

# Demonios, motores y la segunda ley

Charles H. Bennett

*Los físicos se vienen afanando desde 1871 por resolver el problema del demonio de Maxwell, criatura que viola la segunda ley de la termodinámica.*

*La teoría de la computación ofrece soluciones al problema*

Un frigorífico, como dispositivo que crea desigualdades de temperatura en un sistema, necesita energía para funcionar. Esta necesidad la impone la segunda ley de la termodinámica. Recíprocamente, se puede emplear una diferencia de temperatura para obtener trabajo útil; por ejemplo, una máquina de vapor se apoya en la diferencia de temperatura entre caldera y condensador. El físico escocés James Clerk Maxwell propuso ya en 1871, en su *Teoría del calor*, que una criatura suficientemente pequeña, que pudiera ver y manejar moléculas individuales, se hallaría exenta del cumplimiento de esta ley. Sería, pues, capaz de crear y mantener diferencias de temperatura en un sistema sin realizar trabajo.

“...Si concebimos un ser cuyas facultades estén tan desarrolladas que pueda seguir la trayectoria de todas las moléculas, esta criatura, con unos atributos que no se saldrían de nuestro dominio finito, sería capaz de hacer lo que actualmente nos es imposible realizar a nosotros mismos. Se ha visto que las moléculas encerradas en un recipiente lleno de aire a temperatura uniforme se mueven con velocidades que no son uniformes en absoluto... Supongamos ahora que se divide el recipiente en dos mitades, A y B, mediante una pared en la que se haya abierto un pequeño orificio, y que este ser, que puede ver las moléculas una a una, abre y cierra el agujero de tal manera que no deje pasar de A a B más que a las más rápidas y, de B a A, a las más lentas. Procediendo de este modo, sin consumir trabajo, eleva la temperatura de B y baja la de A, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica.”

Este “ser” no tardó en convertirse en el demonio de Maxwell, habida cuenta de los efectos subversivos que sus actividades implicaban en el orden natural de las cosas. El más importante de tales efectos era la abolición

de la necesidad de fuentes de energía, como el petróleo, el uranio o la luz solar. Cualquier motor funcionaría sin batería, sin depósito de combustible y sin conexión a la red eléctrica. El demonio posibilitaría que una máquina de vapor funcionase continuamente sin combustible, por ejemplo, manteniendo la caldera de la máquina perpetuamente caliente y su condensador perpetuamente frío.

Para salvaguardar la segunda ley los físicos han avanzado distintas razones por las que el demonio no podría actuar en la forma descrita por Maxwell. Pero casi todos esos argumentos han fracasado. Muchas veces las objeciones llegaron de los avances en otros campos de la física; bastantes investigadores creyeron (incorrectamente, como después se ha visto) que las limitaciones que impone la teoría cuántica invalidaban al demonio de Maxwell.

La respuesta correcta —la verdadera razón por la que el demonio de Maxwell no viola la segunda ley— se ha descubierto recientemente gracias a los trabajos realizados en una línea de investigación muy distinta: el estudio de los requerimientos energéticos de los ordenadores.

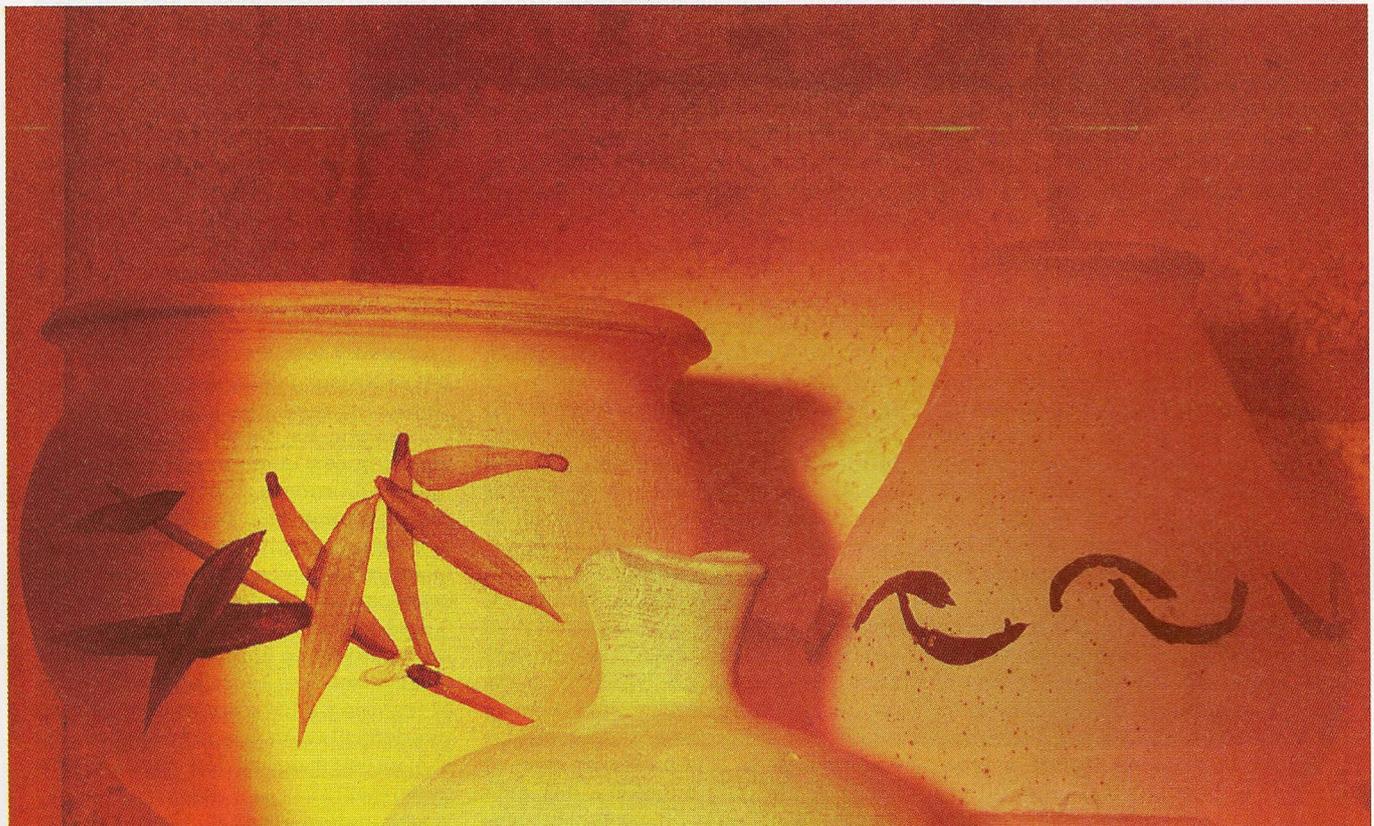
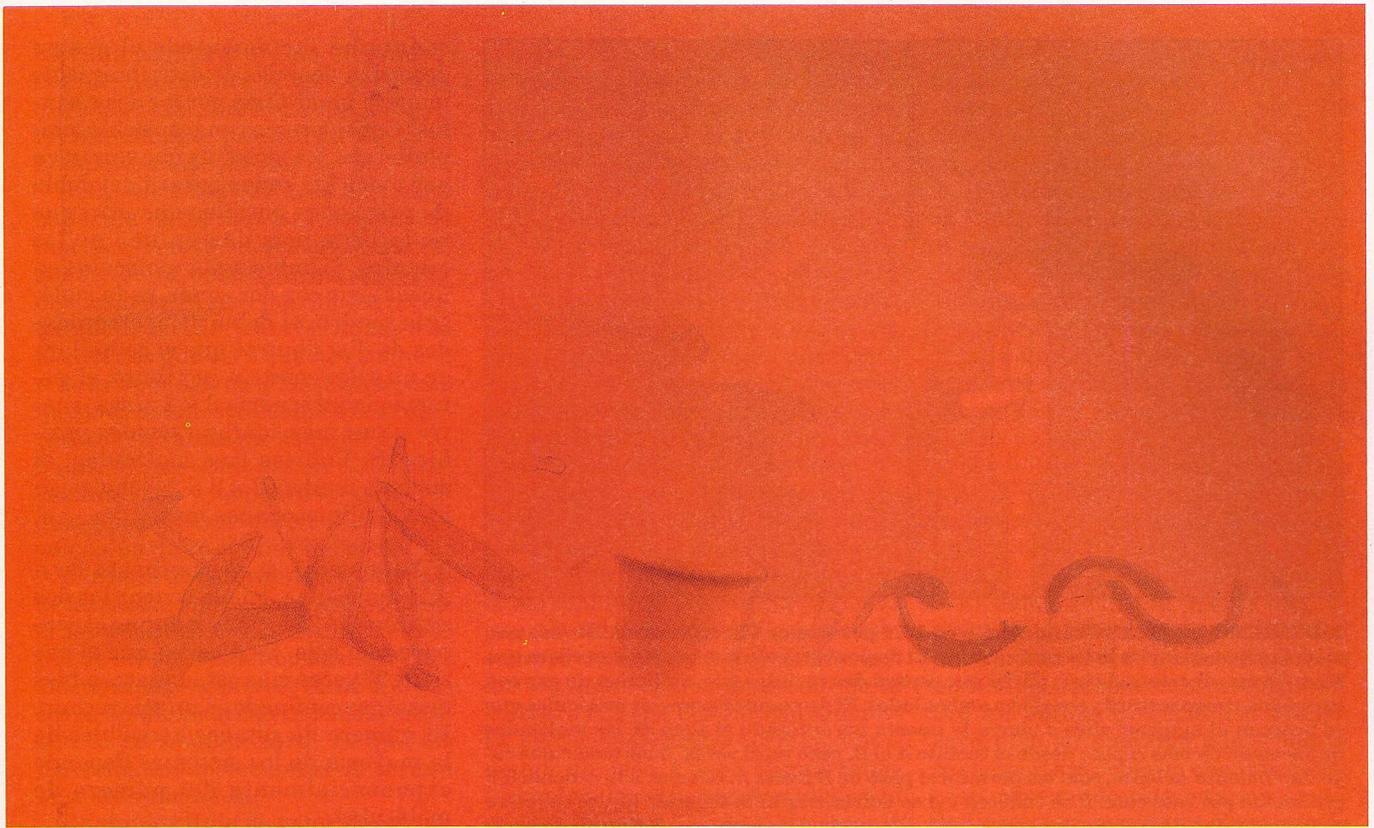
Desde los tiempos de Maxwell se han propuesto numerosas versiones del demonio. Conforme a una de las más sencillas, el demonio crea una diferencia de presión (en vez de una diferencia de temperatura) y permite el paso de todas las moléculas, sean lentas o rápidas, de B hacia A, pero impide el tránsito de A a B. Con el tiempo la mayor parte de las moléculas estarían concentradas en A y se habría creado un vacío parcial en B. Este ser es incluso más plausible que el original de Maxwell, ya que no tiene que ver ni que pensar. No es inmediata la razón por la que este demonio —en esencia una válvula unidireccional para moléculas— no pueda materializarse en un disposi-

tivo inanimado simple, una diminuta trampilla con un muelle, por ejemplo.

Al igual que el diablillo de Maxwell, el “demonio de la presión” supondría una fuente de energía inagotable para los motores. A modo de ejemplo, los martillos neumáticos usados frecuentemente para reparar el firme de las calles funcionan con aire comprimido de un depósito que se mantiene lleno gracias a un compresor de gasolina. Una simple válvula unidireccional para moléculas de aire haría las funciones del compresor, llenando el depósito con aire de los alrededores sin ningún esfuerzo.

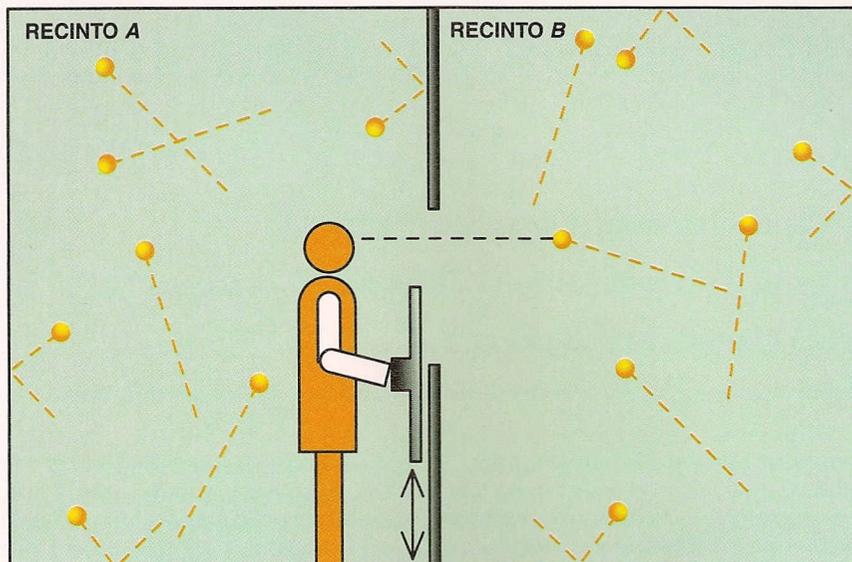
Se podría pensar erróneamente que un sistema como el descrito viola la ley de conservación de la energía (conocida también como primera ley de la termodinámica). Pero no hay tal. La energía usada para perforar el hormigón procedería del calor del aire reunido por la válvula unidireccional. Por tanto, el funcionamiento de la máquina provocaría que el aire se enfriase. La primera ley no prohíbe en absoluto el funcionamiento de un motor que satisfaga todas sus necesidades energéticas con el calor circundante y hasta con el calor liberado por su propio rozamiento y por su escape. Lo que impide que existan estos motores es la segunda ley.

Para analizar con profundidad las acciones del demonio hay que entender antes algunas sutilezas de la segunda ley. Aunque expresada en un principio como una restricción de las posibles transformaciones entre calor y trabajo, la segunda ley se considera ahora una manifestación del incremento del desorden del universo. De acuerdo con ella la entropía o desorden del universo entero no puede disminuir. Eso significa que sólo caben dos tipos de sucesos: aquellos en los que la entropía del universo crece y episodios en los que permanece constante. A los primeros se les denomina procesos irreversibles, porque su inversión implicaría una violación de



**1. RESPLANDOR UNIFORME** de un horno caliente (*arriba*).  
 Pone de manifiesto una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica: es imposible distinguir los objetos de un recipiente sometidos a una temperatura uniforme sin disponer de una fuente luminosa externa cuya temperatura sea superior a la del ambiente. En un recipiente a temperatura uniforme los cuerpos emiten luz de la misma intensidad y del mismo color (incluso los que tienen diferentes reflectancias y colores). La razón estriba en que, si un cuerpo apareciera más

oscuro que su entorno, absorbería energía a expensas de sus vecinos y, en consecuencia, se calentaría y los otros se enfriarían. De acuerdo con la segunda ley, los cuerpos que se hallan a la misma temperatura no pueden adquirir espontáneamente diferentes temperaturas. (En la fotografía se puede percibir cierto contraste, ya que el interior del horno no estaba a temperatura uniforme.) Con una fuente luminosa externa se perciben las diferencias de reflectancia intrínsecas (*fotografía inferior*).



**2. DEMONIO DE MAXWELL**, descrito en 1871 por James Clerk Maxwell. Diríase que viola la segunda ley de la termodinámica. El demonio regula una puerta corredera que bloquea una abertura de una pared que separa dos recintos que contienen un gas con las mismas temperatura y presión a ambos lados. El demonio observa las moléculas que se acercan al agujero; abre o cierra la puerta permitiendo el paso de las moléculas que se mueven más rápido desde el recinto A al B, pero no al revés. A las moléculas cuyo movimiento es lento, sólo les permite el paso de B hacia A. Gracias a la ordenación producida por este ente, B se calienta y A se enfría. Según la segunda ley, se requiere cierta cantidad de trabajo para crear una diferencia de temperatura. El trabajo necesario para mover la puerta corredera puede hacerse arbitrariamente pequeño.

la segunda ley; los segundos constituyen los procesos reversibles. La entropía de un sistema disminuye si se realiza trabajo sobre él, pero al efectuar dicho trabajo se incrementaría la entropía de otro sistema (o la del entorno del primero) en una cantidad igual o mayor.

Un proceso irreversible clásico, que ayuda a definir el concepto de entropía de una forma más precisa, es el de expansión libre. Supongamos una cámara llena de un gas y separada por una pared de otra sala de igual volumen donde se haya producido el vacío. Si se abriese un agujero en la pared, se escaparía el gas (es decir, se expandiría libremente) hacia la zona que antes estaba vacía, hasta que ambas cámaras quedasen equilibradas.

La razón por la que las moléculas acaban llenando ambos recintos es más matemática que física, si se nos permite esta distinción. Si el número de moléculas presentes en ambos lados de la división tiende a igualarse no es porque exista una mutua repulsión y propendan a alejarse, sino porque sus frecuentes colisiones contra las paredes del recinto y entre sí tienden a distribuirlas al azar por el espacio disponible, hasta que la mitad de ellas se encuentre a un lado del muro y la otra mitad en el otro.

Al deberse al azar y no a la repulsión la difusión de las moléculas,

existe una cierta probabilidad de que todas ellas pudieran volver simultáneamente a la zona de donde partieron. Ahora bien, si hay  $n$  moléculas, la probabilidad de que todas vuelvan a su recinto de origen es la misma que la probabilidad de que al lanzar  $n$  monedas al aire caigan todas de "cara":  $1/2^n$ . Por tanto, para el número de moléculas con el que se suele trabajar (300.000.000.000.000.000.000 en un gramo de hidrógeno) la expansión libre es en realidad un proceso irreversible: un proceso cuya reversibilidad espontánea, aunque posible, es tan improbable que puede decirse con toda seguridad que nunca se observará.

El estado desordenado —aquel en que el gas se había difundido por los dos recintos, contrapuesto a aquel en que ocupaba sólo uno— resulta más probable que el estado ordenado. Es decir, hay más configuraciones de moléculas en las que se ocupen ambos recintos, de la misma forma que, al echar al aire 100 monedas, hay más formas de obtener 50 caras y 50 cruces que no 100 caras y ninguna cruz. Al decir que la entropía del universo tiende a crecer, la segunda ley proclama que el universo tiende a evolucionar con el discurrir del tiempo hacia los estados más probables.

¿Puede cuantificarse este concepto? En otras palabras, ¿puede decirse

cuánto ha incrementado el gas su desorden después de distribuirse de manera igualitaria por los dos recintos? Consideremos una molécula simple del gas. La molécula que se mueva por todas las zonas gozará del doble de posiciones posibles que otra que no lo haga más que en uno de los recintos. Si hubiese dos moléculas en un sistema con dos zonas, cada molécula tendría el doble de oportunidades de distribuirse que si se hallara en un solo recinto y, por tanto, el sistema global tendría  $2 \times 2$ , o sea, cuatro veces más configuraciones posibles. Si hubiese tres moléculas, el sistema tendría  $2 \times 2 \times 2$  (ocho) posibles configuraciones más.

**E**n general, si el gas consta de  $n$  moléculas, puede ocupar los dos recintos de  $2^n$  formas más que si ocupara uno solo. Se dice así que el gas tiene  $2^n$  veces más estados accesibles que el gas confinado en un solo recinto. El número de estados accesibles de la mayoría de los sistemas depende exponencialmente del número de moléculas.

La entropía de un sistema se define, por consiguiente, como el logaritmo del número de estados accesibles. En el ejemplo que nos ocupa, el incremento del número de estados en  $2^n$  corresponde a un incremento de la entropía de  $n$  bit, o unidad binaria. (La base del logaritmo y por lo tanto el tamaño de las unidades de entropía es arbitraria; por convención se eligen la base 2 y las unidades binarias.) La escala logarítmica tiene la ventaja de hacer que la entropía de una muestra material sea proporcional al número de moléculas que contiene, como les sucede a su energía y a su masa. Se puede establecer una analogía con la memoria de un ordenador: el tamaño, el peso y el costo de una memoria de  $n$  bit son, en términos generales, proporcionales a  $n$ , mientras que el número de distintos estados posibles de la memoria es  $2^n$ .

Las primeras formulaciones de la segunda ley no mencionaban el azar ni el desorden; se referían al calor, al trabajo y a la temperatura. ¿Cómo pueden relacionarse estos conceptos con nuestra definición cuantitativa de entropía?

Las moléculas de cualquier muestra de materia se hallan siempre en movimiento. La velocidad y la dirección de cada molécula están distribuidas al azar, pero la velocidad media de las moléculas es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura de la muestra (medida a partir del cero absoluto). Cuando se

eleva la temperatura de una muestra (se incrementa la velocidad media), las velocidades de las moléculas individuales pasan a distribuirse en un intervalo mayor.

Si la velocidad media es alta, cada molécula de la muestra dispone de una escala mayor de velocidades accesibles, de la misma forma que una molécula de un sistema con dos recintos puede acceder a mayor número de posiciones que otra que no se mueva más que por uno de ellos. Es así como hay más estados accesibles a temperaturas elevadas que a temperaturas bajas. El movimiento se hace más desordenado a temperaturas elevadas, pues es más difícil predecir la velocidad de cualquier molécula.

A la hora de determinar la entropía de un sistema hay que tener en cuenta el desorden del movimiento molecular y el de las posiciones moleculares. La entropía de un gas crece tanto si el gas ocupa un volumen mayor como si incrementa su temperatura, ya que los movimientos moleculares se tornan más desordenados.

Cualquier flujo de calor lleva consigo entropía. Para ser precisos, porta una cantidad de entropía proporcional a la cantidad de calor que fluya dividida por la temperatura a la que se produzca el flujo. Por consiguiente, el flujo de calor desde un cuerpo caliente hacia otro frío eleva la entropía del cuerpo frío y lo hace en una cuantía superior que la empleada para rebajar la del cuerpo caliente. La cantidad de calor que va del cuerpo caliente al frío es única, pero, en términos de descenso de entropía, en el cuerpo caliente se divide por una temperatura alta, mientras que en el frío lo hace por otra menor. Es así como el flujo de calor de un cuerpo caliente hacia otro frío incrementa la entropía total del universo.

Esta definición más precisa de la entropía nos permite comprender mejor por qué el demonio de Maxwell parece violar la segunda ley. Mediante su selección, el demonio produce un flujo de calor desde A hacia B, incluso cuando el recinto B esté ya más caliente que el A. El demonio rebaja así la entropía de A en mayor medida que eleva la de B, disminuyendo la entropía del universo en su conjunto, lo que es una imposibilidad termodinámica.

Maxwell aclaró que él creía en la validez de la segunda ley al realizar su descripción del demonio. Indicó también que quizá los seres humanos no puedan violar la segunda ley (realizando la misma tarea que los demonios) por la sencilla razón de que care-

cen de la capacidad del demonio para ver moléculas individuales. Pero este exorcismo no ahuyenta al diablo; antes bien, deja abierta la cuestión en el sentido de que, si existiera un ser con la capacidad de ver y manejar las distintas moléculas, podría violarla.

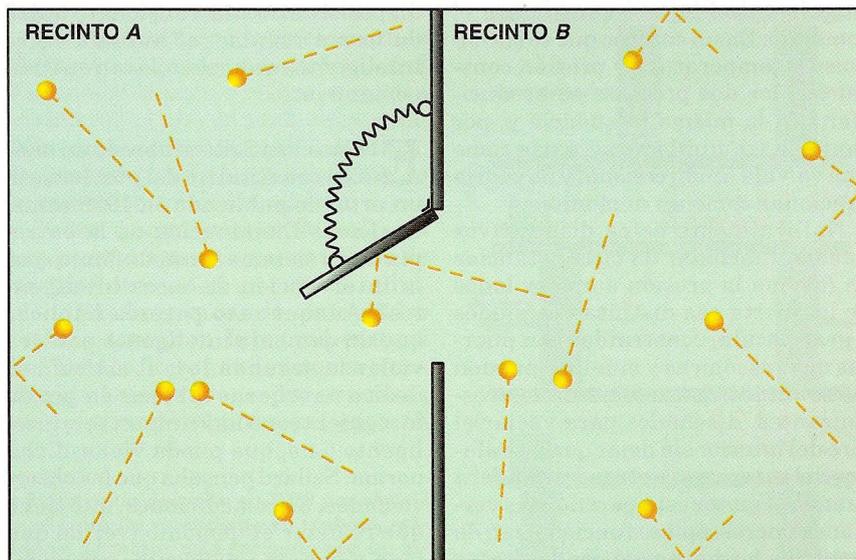
Una forma de descubrir por qué razón el demonio de Maxwell resulta inviable consiste en analizar y rechazar diversos dispositivos, simples e inanimados, que podrían comportarse como demonios; por ejemplo, la trampilla con un muelle a la que nos referíamos antes, que actúa como una válvula molecular unidireccional.

Imaginemos que la puerta se abra hacia la izquierda. Si el demonio trabaja según se supone ha de hacerlo, cada vez que una molécula procedente del recinto de la derecha golpee la puerta, ésta se abrirá y la molécula entrará en el recinto de la izquierda. Cuando sea una molécula de la izquierda la que choque con la puerta, ésta se mantendrá cerrada, impidiendo su paso. Con el tiempo todas las moléculas estarán reunidas en el recinto de la izquierda y el demonio habrá comprimido el gas (reduciendo su entropía) sin realizar trabajo alguno.

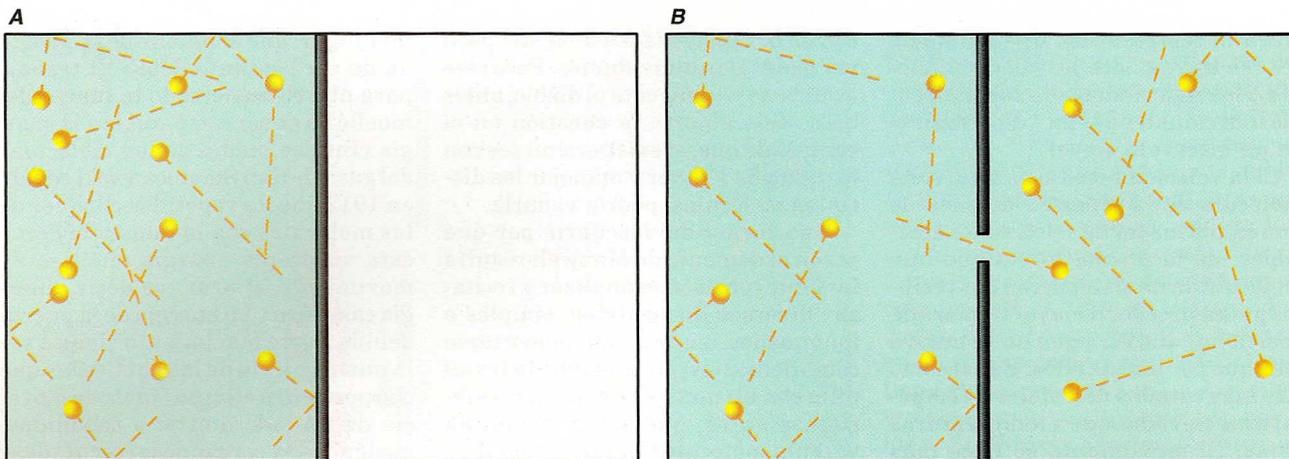
¿Cómo se puede aniquilar al demonio de la puerta? Observemos, en pri-

mer lugar, que el muelle de la puerta ha de ser bastante débil. El trabajo para abrirla venciendo la fuerza del muelle ha de ser comparable a la energía cinética media de las moléculas del gas. Marian Smoluchowski señaló en 1912 que los repetidos choques de las moléculas con la puerta le dan a ésta su propia energía cinética de movimiento al azar (es decir, energía calorífica). La energía de la puerta debida a este movimiento viene a ser la misma que la de las partículas que chocan contra ella; por tanto se movería de un lado a otro, a sacudidas, abriéndose y cerrándose (recuérdese que es muy pequeña), alternativamente rebotando contra su batiente o abriéndose venciendo la fuerza del muelle.

Es evidente que la puerta no funciona como una válvula unidireccional cuando está abierta, ya que las moléculas podrían circular con libertad en ambas direcciones. Podría esperarse, sin embargo, que la puerta se comportara como un demonio perezoso, atrapando una mínima cantidad de gas en exceso en el recinto de la izquierda, pero ni siquiera esto puede hacer. Cualquier tendencia de la puerta a convertirse en válvula unidireccional, abriéndose para permitir que una molécula de gas fuese



3. TRAMPILLA DEMONIACA, una forma del demonio de Maxwell diseñada para funcionar automáticamente y crear desigualdades de presión, no de temperatura. Supongamos que una trampilla con un muelle bloquee un agujero que separe dos recintos que contengan un gas cuyas temperatura y presión iniciales sean las mismas a ambos lados. La puerta se abre en un solo sentido, admitiendo moléculas del recinto B hacia el A, pero no al revés. Con el tiempo, cabría pensar, las moléculas se acumularían en A a expensas de B, creando una desigualdad en la presión. La desigualdad no se produce. La trampilla, calentada por los choques con las moléculas, se abre y se cierra aleatoriamente debido a su energía térmica. Cuando se abre, no es una válvula unidireccional y, cuando se cierra, podría empujar a alguna molécula de A a B. Este proceso tiene lugar tantas veces como su inverso, cuando una molécula de B empuja la puerta y pasa a A.



**4. EXPANSION LIBRE DE UN GAS.** Se trata de un proceso irreversible desde el punto de vista termodinámico. En dicho proceso aumenta la entropía del universo, esto es, su desorden. Inicialmente el gas se encuentra confinado en una zona

determinada de un sistema (*izquierda*). Se elimina la barrera entre las dos zonas y las moléculas transitan de una a otra hasta que ambas cuentan con el mismo número de moléculas (*derecha*).

de la derecha hacia la izquierda, se compensaría exactamente con la tendencia contraria, dándose de bruces con cualquier molécula que se encontrara ante ella e impulsándola desde el recinto izquierdo hacia el derecho (ayudada por la fuerza del muelle).

Los dos procesos —el de una molécula que fuerza su tránsito de derecha a izquierda y el de la puerta que envía una molécula de izquierda a derecha— son inversos mecánicos mutuos: la sucesión de imágenes que mostrara uno de ellos no podría distinguirse de la que representara el contrario. En un entorno que se encontrara a temperatura y presión constantes, los dos procesos se producirían con la misma frecuencia y, por tanto, la trampilla no actuaría como una válvula unidireccional y no podría funcionar como un demonio.

Naturalmente estos dispositivos pueden funcionar en circunstancias en las que la presión a ambos lados de la puerta sea distinta. Versiones a gran escala, construidas con puertas macroscópicas y muelles, pueden verse en los extractores de los restaurantes, diseñados para vaciar el aire del interior sin dejar que las ráfagas del exterior penetren, ni siquiera cuando el motor está parado. Las versiones microscópicas funcionarían de la misma forma, permitiendo el paso de las moléculas si hubiese un exceso de presión en un lado, pero impidiéndoles la circulación si el exceso de presión se produjera en el otro. Estos dispositivos no violarían la segunda ley, ya que lo único que harían sería permitir que la presión se igualase; en ningún caso formarían zonas de sobrepresión.

Que un demonio elemental no pueda operar quizá no sea obstáculo para

que lo haga otro más inteligente. Lo cierto es que, poco tiempo después de que Maxwell describiera su demonio, muchos investigadores creyeron que la inteligencia constituía la propiedad crítica que permitía el funcionamiento del demonio. En un artículo publicado en 1914 escribía Smoluchowski lo siguiente: “Por lo que sabemos hasta ahora, no existe ninguna máquina automática de movimiento perpetuo que alcance una eficacia permanente, a pesar de las fluctuaciones moleculares; ahora bien, tal dispositivo podría funcionar, quizá de forma regular, si hubiera seres inteligentes que controlaran su comportamiento.”

El físico Leo Szilard abordó un análisis cuantitativo del problema en un artículo publicado en 1929 con el título de “Disminución de la entropía de un sistema termodinámico por la intervención de seres inteligentes”. Aunque esto parezca implicar que un demonio inteligente pudiera violar la segunda ley, el artículo se dedica a rechazar tal tesis en pro de la siguiente: no hay ningún ser, inteligente o no, que pueda violar dicha norma. Szilard pensaba que las observaciones, o las mediciones, que tiene que realizar el demonio (ver de qué lado viene una molécula, por ejemplo) no pueden realizarse sin un trabajo que cause un incremento de entropía suficiente para salvar el cumplimiento de la segunda ley.

Szilard consideró un demonio que difería en varios aspectos del diablillo de Maxwell y al que desde entonces se denomina motor de Szilard. (El motor que describiremos aquí divergirá un tanto del original de Szilard.) El principal componente del

motor es un cilindro en el que se mueve aleatoriamente una molécula. Cada extremo del cilindro está bloqueado por un pistón; en su interior hay una pequeña división móvil, que se coloca en el centro del cilindro, confinando así la molécula en una zona u otra del cilindro (véase la figura 5). El motor consta también de dispositivos que permiten observar en qué mitad del sistema está la molécula y de dispositivos que memorizan esta información.

El ciclo del motor se desarrolla en seis etapas. En la primera, se introduce la división que confina la molécula en una parte o en otra. En opinión de Szilard, el trabajo necesario para esta inserción puede reducirse en principio tanto como sea necesario para considerarlo despreciable.

En la etapa siguiente, el motor determina en qué mitad queda encerrada la molécula. El dispositivo de memoria de la máquina tiene tres estados posibles: un estado blanco, que significa que no se ha realizado ninguna medida; un estado *I*, que significa que la molécula se ha observado en la mitad izquierda del aparato, y un estado *D*, que significa que la molécula se halla en la mitad derecha. Al realizar la medida, la memoria pasa del estado en blanco a uno de los otros dos estados.

La tercera etapa, que podría denominarse la carrera de compresión, depende del conocimiento adquirido en la etapa anterior. El pistón del lado que no contiene la partícula avanza hasta que toca la división. A diferencia de la carrera de compresión que se produce en un motor de combustión interna, ésta no requiere trabajo, pues el pistón “comprime” el vacío; la molécula, atrapada en el

otro lado de la partición, no puede oponerse a su movimiento.

En la cuarta etapa se quita la división, permitiendo las colisiones entre la molécula y el pistón que acaba de adelantarse. Estas colisiones ejercen una presión sobre el pistón.

En la quinta etapa, que podría denominarse carrera de potencia, la presión que ejerce la molécula hace retroceder al pistón hacia su posición inicial, realizando un trabajo sobre él. La energía que la molécula confiere al pistón se reemplaza mediante el calor transmitido a través de las paredes del cilindro por el entorno del mismo, con lo que la molécula sigue moviéndose con la misma velocidad media. De lo que se infiere que el efecto de la carrera de potencia consiste en la conversión de calor del entorno en trabajo mecánico realizado sobre el pistón.

La máquina borra su memoria en la sexta etapa, recuperando el estado en blanco. La máquina se halla ahora exactamente en la misma configuración que tenía al comienzo del ciclo, y éste puede repetirse.

Consideradas en conjunto, las seis etapas del ciclo han convertido calor del entorno en trabajo y la máquina vuelve a su estado inicial. Si durante este ciclo no ocurriera ningún otro cambio, la entropía global del universo disminuiría. Como en principio puede repetirse el ciclo tantas veces como se quiera, su ejecución conduce a una violación arbitrariamente grande de la segunda ley.

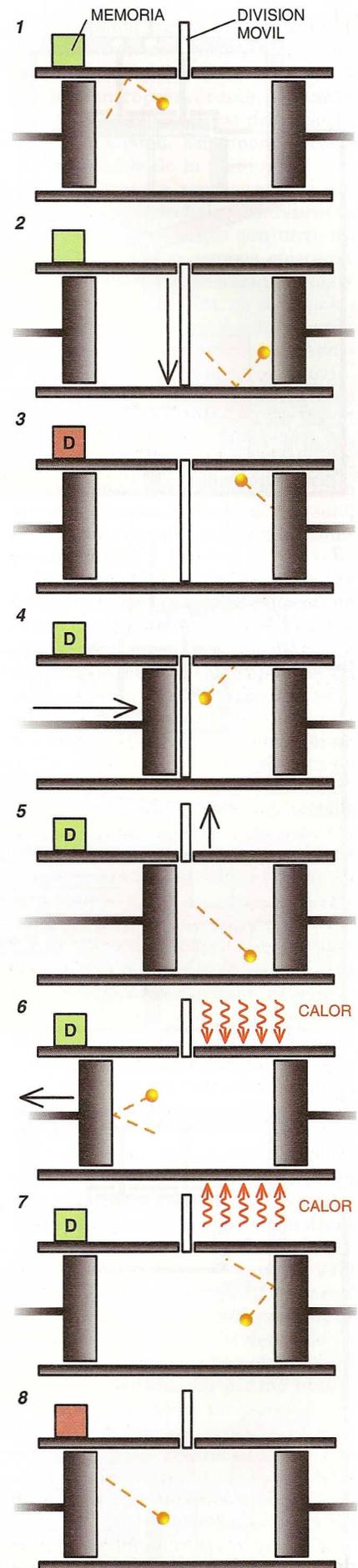
Szilard se salió de este trance postulando que el acto de medir, en el que se determina la posición de la molécula, produce un incremento de entropía suficiente como para compensar la disminución causada en la carrera de potencia, sin precisar la naturaleza ni la localización de este incremento de entropía. Algunos años después de la publicación de su artículo determinados físicos, entre los que destacaron

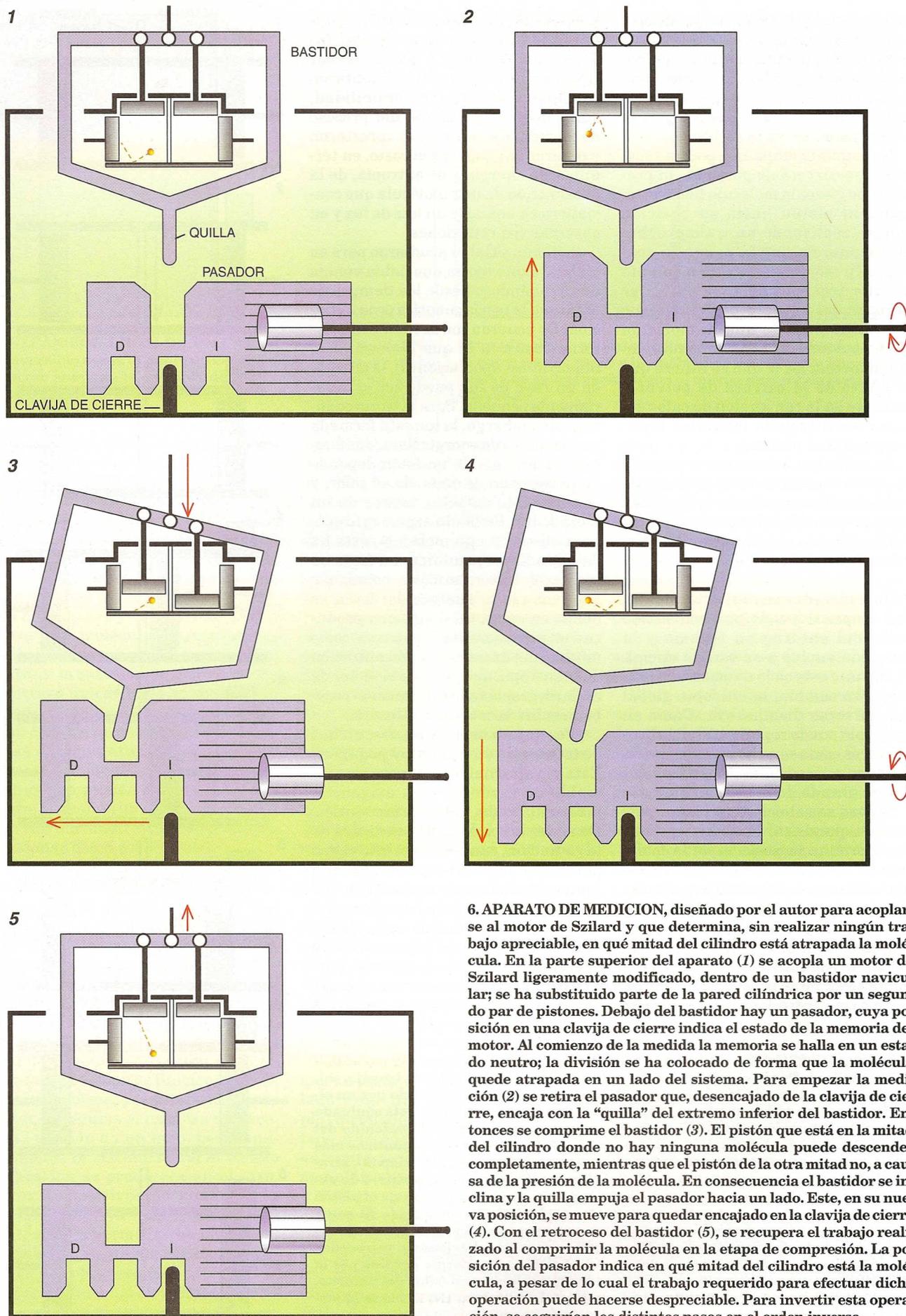
Leon Brillouin (quien en 1956 escribió el famoso libro *Science and Information Theory*) y Denis Gabor (inventor de la holografía), intentaron fundamentar esta irreversibilidad, simplemente postulada, del proceso de medida. En concreto se aprestaron a determinar cuál era el costo, en términos de energía y de entropía, de la observación de una molécula que consistiera en enviarle un haz de luz y en observar sus reflexiones.

Brillouin y Gabor acudieron para su trabajo a una teoría que había venido desarrollándose desde los tiempos de Maxwell: la teoría cuántica de la radiación. De acuerdo con la teoría ondulatoria clásica (a la que Maxwell hizo importantes aportaciones), la energía de un rayo de luz puede ser arbitrariamente pequeña. Para la teoría cuántica, sin embargo, la luz está formada por paquetes de energía llamados fotones. La energía de un fotón depende de su longitud de onda, de su color, y es imposible detectar menos de un fotón de luz. Brillouin argumentó que, para observar una molécula, ésta ha de difundir como mínimo un fotón de un haz detector; sostuvo, asimismo, que, cuando la energía del fotón se disipa en calor, tal disipación producirá un incremento en la entropía, como mínimo del tamaño de la disminución de la entropía que produce el motor de Szilard, gracias a la información recabada sobre la molécula difusora.

¿Por qué no usar, entonces, un haz de fotones de energía muy pequeña? Esta vía alternativa tampoco resulta viable en razón de otra exigencia, más complicada, de la teoría cuántica. De acuerdo con la teoría cuántica de la radiación, cualquier recinto cuyas paredes y cuyo interior se hallen a temperatura constante está lleno de un "gas" de fotones: un baño de radiación. Las longitudes de onda de los fotones dependen de la temperatura del recinto. Este gas de fotones constituye el resplandor rojizo o naranja del interior de un horno caliente. (A

**5. MOTOR DE SZILARD, modelado a partir del ingenio descrito en 1929 por el físico Leo Szilard. Por lo que parece, convierte el calor de su entorno en trabajo, saltándose así la segunda ley de la termodinámica. El motor está formado por un cilindro (1) que en ambos extremos se halla bloqueado por dos pistones. Está equipado también con una división móvil y con dispositivos que observan el contenido del cilindro y registran los resultados de las observaciones. El cilindro no contiene más que una molécula. Al comenzar el ciclo del motor, se introduce la división (2), atrapando la molécula en una de las zonas del cilindro. Mediante el dispositivo de observación se determina y se registra en qué mitad se aloja (3) y se empuja el pistón de la otra mitad hasta que entra en contacto con la división central (4). El movimiento de este pistón no requiere trabajo, ya que comprime el espacio vacío. Se retira entonces la división (5) y la molécula golpea al pistón, haciéndolo retroceder (6). (El gas unimolecular se "expande" contra el pistón.) La energía perdida por la molécula en su forcejeo contra el pistón se recupera luego con calor del entorno. Cuando el pistón se encuentra de nuevo en su posición inicial (7), se borra la memoria (8) y el ciclo puede volver a desarrollarse de nuevo.**





6. APARATO DE MEDICION, diseñado por el autor para acoplarse al motor de Szilard y que determina, sin realizar ningún trabajo apreciable, en qué mitad del cilindro está atrapada la molécula. En la parte superior del aparato (I) se acopla un motor de Szilard ligeramente modificado, dentro de un bastidor navicular; se ha substituido parte de la pared cilíndrica por un segundo par de pistones. Debajo del bastidor hay un pasador, cuya posición en una clavija de cierre indica el estado de la memoria del motor. Al comienzo de la medida la memoria se halla en un estado neutro; la división se ha colocado de forma que la molécula quede atrapada en un lado del sistema. Para empezar la medición (2) se retira el pasador que, desencajado de la clavija de cierre, encaja con la "quilla" del extremo inferior del bastidor. Entonces se comprime el bastidor (3). El pistón que está en la mitad del cilindro donde no hay ninguna molécula puede descender completamente, mientras que el pistón de la otra mitad no, a causa de la presión de la molécula. En consecuencia el bastidor se inclina y la quilla empuja el pasador hacia un lado. Este, en su nueva posición, se mueve para quedar encajado en la clavija de cierre (4). Con el retroceso del bastidor (5), se recupera el trabajo realizado al comprimir la molécula en la etapa de compresión. La posición del pasador indica en qué mitad del cilindro está la molécula, a pesar de lo cual el trabajo requerido para efectuar dicha operación puede hacerse despreciable. Para invertir esta operación, se seguirían los distintos pasos en el orden inverso.

temperatura ambiente, la mayor parte de los fotones están en la zona infrarroja del espectro y por consiguiente son invisibles.)

El gas de fotones podría parecer, a primera vista, una cómoda fuente de luz mediante la cual el demonio observaría las moléculas de gas (ahorrándose el coste de entropía de su luz). Sin embargo, una de las consecuencias sorprendentes de la segunda ley (descubierta por Gustav Robert Kirchhoff en 1859) es que, con la luz propia de un recinto a temperatura uniforme, resulta imposible ver nada. Si uno mira el interior de un horno donde se cuecen objetos de barro, por ejemplo, se ve un resplandor de color naranja uniforme, desprovisto de contraste, aun cuando los objetos del interior tengan colores, brillos y texturas superficiales diferentes.

Diríase que los objetos del interior del horno presentan el mismo color y brillo, lo que no es cierto y se comprueba fácilmente iluminándolos desde fuera con una luz brillante. La razón por la que los cuerpos desaparecen a la luz del horno es que los oscuros (es decir, los no reflectantes) aparecen proporcionalmente más brillantes que los objetos claros (reflectantes), de suerte que la intensidad de la luz total que proviene de cada objeto (reflejada y emitida) es la misma.

Para entender por qué se produce semejante y extraña igualación de la intensidad, imaginemos que no ocurriera y pensemos acerca de sus consecuencias para la segunda ley. Supongamos que un jarrón y una taza se encierran en un horno a temperatura uniforme. Si la intensidad de luz que desde el jarrón se dirige hacia la taza fuera mayor que la que va desde la taza hacia el jarrón, se produciría un flujo de energía desde ésta hacia aquél. El jarrón se calentaría y la taza se enfriaría.

Así, sin consumo de trabajo, dos zonas que inicialmente estaban a la misma temperatura alcanzarían temperaturas distintas, igual que si el demonio de Maxwell se hubiera sentado entre ellos: habríase violado la segunda ley. Por consiguiente, si la segunda ley es válida, los objetos introducidos en un recinto con temperatura uniforme no pueden tener diferentes intensidades de luz superficiales.

Para distinguir los objetos encerrados en el interior de un horno hay que iluminarlos, pues, con una fuente externa, una lámpara de destellos, por ejemplo, cuyo filamento alcanzara una temperatura mayor que la temperatura del horno. En la vida diaria es una fuente luminosa de estas

características —el sol— la que posibilita que se vean los objetos en recintos que están a una temperatura ambiente uniforme.

Brillouin, Gabor y diversos investigadores, armados con sus conocimientos del gas de fotones, sostuvieron que el demonio de Maxwell no podría observar las moléculas para ordenarlas sin utilizar algún tipo de fuente luminosa. Lo que es lo mismo, negaban que pudiera violar la segunda ley. Cada vez que observa una molécula del gas, el diablillo debe disipar, como mínimo, la energía de un fotón, energía del fotón que debe ser mayor que cierta energía mínima (la determinada por la temperatura del gas en la que está el demonio). Estos razonamientos, aunque no del todo rigurosos, parecen confirmar la idea de Szilard según la cual la adquisición de cierta cantidad de información comporta la producción de una cantidad correspondiente de entropía.

La contribución que asestó un golpe mayor a la hipótesis del diablillo débese a los trabajos realizados en termodinámica del proceso de datos por Rolf Landauer, investigador de IBM. Ciertas operaciones de proceso de datos, verbigracia la copia de la información de un dispositivo en otro, no divergen mucho de las operaciones de medida, en las que un dispositivo adquiere información sobre el estado de otro. En ese sentido creíase por los años cincuenta que las operaciones de proceso de datos eran intrínsecamente irreversibles (en la significación termodinámica del vocablo), de la misma manera que Szilard había argumentado que una medida era, en general, irreversible. Se opinaba que todo tipo de operación con información requería, en el peor de los casos, la generación y el traslado de un bit de calor por cada bit de datos procesado. (Cantidad de calor extremadamente pequeña; una diezbillonésima del calor generado por los circuitos electrónicos existentes.)

Landauer analizó la cuestión con mayor detenimiento a comienzos del decenio siguiente. Descubrió que había operaciones costosas desde el punto de vista termodinámico, mientras que otras, entre las que se incluían (bajo condiciones apropiadas) el copiar información de un dispositivo a otro, se hallaban exentas de cualquier limitación termodinámica [véase "Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo", por Charles H. Bennett y Rolf Landauer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985].

La demostración de Landauer arrancaba de una premisa: los distintos estados lógicos de un ordenador podían representarse mediante distintos estados físicos del soporte físico del mismo. En concreto, cada estado posible de la memoria de un ordenador podía representarse por una configuración física diferente (es decir, por un distinto conjunto de corrientes, voltajes, campos, etcétera).

Supongamos que se inicia un registro de memoria de  $n$  bit; en otras palabras, supongamos que el valor de cada uno de ellos se fija en cero, sin importarnos cuál fuese su valor previo. Antes de esta operación el registro podía estar en cualquiera de los  $2^n$  estados admisibles; tras ella se encuentra en un estado único. La operación, por tanto, ha comprimido muchos estados lógicos en uno solo, de la misma forma que un pistón comprime un gas.

De acuerdo con la premisa de Landauer, para comprimir un estado lógico de un ordenador se debe comprimir también su estado físico: se debe disminuir la entropía de su soporte físico. De acuerdo con la segunda ley, la disminución de la entropía del soporte físico del ordenador no puede ocurrir sin un incremento de entropía del entorno del ordenador. Por consiguiente no se puede iniciar un registro de memoria sin generar calor y sin aumentar la entropía del entorno, por lo que poner a cero un registro es una operación termodinámicamente irreversible.

Landauer identificó otras operaciones que eran termodinámicamente irreversibles. Todas esas operaciones compartían un mismo abandono de información relativa al estado anterior del ordenador. Se trataba de operaciones "lógicamente irreversibles", por emplear la terminología utilizada por él.

La conexión de estas ideas con el problema de la medición, implícito en el trabajo de Landauer y en los modelos reversibles de computación desarrollados durante los años setenta por Edward Fredkin, por el autor de este trabajo y por otros investigadores, concluyó en 1982, cuando propuse la correcta explicación del demonio de Maxwell. Consideremos el ciclo del motor de Szilard. La última etapa, durante la cual la memoria de la máquina se pone en un estado blanco, es lógicamente irreversible, ya que comprime dos estados de la memoria del motor ("la molécula está en la izquierda" y "la molécula está en la derecha") en uno solo ("no se ha definido todavía la posición de la molécula").

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Traducción:

José M<sup>a</sup> Valderas Martínez: *El mundo de la termodinámica*; Víctor Navarro Brotons: *Sadi Carnot*; Josep-Enric Llebot: *Demonios, motores y la segunda ley*; J. Vilardell: *Versión doméstica del motor Stirling construida con materiales corrientes*; Néstor Herrán: *La flecha del tiempo*; David Jou: *El movimiento browniano*; Amando García Rodríguez: *La reaparición de fases*; Pilar Iñiguez: *Cuando los puntos de fusión y de solidificación no son el mismo*; Francisco Martínez González-Tablas: *Reacciones químicas oscilantes*.

**Portada:** Prensa Científica, S.A.

Página	Fuente
8	J. L. Charmet, Colección particular, París
9	Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología, Biblioteca Pública de Nueva York
10-11	Ilil Arbel
12-17	Stuart L. Rabinowitz
19	James Kilkelly y R. Bruce Laughlin
20-24	Jerome Kuhl
28-31	Michael Goodman
33-44	Tom Prentis
47-55	George V. Kelvin
58	Christopher M. Sorensen, Universidad estatal de Kansas
59-64	George V. Kelvin
67	Thomas L. Bech, Universidad de Cincinnati
68-69	Ian Worpole
70	Hai-Ping Cheng, Universidad de Chicago ( <i>arriba</i> ); Ian Worpole ( <i>abajo</i> )
71	Ian Worpole
73	R. F. Bonifield
74-80	Allen Beechel
81	R. F. Bonifield
83-93	David Lurié, J. Wagensberg y A. Sellés
96	C. Mans, J. Llorens y J. Costa-López
97-101	C. Mans, J. Llorens, J. Costa-López y Magda Mària
102	C. Mans, J. Llorens y J. Costa-López

Ocurre así que el motor no puede reiniciar su memoria sin añadir como mínimo un bit de entropía al entorno. Esto vuelve a convertir en calor todo el trabajo que se había ganado en la carrera de potencia.

¿Qué sucede en la etapa en que se mide la posición de la molécula? ¿También es costosa desde el punto de vista termodinámico? En este caso la máquina incrementaría la entropía del universo por partida doble: en correspondencia con la medida de la posición de la molécula y luego con la puesta a cero de su memoria tras la carrera de potencia. Pero lo cierto es que la medición no tiene por qué ser costosa desde el punto de vista termodinámico. Hay otras formas de observar las moléculas que no se basan en exponerlas a ningún tipo de destello. Para demostrar este punto he diseñado un dispositivo de medida reversible, que mide y registra la posición de una molécula sin llevar a cabo ningún proceso que sea termodinámicamente irreversible.

Hemos encontrado, pues, la razón de que el demonio no pueda violar la segunda ley: para observar una molécula ha de olvidar antes los resultados de las observaciones precedentes. Olvidar resultados o desechar información resulta costoso desde el punto de vista de la termodinámica.

Pero si tuviera una memoria muy potente, recordaría los resultados de todas sus medidas. Ninguna etapa sería lógicamente irreversible y el motor convertiría un bit de calor en un bit de trabajo en cada ciclo. La cuestión radicaría entonces en que el ciclo ya no sería tal, pues la memoria del motor, que se hallaba inicialmente en blanco, adquiriría otro bit aleatoriamente a cada vuelta. La interpretación termodinámica correcta de esta situación consistiría en decir que el motor incrementa la entropía de su memoria para rebajar la entropía del entorno.

La atribución del incremento de entropía a la etapa de inicio y no a la de medida podría parecer un mero recurso académico, ya que el ciclo completo de un motor de Szilard tiene que contener ambas etapas; ahora bien, nos ahorraremos bastante confusión si distinguimos con claridad entre adquisición de nueva información y destrucción de información antigua, confusión que no sabemos si existió en la mente de Szilard. En la mayoría de sus artículos alude a la medición como si se tratara de una etapa irreversible; pero hay un momento en que hace un recuento de los cambios entrópicos registrados durante

el ciclo y encuentra, sin comentarlo de forma explícita, que el incremento de entropía se produce durante la puesta a cero de la memoria.

Si se hubiera profundizado en este aspecto de los trabajos de Szilard, se hubiera llegado al conocimiento que tenemos ahora del demonio de Maxwell. Omisión que, ironía de las cosas, no es infrecuente en la historia de la ciencia: el crecimiento de una rama (la teoría cuántica de la radiación) retrasa aparentemente el desarrollo de otra (la termodinámica). Un principio de la mecánica cuántica que refuerza la idea según la cual, para adquirir información, se debe pagar un precio termodinámico fundamental, es el de incertidumbre, en virtud del cual ciertos grupos de mediciones no pueden realizarse con más de un cierto grado de precisión. Aunque el principio de incertidumbre parece similar a otra hipótesis de Szilard (las medidas comportan un coste entrópico irreductible), la verdad es que difieren desde sus cimientos. La hipótesis de Szilard se ocupa del coste termodinámico de las mediciones, mientras que el principio de incertidumbre lo hace de la posibilidad misma de su realización, cualquiera que sea su coste termodinámico.

Otra fuente de confusión es que en general no se piensa en la información como en algo que tenga un coste. Pagamos por adquirir los periódicos, no por tirarlos. El recuerdo por parte del demonio de las acciones pasadas lo consideramos intuitivamente como un recurso valioso (o, en el peor de los casos, inútil). Mas para el demonio "el periódico de ayer" (resultado de una medición previa) ocupa un espacio importante y el coste de limpiarlo neutraliza el beneficio obtenido de él cuando era reciente. Quizá la creciente conciencia de la contaminación ambiental y de la explosión de la información debida a los ordenadores haga que ahora nos parezca más natural la idea de que la información tenga valor negativo.

### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- IRREVERSIBILITY AND HEAT GENERATION IN THE COMPUTING PROCESS. R. Landauer en *IBM Journal of Research and Development*, volumen 5, número 3, páginas 183-191; julio, 1961.
- SCIENCE AND INFORMATION THEORY. Leon Brillouin. Academic Press, 1962.
- THE THERMODYNAMICS OF COMPUTATION —A REVIEW. Charles H. Bennett en *International Journal of Theoretical Physics*, volumen 21, páginas 905-940; diciembre, 1982.