

COMPUTADORES BIOELECTRONICOS*

RESUMEN: Las propiedades que presenta la molécula bacteriorrodopsina al incidir sobre ella radiación electromagnética coherente y monocromática son una esperanza para nuevos diseños de computadores de procesamiento en paralelo y redes neuronales. Los cambios en su estructura se pueden utilizar para almacenamiento masivo microscópico tridimensional.

Por: Ing. Rafael Camerano Fuentes
Profesor U. Distrital

INTRODUCCION

El ser humano siempre ha deseado crear una máquina que se parezca en su comportamiento al cerebro humano. Que sea capaz de pensar, interactuar con el mundo exterior y tener conciencia de su propia existencia. Actualmente parece que nos encontramos lejos de ese sueño, no obstante los últimos adelantos en esta materia.

Los grandes computadores están contruidos sobre bases inorgáni-

cas de aleaciones de arsénico, galio, silicio, etc., las cuales han demostrado su bondad al permitirle al ser humano aumentar su potencial de cálculo, realizando millones de operaciones en fracciones de segundo. Hoy se piensa que si las estructuras complejas orgánicas de moléculas son las que han dado origen a la vida en todas sus formas, con una capacidad increíble de adaptación al mundo cambiante y hostil, entonces por qué no dar el viraje hacia nuevas tecnologías que tengan como base la materia viva; es decir, las estructuras proteínicas armadas de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, etc.

VELOCIDAD, TAMAÑO Y COSTO

Uno de los principales tropiezos al querer aumentar la velocidad de proceso son las distancias microscópicas que deben recorrer los electrones y huecos que constituyen la corriente eléctrica que transporta la información que deseamos transformar. Esas distancias, aparentemente despreciables, se convierten en largos caminos, dada la rapidez con que se producen los cambios dentro del "cerebro" del computador. Incluso, existe un límite natural en la precisión con que podemos determinar la posición y cantidad de

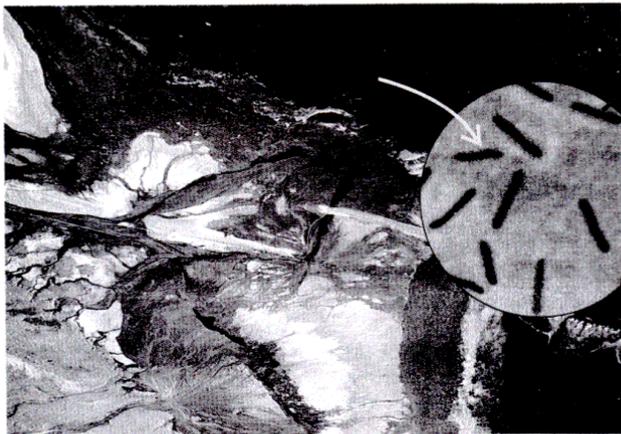


FIGURA 1. LAS AGUAS SALOBRES del californiano lago de Owens, presentan un matiz azulado, causado por bacterias (inserto) que contienen bacteriorrodopsina.

* TOMADO DE LA REVISTA INVESTIGACION Y CIENCIA, MAYO 1985

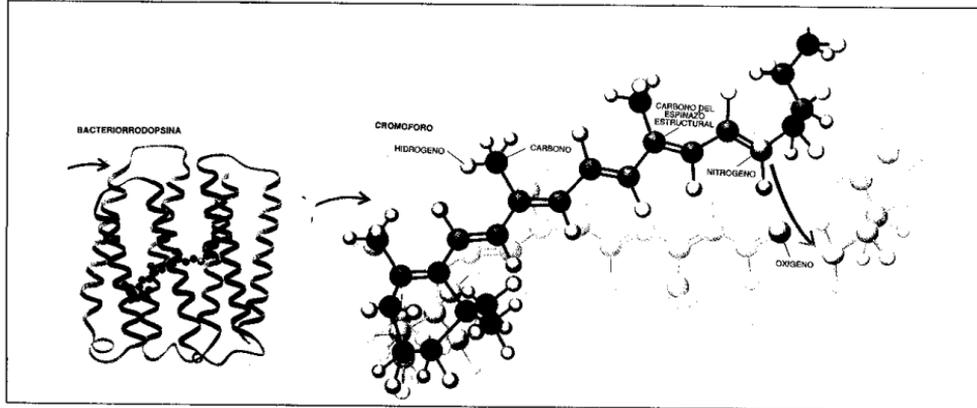


FIGURA 2. Representación de la bacteriorrodopsina y un cromóforo (estructura esquelética de esferas y enlaces lineales) que absorbe la luz. Cuando este segmento se excita por la luz, su estructura cambia alterando la configuración del resto de la proteína. Puesto que la bacteriorrodopsina responde a la luz adoptando estados diferentes y fácilmente detectables, puede servir para puertas lógicas, o conmutadores, en ordenadoras ópticas de base proteínica. (TOMADO DE LA REVISTA INVESTIGACION Y CIENCIA, MAYO 1995)

movimiento de una partícula, lo que limitará en un futuro inmediato la capacidad de proceso de estos aparatos.

Por otro lado, la cantidad de energía calórica que se genera cuando producimos cambios bruscos a las partículas que transportan la corriente, crea vibraciones indeseables dentro del cristal que impiden, a su vez, el movimiento rápido de las mismas. Es como si la propia velocidad llevara sobre sus hombros el agente que impide su movimiento. Este último fenómeno se empezó a observar con preocupación desde el momento en que salió al mercado el microprocesador 80486 y Pentium.

La tendencia hacia la miniaturización continúa y al parecer en los próximos cuarenta años el tamaño de los circuitos lógicos será del orden de una molécula. Por supuesto que serán tecnologías de

costo muy elevado, convirtiéndose el problema económico en el principal obstáculo para su producción. Si a esto se agrega la cantidad de componentes informáticos que se pierden en el proceso de fabricación, debido a la gravedad, las impurezas y otros efectos relacionados con el proceso de fabricación en la tierra, vemos que es necesario buscar nuevas alternativas que mantengan los objetivos centrales: componentes más pequeños, potentes, veloces y producidos a bajo costo.

Se han explorado algunas alternativas tecnológicas como la producción en condiciones de ingravidez, para evitar las dislocaciones por la acción de la gravedad y las impurezas microscópicas que contaminan las pastillas semiconductoras. Se ha estimado en un cincuenta por ciento la pérdida que generan los efectos anteriores. Una dislocación en un cristal pro-

duce cambios significativos en las condiciones nominales del dispositivo, los valores previstos de las resistencias, capacidades distribuidas a muy alta frecuencia y otros parámetros no menos importantes sufren variaciones que hacen imposible introducirlo al mercado. Igual ocurre con las impurezas que se convierten como piedras en el camino de tránsito de las partículas, también creando cambios en los valores nominales de los parámetros. Por ello la alternativa de construcción en la ingravidez es una solución más económica que la actual, porque todo lo invertido en el montaje de una fábrica espacial es inferior a lo que se pierde por desechos en el proceso de fabricación en la tierra.

NUEVAS PROPUESTAS: LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La otra alternativa es la utilización de materiales superconductores

como base de la nueva tecnología. Se trata de aprovechar el efecto túnel y la unión Josephson para crear dispositivos electrónicos que permitan la realización de las operaciones lógicas básicas del computador. Los materiales superconductores tienen la propiedad de presentar resistencia eléctrica cero, lo que les permite mantener en forma indefinida la corriente eléctrica, sin pérdidas de energía y generación de calor. Es un medio ideal para aumentar, teóricamente, la velocidad sin límites. Es necesario que la aparición del fenó-

meno superconductor se haga a temperatura ambiente y no a muy bajas temperaturas que implique la utilización de sistemas complejos de refrigeración que vuelvan imposible su comercialización. La tecnología todavía mantiene sus esperanzas en esta solución.

LA PROPUESTA BIOLÓGICA

La opción de utilizar moléculas biológicas como base para la fabricación de elementos activos dentro de la electrónica de los nuevos computadores se presenta

como una solución de bajo costo. Las moléculas pueden actuar como circuitos lógicos, comportándose como compuertas and, or, nor, nand y otras, unidades fundamentales en las propiedades de procesamiento de información de los computadores. Las moléculas presentan este comportamiento en forma controlada debido a que sus cambios de estado son absolutamente predecibles, lo que permite desde el exterior, a través de señales, darles la configuración deseada para que produzca efectos deseados. Lo único que se requiere es generar sistemáticamente dos estados en la molécula y representar cada uno de ellos como un 1 o un 0. Esta posibilidad de tener compuertas lógicas por debajo de la micra, es decir, una millonésima del metro, mucho menores que los elementos activos semiconductores utilizados en la circuitería del computador, dará como resultado una reducción en el tamaño de los equipos. Los actuales computadores personales se convertirían en computadores de bolsillo. La velocidad prevista para estos pequeños monstruos del proceso sobrepasaría las decenas o centenas de gigahertz. Si la telefonía celular personalizó las comunicaciones, la computación "viva", sustentada en materiales orgánicos, personalizará la informática. El potencial de cálculo y proceso equivalente a una computadora de mediano tamaño en un aparato cuya apariencia no va más allá de una calculadora de bolsillo, indudablemente que representará una nueva revolución para finales del presente milenio.

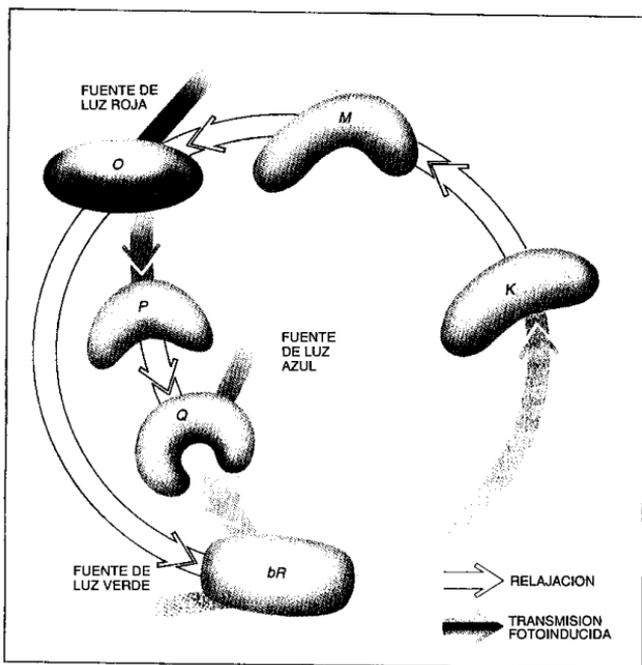


FIGURA 3. FOTOCICLO de la bacteriorodopsina: secuencia de cambios estructurales inducidos por la luz. El fotociclo permite el almacenamiento de datos en la memoria. La luz verde transforma el estado inicial de reposo, conocido como bR, convirtiéndolo en el intermedio K. A continuación K se relaja, formando primero M y luego O. Al exponer a la luz roja el intermedio O, se produce una reacción de ramificación. La estructura O pasa al estado P, que permanece estable. Sin embargo, la luz azul devolverá Q al estado bR. Se les pueden asignar los valores binarios 0 y 1 a dos estados cualesquiera de larga duración, lo que permite almacenar información mediante series de moléculas de bacteriorodopsina en uno u otro estado. (TOMADO DE LA REVISTA INVESTIGACION Y CIENCIA, MAYO 1986)

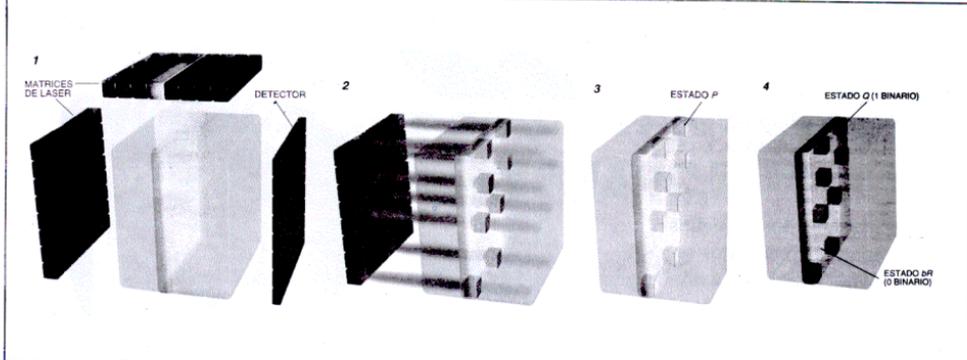


FIGURA 4. LA ESTRUCTURA DE INFORMACION en cubos de bacteriorrodopsina (violeta) y la lectura de tal información se consiguen mediante haces de láser. El proceso de escritura comienza disparando haces de láser de color verde a través de un plano del cubo (1); este paso inicia el fotociclo de la proteína. A continuación se disparan láseres rojos (2); sobre el conjunto de moléculas de dicho plano (verde) que han de convertirse al estado binario 1; las moléculas restantes representan el estado 0. Las moléculas diana forman el estado P (3), relajándose en la estructura Q (4). (TOMADO DE LA REVISTA INVESTIGACION Y CIENCIA, MAYO 1995)

Según Robert R. Birge, experto en dispositivos electrónicos de base proteínica y computadores híbridos, en el momento nadie propone todavía un computador puramente molecular. Se ha pensado en una solución híbrida que combine los semiconductores tradicionales con las moléculas orgánicas. Esto reduciría en cincuenta veces el tamaño de los computadores y aumentaría su velocidad en más de cien veces. Se alcanzarían límites actualmente insospechados con la tecnología actual. El solo aumento de velocidad haría posible la simulación de procesos complejos y costosos que requieren de los computadores más veloces del mundo, como aquellos utilizados en el diseño de aviones, estudio del comportamiento de la atmósfera, en estrategia militar y otros temas que demandan gran capacidad de proceso. El diseño de los nuevos computadores de moléculas biológicas tienen la ventaja adicional de hacerse átomo a átomo lográndose estructu-

ras de propósito específico y propósito general, según las expectativas del diseñador. En la industria automatizada jugarían un papel importante en la transformación de los procesos, al tener la oportunidad de construir computadores miniatura con gran cantidad de información y capacidad de proceso, orientado a controlar un aspecto muy puntual de un proceso determinado.

El apoyo de la tecnología biológica al procesamiento en paralelo prevé un mayor aumento en la capacidad de solución y simulación de sistemas muy complejos, al ampliarse la capacidad de memoria en donde los datos quedarían almacenados en tres dimensiones en lugar de las dos. La estructura espacial y el control atómico que se ejerce sobre toda la red, da la posibilidad de almacenar información binaria en puntos del espacio (x, y, z). La multiplicación de la capacidad de memoria con respecto a las actuales sería

prácticamente indefinida, al tenerse la oportunidad de almacenar espacialmente la información. Otro aspecto que le daría limpieza e inmunidad al nuevo computador es la propiedad que tienen las moléculas de estimularse con la luz. La optoelectrónica encontraría un aliado fundamental en la nueva tecnología, pues la rapidez en las respuestas sería mucho mayor, además de reducir el tamaño significativamente.

La implementación de las redes neuronales darían una nueva estructura lógica al computador distinta a la de Von Newman, basada en las unidades de entrada, proceso y salida, con una unidad de almacenamiento. En la tecnología biológica tendríamos sistemas completos que aprenden de la experiencia, emulando el comportamiento del cerebro y orientando el computador hacia un verdadero sistema de inteligencia artificial. Las redes neuronales por medio de la interac-

ción de las neuronas se adaptan a nuevas condiciones y pueden realizar operaciones que no son posibles en ambientes rígidos, logrando con ello una gran flexibilidad, condición difícil de alcanzar en el modelo de Newmman.

Los sistemas híbridos, aquellos que combinan microcircuitos semiconductores y moléculas biológicas ya se encuentran en el mercado en una aplicación que está muy por debajo de las expectativas de la ciencia y la tecnología. Se trata de las pantallas de cristal líquido que utilizan las calculadoras, computadores portátiles de pantalla plana, las cuales combinan dispositivos semiconductores con moléculas orgánicas para controlar la intensidad de la imagen en la pantalla. Esto hace presagiar que muy pronto tendremos en el mercado dispositivos electrónicos de tecnología híbrida, básicos para la construcción de sistemas electrónicos dedicados al control de procesos y otras aplicaciones. Las grandes empresas fabricantes de dispositivos y equipos electrónicos han iniciado sus ensayos sobre materiales de posible utilización como aliados en la nueva tecnología.

LA BACTERIORRODOPSINA

La **bacteriorrodopsina**, figura 1, proteína bacteriana, es la que ha suscitado mayor interés por parte de los fabricantes y diseñadores. El profesor Birge, principal investigador en la materia, ha construido prototipos de dispositivos de procesamiento en paralelo, elementos de almacenamiento vo-

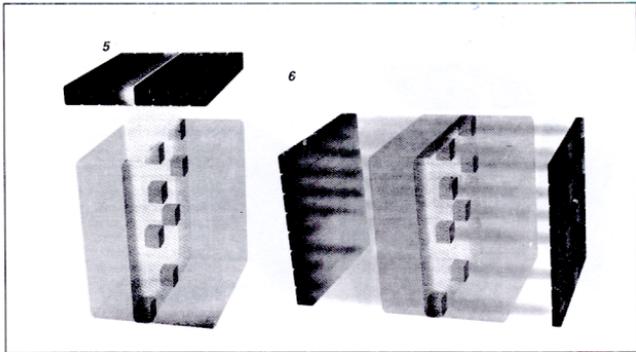


FIGURA 5. La lectura desde la memoria de base proteínica comienza activando el plano con luz verde (5) Se disparan láseres rojos de baja intensidad. Las moléculas en el estado bR absorben la luz roja, mientras que las moléculas en el estado P o Q dejan pasar los bajos niveles luminosos. La configuración resultante de luz y oscuridad puede recogerse en un detector situado frente a la matriz de láser rojo (6) (TOMADO DE LA REVISTA INVESTIGACION Y CIENCIA, MAYO 1985)

lumétrico y redes neuronales que tienen como base esta proteína. En otros laboratorios del Japón, Europa y Estados Unidos también se viene ensayando procesos de fabricación a bajo costo de **dispositivos bioelectrónicos**. Los investigadores Walther Stoeckenius y Dieter Oesterheld descubrieron las propiedades de la proteína al ser expuesta a la luz. La bacteriorrodopsina, que se encuentra en la membrana de **Halobacterium salinarium**, permite el crecimiento de la bacteria cuando la concentración de oxígeno es insuficiente para mantener al microorganismo. Este proceso se da cuando la proteína recibe radiación electromagnética en forma de luz, energía que libera un protón transportándolo a través de la membrana, generando así una corriente eléctrica. La estructura de la membrana se modifica ayudando al metabolismo celular.

El tema de la **bioelectrónica híbrida** es de interés mundial, hasta tal punto que se ha considerado como

secreto de estado por sus aplicaciones militares. Se conoce de aplicaciones para radares de detección sensible, procesadores ópticos de datos utilizados como interfaz en sistemas de captura, películas de microfilmación hechas con base en la bacteriorrodopsina, llamadas biocromo. Existe una molécula que tiene propiedades muy parecidas llamada la **rodopsina** que se encuentra en la retina de los mamíferos. Es una sustancia sensible a la luz que genera una corriente eléctrica microscópica cuando es expuesta a ella, la cual sirve de señal para avisar al cerebro sobre la presencia de luz en el ambiente. Esta señal es la que excita el nervio óptico, que luego la transforma en consecutivos cambios eléctricos y químicos hasta llegar al cerebro. La **rodopsina** y la **bacteriorrodopsina** utilizan un componente llamado **cromóforo**, figura 2, que es el encargado de absorber la luz que incide sobre la molécula. La estructura de la molécula cambia debido a la energía lumínica absorbida por el

cromóforo alterando sensiblemente las propiedades eléctricas y ópticas de la molécula. La **bacteriorrodopsina** tiene propiedades ópticas más estables que la rodopsina, lo que la hace más interesante para aplicaciones en bioelectrónica; por ello se ha convertido en la sustancia objeto de las investigaciones. Una de las propiedades más importantes de la bacteriorrodopsina es su estabilidad a cambios grandes de temperatura sin estropearse. La molécula se mantiene por encima de los 65 grados centígrados. Esta propiedad le permite servir de base para los computadores personales que no se encuentran en ambientes regulados en temperatura y humedad. El material sirve como base para las memorias ópticas, éstas se polarizan espacialmente según la frecuencia de la señal excitadora, permitiendo el almacenaje de unos y ceros.

ESTRUCTURAS DE LA MOLECULA

Las aplicaciones para obtener procesadores y memorias de información requieren de dos estados distinguibles plenamente los cuales nos servirán para identificar los números binarios. La bacteriorrodopsina normalmente se encuentra en su estado estable o de reposo en donde permanece si no es excitada por radiación electromagnética. Este estado o estructura se identifica con las letras **bR**, figura 3. Cuando a la molécula se le aplica luz de color verde cambia su estado a uno intermedio denominado **K**, el cual se relaja posteriormente pasando a los estados **M** y luego **O**. Está último es un estado

semiestable que hace tránsito después de un tiempo hacia la estructura **bR**, y si aplicamos luz de color rojo hace tránsito hacia los estados **P** y **Q** en forma consecutiva. La luz roja produce una ramificación de estructuras de la molécula, que pasa por el estado **P**, de corta duración, y luego pasa al estado **Q**, que vuelve a ser un estado estable de larga duración, incluso de años. De este estado se puede salir y volver al **bR**, después de aplicarle luz azul a la molécula. Con esta luz se recupera nuevamente el estado original. Los estados de larga duración se les pueden asignar los valores de cero y uno, lo que permite almacenar información mediante serie de moléculas de bacteriorrodopsina en uno u otro estado.

Lo cierto es que los estados estables son función de la temperatura. El estado **K** es estable a bajas temperaturas, en donde la bacteriorrodopsina solo puede trabajar refrigerada con nitrógeno líquido. A temperatura ambiente el estado **M** es estable y las transiciones entre **bR** y **M** se consideran como las básicas. En la práctica se pueden escoger dos cualesquiera de los estados considerados estables a la temperatura de trabajo. El cambio producido en la molécula cuando es expuesta a la luz se le denomina proceso de arquitectura secuencial monofotónica.

El montaje que se propone para la escritura y lectura de información binaria se muestra en las figuras 4 y 5. La operación de escritura es la siguiente: se tiene un volumen cúbico de moléculas de bacteriorrodopsina, el cual se puede dividir en planos del grosor teórico de una molécula. El número de planos es suficientemente grande como para almacenar cualquier volumen de información. En la práctica el grosor de los planos depende de la precisión que obtenemos en la coherencia del rayo láser que vamos a utilizar para excitar las moléculas. En la parte superior tenemos fuentes puntuales de láser verde en un arreglo rectangular utilizado para dar la primera excitación a los planos de bacteriorrodopsina y producir la primera transición hacia la estructura **K**. En la parte frontal del cubo se tiene otro arreglo rectangular de fuentes de láser puntuales de color rojo, encargadas de continuar el proceso de transformación estructural de la molécula hasta llevarla al estado **P** y **Q**, considerados como el mismo estado para efectos de su codificación binaria.

Una de las filas de la matriz de láser de color verde excita uno de los planos del cubo de moléculas, produciendo una transición del estado **bR** hacia el estado **K**. El es-

La bacteriorrodopsina normalmente se encuentra en su estado estable o de reposo en donde permanece si no es excitada por radiación electromagnética.

tado **K** es transitorio y solo permanece en el un tiempo muy corto, después del cual se relaja hacia el estado **M** y luego al estado **O**. Este último es un estado semiestable en el sentido que después de un tiempo un poco más largo puede relajarse hacia el estado **bR**. Supongamos que la mayoría de las moléculas se encuentran en el estado **O** y el arreglo de láser de color rojo que se encuentra frente al cubo emite la radiación, pero solo algunas de las fuentes puntuales, tal como se muestra en la figura. Las moléculas que reciben la radiación roja y que se encuentran en la estructura o estado **O**, efectúan la transición hacia el estado **P** y luego al **Q**. El resultado final es moléculas en estado **bR** y moléculas en estado **Q**. Los estados pueden representar arbitrariamente 1 y 0.

De esta manera hemos almacenado información en uno de los planos del volumen de moléculas. Este proceso se puede repetir por cada plano de moléculas en forma concurrente haciendo un almacenamiento en paralelo y aumentando la velocidad de escritura de información. La velocidad puede crecer hasta 100 millones de caracteres por segundo con una memoria de ocho cubos. Las densidades de almacenamiento en memorias ópticas tridimensionales puede alcanzar densidades de un billón de bits por centímetro cúbico.

La lectura se realiza teniendo en cuenta la propiedad que presentan los estados al ser excitados por radiación electromagnética. El estado **bR** cuando recibe luz de co-

lor rojo la absorbe aumentando su nivel energético, pero sin cambiar la estructura física, debido a que la molécula ya pasó por el estado **O** capaz de absorber esa radiación. Esto ocurre con las moléculas que pertenecen al plano que se encuentra excitado. Las moléculas que se encuentran en el estado **Q** al incidir sobre ellas radiación roja no la absorben y la dejan pasar libremente. Si colocamos en la cara posterior del cubo de moléculas de bacteriorrodopsina una película sensible a la radiación lumínica emitida por el láser, y si disparamos los rayos con todas las fuen-

La velocidad puede crecer hasta 100 millones de caracteres por segundo con una memoria de ocho cubos.

tes puntuales de la matriz de rojo, éstos serán absorbidos por las moléculas que se encuentran en el estado **bR**, el cual podemos denominar cero, 0 y, por tanto, la película sensible no será impresionada en los puntos correspondientes a estas moléculas. Donde existan moléculas que se encuentren en el estado **Q**, no se producirá ningún efecto sobre la radiación roja y ésta impresionará la placa sensible, dejando la huella de la presencia de un 1 en el plano o página de memoria. Por consiguiente, la placa sensible contiene la información almacenada en memoria bioelectrónica.

De esta manera tenemos la posibilidad de implementar una memo-

ria que facilita el procesamiento en paralelo. Si combinamos el procesamiento en paralelo con las redes neuronales tenemos lo más parecido al funcionamiento del cerebro, que aunque lento puntualmente, tiene una rapidez impresionante cuando se trata de tomar decisiones complejas. Esto es debido a la capacidad de asociar, con memorias que funcionan de esta manera y espacialmente en forma tridimensional, lo que le permite relacionar datos en cualquiera de las dimensiones, dando la sensación de una mayor rapidez. La red neuronal facilita el aprendizaje a través de la experiencia, debido a que los datos de entrada, procesados por una función específica de la neurona, transforma la propia función de proceso, dándole flexibilidad asociada al mundo exterior. Parece que la inteligencia artificial ha encontrado un aliado fuerte en el procesamiento en paralelo y las redes neuronales, vale decir, en los sistemas construidos sobre la base de componentes bioelectrónicos.

BIBLIOGRAFIA

INVESTIGACION Y CIENCIA. Mayo 1995, págs. 60-65.

BACTERIORHODOPSIN: A BIOLOGICAL MATERIAL FOR INFORMATION PROCESS Ing. Dieter Oesterhelt y otros.

PROTEIN-BASED OPTICAL COMPUTING AND MEMORIES. Robert Birge.

PROTEIN-BASED THREE-DIMENSIONAL MEMORY. Robert Birge. ●