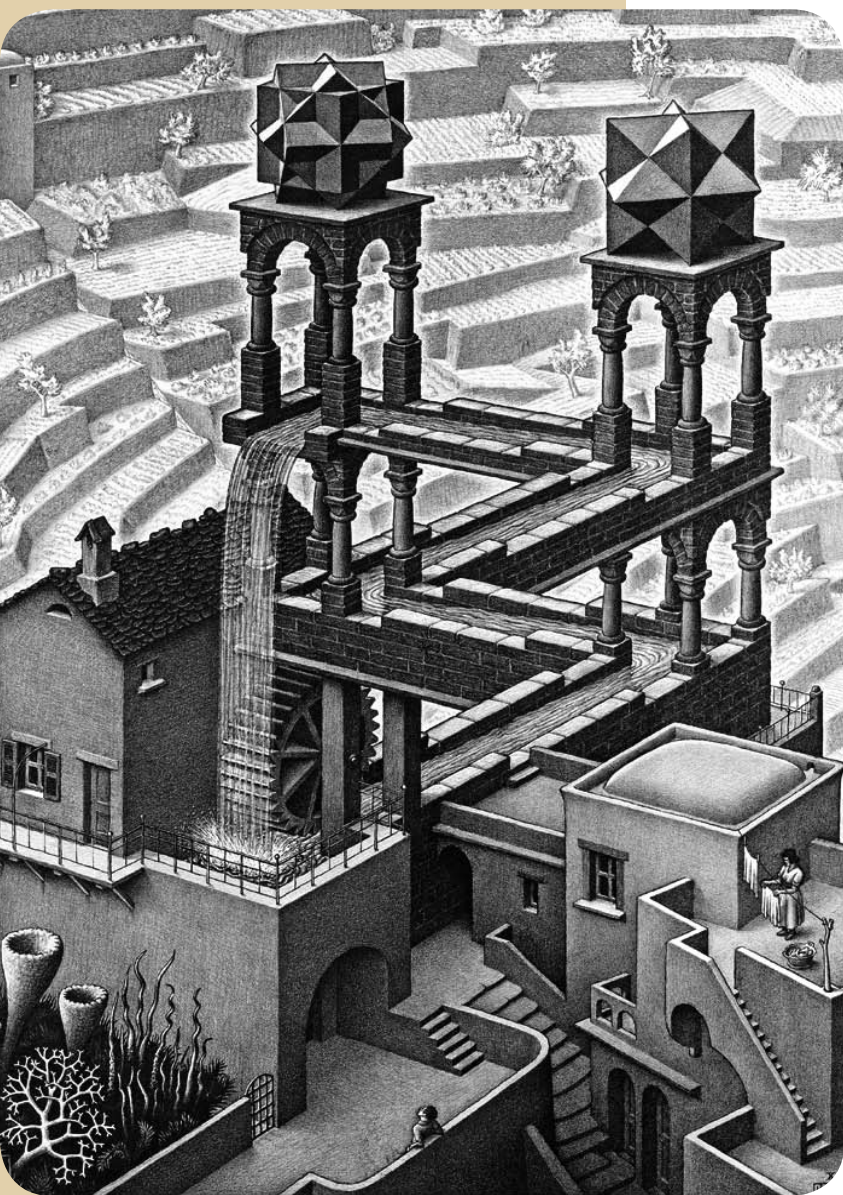


Perpetuum mobile

ALONSO
SEPÚLVEDA



Cascada, de Escher

Ex nihilo nihil fit.
Parménides

Escher

En uno de los más conocidos e ingeniosos grabados de Escher (*Cascada*, 1961), el artista dibuja un canal descendente de paredes escalonadas, que conduce agua; al final de un recorrido en zigzag, el agua llega a un punto ubicado exactamente encima del punto de partida, desde donde cae libremente por gravedad completando un circuito; en su caída, el agua hace girar una rueda de paletas interpuesta en su camino. El eje de la rueda giratoria parece entrar en una sala de máquinas hacia la que mira un hombre con cierto aire de curiosidad, mientras una mujer, por completo ajena al prodigio que se realiza en su casa, tiende ropa en su patio.

La mirada que sigue el recorrido del agua en el canal descubre que esta ha estado subiendo todo el tiempo, aunque no se logre descubrir fácilmente el sutil artificio en que se basa el engaño: una cuidadosa distorsión de las reglas de la perspectiva. La estrategia de Escher se asienta en las singulares propiedades del triángulo de Penrose, con el que puede diseñarse una escalera cerrada que siempre asciende (o desciende, según la dirección en que se recorra). La figura de



Triángulo de Penrose

Penrose es una estructura triangular imposible, consistente en tres barras rectas que se unen entre sí formando un ángulo recto en cada esquina, de modo que el ángulo total es de 270 grados en vez de los conocidos 180 de la geometría euclidiana; el triángulo —contra toda evidencia— parece formar una figura cerrada consistente, solo que cada vértice es correcto pero no el ensamble de los tres, lo que da un resultado exótico, algo que no puede ocurrir en el espacio físico. Solo porque este triángulo es posible *en el papel*, también es posible *dibujar* la arquitectura presentada por Escher en la *Cascada*. Este y otros grabados de Escher (como *Belvedere* y *Ascendente y descendente*) están basados en una inteligente y disimulada violación de las reglas de la perspectiva.

Lo que, para nuestro propósito, torna más interesante el dibujo de Escher, es que pone en duda un principio físico del que no hay excepciones conocidas en el mundo cotidiano: la conservación de la energía. Esto se concluye si se cae en la cuenta de que Escher ha dibujado una máquina de movimiento perpetuo, un artefacto al que, cuando más, en palabras de Escher, ha de “añadirse de vez en cuando un poco de agua para compensar la natural evaporación”. La máquina de Escher podría funcionar de modo indefinido, permitiendo la transformación de la energía cinética de la rueda en trabajo útil, lo que la convierte en una máquina creadora de energía, que viola la primera ley de la termodinámica.

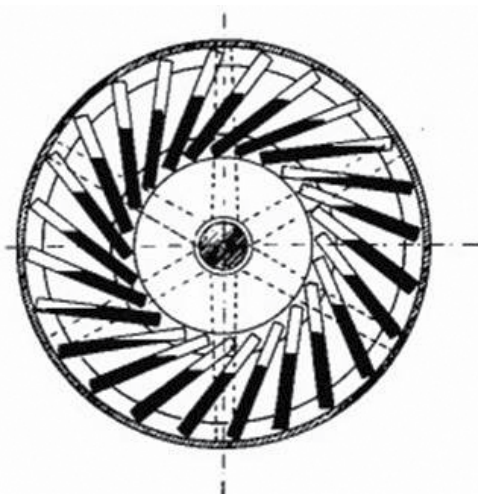
Parece así que Escher se vale de la violación de una regla de la perspectiva para sugerirnos la violación de una regla física, que en el mundo cotidiano no tiene, hasta ahora, excepciones. Obviamente la *Cascada* no hace parte de nuestro mundo. La lección parecería ser que en mundos *dibujados* que violen las reglas de la perspectiva también es posible violar las leyes de la física.

Historia

Se atribuye a Parménides, unos 500 años a. C., la proposición “Nada surge de la nada” (*Ex nihilo nihil fit*), que parece ser la forma más antigua de una ley de conservación, en la cual puede inscribirse la de la energía y la masa. Sin embargo, el propósito de lograr una máquina capaz de generar trabajo a partir de nada tiene una historia que puede rastrearse hasta la India en el siglo VII d. C. Un diseño persistente del que se encuentran muchas variantes es la rueda vertical que giraría sobre su eje en forma continua, y que fue concebida no tanto con el propósito de obtener trabajo útil sino con el de obtener un móvil perpetuo, símbolo de la divinidad.

El concepto esencial que anima la rueda de movimiento continuo es el mismo de la palanca: un par de pesos iguales ubicados en los extremos de una varilla horizontal (llamémosla A) permanece en equilibrio si esta se suspende desde su punto medio; en tal situación los pesos y los brazos son iguales. Si el peso de la izquierda —por ejemplo— se desplaza hacia el centro una pequeña distancia, la varilla se desequilibra y, al ser mayor el brazo del peso de la derecha, la varilla gira en dirección de las manecillas del reloj. La experiencia demuestra que la varilla desequilibrada oscila con el peso de mayor brazo en la parte inferior y al final se detiene por la fricción con el aire o con la balinera del centro de la varilla. Pero supongamos una segunda varilla (llamémosla B) perpendicular a la primera; cuando B logre su posición horizontal, el peso de la izquierda se le desplaza hacia el centro; con esto, el mayor brazo del peso de la derecha

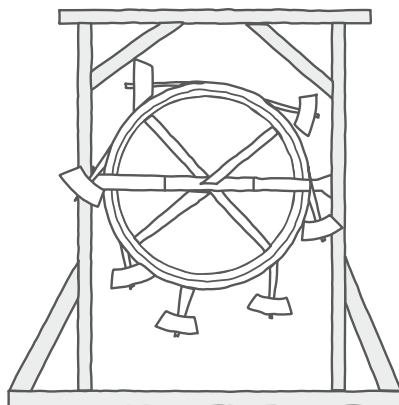
provoca un desequilibrio que hace que la varilla gire en dirección de las manecillas del reloj. Cuando el peso derecho de la varilla B logre llegar al punto más bajo, la varilla A ha logrado una posición horizontal. En su retorno a esta posición —mediante algún mecanismo— se hace que la pesa en A, desplazada hacia el centro (que ahora está a la derecha), regrese a su posición equidistante del centro, y que la pesa izquierda se desplace un poco hacia el centro. De este modo se mantiene siempre un desequilibrio de torques que logra el movimiento continuo de la cruceta de cuatro pesas. Lo que resta es lograr que este proceso se repita sin necesidad de desplazar manualmente las pesas, es decir, automatizar el proceso. Puede además enriquecerse el sistema con más pesas para obtener una estructura con múltiples radios, no cuatro, sino ocho o dieciséis, o más.



Rueda de Bhaskara

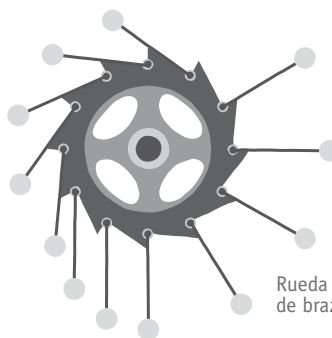
Una versión elaborada, “automatizada”, de este mecanismo, es una rueda con rayos inclinados, consistentes en tubos cerrados llenos con mercurio; este artefacto se remonta al siglo VII, en la India. Algunas variantes fueron propuestas en los siglos siguientes, como la de Bhaskara, en el siglo XII. Como puede verse, el mercurio a la derecha está más alejado del centro que a la izquierda, lo que —por su mayor

brazo— daría lugar al movimiento de la rueda en dirección de las manecillas del reloj. Sin embargo, la cantidad total de mercurio es mayor a la izquierda aunque está más cerca al centro, por lo que el desbalance se pierde: mayor brazo a la derecha pero mayor peso a la izquierda, por lo que la ley de la palanca no se viola y la rueda no gira continuamente como se esperaba.



Móvil perpetuo de Villard de Honnecourt

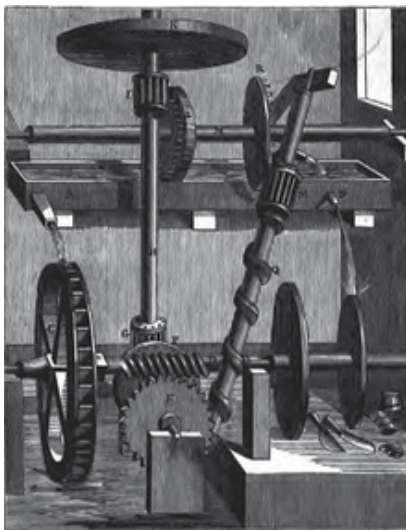
El primer diseño europeo de este tipo es el de Villard de Honnecourt (siglo XIII). Es un mecanismo bastante más simple que el de Bhaskara. Consiste en una rueda con siete pesas igualmente espaciadas, en la que un giro inicial hace que queden cuatro pesas a la derecha y tres a la izquierda, por lo que la rueda giraría en dirección de las manecillas del reloj. Otra vez, el sistema se reduce a sistemas de palancas con mayor peso a un lado pero mayor brazo al otro. Una versión “mejorada” es la rueda sobrebalanceada de brazos. Lo que esto enseña es que hay que olvidarse de obtener energía gratis usando la ley de la palanca.



Rueda sobrebalanceada de brazos

Leonardo trabajó algunas variantes de ruedas desbalanceadas, logrando concluir la imposibilidad de su funcionamiento; una de ellas se encuentra en la dirección de YouTube citada al final del artículo.¹

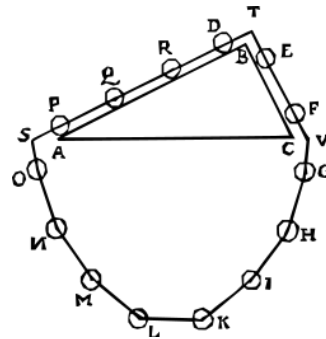
Un diseño interesante es el de la bomba extractora de agua que se alimenta a sí misma, concebida por el inglés Robert Fludd, en el siglo XVII. La rueda de paletas a la izquierda de la figura es movida por el agua que cae; el engranaje unido a su eje hace girar una rueda horizontal, cuyo eje vertical logra el giro de la varilla horizontal superior, que a su vez logra el ascenso de las cubetas con agua, la que, vertida en la canaleta, cae sobre la rueda de paletas, completando el ciclo y permitiendo que la energía de la caída del agua sea extraída de la rueda de paletas. En otra versión equivalente, la cadena con cangilones se reemplaza por un tornillo de Arquímedes. Obviamente, de aquí podría obtenerse trabajo gratis, como en la “máquina” imaginada por Escher.



Tornillo de agua de Robert Fludd

Simón Stevin, contemporáneo de Galileo, enunció la regla del paralelogramo de fuerzas asociada a su nombre, después de un estudio detallado de una máquina de movimiento perpetuo que no funciona, como pudo constatarlo. Tal artefacto consiste en un plano inclinado doble y una

cadena cerrada que lo rodea. El peso de la cadena, mayor sobre el plano izquierdo, debería hacerla rotar en dirección contraria a las manecillas del reloj. Puesto que esto nunca ocurre debe haber una ley que lo impide. Stevin descubre entonces la que en física elemental conocemos como regla del paralelogramo de fuerzas. Con la aplicación de esta ley se invalida el funcionamiento de varias máquinas de movimiento perpetuo.



Demostración de Stevin

Resulta así que de la ineficacia de estas máquinas pueden extraerse las leyes que lo impiden, las que, simple y llanamente, son leyes naturales; del mismo modo, leyes ya descubiertas explican la no operación de nuevas máquinas propuestas. La supuesta operación de este tipo de máquinas está basada en la pobre comprensión de las leyes naturales asociadas. ¿Por qué no sube el agua en el frasco de autollenado de Boyle? Porque el fenómeno no depende de la mayor cantidad de agua a la izquierda, cuyo peso obligaría al ascenso por el tubo de la derecha,



Frasco de autollenado de Robert Boyle

sino de las presiones. Un análisis mecánico completo revela que estas se encargan de mantener el fluido en equilibrio estático.

A medida que la física fue avanzando, se involucraron nuevos descubrimientos en el diseño de las máquinas de movimiento perpetuo. Esto ocurrió con la mecánica de sólidos y fluidos, la electrostática, el magnetismo y la inducción electromagnética, la capilaridad, la ósmosis y el principio de Arquímedes, por mencionar algunos. La evolución de estas máquinas ha sido continua y pareja con el de la física, solo que *ninguna* ha funcionado, lo que no ha sido obstáculo para que aún hoy sigan presentándose propuestas a las oficinas de patentes de diversos países.

Las leyes de la energía

Lisa, en esta casa obedecemos las leyes de la termodinámica.

Homero Simpson

La termodinámica se estructura con base en tres leyes. El diseño de las máquinas de movimiento perpetuo habitualmente pretende violar una de las dos siguientes:

1. *La energía no puede crearse ni aniquilarse.* Se conoce como conservación de la energía. Las que pretenden violar esta ley son máquinas de movimiento perpetuo de primera clase.
2. *El calor no puede convertirse completamente en trabajo.* En forma equivalente, se enuncia afirmando que la entropía —grado de desorden— de un sistema aislado, sin interacción con el exterior, no puede disminuir. Las que violan esta ley son máquinas de movimiento perpetuo de segunda clase.

Las leyes de la termodinámica surgieron como respuesta al problema de las transformaciones de la energía. Las formas propuestas en un principio fueron la cinética (asociada al movimiento) y la potencial (asociada a la posición de un cuerpo respecto a otros). Esta última adopta las formas de potencial gravitacional, elástica, eléctrica, entre otras.

Con el paso del tiempo se adicionó la energía magnética, la asociada a la luz, al sonido, la energía nuclear, etc., y se reconoció que el calor es una forma de energía asociada a la cinética, distribuida de modo aleatorio entre las partículas componentes de los sólidos, líquidos y gases. Con el desarrollo de las máquinas térmicas surgió el problema de calcular su eficiencia, que se resolvió con la enunciación de las leyes de la termodinámica, de acuerdo con las cuales la energía conservada de un sistema cerrado puede transformarse de un tipo a otro manteniendo siempre el valor total, con la restricción de que, mientras cualquier forma de energía puede transformarse por completo en calor, este no puede transformarse por completo en otras formas de energía. Así, por ejemplo, no puede tomarse agua de mar a 20 grados centígrados, extraer su energía calorífica y devolver el agua a quince grados sin invertir trabajo en el proceso, pues, en forma equivalente, la segunda ley afirma —como lo propuso Clausius en 1850— que el calor no fluye espontáneamente de los cuerpos más fríos a los más calientes. En la forma enunciada por Kelvin y Planck, la ley asegura que una máquina alimentada con calor nunca lo convierte *por entero* en trabajo; parte del calor se desperdicia, aunque la energía total se preserva. En un motor de automóvil, por ejemplo, el calor generado por la combustión de la gasolina se reparte entre el trabajo producido al mover los pistones y el que, desperdiciado, va a la atmósfera mediante el radiador.

Mientras la primera ley se viola en las máquinas de movimiento perpetuo de primera clase, cuyo propósito es crear energía (como en el mecanismo de Fludd o en la rueda con radios de mercurio), la segunda ley permite —en las máquinas de segunda

La energía
conservada
de un sistema
cerrado puede
transformarse
de un tipo
a otro
manteniendo
siempre el
valor total.

clase— una eficiencia mayor en la transformación del calor en trabajo que la permitida por esta ley.

Ahora bien, la segunda ley de la termodinámica introduce en la física una única dirección del acontecer físico. Las leyes que gobiernan el movimiento de las partículas no contienen una dirección única del tiempo, pues son las mismas si la variable

temporal t se reemplaza en las ecuaciones por $-t$. Esto significa que las leyes básicas no pueden determinar una secuencia pasado-presente-futuro, ya que los fenómenos elementales son reversibles. Esto puede ejemplificarse con un juego de billar idealizado en el que las colisiones entre las bolas son completamente elásticas, es decir, no disipan energía en forma alguna, ni en el choque de las bolas con las bandas, ni en su movimiento en la superficie del billar. En este caso pueden filmarse el choque de una bola con otra y la consecuente dispersión del conjunto y proyectar la película en orden temporal inverso. El resultado es una secuencia que puede ocurrir en el mundo real, por lo que mediante este juego no es posible determinar un orden único en el tiempo. Sin embargo, cuando se estudian las colisiones entre un gran número de partículas, como ocurre en un gas, estas tienden siempre a llevar el sistema a estados de máximo desorden cuya consecución permite determinar un orden temporal único, el del aumento de la entropía, del desorden interno del sistema. Si un frasco de perfume se destapa en una esquina de una habitación hermética, este se difundirá hasta ocupar de modo uniforme todo el lugar. Es este, en la práctica, un proceso irreversible que marca en el tiempo una única dirección. Vale decir que la dirección del tiempo es la que marcan los procesos en los que participa un gran número

La física del
siglo xx en
buena medida
piensa el
mundo sin
imágenes
espaciales,
solo con
estructuras
matemáticas.

de partículas (como ocurre con el universo entero), procesos, por naturaleza, estadísticos e irreversibles.

En las máquinas de movimiento perpetuo de segunda especie el calor adquiere una eficiencia no permitida por la segunda ley de la termodinámica. Por simplicidad, y porque no atañen al argumento central de este escrito, no haremos consideraciones sobre la tercera ley de la termodinámica.

Simetrías y leyes de conservación

Las máquinas de movimiento perpetuo violan la primera o la segunda ley de la termodinámica, pero ¿no podría suponerse, por un momento, que tal vez existan violaciones de estas leyes que permitan el funcionamiento de tales máquinas? ¿O hay un argumento más profundo en contra del funcionamiento de las máquinas de movimiento perpetuo —al menos las de primera clase, para simplificar— que las leyes de la termodinámica? ¿Quiénes se oponen a las máquinas de movimiento perpetuo lo hacen, en la generalidad de los casos, acudiendo a leyes físicas reconocidas o a la validez irrestricta de las leyes termodinámicas. ¿Pero hay argumentos de más peso?

Sí, con la condición de que el tema se enfoque desde una perspectiva estructural de la física. Resulta que la física actual —la que tiene su origen en el primer cuarto del siglo xx— no concibe las leyes de conservación como simples y contundentes resultados experimentales, o como teoremas que pueden enunciarse desde teorías sobre fenómenos específicos, como la mecánica o el electromagnetismo. El tema de las leyes de conservación, visto modernamente, tiene que ver con la estructura misma de la física y no solo con leyes experimentales. Con esto queremos asegurar que la física aprendió a trabajar con *superestructuras* que apuntan mucho más allá de los fenómenos concretos del mundo. La física del siglo xx en buena medida piensa el mundo sin imágenes espaciales, solo con estructuras matemáticas. Es esto lo que ha permitido el avance moderno de la física de partículas y



la cosmología, con sus versiones de cuerdas, supercuerdas, membranas, p-branas, multiversos; un insólito y sorprendente conjunto de abstracciones que hacen de la física actual un panorama calidoscópico bastante divertido, un exótico parque de atracciones matemáticas para el goce de físicos y cosmólogos. ¿Qué pasó? Que la física del siglo XX se dedicó no solo a explorar lo minúsculo y lo inmenso —la microfísica y la cosmología— sino que también se dedicó, con igual intensidad, a profundizar en su propia estructura; no por otra razón los mejores físicos de la última generación de la física son excelentes matemáticos.

En el siglo XVIII la mecánica lagrangiana, una versión abstracta de la mecánica de Newton, logró establecer la existencia de cantidades cuyo valor se conserva, cumplidas ciertas condiciones: la energía y los momentos lineal y angular.

El paso siguiente, ejemplo inigualable de abstracción y generalización, fue dado por la matemática alemana Emmy Noether a comienzos del siglo XX, en la forma de un teorema luminoso según el cual —trátese de partículas o de campos, de física clásica, cuántica o relativista— a cada simetría de una ley física hay asociada una ley de conservación. Abstracción, simplicidad, generalidad y belleza a la vez. La física vuelta estética de la inteligencia que anunciaba Bachelard.

Distancia y momento lineal, ángulo y momento angular, tiempo y energía son parejas que contienen la variable de simetría y la cantidad conservada. Nuevas parejas aparecieron con la mecánica cuántica y la física de las partículas elementales. El teorema de

Noether contiene la afirmación lagrangiana, altamente generalizada, de que las leyes físicas se expresan mediante ecuaciones que minimizan una cantidad conocida como la acción. La asociación simetrías-leyes de conservación significa que si un sistema permanece el mismo bajo traslación espacial el momento lineal en esa dirección se conserva; si el sistema físico permanece el mismo bajo rotación por un ángulo arbitrario el momento angular se conserva; si las leyes que describen un sistema físico son las mismas ayer, hoy y mañana, es decir, son independientes del momento en que se realice una medida en el sistema, entonces la energía se conserva. Vale decir, en este último caso, que la conservación de la energía está asociada a la invarianza de las leyes físicas bajo traslación temporal.

Desde esta nueva perspectiva, el tema de las máquinas de movimiento perpetuo no compete solo a la termodinámica, pues en caso de funcionar compromete la superestructura, asociada a las simetrías, que da lugar a las leyes de conservación.

Como hemos dicho, las máquinas de primera especie crean energía. Para comprender mejor las implicaciones que traería esta posibilidad, y tomando en cuenta la asociación entre tiempo y energía, proponemos el siguiente ejemplo: supóngase un tanque alto que contiene agua, que puede bajar por su propio peso por una manguera conectada al tanque; el chorro producido se enfoca hacia una rueda provista de paletas, cuyo movimiento es utilizado para poner en marcha un generador que produce corriente eléctrica, con la que puede cargarse una batería. Hasta aquí todo está bien:

energía potencial gravitacional del agua es transformada en cinética de rotación, luego en corriente eléctrica y, al final, en energía química almacenada en la batería. Pero supongamos, y aquí viene lo central, que la gravedad terrestre es menor los lunes que el resto de la semana; esto sugiere que la ley de gravedad depende del tiempo, por lo que no es invariante bajo traslación temporal.

Comencemos con el tanque lleno. El domingo dejamos que el agua almacenada baje y cargue la batería. Para economizar, almacenamos el agua que ha bajado. El lunes, aprovechando que el agua pesa menos, la subimos al tanque utilizando una bomba alimentada por la batería. Es obvio que sobra un poco de energía que puede utilizarse el resto de la semana para otros menesteres. El domingo —o cualquier otro día, excepto el lunes, para no perder el regalo— recargamos la batería dejando fluir el agua. El lunes siguiente el agua se devuelve al tanque, utilizando menos energía que la producida cuando baja cualquier otro día. De este modo siempre habrá energía para subir el agua y queda un remanente logrado de manera gratuita. Esta es una máquina de movimiento perpetuo de primera clase basada en que la ley de gravedad es diferente en diferentes momentos. Esta violación de la simetría temporal viola la conservación de la energía. Es fácil concluir, así, que las máquinas de movimiento perpetuo desvirtúan, en caso de funcionar, la relación simetría temporal-conservación de energía. Hemos utilizado aquí el ejemplo de la gravedad, pero podemos concluir que, si vemos variar cualquier ley natural de un día a otro —de un instante a otro, para exagerar— ahí se abrirá la posibilidad de hacer funcionar una máquina de movimiento perpetuo.

Si se viola la conexión energía-tiempo es de esperar que lo mismo pueda hacerse con distancia-momento lineal o ángulo-momento angular: puede crearse movimiento lineal, puede crearse rotación. Más aún, puesto que la conservación de la carga eléctrica está asociada a la llamada simetría de fase, también podría crearse carga

eléctrica. Además, la relatividad especial engloba en una sola simetría espacio-temporal el momento lineal, el angular y la energía —¡incluso la ley de inercia!—, de modo que es suficiente que una sola asociación entre una variable de simetría no dé lugar a una cantidad conservada para que *todas* las leyes de conservación del grupo sean violables.

Hasta ahora estas excepciones no han sido observadas y nadie ha visto aún funcionando, de manera examinable, científica, sin trucos, sin fuentes externas de energía, una máquina de movimiento perpetuo.

Un solo perpetuum mobile en operación —uno solo—, una sola máquina que permita crear energía en forma ilimitada cambiaría la estructura de base de la física que conocemos, no solo la termodinámica; además, seguramente se convertiría en el artefacto doméstico más apreciado. Un doble premio para quien logre crear una de estas máquinas exquisitas, exóticas y, hasta ahora, solo posibles en el arte. ■

Alonso Sepúlveda (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia, con estudios de posgrado en el Hunter College de la Universidad de Nueva York. Ha publicado: *Los conceptos de la física, Electromagnetismo, Física matemática y Estética y simetrías*. Ha participado en proyectos de investigación sobre dinámica de galaxias con el grupo de astrofísica de la Universidad de Roma.

Notas

- ¹ <http://www.youtube.com/watch?v=287qd4uI7-E>,
<http://www.youtube.com/watch?v=OWRyYYX7JxE>

Estas son unas pocas entre muchas entradas que el lector puede consultar:

- Una divertida lista de máquinas de movimiento perpetuo que abarca desde el siglo VIII hasta el año 2006: http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_perpetual_motion_machines.
- Una buena demostración de que es posible obtener patentes de artefactos que no funcionan (una lista que va desde 1809 hasta 2004): <http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/patents.htm>. Véase también: <http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/unwork.htm#top>.
- Simulaciones de diversas máquinas, y máquinas “reales” funcionando: <http://www.youtube.com/watch?v=PTVHXvd267A>, <http://www.youtube.com/watch?v=0H5k5CJRuiE>.