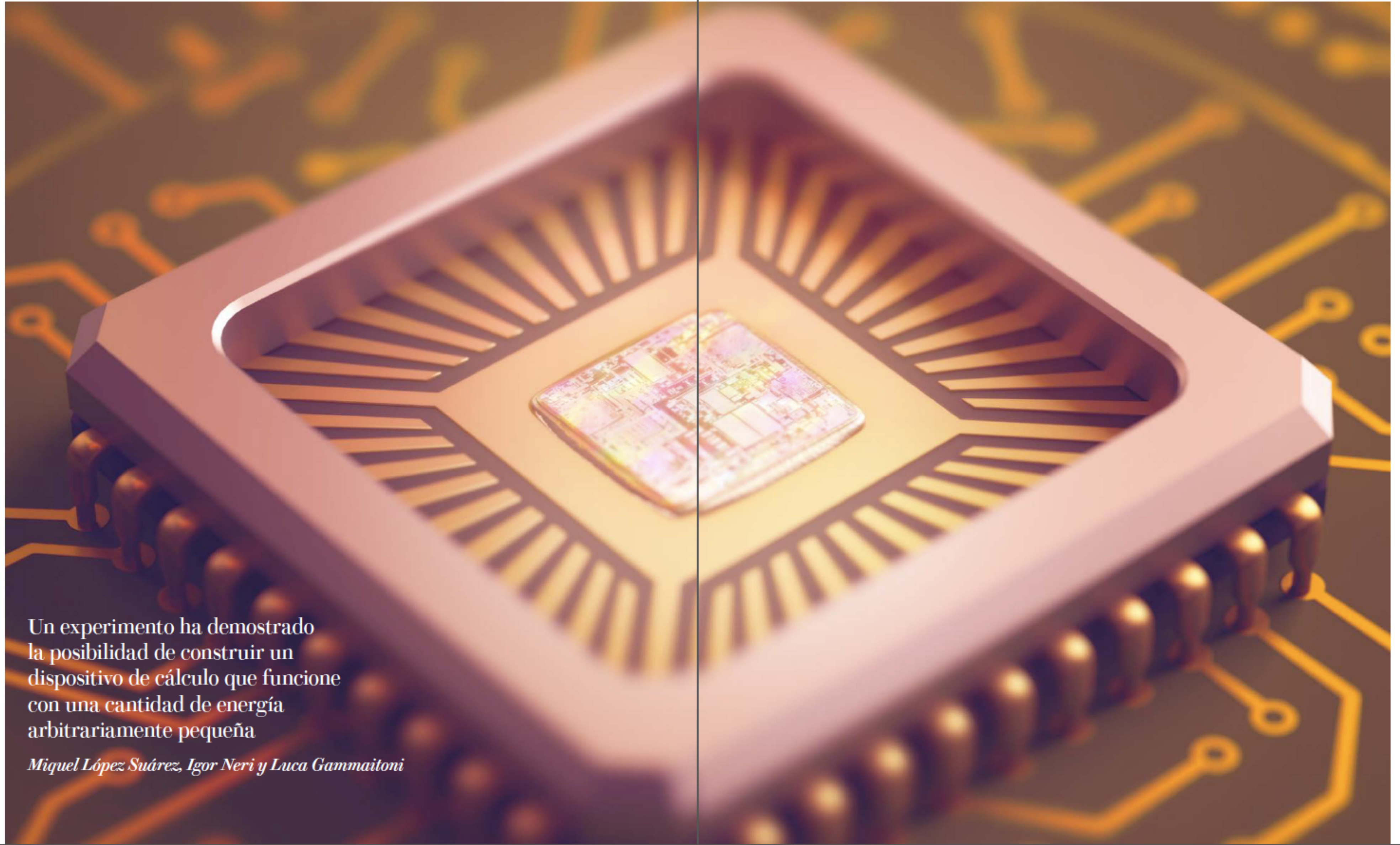


FÍSICA

Hacia la computación de energía cero



Un experimento ha demostrado la posibilidad de construir un dispositivo de cálculo que funcione con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña

Miquel López Suárez, Igor Neri y Luca Gammitoni

Miquel López Suárez es doctor en física e investigador posdoctoral en el Laboratorio de Ruido en Sistemas Físicos (NiPS), de la Universidad de Perugia.

Igor Neri es doctor en ingeniería de la información e investigador posdoctoral en el NiPS.

Luca Gammaitoni es profesor de física experimental en la Universidad de Perugia y director del NiPS.



¿HA NOTADO QUE LA BATERÍA DE SU TELÉFONO móvil cada vez dura menos? El fenómeno ha ido a la par que el aumento de las prestaciones de estos dispositivos. De simples terminales telefónicos han pasado a convertirse en verdaderos centros multimedia con funciones muy variadas: se conectan a Internet, toman fotografías y vídeos, sirven como reproductores de sonido e imágenes o incluso controlan nuestro estado de salud y nos ofrecen prestaciones deportivas.

Este espectacular aumento de funciones ha sido posible gracias al desarrollo tecnológico de las últimas décadas, el cual nos ha provisto de microprocesadores cada vez más complejos y veloces. Los microprocesadores constituyen el corazón de todo dispositivo electrónico. Contienen un enorme número de transistores (actualmente, más de mil millones por dispositivo), cada uno de los cuales usa una pequeña cantidad de energía. Hoy por hoy, los transistores más eficientes consumen unos 10^{-15} julios por operación, donde un julio equivale a la energía necesaria para elevar una manzana a un metro del suelo. Cuanto mayor sea el número de transistores, mayor será la capacidad de cálculo, pero también el consumo de los dispositivos. A ello se debe que las baterías duren cada vez menos.

Los diseñadores y fabricantes de microprocesadores se encuentran hoy ante la difícil tarea de aumentar la potencia de cálculo (lo que implica elevar el número y la velocidad de los transistores) sin incrementar en exceso el consumo de energía. La situación es grave hasta el punto de que, según el informe *Re-*

booting the IT revolution: A call to action, presentado en 2015 por la Asociación Industrial de Semiconductores y la Corporación de Investigación en Semiconductores, si esta tendencia continuase, en 2040 la demanda de energía debida al uso de ordenadores superaría la producción mundial de electricidad.

En los últimos cuarenta años se han conseguido importantes logros con miras a reducir el consumo energético de los

transistores. Sin embargo, parece que, por una serie de problemas tanto técnicos como económicos, esa senda no será transitable durante mucho más tiempo. Si deseamos evitar una paralización en el crecimiento del sector, tendremos que encontrar nuevos modos de construir ordenadores que resulten más eficientes desde el punto de vista energético.

¿Cómo alcanzar ese objetivo? ¿Hasta dónde podremos reducir el consumo energético de un microprocesador? ¿Imponen las leyes fundamentales de la física algún límite al consumo mínimo de un dispositivo de cálculo? ¿O cabe imaginar un ordenador que funcione con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña?

INFORMACIÓN FÍSICA

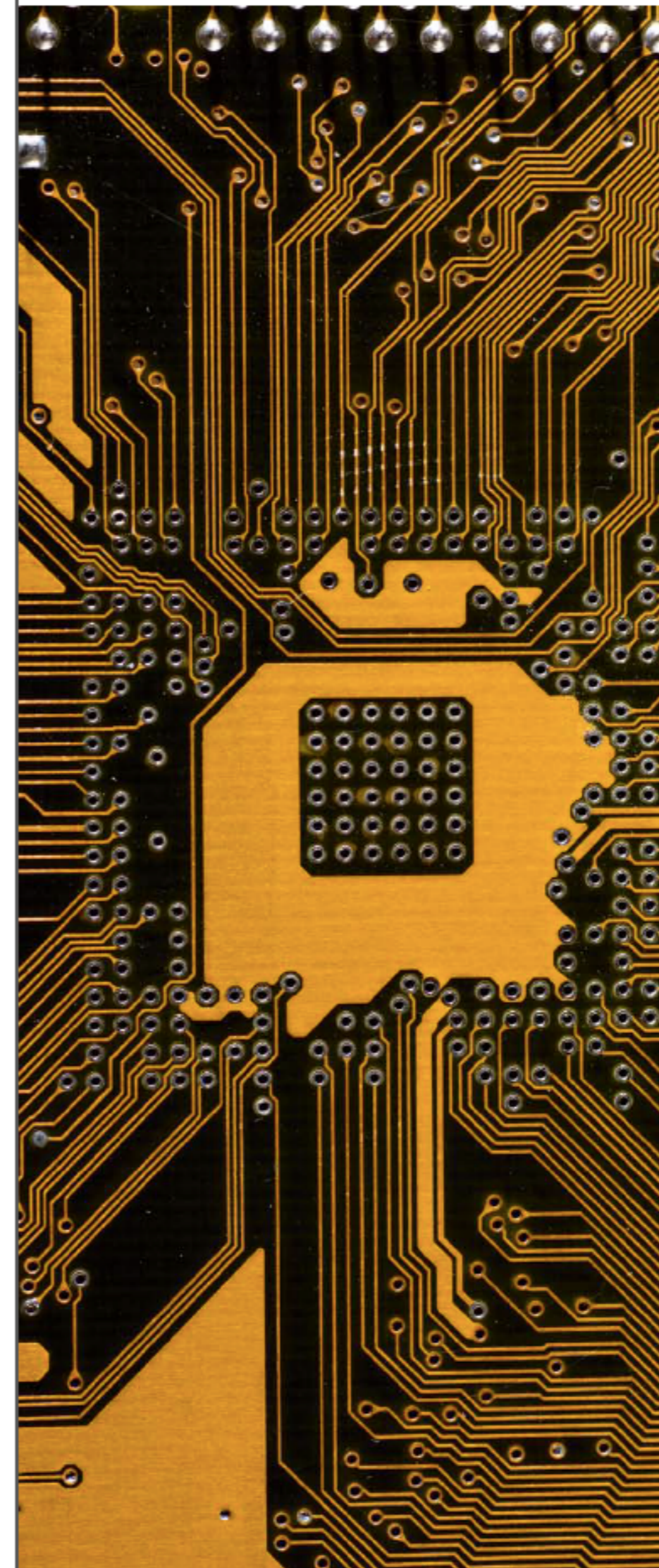
Los investigadores se han venido formulando tales preguntas desde los albores de las ciencias de la computación. Las primeras respuestas se deben a algunos de los pioneros de la informática, como Claude Shannon, John von Neuman y Rolf Landauer. A este último, físico de origen alemán que trabajó durante largo

EN SÍNTESIS

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas nos ha permitido disponer de ordenadores cada vez más complejos y veloces. Sin embargo, ese aumento de potencia ha incrementado la energía necesaria para alimentar los dispositivos.

Un resultado de 1961, conocido como «principio de Landauer», establece que el funcionamiento de todo dispositivo lógico irreversible lleva asociado un consumo de energía que no puede ser inferior a cierta cantidad límite.

Un experimento reciente ha demostrado que dicho principio es falso. Aunque los prototipos usados no pueden sustituir a los microprocesadores actuales, el resultado abre la puerta a la fabricación de ordenadores mucho más eficientes.



tiempo en IBM, se le atribuye un importante resultado que hoy conocemos como «principio de Landauer».

Para entender en qué consiste, debemos recordar que todo ordenador es, en última instancia, un sistema físico que, como tal, ha de obedecer las leyes de la termodinámica. En un artículo hoy célebre publicado en 1961 en la revista *IBM Journal of Research and Development*, Landauer señaló que la aplicación de estas leyes al funcionamiento de las computadoras impone límites a la energía que un ordenador debe utilizar durante su funcionamiento. En particular, el segundo principio de la termodinámica implica que, en toda transformación que conlleve una disminución de entropía (es decir, una reducción del número de estados físicos posibles), se debe consumir una cierta cantidad de energía. Por tanto, dicho proceso no puede llevarse a cabo a expensas de un gasto energético nulo.

¿Cuándo tiene lugar una transformación caracterizada por una disminución de entropía? Para entender bien este punto, consideremos una operación que los ordenadores deben realizar a menudo: la escritura de una posición de memoria. En una computadora, los datos se representan mediante secuencias de ceros y unos, o bits, acrónimo de las palabras *binary* y *digit*, es decir, dígito binario. Para efectuar cálculos en un ordenador necesitamos por tanto dispositivos que puedan adoptar dos estados, como «encendido» y «apagado» o «abierto» y «cerrado». Tales mecanismos reciben el nombre de interruptores binarios, y pueden clasificarse en dos grandes grupos: combinatoriales, útiles para efectuar los cálculos propiamente dichos; y secuenciales, útiles para las memorias.

Un dispositivo combinatorial es un interruptor binario que puede cambiar su estado cuando se le aplica una entrada y que, una vez retirada esta, regresa a su estado inicial. A modo de ejemplo, pensemos en una bola que descansa sobre un plano y que se encuentra unida a un muelle. Si aplicamos una fuerza (la entrada de nuestro dispositivo), el muelle se estirará y la bola cambiará de posición (la salida de nuestro dispositivo). Cuando deje de aplicarse la fuerza, la bola, gracias a la presencia del muelle, regresará a la posición inicial.

Un dispositivo secuencial resulta similar al anterior, pero con la diferencia de que, cuando se retira la entrada, no regresa a su estado inicial; de ahí que resulte útil para las memorias. A modo de ejemplo, podemos imaginar que nuestra bola se encuentra en una huevera con dos alojamientos. Si aplicamos una fuerza, podemos hacer que la bola cambie de posición. Pero, una vez que dejemos de aplicarla, la bola permanecerá allí donde se encuentre.

Para almacenar en una memoria un bit de información debemos usar un dispositivo secuencial y generar una transformación de su estado físico. En la práctica, esto se efectúa asociando un estado lógico (un valor del bit) a cada uno de los dos estados físicos posibles: por ejemplo, 0 al interruptor abierto y 1 al cerrado. Un dispositivo secuencial abandonado a sí mismo alcanzará un estado de equilibrio termodinámico; es decir, uno en el que puede encontrarse con igual probabilidad en el estado 0 o el 1. Si, por ejemplo, deseamos almacenar en una memoria un bit en el estado 0, habremos de aplicar una fuerza que rompa ese estado de equilibrio y que, con toda certeza, lo lleve al estado lógico 0.

La relación entre la entropía y el número de estados físicos posibles de un sistema fue deducida a finales del siglo XIX por el físico austriaco Ludwig Boltzmann. Según dicha relación, la escritura de un estado de memoria como la que acabamos de describir constituye una transformación física que comporta

Dispositivos reversibles e irreversibles

Los microprocesadores llevan a cabo los cálculos mediante puertas lógicas: dispositivos que asocian una cierta salida a cada combinación de bits de entrada. Por ejemplo, una puerta OR (que implementa una disyunción lógica, «A o B») admite dos entradas y una salida: si ambas entradas son 0, la salida es también 0; en todos los demás casos, la salida es 1 (tabla).

Las puertas lógicas pueden clasificarse en reversibles e irreversibles, un concepto introducido en 1961 por el físico Rolf Landauer. Según este, un dispositivo es lógicamente irreversible si su salida no basta para identificar de manera unívoca las entradas. En el caso de la puerta OR, solo si la salida es 0 podremos con-

cluir que la entrada fue la combinación 00. Sin embargo, si la salida es 1, no podremos afirmar con certeza si las entradas fueron 00, 10 o 11.

Poco después del trabajo de Landauer, el teórico de la computación Charles Bennet demostró la posibilidad de efectuar cálculos usando puertas lógicas reversibles, como las ideadas en 1980 por Tommaso Toffoli y en 1983 por Edward Fredkin, por entonces ambos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Tales puertas se caracterizan por tener un número de salidas no inferior al de entradas, lo que permite recuperar el valor de las segundas a partir del de las primeras.

Entrada		Salida
A	B	A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

una disminución de entropía, ya que el sistema pasa de estar caracterizado por dos estados posibles a estarlo por uno solo. Ahora bien, por el segundo principio de la termodinámica, a esa disminución de entropía le corresponde un gasto energético mínimo. En nuestro caso, y a temperatura ambiente, el valor de dicho gasto resulta minúsculo: del orden de 10^{-21} julios, una milésima de milmillonésima de milmillonésima de julio.

Landauer llevó a cabo su análisis energético de los procesos de cómputo a principios de los años sesenta. En aquella época ya se había popularizado el concepto de cantidad de información, introducido quince años antes por Claude Shannon, ingeniero de los Laboratorios Bell. Siguiendo esta idea, una posición de memoria que no esté escrita (es decir, en equilibrio termodinámico) constituye un dispositivo caracterizado por dos estados, ya que puede encontrarse tanto en el estado lógico 0 como en el 1. Si escribimos nuestra memoria y la obligamos a adoptar el estado 0, por ejemplo, el número de estados en los que puede encontrarse pasará de dos a uno. Como ya hemos visto, a esta operación lógica, hoy conocida como «borrado de Landauer», le corresponde una transformación física que conduce a una disminución de la entropía y, por ende, a un gasto de energía que no puede ser inferior a cierta cantidad límite.

A partir de tales consideraciones, Landauer extrajo la idea fundamental que subyace al principio que lleva su nombre: cada vez que reducimos la cantidad de información en un dispositivo, ello equivale a efectuar la correspondiente disminución de entropía y, por tanto, requiere un gasto de energía que no puede ser nulo. Es en este sentido como debe interpretarse la célebre conclusión de Landauer: «La información es física».

PROCESOS REVERSIBLES E IRREVERSIBLES

La idea de asignar un papel físico a la cantidad de información, una magnitud considerada hasta entonces puramente matemática, se popularizó en los años sesenta y setenta del pasado siglo y generó variopintas interpretaciones, no todas plenamente compartidas por la comunidad científica. Una de las cuestiones más controvertidas se refiere a cuál es esa cantidad mínima de energía requerida para realizar un cálculo. Para responder a

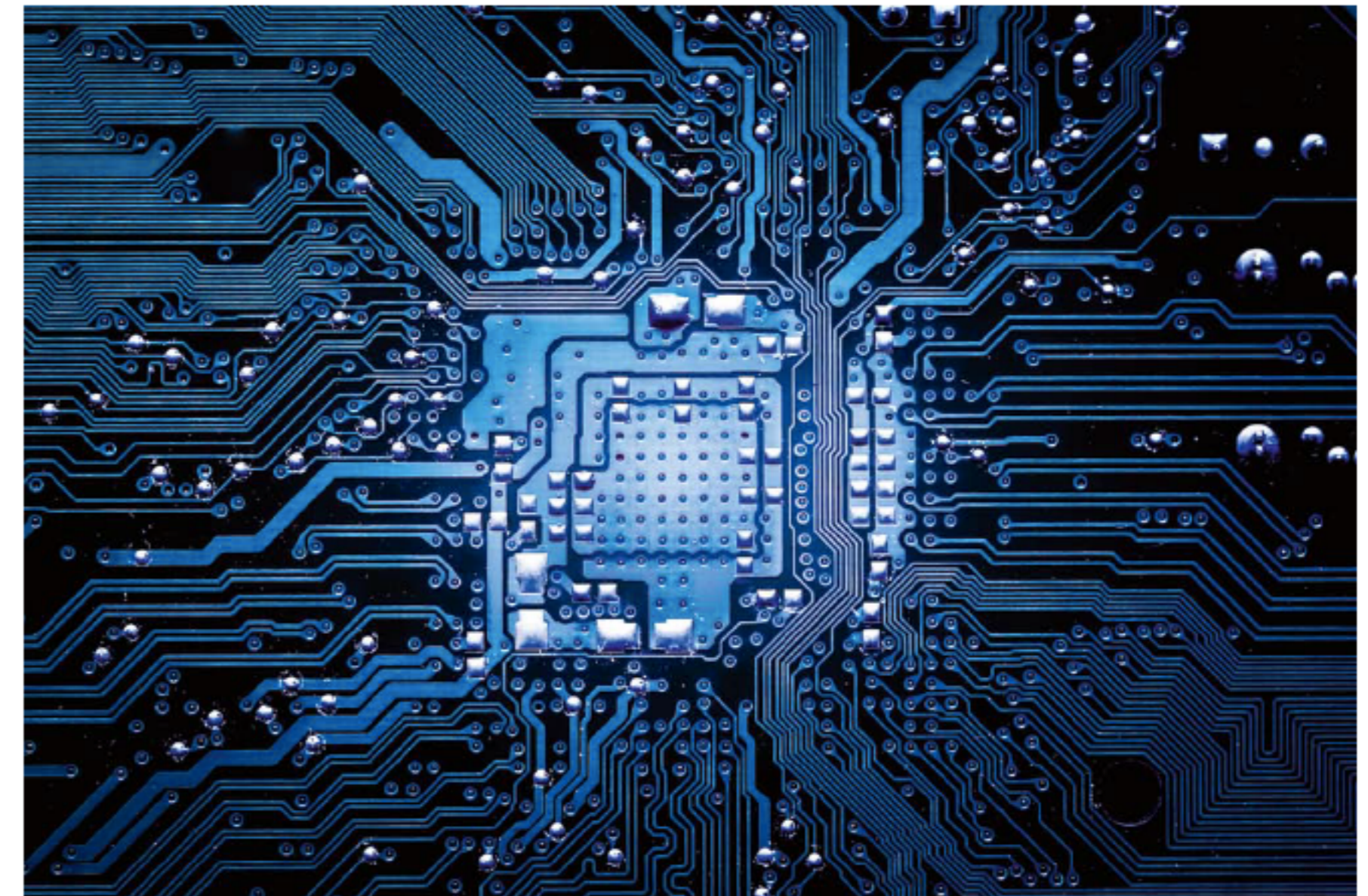
esta pregunta, hemos de definir con precisión qué entendemos por «efectuar un cálculo».

Como hemos mencionado, un ordenador necesita dos tipos de dispositivos: secuenciales y combinacionales. Los primeros se emplean en las memorias; los segundos, para las operaciones de cálculo. Estas últimas, que habitualmente identificamos como las cuatro operaciones aritméticas básicas (suma, resta, multiplicación y división), pueden llevarse a cabo combinando puertas lógicas. Un ejemplo sencillo lo hallamos en la puerta lógica OR, o de disyunción lógica. Decimos que esta puerta es «lógicamente irreversible», un concepto introducido por el propio Landauer en su famoso artículo de 1961: «Diremos que un dispositivo es lógicamente irreversible si su salida no basta para identificar de manera unívoca las entradas». La idea de Landauer sobre el consumo energético del cálculo resulta muy simple y quedó expresada en un artículo publicado en esta revista en 1985: «Siempre que utilicemos una de tales puertas lógicamente irreversibles disiparemos energía en el ambiente» [véase «Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo», por Charles Bennet y Rolf Landauer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985].

En un principio, Landauer pensó que para efectuar cálculos resultaba indispensable usar puertas lógicas irreversibles. Poco después, sin embargo su colega de IBM Charles Bennet demostró la posibilidad de realizar cálculos usando otro tipo de puertas lógicas, denominadas reversibles. En estas, una vez conocido el estado lógico de salida, es posible recuperar el estado lógico de todas las entradas.

Por tanto, la idea de Landauer, compartida también por Bennet, puede resumirse así: dada cualquier puerta lógica, su funcionamiento estará unido a cierto gasto energético, el cual vendrá dado por la disminución en la cantidad de información que contiene la salida con respecto a las entradas. En este sentido, Landauer trata las puertas lógicas como había hecho con las memorias: toda disminución de información conlleva un gasto mínimo de energía.

En las puertas lógicas reversibles de interés práctico, el número de salidas es igual al número de entradas, por lo que esa



pérdida de información no existe y pueden hacerse funcionar sin consumo energético. Claramente, este no es el caso de puertas lógicas como OR, que, con dos entradas y una salida, entraña la pérdida de un bit de información. Para Landauer, una puerta OR no puede operarse sin consumir una cantidad de energía inferior a cierto valor límite. Dicho umbral se conoce hoy como «límite de Landauer».

En resumen, podemos afirmar que el trabajo de Landauer y Bennet difundió la idea de que es posible realizar un cálculo sin consumir energía, siempre y cuando usemos solo puertas lógicas reversibles. Esta noción dio lugar al nacimiento de una disciplina conocida como «cálculo reversible». Hasta ahora, sin embargo, este campo ha dado lugar a pocas aplicaciones. Ello obedece a dos razones. Por un lado, no existen muchos ejemplos prácticos de puertas lógicas reversibles. Por otro, debido a diversos fenómenos de disipación y resistencias internas, el consumo energético de las puertas actuales resulta millones de veces mayor que el supuesto límite de Landauer, por lo que, en la práctica, emplear puertas reversibles no modificaría la cantidad de energía requerida. No obstante, aunque por ahora la diferencia no resulte significativa desde el punto de vista tecnológico, desde una perspectiva teórica sí supone un salto conceptual.

Según el límite de Landauer, la cantidad mínima de energía que debe invertirse para hacer funcionar una puerta lógica irreversible resulta tan minúscula que, hasta hace poco, no disponíamos de las técnicas adecuadas para medirla. Como consecuencia, la teoría de Landauer permaneció durante largo tiempo sin confirmación experimental. En 2012, sin embargo, Eric Lutz, por entonces en la Universidad de Augsburg, Sergio

Ciliberto, de la Universidad de Lyon, y otros investigadores pusieron a prueba la operación de borrado de Landauer usando una pequeña esfera en suspensión en un líquido y sometida a una pinza óptica. Los resultados, publicados en *Nature*, se mostraron en consonancia con la previsión de Landauer. Dos años después, John Bechhoefer y sus colaboradores de la Universidad Simon Fraser, en Canadá, repitieron el experimento y confirmaron el resultado en *Physical Review Letters*. Sin embargo, y a pesar de que en estos años se han llevado a cabo otros trabajos relacionados con la teoría de Landauer, hasta ahora nadie había sometido a una prueba directa la afirmación según la cual no es posible hacer funcionar un dispositivo lógicamente irreversible con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.

EL LÍMITE A PRUEBA

Hace unos cinco años, los autores de este artículo y otros investigadores propusimos a la Comisión Europea la financiación de un proyecto de investigación encaminado a estudiar los aspectos del cálculo a «energía cero». El proyecto, denominado LANDAUER e iniciado en septiembre de 2012, ha conocido la participación de seis grupos europeos coordinados por la Universidad de Perugia. Tras unos años de trabajo, hemos obtenido varios resultados notables publicados en revistas internacionales. Uno de los más interesantes hace referencia, precisamente, a la aplicación del principio de Landauer a puertas lógicas irreversibles.

En el Laboratorio de Ruido en Sistemas Físicos (NiPS), de la Universidad de Perugia, construimos una puerta lógica OR haciendo uso de la tecnología microelectromecánica (véase el recuadro «Landauer, puesto a prueba»). Nuestra puerta, con-

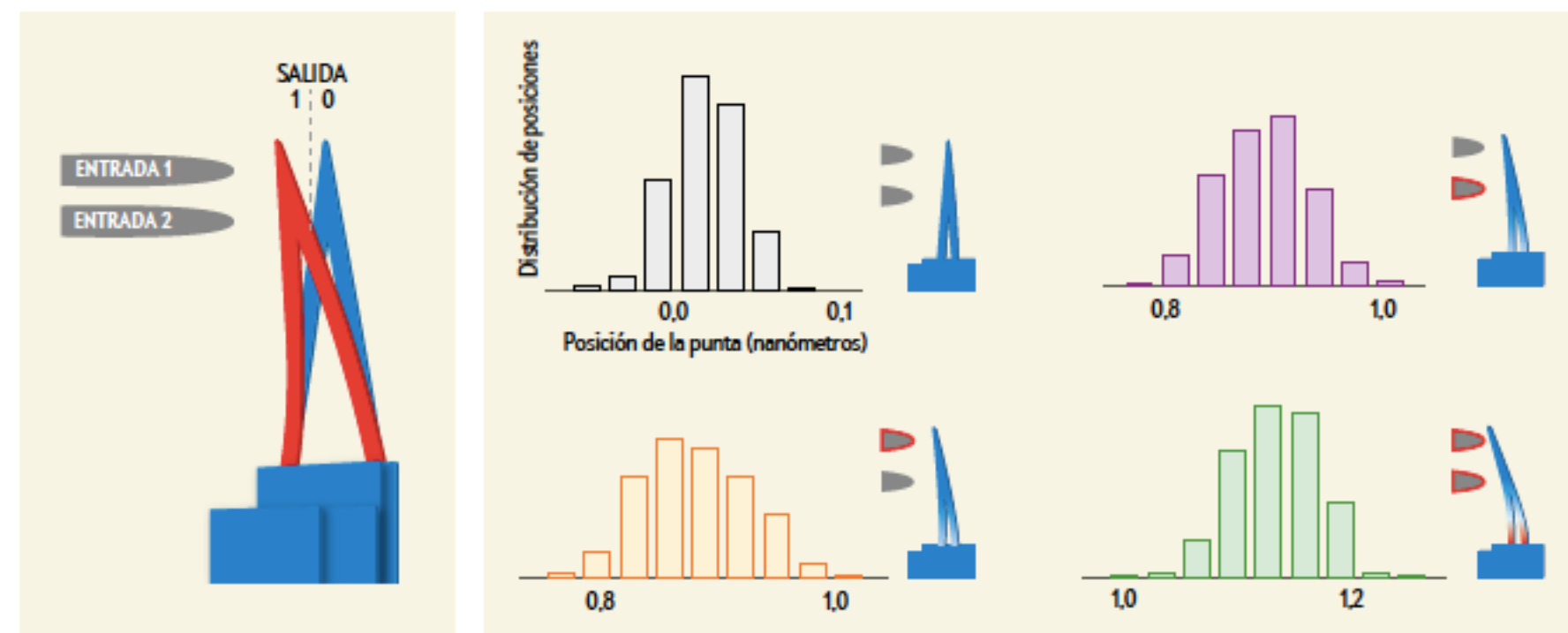
Landauer, puesto a prueba

El «principio de Landauer» establece que la operación de todo dispositivo lógicamente irreversible disipará al entorno una cantidad mínima de energía. Dicha cota viene dada por $k_B T \ln 2$, donde k_B denota la constante de Boltzmann (una constante universal de la naturaleza) y T la temperatura. Con el objetivo de poner

a prueba esta idea, los autores construyeron un dispositivo microelectromecánico que imitaba las funciones de una puerta lógica OR.

Dicho dispositivo constaba de una lámina de nitruro de silicio con forma de V invertida y unas dimensiones de unos 200 micrómetros de longitud y 500 na-

nómetros de anchura (abajo, izquierda). La lámina podía doblarse por medio de una fuerza electrostática ejercida por dos puntas metálicas vecinas a las que se aplicaba una diferencia de potencial. Si no se aplicaba tensión a ninguna de las puntas (equivalente a la entrada 00), la lámina permanecía en posición vertical (asociada al estado



sistente en una pequeña lámina sometida a fuerzas electrostáticas, constituye un ejemplo de dispositivo irreversible: si nos remitimos a la combinación de entradas 01, 10 y 11, veremos que, de la mera observación de la salida (1), representada por la posición de la lámina, resulta imposible deducir la configuración de entrada.

A fin de verificar la aplicación del límite de Landauer a nuestras puertas lógicas, llevamos a cabo un gran número de mediciones relativas a la cantidad de trabajo ejercido por las fuerzas eléctricas para doblar la lámina, bajo diversas condiciones del valor de las entradas y también a distintas velocidades de transformación. Como resultado, hallamos que casi todas las medidas mostraban que la energía empleada era inferior al límite propuesto por Landauer. Nuestros resultados, publicados el año pasado en *Nature Communications*, indican que, al contrario de lo que sostiene la teoría de Landauer, sí es posible hacer funcionar puertas lógicas irreversibles consumiendo una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.

UNA CUESTIÓN DE LENGUAJE

Aún es pronto para saber cómo recibirá la comunidad científica nuestro resultado. No obstante, hemos de recordar que, desde sus inicios, la teoría de Landauer ha sido objeto de controversia. Aclamada por ingenieros electrónicos y de la información, a menudo ha tropezado con la oposición de los expertos en física estadística. En nuestra opinión, ello se debe en gran medida a malentendidos derivados del uso de dife-

rentes lenguajes. Landauer asume un lenguaje propio de la teoría de la información, que, sin embargo, se adapta mal a la física. Habla de «entrada» y «salida» de un dispositivo de cálculo y asocia a estas «dos partes del sistema» una cierta cantidad de información.

Ahora bien, si examinamos con atención un dispositivo de cálculo, nos daremos cuenta de que el papel de las entradas puede asignarse a las fuerzas que actúan sobre el sistema, mientras que el de la salida queda representado por el estado del sistema. En este sentido, las entradas corresponden simplemente a la causa de la variación del estado, pero no cuentan a la hora de calcular el cambio en la entropía, puesto que no forman parte del sistema físico que experimenta la transformación.

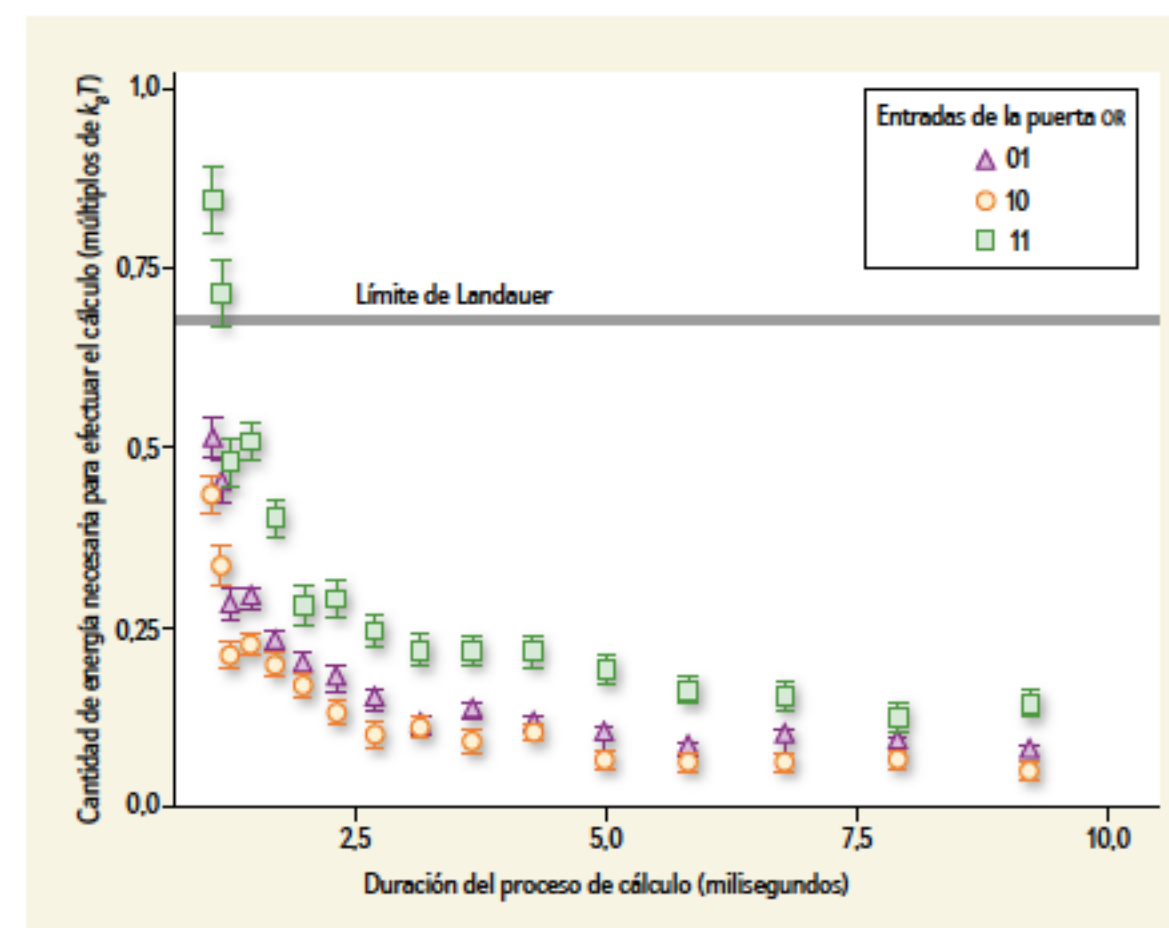
Desde el punto de vista de Landauer, lo importante es la diferencia en la cantidad de información entre la entrada y la salida, lo que se interpreta como un cambio en la entropía del sistema. El punto de vista termodinámico, en cambio, razona sobre las transformaciones que experimenta un sistema desde un estado inicial hasta otro final. Para la termodinámica solo cuenta la variación de entropía entre esos dos estados o, mejor dicho, la variación de entropía cuando el estado del sistema cambia en el tiempo bajo la acción de una fuerza. Por tanto, si logramos transformar el estado de forma que la entropía permanezca constante, las leyes de la física sí permiten que dicho cambio se produzca a expensas de un gasto energético nulo con independencia de cuántos bits estén presentes en la

DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR

de salida 0, azul). En cambio, al aplicar un voltaje a una o ambas puntas (estados de entrada 01, 10 o 11), la lámina se doblaba (estado de salida 1, rojo). Al interpretar de esta manera los valores de las entradas y las salidas, puede comprobarse que dicho dispositivo efectúa las funciones de la puerta lógica irreversible OR.

Debido al pequeño tamaño de la lámina, el desplazamiento de la punta resulta también minúsculo, por lo que se halla sujeto a fluctuaciones térmicas y se distribuye estadísticamente según la ley de Gauss (página opuesta, derecha). En el caso de las entradas 01 y 10, el desplazamiento medio resulta similar, con un valor ligeramente inferior a un nanómetro. Por su parte, el correspondiente a la entrada 11 se sitúa en torno a 1,1 nanómetros.

La gráfica reproducida aquí muestra tres curvas relativas a las medidas de la energía disipada en el proceso para tres configuraciones de entradas. Para cada una se observa que, al alargar la duración del ciclo, la energía disipada disminuye. Dicha pérdida energética se encuentra asociada a los procesos de rozamiento en el movimiento de la lámina. Cuanto más lento es el proceso, más se reduce la disi-



pación de energía y más se acerca este a una transformación «adiabática»; es decir, a una en la que no hay intercambio neto de calor con el medio. La mayor parte de las medidas muestran un valor de la ener-

gía inferior al límite predicho por Landauer. Los resultados demuestran la posibilidad de construir dispositivos lógicos irreversibles que operen con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.

entrada; es decir, sin importar cuántas fuerzas actúen sobre el sistema.

Si el resultado de nuestro trabajo se ve confirmado por otros experimentos, será necesario revisar en profundidad la física de los procesos de cómputo. Y la teoría de Landauer, como tantas otras a lo largo de la historia, deberá actualizarse a la luz de las nuevas pruebas experimentales.

REGRESO AL PASADO

La inexistencia de una cota inferior en la energía necesaria para hacer funcionar una puerta lógica irreversible abre el camino a la fabricación de microprocesadores que no se vean limitados por una disipación mínima de calor. A fin de demostrar esta posibilidad, en nuestro laboratorio hemos construido también una puerta universal NOR (la negación de OR), cuyas combinaciones permiten efectuar todas las operaciones lógicas y aritméticas típicas de un microprocesador. El siguiente paso consistirá en construir un «sumador completo»; es decir, un dispositivo capaz de calcular la suma de números binarios. Por ahora ya hemos diseñado la configuración de láminas necesaria para fabricarlo, así como para medir el consumo energético durante su funcionamiento.

Somos conscientes de que nuestros prototipos microelectromecánicos no pueden constituir per se una alternativa a los circuitos semiconductores actuales: por más que resulten millones de veces más eficientes en cuanto a consumo energético, son demasiado lentos y voluminosos. Sin embargo, señalan un camino

que podría llevar a los ordenadores de mañana a abandonar la tecnología microelectrónica de los transistores contemporáneos en favor de dispositivos nanomecánicos. Una especie de vuelta al pasado, cuando las calculadoras funcionaban con engranajes accionados por una manivela. El futuro de los sistemas de computación se antoja impredecible e interesante: todos estamos llamados a imaginar nuevos teléfonos con baterías de duración potencialmente ilimitada. ■

© Le Scienze

PARA SABER MÁS

Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. Antoine Bérut et al. en *Nature*, vol. 483, págs. 187-189, marzo de 2012.

Exploring the thermodynamic limits of computation in integrated systems: Magnetic memory, nanomagnetic logic, and the Landauer limit. Brian Lambson, David Carlton y Jeffrey Bokor en *Physical Review Letters*, vol. 107, art. 010604, julio de 2011.

Sub- $k_B T$ micro-electromechanical Irreversible logic gates. Miquel López-Suárez, Igor Neri y Luca Gammaioni en *Nature Communications*, vol. 7, art. 12068, junio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo. Charles H. Bennett y Rolf Landauer en *JyC*, septiembre de 1985.

Rolf Landauer: A lomos de los electrones. Gary Stix en *JyC*, noviembre de 1998.