

¿Qué es un transistor?

¿Y por qué cargamos miles de millones de ellos en nuestro bolsillo?

THOMAS STEGMANN

El Dr. Thomas Stegmann es investigador en el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM. Su trabajo se centra en el estudio del transporte electrónico en nuevos materiales cuánticos. Fue galardonado recientemente por sus investigaciones con la Cátedra Marcos Moshinsky.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

En esta edición les quiero contar sobre los transistores, una de las invenciones más importantes del siglo pasado y, hoy en día, el dispositivo electrónico más fabricado del mundo. De hecho, todos los días llevamos miles de millones de ellos en nuestros bolsillos, ya que son un elemento clave para cualquier computadora o teléfono inteligente. Pero empecemos despacio con solo uno de ellos. Si acudimos a una tienda de componentes electrónicos y preguntamos por un transistor, nos venderán un dispositivo como el que muestra la Figura 1, que tiene aproximadamente el tamaño y peso de un chicharo. (Tranquilos: millones de transistores no tienen necesariamente el tamaño ni el peso de

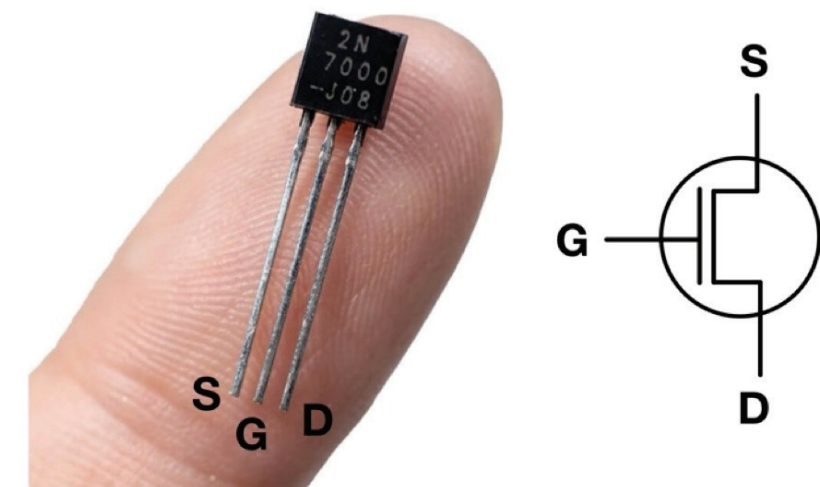


FIGURA 1. FOTOGRAFÍA de un transistor (fuente: uelectronics.com), junto con su diagrama de circuito. El transistor tiene tres contactos, denominados S, D y G.

millones de chicharos.)

El transistor tiene tres patitas o contactos. Conectemos entre los contactos S y D una batería y un pequeño foco, como se muestra en la Figura 2. Lo interesante del transistor ocurre con el tercer contacto G con el cual podemos controlar si el foco se enciende o se queda apagado. Si conectamos otra batería con un voltaje variable a este contacto, para voltajes cero o bajos el transistor bloquea el flujo de corriente y el foco permanece apagado. Para voltajes altos, el transistor deja pasar el flujo de corriente y el foco se enciende. En resumen, mediante el voltaje aplicado al contacto G podemos abrir o

cerrar el flujo de corriente eléctrica. El transistor funciona como un interruptor de luz, con la diferencia de que no es mecánico, sino que opera de manera eléctrica. Esta es la esencia de un transistor.

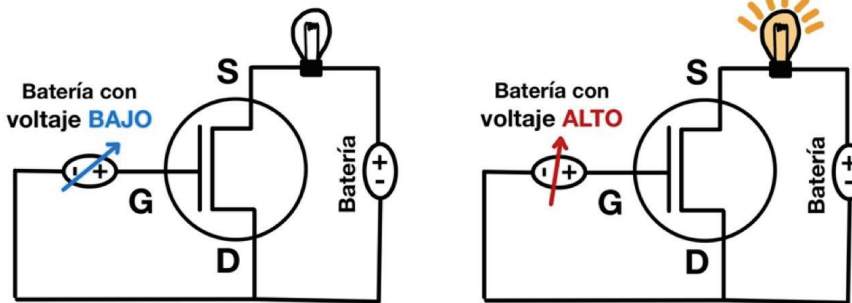


FIGURA 2. EL flujo de corriente eléctrica se puede controlar mediante el voltaje aplicado al contacto G del transistor. Si el voltaje es bajo, la corriente está bloqueada y el foco apagado (izquierda). Si el voltaje es alto, la corriente puede fluir y el foco se enciende (derecha).

¿Y cómo se lleva a cabo este funcionamiento dentro de la cajita negra? La manera más común hoy en día está basada en *semiconductores*, como el silicio, el segundo material más abundante en la superficie de la Tierra, ya que la arena y muchas rocas están constituidas principalmente por el dióxido de silicio. Sin

en la mecánica cuántica. No podemos explicar aquí todos los detalles de esta figura, pero lo importante de ella es que existe una pequeña región (marcada en gris) donde no hay ninguna banda. En esta región, llamada *brecha de energía*, el material se comporta como un aislante, mientras que en las otras regiones puede ser un conductor y, por ende, se llama *semi-conductor*. Entender (y poder manipular) las propiedades de conducción de los materiales es uno de los grandes logros de la mecánica cuántica, cuyo centenario festejamos el año pasado.

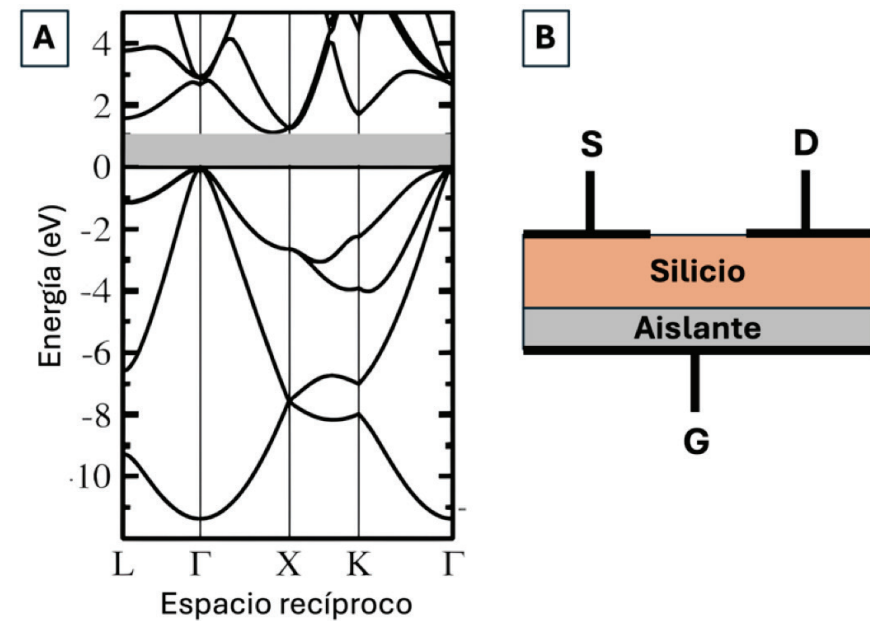
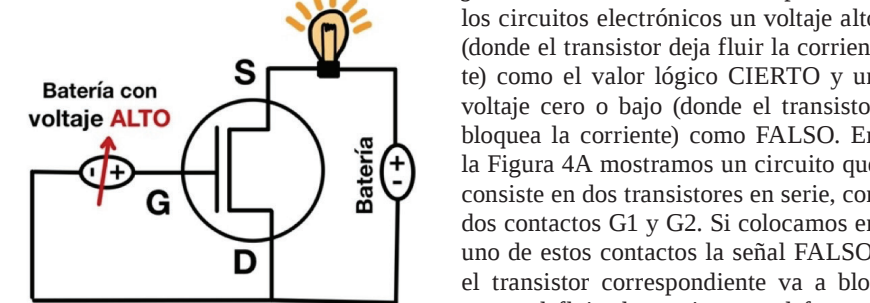


FIGURA 3. ESTRUCTURA de banda del silicio (Fuente: physics.stackexchange.com) y diagrama de construcción de un transistor de efecto de campo basado en silicio.

En la Figura 3B mostramos finalmente cómo se puede construir un transistor a base del silicio. Este consiste principalmente en un pequeño bloque de silicio, al cual se conectan directamente los contactos S y D para inyectar y extraer la corriente. Además, se añade el contacto G, separado del silicio por un material aislante (típicamente el dióxido de silicio). Si el voltaje en el contacto G es cero o bajo, los electrones provenientes de la batería caen en la brecha de energía, donde el flujo de corriente está bloqueado. Si se aplica un voltaje más alto en el contacto G, se genera un campo eléctrico que eleva los electrones, de modo que caen en una zona con bandas y pueden fluir. El funcionamiento de este tipo de transistor se establece por el campo eléctrico generado por el contacto G y, por ende, se denomina *transistor de efecto de campo* (field-effect transistor, FET). Por sus investigaciones pioneras en semiconductores y transistores, John Bar-

deen, William Shockley y Walter Brattain fueron galardonados con el Premio Nobel de Física 1956. (Vale también la pena mencionar que John Bardeen es una de las pocas personas que han recibido el Premio Nobel en dos ocasiones, la segunda vez por sus contribuciones a la teoría de la superconductividad).

¿Y qué hace a los transistores tan importantes y para qué los necesitamos en computadoras y teléfonos inteligentes? La respuesta es que con varios de ellos se pueden realizar *operaciones lógicas*. Para ello, vamos a interpretar en los circuitos electrónicos un voltaje alto (donde el transistor deja fluir la corriente) como el valor lógico CIERTO y un voltaje cero o bajo (donde el transistor bloquea la corriente) como FALSO. En la Figura 4A mostramos un circuito que consiste en dos transistores en serie, con dos contactos G1 y G2. Si colocamos en uno de estos contactos la señal FALSO, el transistor correspondiente va a bloquear el flujo de corriente y el foco se queda apagado. Sólo si ambos contactos G1 y G2 tienen la señal CIERTO, se va a encender el foco. El circuito analiza las señales en los contactos y solo si G1 y G2

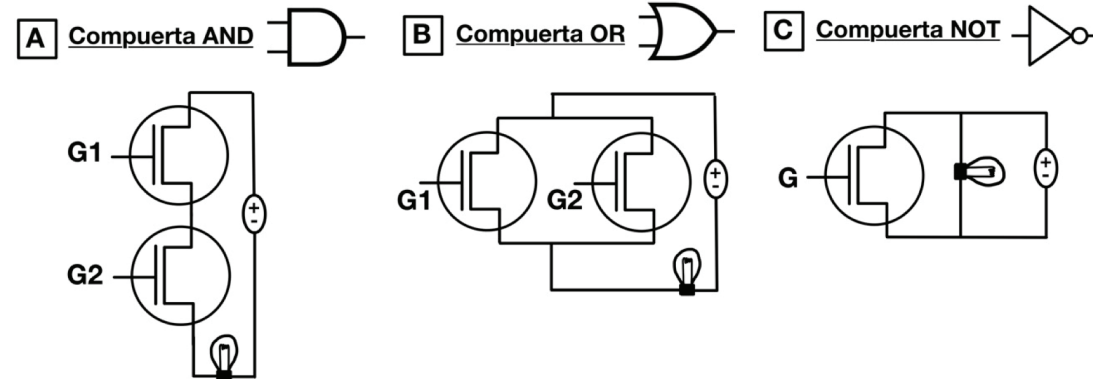


FIGURA 4. LOS circuitos de transistores permiten realizar operaciones de la lógica. Se muestran las compuertas AND, OR y NOT.

Analizamos ahora el siguiente circuito en la Figura 4B, que consiste en dos transistores en paralelo. Si uno (o ambos) de los contactos G1 o G2 está en CIERTO, se establece el flujo de corriente y se enciende el foco. Este circuito funciona como una disyunción y se llama *compuerta OR*, que da una respuesta positiva si uno de los contactos (o ambos) está en el estado CIERTO. El siguiente ejemplo es la *compuerta NOT*, mostrada en la Figura 4C, que tiene el efecto de invertir una señal. Si la entrada G está en el estado CIERTO, la respuesta va a estar en el estado FALSO, y viceversa.

Usando estos tres ejemplos de compuertas lógicas a base de transistores, podemos construir otras compuertas, por ejemplo, la *compuerta XOR*, que se muestra en la Figura 5. Esta compuerta da la respuesta CIERTO solo si una de las entradas G1 o G2 está en el estado CIERTO, pero no ambas, a diferencia de la compuerta OR.

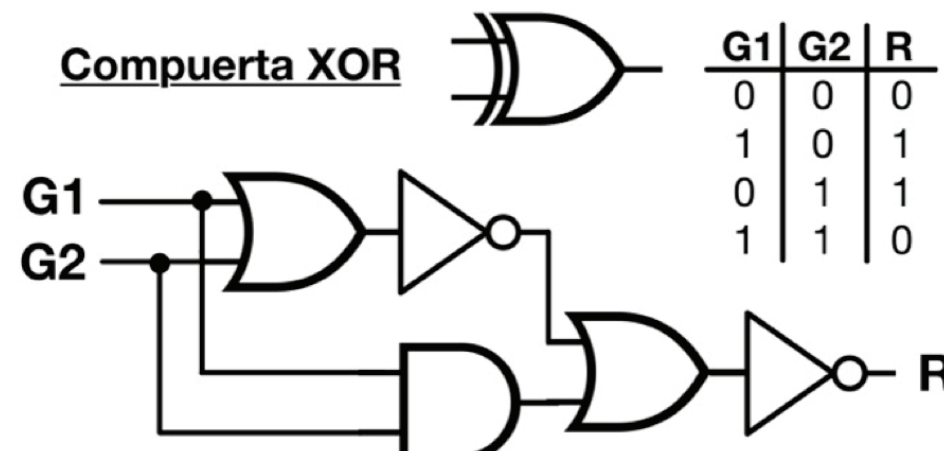


FIGURA 5. USANDO las compuertas mostradas en la Figura 4, podemos construir más compuertas lógicas, como la compuerta XOR.

Para profundizar un poco más, vamos a hacer uso de las compuertas lógicas definidas para construir una computadora “sumamente poderosa”, que nos permite realizar los siguientes cálculos: $0+0=0$, $1+0=1$, $0+1=1$, $1+1=2$. Primero, es importante comentar que las computadoras no trabajan con el *sistema decimal* (0,1,2...9), que conocemos de nuestra vida diaria (en parte porque tenemos diez dedos), sino con el *sistema binario* formado por 0 y 1. En la Figura 6 mostramos una pequeña tabla de conversión entre números decimales y binarios. Las computadoras trabajan con este sistema, porque en un circuito electrónico podemos identificar un voltaje bajo como

Número	
decimal	binario
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001

FIGURA 6. TABLA de conversión entre los números en forma decimal (0,1, 2...9) y binario (0,1). Para entender mejor cómo funciona el sistema binario y convertir cualquier número decimal a binario, ver <https://masterplc.com/calculadora/convertir-decimal-a-binario/>

Sumadora de 2 bits

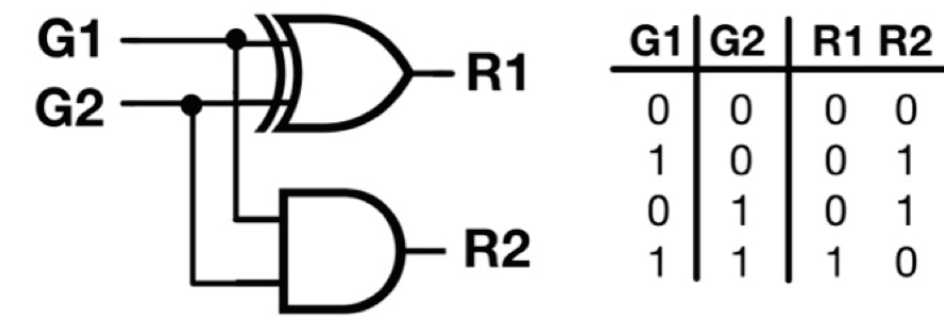


FIGURA 7. DIAGRAMA de circuito de una computadora que puede sumar 0 y 1 en binario: $G1 + G2 = R1R2$.

entradas G1 y G2 se puede poner cualquier combinación de los números 0 y 1. El circuito calcula la suma de ellos y coloca el resultado en las salidas R1 y R2. La limitación de esta

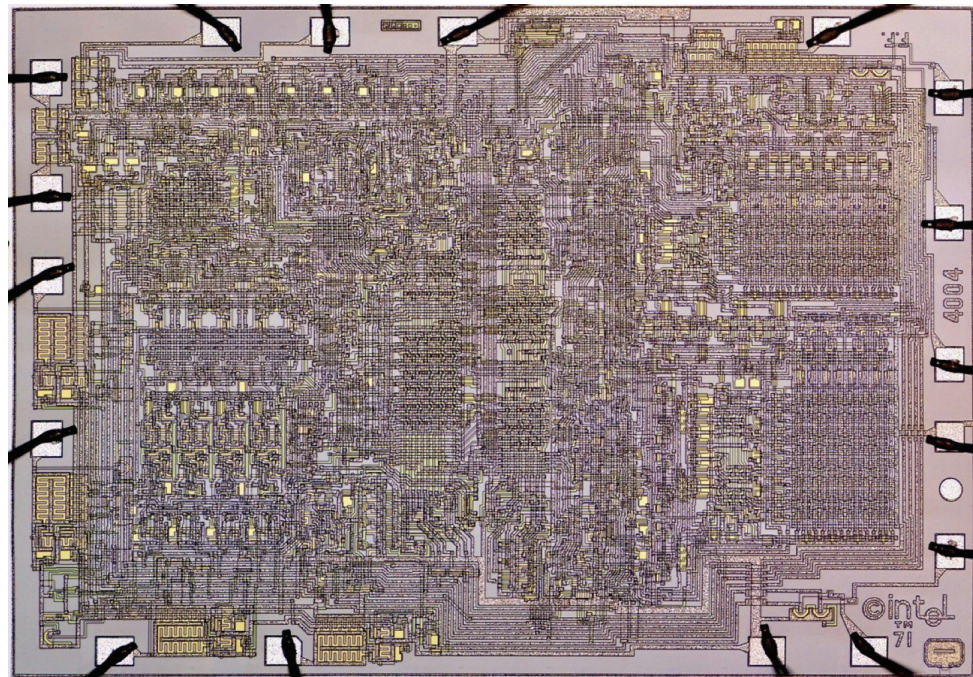


FIGURA 9. FOTOGRAFÍA del primer microprocesador comercial, el Intel 4004 (Fuente: X/CPU_duke).

computadora consiste en que las dos entradas corresponden a números de solo 1 bit, y la salida de un número de 2 bits. Para hacer nuestra computadora más poderosa, hay que usar un circuito más complejo con más compuertas (y muchos más transistores), como nos muestra la Figura 8.

Este circuito nos permite colocar en cada entrada X y Y un número de 2 bits (los números decimales 0,1,2,3) y obtener la suma de ellos como resultado R, representado por un número de 3 bits. Los pequeños números

5^{decimal}* Continuando con este juego, al hacer el circuito mucho más complejo con muchos más transistores, vamos a obtener una computadora verdaderamente poderosa que puede realizar todas las cosas magníficas que nos ayudan hoy en día.

¿Y cómo se hace que todo esto quepa en nuestro bolsillo y no llene una bodega completa? La respuesta es que se fabrica como un *circuito integrado*, llamado *microchip*. Esto significa que no se fabrican los transistores de manera individual y se conectan después con cables, sino que todo el circuito (como el de la Figura 8) está fabricado en una sola pieza de silicio. El primer microchip fue el *Intel 4004*, que salió al mercado en 1972 con 2300 transistores, fabricados con una distancia promedio de 10 micrómetros (la centésima parte de un milímetro). La Figura 9 muestra una fotografía de microscopio de este microchip, que tiene un tamaño aproximado de 3 x 4 milímetros.

Hoy en día los microchips más poderosos tienen entre 10 a 100 mil millones de transistores y bien podrían llamarse nanochips, porque están fabricados a una escala de pocos nanómetros (es decir, aproximadamente 1000 veces más pequeños que hace 50 años). El increíble crecimiento del poder de nuestras computadoras en las últimas décadas se debe principalmente al enorme incremento en el número de transistores, acompañado de una reducción de su tamaño, lo que permite realizar muchas más operaciones simultáneamente y a mayor velocidad. Espero que con esto les haya explicado un poco sobre el uso de los transistores y su suma importancia para todas las computadoras y teléfonos inteligentes, haciendo del transistor, sin duda, una de las invenciones más importantes del siglo pasado.

Para saber más

- los videos de B. Eater, disponibles en <https://eater.net>
- Datta, S. *Atom to Transistor*. Cambridge University Press, 2012
- Malvino, A. P. y J. A. Brown. *Digital Computer Electronics*. Glencoe, McGraw-Hill, 2017
- Nisan, N. y S. Schocken. *The Elements of Computing Systems*. MIT Press, 2008

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.