

## Capítulo 5 – Aplicaciones del memristor

Uno de los campos con mayor crecimiento en el mundo de la electrónica ha sido sin duda la inteligencia artificial, la cual se ha visto envuelta en constantes desilusiones. Por ejemplo, en los 60s, la invención del transistor llevó a pensar que las maquinas superarían al hombre entre los próximos veinte años. Ahora, cincuenta años después no hay algo mejor que un sistema automático que sirva de soporte a clientes o quizás robots que puedan hacer hot-cakes según las indicaciones del cliente. ¿Pero qué tal inteligencia artificial capaz de crear su propio conocimiento, como en películas de ciencia ficción? Esto todavía no es posible debido al pobre procesamiento de nuestras máquinas actuales, incluso el cerebro de un ratón posee mayor poder de procesamiento que la computadora más poderosa en la actualidad.

El reciente diseño de memristores físicos nos ha llevado a darle vida a nuevas ideas, hasta ahora imposibles pues la limitante siempre han sido los tan utilizados ceros y unos, lógica binaria. Pero el memristor al ser un dispositivo analógico puede tener infinidad de aplicaciones, las cuales las empresas y los gobiernos de los países más desarrollados y que invierten en tecnología han visto como este elemento eléctrico puede servir como columna vertebral para sus actuales proyectos.

El memristor es un elemento capaz de reemplazar memorias RAM, Flash o discos duros pues es un elemento construido a nivel nanométrico que puede recordar información permanentemente, conmutar en nanosegundos, podemos tener millones sustituyendo a transistores pues Stan Williams estima que un solo memristor puede sustituir a 10 transistores. Williams igualmente expone que los memristores alcanzan las velocidades de una célula DRAM y dependiendo el material utilizado para su construcción, pueden tener una vida útil similar a la de un disco duro tradicional; actualmente los diseños de HP arrojan datos sobre la vida del memristor, donde su vida útil es mayor que la de una memoria Flash, pero ya se trabaja en extender esto. Chua prevé que los memristores, dentro de los próximos cinco a diez años, puedan sustituir no solo memorias RAM, sino también CDs o Blu-Rays aprovechando sus propiedades no-volátiles.

Las características del memristor han dado dolor de cabeza a los diseñadores digitales, pues todo el paradigma de almacenamiento y procesamiento tendrá que variar. ¿Cómo cambiara un diseño si se pueden tener una gran cantidad de memoria similar a la SRAM a fin de guardar información

en el microprocesador sin necesidad de memorias DRAM? Pensemos ahora en grandes cantidades de memoria cerca del procesador, como la *cache* o tener un mejor ancho de banda, todo esto con poca potencia.

Nuestra sociedad ama el progreso, pero odia el cambio. Los memristores necesitan de un cambio de paradigma, no son solamente una tecnología plug-and-play pues se necesita un rediseño de la arquitectura actual de computadoras. Los diseñadores buscan hacer las computadoras más parecidas al cerebro de un mamífero, lo cual veremos con más detalle cuando se aborde el proyecto MoNETA. Tomará años para que la industria adopte al nuevo integrante de la electrónica como elemento dentro de sus diseños.

¿Pero de cuanto almacenamiento hablamos? Williams y su equipo estiman que se pueden alcanzar múltiples petabits de memoria por  $\text{cm}^2$ , siendo un petabit similar a 128 Terabytes. Esto es increíble considerando que un terabyte es igual a 128 DVDs o 250,000 imágenes de 4MB. Igualmente Williams comenta durante su exposición en la Universidad de Berkeley que HP se encuentra trabajando en tecnología óptica para eliminar ese cuello de botella que se ha vuelto el mover información por cables en un circuito eléctrico. Ahora se trabaja en interconexiones fotónicas, las cuales serán usadas cada vez que un bit deba de viajar más de 100 micras, utilizando pulsos de luz. Williams estima que dentro de los próximos 10 años un chip que utilice memristores e interconexiones fotónicas sobrepase el rendimiento computacional de una computadora por dos órdenes de magnitud por unidad de energía, superando lo que pueden hacer los transistores.

### ***5.1 – Memristor Bi-Estable controlado por carga***

La curva  $\varphi - q$  de un memristor Bi-estable controlado por carga se muestra en la figura 5.1. La pendiente de la curva  $\varphi - q$  arroja el valor de la memristancia  $M$ . Los dos valores de la memristancia pueden ser considerados como dos diferentes estados binarios. La característica importante es que el memristor guarda el valor lógico como una impedancia y no como voltaje. La resistencia puede variar, así moviéndonos entre ambos estados, aplicando el voltaje apropiado. En la figura 5.1, Chua pone como ejemplo variaciones de resistencia 1:10, donde existe un estado de baja impedancia ( $1 \Omega$ ) y otro de alta impedancia ( $10 \Omega$ ).

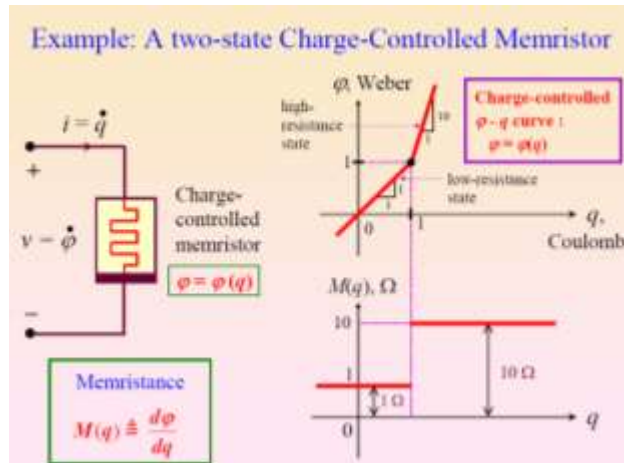


Figura 5.1 – Memristor Bi-estable controlado por carga

## 5.2 – Configuraciones lógicas de memristores

### 5.2.1 – Configuración inversora

La figura 5.2 muestra los pasos a describir, esta figura fue adaptada por Ketaki Kerur a manera de explicación gráfica para poder comprender el funcionamiento de la configuración propuesta por Raja y Mourad en su paper *Digital Logic Implementation in Memristor-Based Crossbars*. Esta figura muestra dos memristores configurados como inversores. Memristor 1 (Mem1) es el memristor de control y su valor no varía. Memristor 2 (Mem2) varía su valor para crear la lógica inversora; este proceso se logra en tres pasos.

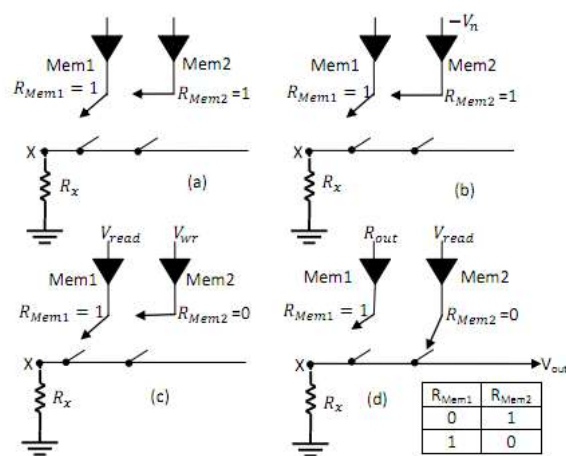


Figura 5.2 – Configuración inversora para memristores

La primer etapa es denominada *etapa incondicional*, Mem2 se configura para que esté en estado abierto forzando la alta impedancia en la terminal de control de Mem1 y aplicando un voltaje  $-V_n$  en la terminal de control de Mem2. El voltaje  $-V_n$  es mayor que el umbral requerido para abrir al memristor y el estado lógico de Mem2 es 1 no importando su estado anterior. Esta etapa se muestra en la figura 5.2(b)

Para la segunda etapa, denominada *cerrado condicional* y que se muestra en la figura 5.2(c), a Mem1 se le aplica un voltaje  $V_{read}$  en su terminal de control. Un voltaje  $V_{wr}$  es aplicado a la terminal de control de Mem2. Si Mem1 se cierra, la impedancia  $R_{M1} = 0$ . Esto hace que el voltaje en el nodo X sea  $V_{read}$  y el voltaje sobre Mem2 sea  $V_{wr} - V_{read}$ , el cual no es suficiente para cerrar Mem2 dejándolo todavía en estado abierto. Si Mem1 se abre, el voltaje en el nodo X es ahora cero y el voltaje sobre Mem2 es ahora  $V_{wr}$ . De esta forma la operación inversora toma lugar. La tabla de verdad se muestra en la misma figura 5.2.

Existe una última etapa denominada de *lectura*. La terminal de control de Mem1 es puesta en alta impedancia para que no se tenga efecto sobre el nodo X. Un voltaje  $V_{read}$  es aplicado a la terminal de control de Mem2. Esto resultará en un voltaje sobre la terminal de salida, dependiendo del estado de Mem2.

### 5.2.2 – Configuración NAND

Mourad y Raja proponen otra configuración para el memristor, ahora una NAND. Consideremos un conjunto de memristores como en la figura 5.3. El memristor Mem1 de la configuración inversora es ahora reemplazado por memristores Mem1-Mem2-Mem3, los cuales son conectados en paralelo. Las terminales de control de estos memristores son conectadas. El memristor Mem4 es incondicionalmente abierto aplicando un voltaje  $-V_n$  en su terminal de control. Después el voltaje  $V_{read}$  es aplicado a la terminal de control común y  $V_{wr}$  es aplicado a la terminal de control de Mem4. Cuando el conjunto de los primeros tres memristores están abiertos, el voltaje en el nodo X es cero y la caída de voltaje sobre Mem4 es  $V_{wr}$ , lo cual cierra Mem4. Cuando Mem1 está cerrado y Mem2-Mem3 abiertos, el nodo X tiene voltaje  $V_{read}$  y el voltaje a través de Mem4 no es suficiente para cerrar el memristor. Lo mismo sucede para los casos de Mem2 y Mem3. Entonces la operación lógica toma lugar pues  $Mem4 = \overline{Mem1 \cdot Mem2 \cdot Mem3}$  es una

operación NAND. Esta configuración es denominada por sus autores como AND-conectada ya que varias entradas están interconectadas para producir el resultado.

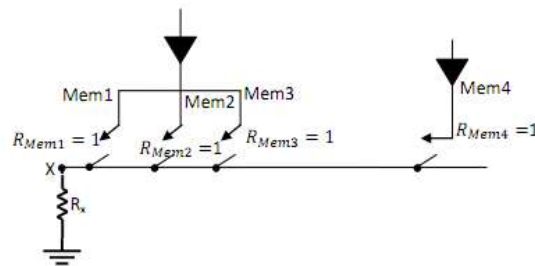


Figura 5.3 – Configuración NAND para memristores

### 5.3 – Memoria de un memristor

La propuesta más clara de memristores ha sido su uso como memoria no volátil, permitiendo una gran densidad de información que los actuales discos duros. HP ha diseñado una memoria matricial de *latch* basada en memristores la cual puede contener 100 gigabits en un solo  $\text{cm}^2$ . HP afirma que esta memoria puede soportar hasta un millón de ciclos de lectura/escritura antes de su degradación, comparada con una memoria flash que posee 100,000 ciclos. No hay que dejar de lado que los memristores consumen baja potencia.

En memorias basadas en memristores, la operación de lectura se lleva a cabo aplicando un voltaje menor al de umbral. El memristor conducirá a este voltaje si está *encendido*. Si está apagado, no conducirá. Para escribir un dato (0 o 1) un voltaje mayor al de umbral debe ser aplicado. Para escribir el otro valor lógico, se debe aplicar un voltaje de polaridad opuesta cuya magnitud sea mayor al voltaje de umbral. Esto pone al memristor en estado *apagado*.

Los memristores tienen la capacidad de recordar aun cuando no tengan energía. Así, computadoras construidas en base a memristores no necesitarán de tiempo de carga, pues al encenderlas al igual que un foco convencional, desplegarán su la última información dentro de ellas instantáneamente.

#### **5.4 - MoNETA**

Recientemente, el gobierno de Estados Unidos y más directamente, la agencia DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ha estado financiando investigaciones realizadas en la Universidad de Boston, donde expertos en ciencias de la computación e inteligencia artificial están en la búsqueda de construir un cerebro electrónico que pueda funcionar de forma similar al cerebro de un mamífero. Se está desarrollando un software único y especial, llamado MoNETA (Modular Neural Exploring Traveling Agent), el cual tendrá una capacidad de procesamiento muy avanzada. La capacidad de realizar tareas de procesamiento y almacenamiento, hacen del memristor el elemento ideal para llevar a cabo tan gran empresa.

Algunos proyectos de DARPA no han tenido mucho éxito, pues el hecho de que un automóvil se conduzca solo por el desierto Mojave en California por 212 km no resultó ser suficiente cuando se probaron diversos automóviles tratando de circular por una ciudad cumpliendo todas las reglas de manejo.

Ahora consideremos el cerebro de una rata, donde el cerebro toma el lugar de una poderosa computadora. Primeramente, una rata buscará por comida memorizando rutas que le parezcan familiares y sin peligro, pero al mismo tiempo debe procesar información generada a partir de su entorno. Después de comer, la rata deberá olvidarse de esa tarea y buscar nuevas prioridades. Esto no puede ser realizado por una máquina del tamaño del cerebro de una rata. ¿Entonces por qué es tan superior el cerebro de una rata? Por su arquitectura. Aproximadamente su cerebro posee 21 millones de neuronas (el del ser humano tiene 100 aproximadamente). Las neuronas, como ya se sabe, se comunican entre ellas por medio de las dendritas y axones y se mandan pulsos eléctricos los cuales llevan información; esta información es procesada por la sinapsis, la unión entre la dendrita de una neurona y el axón de la neurona vecina.

Según el grupo de investigadores detrás de MoNETA, para simular una sinapsis por medio de software actual se necesita de lo siguiente: El estado de la sinapsis, es decir, su peso sináptico, debe estar guardado en memoria. Para alterar este valor, el procesador debe transmitir una señal eléctrica a través del bus principal a lo largo de unos 2 o 10 cm. para alcanzar la memoria física, ser interpretada para acceder a la localidad de memoria deseada.

Ahora suponiendo que un cerebro de rata posee alrededor de 8000 sinapsis, hay que multiplicar la secuencia explicada anteriormente por ese número y después multiplicar el valor resultante por el número de neuronas dentro del cerebro a emular. Tendríamos billones. ¿Lo cual es un gran cálculo, o no? Apenas y modelamos un solo milisegundo de actividad cerebral. Esto puede ser desilusionante.

Ahora veamos qué es lo que realiza un cerebro para procesar la información. Primeramente la neurona 1 genera un pulso eléctrico, el cual lleva información y es mandado por el axón hacia la sinapsis de la neurona 2. La sinapsis de la neurona 2, ya teniendo guardado su estado (peso sináptico), evalúa la importancia de la información proveniente de la neurona 1. Entonces ambos datos, estado de la sinapsis de la neurona 2 y el pulso enviado por la neurona 1, fluyen hacia el cuerpo de la neurona 2, sobre sus dendritas. Lo interesante en este proceso es que durante este tiempo solo existe un solo valor pues todo el procesamiento se llevó a cabo durante la transferencia de información; no existe necesidad, por ejemplo, de que el cuerpo extraiga información de una neurona, la procese en otro lugar y regrese un resultado. Lo impresionante es que el almacenamiento y procesamiento suceden al mismo tiempo y en el mismo lugar. Como esto ya se ha explicado, se necesita entonces un cambio en la arquitectura de computadoras actuales. Es por eso que el cerebro humano es capaz de funcionar con la misma potencia que un foco de 20 Watts, y una computadora necesita de una planta completa para ni siquiera hacerle sombra al cerebro humano.

### ***5.5 - Procesamiento en paralelo***

Bradford Cross, empleado de *Flightcaster*, la cual es una empresa dedicada a implementar algoritmos de predicción de vuelos, habló sobre Hadoop, Cascade y otras tecnologías utilizadas para este tipo de algoritmos. Al final, Bradford mencionó algo que realmente me impactó pues resumió sus investigaciones en unas simples palabras tales como “todo lo que buscamos es aplicar funciones matemáticas a la información”. Aquí estamos hablando de funciones matemáticas que sirvan para modelar información. ¿Será esto muy difícil?

Si echamos un vistazo al memristor y si capacidad de ser configurado dinámicamente como memoria y dispositivo de procesamiento durante su funcionamiento, podemos aplicar esta característica para procesar información en paralelo.

Imaginemos una película como *Toy Story 3*, la cual según la revista *Wired* tomó 1084 días para ser completada, contiene infinidad de cuadros. En promedio toma 7 horas renderizar un cuadro en la película, sin dejar de lado que algunos cuadros pueden tomar incluso hasta 39 horas; si tomamos en cuenta que la película dura 103 minutos y tenemos 24 cuadros por segundo entonces obtenemos 1,038.240 horas o 117 años para poder terminar todos los cuadros. Pero tomemos en cuenta que muchos cuadros se procesan en paralelo para poder acortar considerablemente este tiempo, sino esta película no habría visto nunca la luz del día. Otro factor que se debe tomar en cuenta es que no se han considerado escenas como bloopers, el hecho de que está hecha en 3D o escenas eliminadas.

Los creadores de algoritmos deberán adaptarse entonces a las ventajas que las nuevas arquitecturas de computadoras nos brindarán. Ahora imaginemos un algoritmo de reconocimiento de imágenes siendo varias imágenes procesadas en paralelo gracias al uso de memristores. Entre las aplicaciones en inteligencia artificial podremos procesar redes neuronales de forma más rápida pues los pesos sinápticos podrían ser calculados rápida y eficientemente. También tenemos de ejemplo el *Aprendizaje Profundo*, una tendencia en aprendizaje, el cual utiliza grandes operaciones de matrices donde existen millones de variables.

Abordando el mundo de la lógica reconfigurable y los microprocesadores, no podemos dejar de pensar en los FPGA (Field Programmable Gate Array).

Actualmente el diseño digital posee tres grandes armas para abordar problemas, el microprocesador, FPGA y los ASICs (Application Specific Integrated Circuits). Primeramente, los ASICs son de un solo propósito, resultan ser rápidos, más robustos pero más pequeños, con menor consumo de energía y con menor costo por unidad. Pero con un solo error en su diseño o construcción se deberán abordar gastos extras y tomará más tiempo. Por otro lado, los microprocesadores son una opción más general pues se interpretan instrucciones paso a paso según se haya escrito el programa. El inconveniente es que utilizan mayor potencia y ocupan mayor espacio, aunque son versátiles, lo cual los hace ser elegidos por muchos diseñadores digitales.

Ahora veamos a un *FPGA*, siendo estos una gran colección de compuertas las cuales pueden ser interconectadas a placer para crear procesadores o hardware de uso específico, todo esto por



programa. Una vez programadas estas compuertas, el sistema trabaja de forma muy rápida y eficiente. El FPGA permite construir hardware que trabaje en paralelo produciendo una alta eficiencia. Es por eso que se consideran como flexibles y eficientes, siendo esto atractivo para muchas aplicaciones y más robusto que ciertos ASICs. Imaginemos el procesamiento de una imagen de video, siendo cada línea de pixel procesada por memristores, lo cual nos llevaría a una mayor calidad en la imagen. Se espera que el memristor ayude a la construcción de sistemas más robustos, con menos componentes en su interior y que consuman menos potencia pero con mayor poder de procesamiento. Si los planes, no sólo de HP, sino de diversas compañías a nivel mundial van por buen camino, se podría revolucionar la forma en que los sistemas embebidos son construidos.

### ***5.6 – Memristores basados en sangre humana***

En recientes días, exactamente el 30 de marzo de 2011, una nueva investigación ha arrojado resultados sorprendentes pues S.P. Kosta y colegas, del *Education Campus Changa* en Gujarat, India, han publicado un paper en el *International Journal of Medical Engineering and Informatics* mostrando que la sangre humana cambia su resistencia eléctrica dependiendo del voltaje aplicado. El equipo de investigadores clama que este efecto dura al menos cinco minutos. Esta no es la primera conexión de memristores con el mundo biológico pues la similitud de los memristores con la sinapsis dentro del cerebro humano es otra posible aplicación.

Kosta y el resto del equipo de investigación parecen tener posibles aplicaciones terapéuticas tales como neuroprótesis en el cerebro. Los investigadores afirman en su paper que el estudio es originalmente exploratorio, pero abre nuevas puertas en el tratamiento de enfermedades humanas gracias al uso de tejido humano basado en circuitos electrónicos. De acuerdo con el anuncio del equipo de investigación, el próximo paso será crear dispositivos memristivos que limiten la sangre a pequeños canales, donde los combinarán para aplicar funciones lógicas.