

TRANSISTORES MOLECULARES

Avances y desafíos en el camino a construir una electrónica a escala molecular

Pablo S. Cornaglia

Sesenta años después de su nacimiento, los transistores han pasado a formar parte de nuestra vida cotidiana y han revolucionado nuestra manera de comunicarnos y de trabajar. Son una parte fundamental de los teléfonos celulares, computadoras, cámaras de fotos y virtualmente de todos los aparatos electrónicos. Un esfuerzo tecnológico constante ha logrado reducir cada dos años el tamaño y costo de un transistor a la mitad, aumentando la velocidad de los circuitos electrónicos y haciéndolos accesibles a un número cada vez mayor de personas. Sin embargo, si se continúa al ritmo actual, en pocos años éstos alcanzarán un tamaño límite, por debajo del cual será imposible su utilización de acuerdo con los principios de funcionamiento actuales. La única alternativa posible para superar esta barrera parece ser un cambio de paradigma. En lugar de reducir el tamaño de los transistores de silicio actuales como se ha hecho hasta ahora (esto es, ir de lo grande a lo pequeño), una posibilidad es comenzar con los elementos más pequeños, los átomos o las moléculas, y construir nuevos dispositivos electrónicos a partir de los mismos (ir de lo pequeño a lo grande). Recientemente se ha logrado crear transistores a partir de una sola molécula y, aunque éstos están aún en etapa de desarrollo y actualmente sólo funcionan a muy bajas temperaturas, ofrecen una gran variedad de posibilidades para la creación de nuevos dispositivos y para comenzar a construir la electrónica del futuro.

¿Qué es un transistor?

El transistor es el componente básico de la electrónica y su función es como la de un interruptor que enciende y apaga la luz de una lámpara. En lugar de tener una tecla, como en un interruptor hogareño, la corriente eléctrica se activa o corta a partir de señales eléctricas (ver apartado: ¿Cómo funciona un transistor?). Esta posibilidad de los transistores de estar en dos estados, encendido (1) o apagado (0), permite el tratamiento (binario) de la información en computadoras. Los transistores son entonces los bloques de construcción de los microprocesadores, que son el cerebro de las computadoras.

La historia del transistor comienza en 1945 cuando la compañía de comunicaciones Bell le encarga al físico estadounidense William Shockley desarrollar un dispositivo para reemplazar las válvulas de vacío utilizando materiales semiconductores. Éste forma un grupo de científicos que recluta de las mejores universidades. Entre ellos estaban el físico teórico John Bardeen y el experimental Walter Brattain, a quienes Shockley encarga encontrar el problema de un diseño suyo fallido. Bardeen y Brattain trabajan muy bien juntos y en menos de dos años diseñan y fabrican el primer transistor a partir de un cristal de germanio. La patente del nuevo descubrimiento quedó a nombre de Bardeen y Brattain lo que enfureció a Shockley que, si bien era el jefe del grupo, no había participado directamente en la investigación. Esto lo motivó a trabajar sin descanso en un nuevo diseño y en 1951 presentó el *transistor de juntura*, que superaba varios inconvenientes del primer diseño. En 1956 los tres recibieron el premio Nobel. Bardeen siguió trabajando en investigación científica y en 1972 recibió un segundo premio Nobel por la teoría de la superconductividad. Shockley decidió buscar aplicaciones para el transistor y fundó en 1957 la primera compañía del Silicon Valley. Ninguno de sus colaboradores de la Bell quiso acompañarlo pero nuevamente logró conseguir gente de las mejores universidades. Shockley tenía un carácter muy complicado y estaba convencido de que sus empleados complotaban contra él. Como resultado, un año más tarde ocho de sus empleados se fueron, dos de los cuales fundarían más tarde la compañía de microprocesadores Intel®, que es actualmente la líder mundial en esa tecnología.

Palabras clave: transistor, electrónica molecular, nanotecnología.

Pablo Sebastián Cornaglia

Dr. en Física, Instituto Balseiro, Argentina. Investigador del CONICET, Centro Atómico Bariloche. Docente del Instituto Balseiro, Argentina.
pablo.cornaglia@cab.cnea.gov.ar

Recibido: 02/06/2009. Aceptado: 16/10/09

La creación del transistor provocó una revolución porque éste superaba las principales falencias de su antecesor, la válvula, que era frágil, lenta, tenía un alto consumo de energía y un tamaño mucho mayor. A partir de la aparición del transistor, los avances y las aplicaciones se han multiplicado a un ritmo vertiginoso.

Así por ejemplo, sería imposible construir un teléfono celular sin transistores. Si se quisiera hacer uno a partir de válvulas, su tamaño sería mayor al del obelisco de Buenos Aires y consumiría tanta electricidad como una ciudad pequeña.

¿Cómo funciona un transistor?

Los transistores son usualmente fabricados a base de *silicio*, un material semiconductor que forma parte de la arena de los desiertos y es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre. Las propiedades eléctricas del silicio cristalino puro son similares a las de un aislante, como la madera, el vidrio o el plástico, pero es posible modificarlas agregando átomos de ciertos elementos químicos.

El estado de los electrones en el silicio es análogo al de autos en una autopista en la cual uno de los carriles está vacío y el otro está completamente lleno, generando un embotellamiento (ver Figura 1). En esas condiciones los autos no pueden moverse y la circulación está bloqueada. Si se pasa un auto del carril lleno al vacío, los autos pueden desplazarse nuevamente en ambos carriles. En el carril superior el auto está libre de moverse normalmente. En el carril inferior se genera un hueco y los autos pueden avanzar una posición llenando el hueco cada uno a su turno, lo que hace al hueco moverse en el sentido contrario.

En el silicio, el carril inferior se llama *banda de valencia* y el superior, *banda de conducción*. Es posible hacer pasar electrones de la banda de valencia a la de conducción aumentando la temperatura del material y de esa forma su conductividad eléctrica. Otra posibilidad es agregar impurezas atómicas. Cuando se le agregan átomos de *boro* al silicio, se crean huecos en la banda de valencia que se comportan como si fueran electrones con carga positiva y por eso se le llama silicio tipo p (por positivo). El silicio con átomos de *fósforo* es tipo n (de negativo) porque tiene electrones libres de desplazarse en la banda de conducción. Una vez agregadas estas impurezas, el material puede conducir electricidad.

Si se conecta silicio-n con silicio-p, los electrones fluyen a través de la unión entre los dos materiales

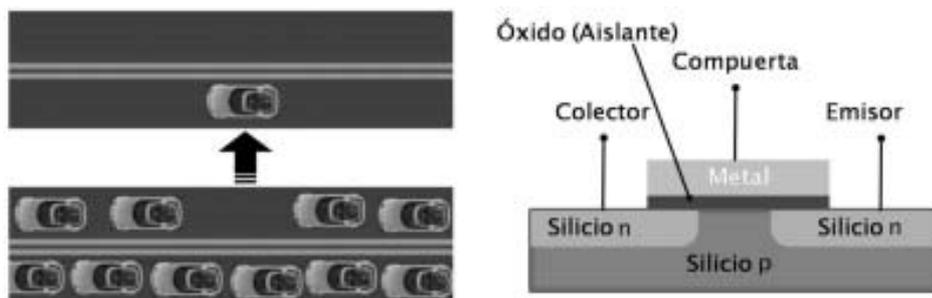
de la zona n a la p y se compensan los electrones del silicio-n con los huecos del silicio-p cerca de la interfaz. Esa región queda entonces sin portadores de carga (sin electrones ni huecos) y funciona como una barrera (un aislante) para el paso de más electrones entre los dos materiales. Es decir, el diodo puede conducir electricidad solamente en un sentido.

Si se unen ahora tres materiales haciendo un "sandwich" n-p-n, la corriente estará bloqueada en ambas direcciones porque eso equivale a conectar dos diodos opuestos (ver Figura 1).

Ésa es la base de un transistor, y el truco para que funcione como un interruptor es acercar (pero no conectar) un terminal adicional (llamado de compuerta) a la región central de silicio p. En la práctica eso se hace colocando un material aislante entre el electrodo y la región de silicio p. Si se aplica un potencial positivo a ese terminal, los electrones son atraídos hacia él y se genera una zona rica en electrones libres (como si se tratara de silicio-n) en el silicio-p. Esa zona funciona entonces como un canal que permite el paso de los electrones a través del sandwich.

Los transistores tienen entonces tres terminales: el emisor y el colector, que están conectados cada uno a una tapa de silicio-n del sandwich, y el de compuerta, que está acoplado (pero no conectado) a la región central, y con el cual se puede controlar el paso de la corriente entre el emisor y el colector (ver Figura 1). Una cualidad indispensable en un transistor es la posibilidad de tener una ganancia: la potencia eléctrica necesaria para encenderlo es menor a la que se activa. De esa manera se puede amplificar una señal.

Figura 1. Izquierda: el comportamiento de los electrones en un semiconductor es análogo al de autos en una autopista con un carril lleno y otro vacío. Derecha: esquema de un transistor semiconductor.



Pablo S. Cornaglia

TRANSISTORES MOLECULARES

Una de las primeras aplicaciones de los transistores fue la radio Regency® TR-1 que salió a la venta en 1957, tenía 4 transistores y costaba 50 dólares de la época, lo que equivaldría a 370 dólares actuales. En comparación, el ipod nano® (que permite ver videos y escuchar música), que estéticamente y en tamaño es muy parecido a las radios Regency, tiene miles de millones de transistores y cuesta 170 dólares. Esto da una idea del rápido avance en la miniaturización, que permite integrar miles de millones de transistores donde antes sólo entraban unos pocos.

Ley de Moore

En 1965 Gordon Moore (cofundador de la corporación Intel®) hizo la predicción, basada en la evolución de la electrónica en esa época, que el tamaño y el precio de los transistores en los circuitos integrados basados en silicio se iba a dividir por dos cada dos años. Esta predicción, que se cumple desde entonces, es conocida como la ley de Moore e implica un avance muy rápido (ver Figura 2). Si la industria de la aviación hubiera seguido la misma evolución que la electrónica, un viaje entre Nueva York y París, que en los años setenta costaba 900 dólares y duraba nueve horas, costaría ahora menos de un centavo y duraría menos de un segundo.

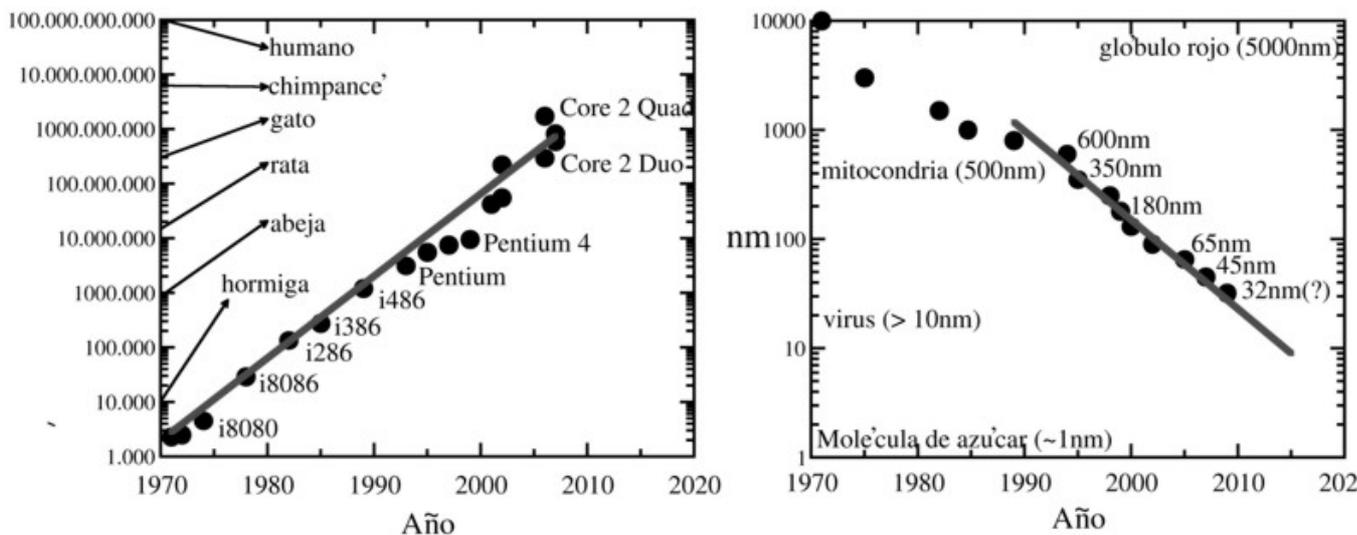
Debido a esta constante miniaturización, los transistores han alcanzado la escala nanométrica y algunas de sus partes ya son menores a 45 nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro, es decir que entran tantos nanómetros en un milímetro como milímetros en un kilómetro). La tecnología actual permite poner más de 2.000 transistores en el ancho de un pelo humano y esto ha hecho posi-

ble crear microprocesadores con más de mil millones de transistores.

Para llegar a esos tamaños ha sido necesario superar numerosas dificultades, crear nuevas técnicas y diseñar nuevos materiales realizando enormes inversiones en investigación y desarrollo. Si la ley de Moore continúa siendo válida, en la próxima década los transistores llegarán a tener estructuras inferiores a los 10 nanómetros. (ver Figura 2, derecha).

A esas escalas tan pequeñas, la mecánica cuántica, que gobierna el comportamiento de los electrones, tiene un rol cada vez más importante. En particular, comienza a ser posible para los electrones saltar la barrera aislante entre el contacto de compuerta y la región central de un transistor (ver apartado: ¿Cómo funciona un transistor?) destruyendo de esa manera la información sobre el estado encendido o apagado del mismo. Para la tecnología actual basada en silicio, algunos efectos cuánticos plantean entonces serios problemas que no pueden ser resueltos perfeccionando los materiales, como se ha hecho en el pasado. Es indispensable entonces buscar alternativas que permitan aprovechar los efectos cuánticos. Una posibilidad es crear circuitos basados enteramente en las leyes de la física cuántica. Esto implica un cambio total en la manera de diseñar las computadoras y los programas que funcionan en ellas, y se ha dado a llamar computación cuántica.

Otra posibilidad es crear dispositivos nuevos con propiedades similares a aquellos basados en silicio, pero que sean más pequeños y que saquen provecho de las propiedades cuánticas. En esto último se concentra principalmente la electrónica molecular.



Pablo S. Cornaglia

Figura 2. Izquierda: Número de transistores en los microprocesadores de Intel® de 1970 a la actualidad. La línea indica el crecimiento predicho por la ley de Moore. Se indica asimismo el número de neuronas del cerebro de diferentes animales. Aunque se puede comparar el número de elementos constitutivos de un transistor y un cerebro, esto no tiene implicancias directas con la inteligencia ya que, entre otras cosas, la red que forman las neuronas en un cerebro es mucho más compleja que la de un microprocesador. Derecha: tamaño de las estructuras más pequeñas de los transistores. A título indicativo se presentan diferentes objetos con sus tamaños típicos.

Transistores moleculares

La *electrónica molecular* busca desarrollar un reemplazo de tamaño molecular para los dispositivos semiconductores actuales. Utilizando moléculas de dimensiones inferiores a un nanómetro se podría aumentar más de mil veces el número de componentes en un circuito integrado. Recientemente se ha logrado construir transistores moleculares en los cuales se conecta una molécula entre dos electrodos metálicos, *emisor* y *colector*, y se utiliza un tercer electrodo como *compuerta* (ver Figura 3). La corriente que circula entre el emisor y el colector puede ser alterada modificando las propiedades de la molécula con el electrodo de compuerta. En estos transistores, el elemento activo es una molécula, por lo que el comportamiento electrónico es cualitativamente diferente al de sistemas macroscópicos y no puede ser deducido a través de una simple ley de escala del comportamiento de estos últimos. El confinamiento electrónico, las interacciones en la molécula y el acoplamiento de los electrones a las vibraciones moleculares dan lugar a una rica variedad de fenómenos físicos. En lo que sigue, para simplificar el análisis, se consideran dispositivos a temperaturas muy bajas (más estrictamente el cero absoluto: 0 grados Kelvin o 273,15 grados centígrados bajo cero). Sin embargo, dicho caso da una idea cualitativa de lo que sucede a temperaturas mayores.

Para comprender el transporte a través de una molécula, es necesario analizar primero cómo se comportan los electrones en ella. Niels Bohr presentó en 1913 una teoría, precursora de la mecánica cuántica, según la cual los electrones realizan órbitas alrededor del núcleo del átomo indicando que sólo algunas órbitas están permitidas y que cada una tiene una energía bien definida. Aunque su teoría fue más tarde mejorada, sirve para hacerse una idea cualitativa de lo que sucede con los electrones tanto en átomos como en moléculas. Los electrones sólo pueden estar en ciertos *orbitales* que tienen una energía bien definida. Esta *cuantización* de los niveles de energía electrónicos en

una molécula tiene consecuencias directas para el paso de los electrones a través de la misma.

En la Figura 3 (al centro) se presenta un esquema donde se indican con líneas horizontales los niveles de energía electrónicos asociados a los orbitales de una molécula, y con flechas los electrones que los ocupan. Una molécula aislada tiene un número de electrones N que se reparten entre los orbitales moleculares de manera tal que los orbitales que tienen las energías más bajas se llenan primero. Una restricción importante es la que impone el principio de exclusión de Pauli, que implica que puede haber hasta dos electrones en cada orbital.

Los metales que sirven de electrodo también tienen estados cuánticos con sus respectivas energías. Mientras que en la molécula los niveles de energía están en general bien separados, en los metales hay una densidad mucho mayor de niveles. Nuevamente, los niveles de más baja energía son los que van a estar ocupados. La energía del último nivel ocupado (el de más alta energía) es comúnmente llamada *energía de Fermi*. Los electrodos son como dos mares llenos de electrones hasta cierto nivel (el nivel de Fermi). El transistor molecular funciona como un sistema de vasos comunicantes, de modo que si se aumenta el nivel de llenado del electrodo emisor, los electrones van a fluir pasando por la molécula hacia el colector hasta que se igualen los niveles.

Supongamos que se quiere pasar un electrón del emisor al colector en el transistor. Es necesario entonces sacarlo de un nivel ocupado del emisor, ponerlo en un orbital desocupado de la molécula y de ahí pasarlo a un nivel desocupado del colector. Eso parece siempre posible, sin embargo hay una restricción muy importante que no hemos mencionado aún: la conservación de la energía. Para que se conserve la energía, el electrón que sacamos de un nivel del emisor tiene que terminar en un nivel que tenga la misma energía en el colector. Eso sólo es posible para un electrón que está exactamente en el nivel de Fermi ya que todos los

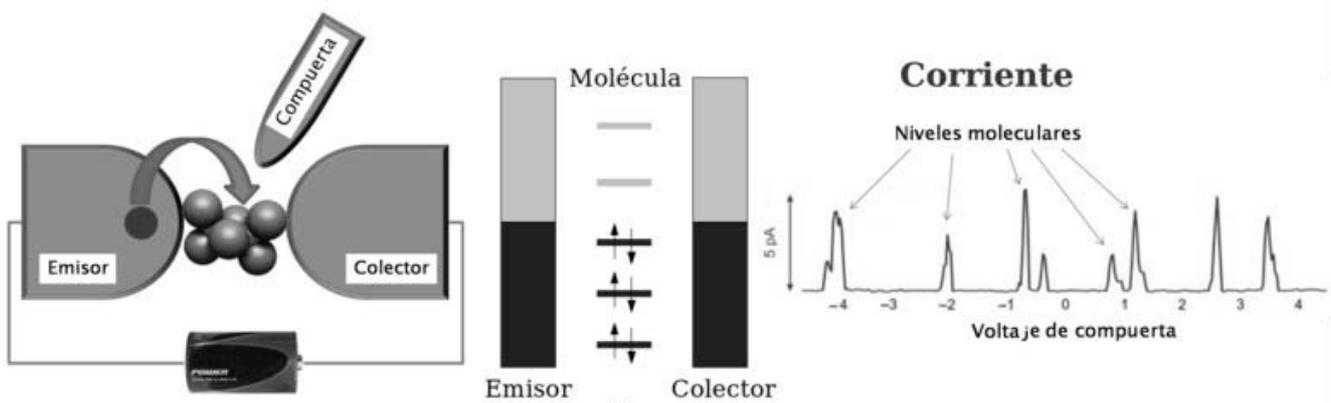


Figura 3. Izquierda: transistor molecular, los electrones saltan a la molécula desde el emisor. Centro: niveles de energía de la molécula y de los electrodos. Las flechas representan electrones ocupando los orbitales moleculares. Derecha: corriente a través de la molécula en función del voltaje de compuerta.

Ley de Ohm y cuantización de la conductancia

La corriente a través de un metal como el cobre o el oro satisface la ley de Ohm

$$I = V/R,$$

donde V es la diferencia de potencial (el voltaje que se aplica) entre los extremos del conductor y R es la resistencia. La resistencia a su vez depende de la geometría del conductor y de la resistividad ρ , una propiedad intensiva que caracteriza al material

$$R = \rho L/A,$$

donde L es la longitud del cable y A el área de su sección transversal.

La pregunta que uno se puede formular es: ¿Si se redujesen las dimensiones del conductor, seguirían siendo válidas estas relaciones? Notablemente, la primera relación (bajo ciertas condiciones) continúa siendo válida en sistemas como las moléculas. Sin embargo, la segunda relación no lo es. Se puede demostrar y se ha observado experimentalmente que la resistencia al paso de la corriente en moléculas satisface una relación diferente

$$R = h/e^2n,$$

donde e es la carga del electrón, h es la constante de Plank y $n=0,1,2,\dots$ es un número natural. Esta expresión para R corresponde a haber conectado n conductores idénticos con resistencia $h/e^2 = 12,906$ Ohm en paralelo. La presencia de la constante de Plank h indica que se trata de un fenómeno cuántico.

La inversa de la resistencia, la conductancia $G = 1/R$, vale un número entero de veces el llamado cuanto de conductancia $G_0 = e^2/h$, por lo que este fenómeno se denomina cuantización de la conductancia.

estados por debajo del mismo están ya ocupados y no hay electrones disponibles en el emisor por encima del mismo. Además, para que el electrón pueda pasar por un nivel electrónico del orbital molecular, el nivel va a tener que estar alineado con el nivel de Fermi de los electrodos. En general esto no va a ocurrir naturalmente y por lo tanto la corriente va a ser baja. Como mencionamos previamente, el sistema de vasos comunicantes indica que si un nivel de la molécula está por debajo del nivel de Fermi (la energía de llenado de los electrodos), dicho nivel va a estar ocupado, mientras que si está por encima del mismo, va a estar vacío. También sabemos que si se acerca un electrodo con potencial positivo a la molécula, los electrones se van a sentir atraídos hacia la misma y su carga va a aumentar, y lo contrario va a ocurrir si se pone un potencial negativo en dicho electrodo. Esto quiere decir que cambiando el potencial del electrodo de compuerta se puede hacer pasar un nivel de la molécula a través del nivel de Fermi, y de esa forma obtener un pico en la corriente (ver Figura 3, derecha).

Vemos que, de esta forma, el transistor molecular funciona como un interruptor en el que se puede regular el paso de la corriente con el potencial de compuerta. En la situación que analizamos la molécula estaba muy débilmente conectada a los electrodos, si la conexión es mejor, se van a producir picos más anchos en la corriente como función del voltaje de compuerta.

Los efectos cuánticos hacen que la *conductancia* (la inversa de la resistencia) de la molécula tome un valor muy especial. Si consideramos que los electrones pasan a través de un solo nivel molecular, la corriente I es proporcional al voltaje $I = GV$, y la conductancia máxima en uno de los picos es e^2/h , donde e es la

carga del electrón y h la constante de Plank. Lo llamativo de este resultado es que es independiente de las características de la molécula y sólo depende de constantes universales. Si la corriente pasa a través de n niveles moleculares, la conductancia máxima es $n e^2/h$, un efecto llamado cuantización de la conductancia (ver apartado: Ley de Ohm).

Esta descripción da una imagen cualitativa de lo que ocurre en un transistor molecular; sin embargo, la realidad es más complicada porque hasta aquí no hemos tenido en cuenta las interacciones entre los electrones, que traen aparejados nuevos fenómenos.

Hay dos restricciones fundamentales para que un electrón entre a la molécula. Por un lado, como vimos, tiene que encontrar un orbital desocupado porque la repulsión de Pauli (ligada al principio de exclusión de Pauli) le impide entrar a uno ya ocupado. Por otro lado, si la molécula está cargada eléctricamente porque ya entró un electrón desde el emisor, un segundo electrón sentiría una repulsión coulombiana muy grande debido a la presencia del primero y al tamaño reducido de la molécula en la que tienen que convivir. El segundo electrón va a poder entrar a la molécula sólo cuando el primer electrón haya salido.

Entonces, para que haya una corriente los orbitales moleculares se tienen que estar cargando y descargando permanentemente y los electrones en general sólo pueden pasar uno a la vez. Este efecto aumenta la resistencia de la molécula al paso de los electrones. Además, estas interacciones pueden dar lugar a comportamientos complejos con importantes consecuencias para la corriente a través de la molécula.

Otra particularidad de las moléculas que afecta al paso de los electrones son las vibraciones. Las molé-

culas pueden deformarse y vibrar en algunos casos como lo hace una cuerda de guitarra y en otros también pueden realizar un movimiento de vaivén de un electrodo al otro. En este último caso es fácil darse cuenta de que los electrones van a saltar con más facilidad dentro o fuera de la molécula, desde o hacia el electrodo que esté más cerca. Si se satisfacen ciertas condiciones, los electrones pueden pasar uno a uno con cada vaivén de la molécula. Cada electrón salta hacia la molécula cuando ésta se acerca al emisor y salta fuera de la misma cuando ésta se acerca al colector.

Efectos de muchos cuerpos

Las interacciones entre los electrones, junto con las vibraciones moleculares, dan lugar a fenómenos colectivos en los cuales los electrones tienen un comportamiento que difiere completamente del comportamiento de un electrón aislado. Esto es análogo a lo que ocurre con grupos de personas que, en eventos deportivos o manifestaciones, pueden tener comportamientos complejos variados e inesperados.

A diferencia de las personas, todos los electrones son iguales e indistinguibles los unos de los otros y su comportamiento es predecible según las leyes de la mecánica cuántica. Uno de los ejemplos más espectaculares de comportamiento colectivo electrónico es la superconductividad, en la cual los electrones se asocian de a pares que se interrelacionan entre sí de manera tal que pueden desplazarse a través de un sistema desordenado sin chocar con los obstáculos. Dado que el choque con los obstáculos es la fuente de resistencia eléctrica del material, la ausencia de los mismos provoca un desplazamiento sin resistencia de los electrones que da el nombre a la superconductividad.

En los transistores moleculares se ha observado un fenómeno colectivo llamado *efecto Kondo*. Éste se produce cuando hay un número impar de electrones en la molécula. En esa situación y a bajas temperaturas, los electrones se comportan de una manera radicalmente distinta a la habitual y pueden ignorar la fuerte repulsión entre ellos en la molécula para producir una corriente en situaciones en las que el paso de electrones está normalmente bloqueado.

Recientemente se ha demostrado que el acoplamiento con las vibraciones moleculares puede producir una reducción importante de la interacción repulsiva de los electrones en la molécula. Esto es similar a lo que ocurre en los superconductores donde el acoplamiento de los electrones con las vibraciones del sistema logra producir una interacción atractiva entre los electrones generando la tendencia a formar pares. Si el acoplamiento entre los electrones y las vibraciones moleculares es suficientemente fuerte se podría dar una situación en la que los electrones se atraen dentro de la molécula. En dicho caso, puede mostrarse que tal

molécula presentaría propiedades de transporte muy especiales, algunas de ellas interesantes en vista de posibles aplicaciones.

Consideraciones finales

En los últimos años se han realizado importantes avances tanto en la construcción como en la comprensión del comportamiento de transistores hechos a partir de una sola molécula. Los electrones en transistores moleculares presentan comportamientos complejos debido a la predominancia de efectos cuánticos y de interacciones electrónicas y a la presencia de vibraciones moleculares. La manipulación de moléculas individuales para conectarlas a dos electrodos y modificar sus propiedades con un tercer electrodo representa un logro colosal.

Se ha logrado crear dispositivos que cumplen varios de los requisitos para ser utilizados en aplicaciones. Sin embargo, hay todavía numerosos inconvenientes que es necesario resolver. Por un lado, no existe aún una técnica que permita integrar estos transistores en circuitos complejos. Por otro lado, los transistores que se han construido sólo funcionan a bajas temperaturas (es necesario enfriarlos muy por debajo de la temperatura ambiente), y son poco estables.

El estado actual es similar al de 1947 con la invención del transistor de punto de contacto por Bardeen y Brattain. Faltaría un salto como el que dio Shockley que posibilite la producción comercial de los transistores moleculares y quizás falte también encontrar las moléculas adecuadas para ello.

Con los transistores semiconductores, la primera aplicación llegó a menos de diez años de su invención y fue un audífono que, por su tamaño, era imposible de realizar con válvulas. Los transistores moleculares quizás sigan un camino paralelo en el cual las primeras aplicaciones tengan sólo unos pocos de ellos y donde el tamaño sea un factor determinante.

Lecturas sugeridas

- Cornaglia, P.S., Ness, H. y Grepel, D. 2004. Many Body Effects on the Transport Properties of Single-Molecule Devices. *Physical Review Letters* 93:147-201.
- Cornaglia, P.S., Usaj, G. y Balseiro C.A. 2007. Electronic Transport through Magnetic Molecules with Soft Vibrating Modes. *Physical Review B*, 76: 241-403.
- Balseiro, C. A. y Usaj, G. 2004. Conducción electrónica en sistemas nanoscópicos: Transportando electrones en circuitos de escala molecular. *Ciencia Hoy*, 14,84: 24.
- Fainstein, A. y Hallberg, K. 2004. La física de alambres moleculares, átomos artificiales y cavidades nanoscópicas. *Ciencia Hoy*, 14, 84: 16.