. Si suponemos que es cierto, y añadimos los principios de la mecánica cuántica, entonces podemos deducir el principio de la conservación de la energía. Es algo sutil e interesante, y no es nada fácil de explicar. Las otras leyes de conservación también están relacionadas. La conservación del momento está asociada en mecánica cuántica con la afirmación de que, independientemente de *dónde* hagan ustedes el experimento, los resultados siempre serán los mismos. Del mismo modo que la independencia respecto al espacio tiene que ver con la conservación del momento, la independencia respecto al tiempo tiene que ver con la conservación de la energía; y finalmente, si *giramos* nuestro aparato, esto tampoco supone ninguna diferencia, y así la invariancia del mundo respecto a la orientación angular está relacionada con la conservación del *momento angular.* Además de estas, existen otras tres leyes de conservación, exactas hasta donde hoy podemos decir, que *son* mucho más simples de entender porque son más parecidas al recuento de bloques.

La primera de estas tres es la *conservación de la carga,* que significa simplemente que ustedes pueden contar el número de cargas eléctricas positivas y restar el número de cargas negativas que tienen, y el número resultante nunca cambia. Ustedes pueden cancelar una carga positiva con una negativa, pero no pueden crear un exceso neto de cargas positivas sobre cargas negativas. Otras dos leyes son análogas a esta: una se denomina la *conservación de bariones.* Hay cierto número de partículas raras, un neutrón y un protón son ejemplos de ellas, que se denominan bariones. En cualquier reacción que tenga lugar en la naturaleza, si contamos cuántos bariones intervienen en un proceso, el número de bariones[4] que resulta de ello será exactamente el mismo. Hay otra ley: la *conservación de leptones.* Podemos decir que el grupo de partículas denominadas leptones está constituido por el electrón, el mesón-μ y el neutrino. Existe un antielectrón que es un positrón, es decir, -1 leptón. Contando el número total de leptones en una reacción se pone de manifiesto que el número inicial es siempre igual que el número final, al menos hasta donde sabemos actualmente.

Estas son las seis leyes de conservación, tres de ellas sutiles, que implican el espacio y el tiempo, y tres de ellas simples, en el sentido de contar algo.

Con respecto a la conservación de la energía deberíamos advertir que la energía *disponible* es otra cuestión: hay un montón de agitación en los átomos del agua del mar, porque el mar tiene una cierta temperatura, pero es imposible encauzarlos en un movimiento definido sin tomar energía de alguna otra parte. Es decir, aunque sabemos y damos por hecho que la energía se conserva, la energía disponible para utilización humana no se conserva tan fácilmente. Las leyes que gobiernan cuánta energía hay disponible se denominan *leyes de la termodinámica* e implican un concepto denominado entropía para procesos termodinámicos irreversibles.

Para terminar, haremos un comentario sobre la cuestión de dónde podemos obtener hoy nuestros suministros energéticos. Nuestros suministros energéticos proceden del Sol, la lluvia, el carbón, el uranio y el hidrógeno. El Sol provoca la lluvia, y también provoca el carbón, de modo que todos ellos proceden del Sol. Aunque la energía se conserva, la naturaleza no parece interesada en ello: ella libera un montón de energía desde el Sol, pero sólo una parte en dos mil millones llega a la

[4] Restando los antibariones.

Tierra. La naturaleza conserva la energía, pero no se preocupa realmente; malgasta un montón en todas direcciones. Ya hemos obtenido energía del uranio; también podemos obtener energía del hidrógeno, pero por el momento sólo en situaciones explosivas y peligrosas. Si pudiera ser controlada en reacciones termonucleares, resultaría que la energía que puede obtenerse de 10 litros de agua por segundo equivale a toda la potencia eléctrica generada en los Estados Unidos. Con 600 litros de agua corriente por minuto, ¡ustedes tendrían combustible suficiente para suministrar toda la energía que se utiliza hoy en los Estados Unidos! Por lo tanto, es tarea del físico descubrir la forma de liberarnos de la necesidad de disponer de energía. Puede hacerse.