

MODELIZACIÓN COMPUTACIONAL DE REDES MEMRISTORES: INFLUENCIA DE LA CONECTIVIDAD Y LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN SU RESPUESTA ELÉCTRICA

COMPUTATIONAL MODELING OF MEMRISTOR NETWORKS: INFLUENCE OF CONNECTIVITY AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THEIR ELECTRICAL RESPONSE

Jonathan Furlanetto¹, Ruben Weht^{2,1} y Cynthia Quinteros^{*3}

¹Instituto Sábito, Universidad Nacional de San Martín – Comisión Nacional de Energía Atómica, Avda. General Paz 1499, C1650 San Martín, Prov. de Buenos Aires

²Departamento Física de la Materia Condensada, Comisión Nacional de Energía Atómica – CONICET, Avda. General Paz 1499, C1650 San Martín, Prov. de Buenos Aires

³Instituto de Ciencias Físicas (ICIFI), Universidad Nacional de San Martín - CONICET, 25 de Mayo y Francia, C1650 San Martín, Prov. de Buenos Aires

Recibido: 05/06/2024; Aceptado: 27/06/2024

Con la perspectiva de implementar sistemas neuromórficos con redes de memristores, presentamos una plataforma numérico-computacional que permite estudiar sus propiedades de transporte eléctrico. La misma consta de: una función que describe el comportamiento del memristor individual (la cual permite considerar un caso experimental de interés) y un diagrama genérico de conexión entre memristores. Utilizando esta plataforma, se estudian redes bidimensionales de diferentes tamaños incorporando también efectos ambientales (tales como humedad y temperatura). Además, seleccionando los puertos eléctricamente accesibles se evalúa el impacto de la conectividad en las propiedades eléctricas de la red. Los resultados indican que, más allá de las características individuales de los memristores (determinadas por el modelo elegido), tanto el grado de conectividad, la topología del conexionado, y las condiciones ambientales influyen significativamente en la respuesta eléctrica macroscópica de las redes.

Palabras Clave: Redes de memristores, Dispositivos neuromórficos.

With the perspective of implementing neuromorphic devices using memristor networks, we present a numerical-computational platform that allows studying their electrical transport properties. It consists of a function that describes the behavior of an individual memristor (which enables the consideration of an experimental case of interest) and a connection diagram between memristors. Using this platform, two-dimensional networks of various sizes are studied, also incorporating environmental effects (such as humidity and temperature). Furthermore, by selecting the electrically accessible ports, the impact of connectivity on the electrical properties of the network is evaluated. The results indicate that, beyond the individual characteristics of the memristors (determined by the particular selected model), the degree of connectivity, the topology of the connections, and the environmental conditions significantly influence the macroscopic electrical response of the networks.

Keywords: Memristor networks, Neuromorphic devices.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2024.35.3.57>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de redes neuronales artificiales está posibilitando un impresionante desarrollo en muchas áreas de la ciencia y la tecnología, principalmente por su aplicación en técnicas de aprendizaje automático y, más generalmente, de inteligencia artificial [1-5]. Estas redes son abstracciones matemáticas con una fuerte inspiración biológica, implementadas mayormente en códigos (*software*) ejecutados sobre dispositivos electrónicos tradicionales (tecnología *CMOS*) [6].

Un abordaje alternativo propone que la red podría codificarse directamente en el *hardware*. Ello redundaría tanto en la optimización del consumo eléctrico como en la posi-

bilidad de implementar formas de cálculo y procesamiento de información no convencionales [7-10]. Las concreciones experimentales que se vienen explorando en este sentido son de dos tipos: la interconexión predefinida de componentes individuales previamente optimizados (*top-down*) o el aprovechamiento de ensamblajes autoafines entre unidades constitutivas con propiedades potencialmente promisorias (*bottom-up*).

En este trabajo se presenta una plataforma numérico-computacional que pretende ser aplicable y adaptable a la simulación de una multiplicidad de aquellas concreciones experimentales. En dicha plataforma los componentes o unidades constitutivas están representados por memristores. El memristor es un componente electrónico predicho por la teoría de circuitos [11], matemáticamente modelizado me-

* cquinteros@unsam.edu.ar

dianter diversas formulaciones [12] y experimentalmente demostrado en sistemas basados en distintos materiales [13]. Su característica principal es la capacidad de cambiar su estado resistivo dependiendo de la historia previa de los estímulos aplicados, típicamente eléctricos [11]. El objetivo de la plataforma es estudiar las propiedades de transporte eléctrico en esas redes memristivas simuladas, dependiendo de las características de la red y habilitando la incorporación de condiciones ambientales.

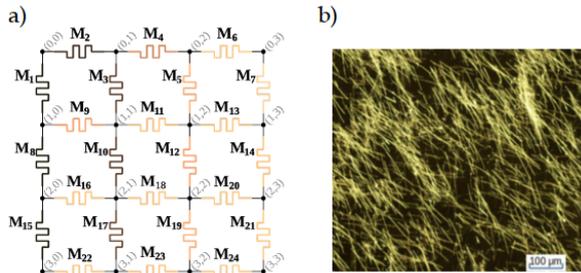


FIG. 1: (a) Esquema de una red de memristores con forma de grilla bidimensional. (b) Fotografía de campo oscuro de un autoensamblado de nanohilos de plata.

Si bien el objetivo del presente trabajo es la simulación de redes de memristores de distinto tamaño, interconexión y bajo diversas condiciones ambientales, la elección del modelo memristivo individual fue motivada por una concreción experimental particular: los autoensamblados de nanohilos de plata (Fig. 1). En dicha concreción, la red o entramado de hilos nanométricos es compleja y hay evidencia experimental que indica que, en las intersecciones entre nanohilos, se forman zonas de resistencia modulable. Es decir, la respuesta eléctrica de las juntas formadas en las intersecciones entre los nanohilos sería equiparable al comportamiento memristivo.

La plataforma se desarrolla bajo la premisa que la respuesta eléctrica macroscópica de las redes de memristores, definidas mediante distribuciones convenientemente seleccionadas, se asemeja a la obtenida en los autoensamblados de nanohilos. Evidentemente ello implica una adecuada elección de la conectividad y la dimensionalidad de la red en cuestión. En ese sentido, es importante destacar que este primer trabajo se enfoca en redes sencillas compuestas por una moderada cantidad de memristores, fuertemente idealizados. Esta estrategia facilita la interpretación de los resultados obtenidos que, no obstante las simplificaciones mencionadas, comienzan a evidenciar la complejidad del sistema y permiten elaborar recomendaciones en la implementación de los protocolos eléctricos aplicados al sistema experimental. La obtención de resultados equiparables a aquellos obtenidos experimentalmente requerirá el escalado posterior de la cantidad de memristores y la paralelización consecuente del código empleado.

II. METODOLOGÍA

La plataforma de simulación consiste en un código desarrollado en Python que define unidades memristivas y las interconecta empleando una cierta distribución (Fig. 2). El usuario puede definir la posición de los dos nodos eléctricamente accesibles y la señal externa aplicada. La respuesta

eléctrica del sistema dependerá de todos esos factores y del modelo memristivo programado, lo cual incluye una formulación matemática específica y la elección de los parámetros a emplear.

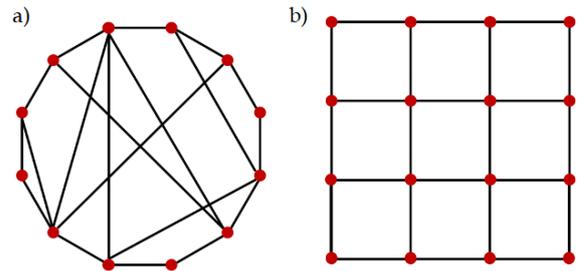


FIG. 2: Ejemplos de distribuciones de distinto tipo: (a) small-world y (b) grilla bidimensional. Una vez generada la red, los memristores se ubican en las aristas que conectan cada par de nodos.

La forma funcional, amplitud y ubicación de los electrodos de la señal eléctrica aplicada, así como la distribución de memristores, sus estados resistivos iniciales y las leyes de Kirchhoff, determinan las caídas de tensión entre cada par de nodos y, consecuentemente, la evolución resistiva de la red. Por cada paso de simulación, la plataforma genera dos tipos de cantidades. Un indicador global: la **resistencia de la red**, cuantificada como la tensión aplicada entre los dos nodos accesibles dividida por la corriente que circula entre ellos, y un indicador local: el **estado resistivo de cada unidad memristiva**. Cada uno de estos indicadores posee una contrapartida experimental. Una medición eléctrica efectuada a dos terminales es equiparable a la **resistencia de la red** y un mapa de microscopía de fuerza atómica conductora podría contrastarse con la información local relativa al **estado de cada unidad memristiva**. Además, la disponibilidad de los dos tipos de indicadores permite interpretar la respuesta global en función de la distribución de estados memristivos individuales.

Modelo individual

Las redes se conforman como colecciones de elementos memristivos individuales. En este caso particular, se eligió el modelo VEOV [14], aunque la plataforma está modularizada de tal manera que el modelo sería fácilmente intercambiable. La elección radica fundamentalmente en su plasticidad para implementar las características de las juntas de nanohilos y las modificaciones ambientales de interés [14]. Originalmente, el modelo VEOV fue diseñado para memristores basados en óxidos de metales de transición. En ellos, la modulación de la población de vacancias de oxígeno (VO) determina el estado resistivo del memristor. En dichos materiales, las VO actúan como dopantes en una matriz dieléctrica homogénea. La distribución de las VO se determina mediante una probabilidad de migración entre regiones que depende de la tensión aplicada, la densidad local de vacancias y la energía de activación [14]. La ubicación de esas VO, combinada con la asignación de resistividades diferenciales dependiendo de la posición que ocupen dentro de la estructura, definen el estado resistivo del memristor en cuestión.

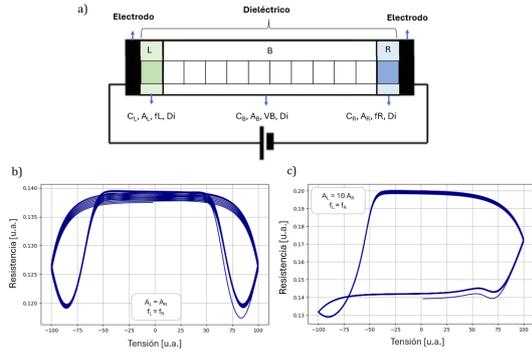


FIG. 3: Modelo memristivo individual. (a) Representación esquemática del modelo VEOV para un memristor. Se modela una estructura capacitiva mediante la discretización del dieléctrico en celdas con distintas propiedades microscópicas. (b) y (c) Estado resistivo de un único memristor (total de celdas) en función de la tensión aplicada en los casos en que las interfaces (L y R) se definen con características simétricas y asimétricas, respectivamente.

El modelo utilizado fue desarrollado por Rozenberg *et al.* [14] y consiste en un conjunto unidimensional de C celdas que dividen artificialmente el dieléctrico (representado esquemáticamente en la Fig.3a). Dos regiones, L y R, próximas a los contactos eléctricos se distinguen de una zona central B. Cada una de las regiones tiene asociada una cantidad de parámetros que, en el presente trabajo ¹, han sido restringidos a la cantidad de celdas C_x , la resistividad A_x y la movilidad. Esta última se define en función del valor de la zona central V_B , con factores f_L y f_R en la proximidad de los electrodos respectivos. La resistencia de estas tres regiones es dependiente de la densidad de VO, por lo que, según la condición inicial definida y los estímulos aplicados, el sistema evolucionará mediante la migración de vacancias entre las regiones y una potencial conmutación entre distintos estados resistivos del memristor [14]. La población inicial de vacancias se define empleando el parámetro D_x . Adicionalmente, la rutina define las características de la señal eléctrica externa aplicada, pudiendo elegirse: la tensión máxima (V_{max}), la polaridad, el incremento y la cantidad de ciclos o repetición. Todas estas cantidades se definen en unidades arbitrarias, con el objetivo de lograr que el sistema converja y pueda obtenerse una respuesta estable luego de algunos ciclos transitorios ². La elección de los valores relativos de resistividad (A_L y A_R) y movilidad (f_L y f_R) determinan la simetría en la estructura memristiva y, consecuentemente, los estados memristivos accesibles. Así, por ejemplo, las Figs. 3b y 3c presentan el estado resistivo de un único memristor (cuantificado como la suma de la resistencia de las C celdas que discretizan el dieléctrico) como función del valor de voltaje externo aplicado. La señal de voltaje consiste en una función triangular periódica de 100 u.a. de amplitud con un paso de 1 u.a. y 5 ciclos de repetición ³. La Fig. 3b ilustra el comportamiento obtenido en una estructura com-

¹Este trabajo forma parte de la tesis de maestría de Jonathan Furlanetto [15].

²Más detalles sobre los parámetros empleados así como sus valores de referencia pueden hallarse en el repositorio <https://github.com/jfurlanetto/Tesis-Modelo-VEOV>.

³Es de destacar que se omite la respuesta obtenida durante los dos primeros ciclos por considerarse un régimen transitorio.

pletamente simétrica (hay coexistencia de distintos estados resistivos pero éstos se desvanecen en la condición de remanencia $V = 0$ u.a.). La Fig. 3c, en cambio, manifiesta la existencia de dos estados resistivos remanentes claramente distinguibles:

$$R_{rem} = \begin{cases} 0.20 \text{ u.a.} \\ 0.14 \text{ u.a.} \end{cases} \quad (1)$$

producto de la asimetrización de la estructura individual del memristor. En ese caso particular, la resistividad de la región L es un orden de magnitud mayor que la de R, dando origen a los dos estados remanentes indicados en la ec. 1 que identificaremos como alta y baja resistencia.

Adaptación del modelo e incorporación de condiciones ambientales

Las juntas de nanohilos de plata, separados por vestigios poliméricos y productos de la oxidación del metal, se asemejan a la estructura capacitiva habitual de los memristores experimentales. No obstante, en este caso es preciso revisar los mecanismos de conducción y conmutación involucrados.

Como se dijo anteriormente, el modelo VEOV fue desarrollado para memristores basados en óxidos de metales de transición con dieléctricos homogéneos. Las evidencias experimentales indican que, en dicho caso, la migración de especies iónicas (tales como las vacancias de oxígeno) es responsable de la conmutación entre distintos estados resistivos. El movimiento de dichas especies, modulado por la señal eléctrica externamente aplicada, favorece o perjudica la conducción electrónica entre los electrodos metálicos que completan la estructura.

En cambio, en el caso experimental de interés, no hay evidencia concluyente sobre cuáles son los mecanismos de conducción y conmutación en las juntas formadas entre los nanohilos metálicos. Los residuos poliméricos del proceso de fabricación persisten en las juntas. Además, las condiciones de fabricación, post-procesamiento y conservación de las muestras resultan favorables para la oxidación de la plata. Dado que cada una de estas dos situaciones puede -por sí misma- determinar la formación de películas dieléctricas entre los nanohilos, el material que conforma las juntas puede no ser homogéneo. Mientras que en los polímeros las especies iónicas poseen una movilidad alta [16, 17], pudiendo incluso actuar como portadores, en los óxidos simples, éstas serían las que habilitan los estados disponibles para la conducción basada en electrones [14]. Por simplicidad, en este trabajo asumiremos que la conducción se debe a la circulación electrónica y la conmutación se debe a las vacancias móviles.

Partiendo de la hipótesis de que la movilidad de las vacancias se incrementa con la energía térmica disponible (entre otros factores) [18], se incorpora al modelo de manera cualitativa la influencia de la temperatura ambiente sobre las probabilidades de salto de las VO. Ello afecta la operación de conmutación y se implementa en el modelo aplicando un factor multiplicativo. Éste permite modificar el valor efectivo de la movilidad de las vacancias dentro del rango de convergencia del modelo.

Por su parte, en lo referente al impacto de la tempera-

tura en el mecanismo de conducción, debemos contemplar los siguientes aspectos. En primer lugar, incluso en el caso de los semiconductores más sencillos, la dependencia de la resistencia con la temperatura no es trivial y responde a una serie de factores tales como el aumento de la *movilidad* de los portadores (electrones y huecos) así como el aumento de la *cantidad* de portadores (por la generación de pares electrón-hueco) aunque también por la presencia de impurezas e imperfecciones en la red [19]. Sumando complejidad a dicho escenario, si bien asumiremos que la conducción a través de las juntas es electrónica no podemos desconocer el rol de las especies iónicas que actúan como mediadoras. Sea por la agitación térmica que produce la temperatura en los niveles accesibles para los electrones, por las vibraciones de la red debidas a la energía adicional o por el aumento del *scattering* que podría observarse en la interfaz entre polímeros y óxidos de plata (ambos probablemente presentes en la junta) habremos de asumir que el efecto neto del aumento de la temperatura es un aumento monótono de la resistencia. A fin de reflejar este comportamiento en el modelo computacional se propuso un factor de temperatura en la conducción (FTC) que varía la resistencia específica de las celdas de cada memristor linealmente con la temperatura.

La humedad ambiente, por su parte, es interpretada en términos de la capacidad del dieléctrico para captar o liberar especies iónicas. Por eso, a fin de modelizar su influencia se incorpora la posibilidad de incrementar o decrementar la cantidad de VO mediante la adición de una celda adicional, que actúa como un reservorio de VO, y que se ubica en contacto con una de las regiones externas del memristor individual [20]. La dinámica del intercambio de vacancias entre el memristor y el reservorio está determinada por la misma probabilidad de salto de las VO empleada entre las celdas interiores. La celda adicional o reservorio no es computada para el cálculo de la resistencia total del memristor.

Habiendo especificado las condiciones en que se implementará el modelo memristivo individual, considerando las particularidades del sistema experimental de interés y las condiciones ambientales, procedemos ahora a analizar la respuesta eléctrica de la red de memristores ensamblados según distribuciones sencillas de distintas dimensiones.

III. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Atendiendo a las restricciones de longitud del presente trabajo, aquí nos enfocamos en el comportamiento de redes de memristores con forma de grilla bidimensional, de dimensiones moderadas y con dos nodos eléctricamente accesibles. El lector interesado puede ahondar en el comportamiento de configuraciones más complejas consultando la Ref.[15]. Como lo indica la Fig. 4, los memristores se ubican entre nodos distribuidos en un arreglo de filas y columnas. La señal externa se aplica entre dos nodos, considerados externamente accesibles, cuya ubicación es definida por el usuario.

La Fig. 4 incluye dos redes de memristores de 3×3 nodos. En la Fig. 4a la fuente se conecta entre el primer nodo de la malla (N1, nodo superior izquierdo), y el último nodo en la diagonal opuesta (N9, nodo inferior derecho). Si todos los memristores son iguales (tanto el modelo empleado,

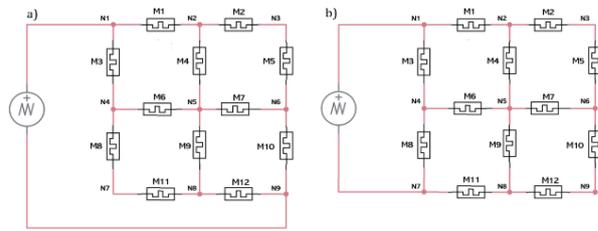


FIG. 4: Dos redes de memristores con forma de grilla bidimensional (3×3 nodos). La fuente externa puede conectarse entre cualquier par de nodos. Por ejemplo: entre los extremos de la diagonal (a) o en la primera y última fila de una misma columna (b).

sus parámetros y su estado inicial), la configuración resulta geoméricamente simétrica respecto de la diagonal. Como se verá más adelante, a pesar de mantenerse inalterada la distribución y configuración de los memristores individuales, en la Fig. 4b el cambio de posición de los nodos accesibles afectará en la distribución lateral de caídas de tensión y corriente.

Teniendo en cuenta las configuraciones presentadas, procedemos a realizar experimentos incrementando sucesivamente el número de nodos. Todos los memristores que conforman la red se inicializan con las mismas condiciones. Cada memristor individual se define como el presentado en la Fig. 3c. Estos experimentos equivaldrían a aumentar la densidad de nanohilos y juntas en el sistema experimental mientras se mantiene V_{\max} fijo, atendiendo a las restricciones experimentales (ya que el voltaje de las fuentes de ensayo es limitado).

Se conforman redes cuadradas de $N \times N$ nodos, se eligen los dos nodos accesibles, se configura la condición inicial de cada memristor de manera homogénea en la red y, una vez que el sistema se encuentra estable ⁴, se aplican 10 ciclos de tensión alterna (triangular). La resistencia de la red se cuantifica cada vez que la señal atraviesa $V = 0$ u.a. (remanencia).

La Fig. 5 resume el comportamiento eléctrico de redes cuadradas (Fig. 4) de dimensiones crecientes. La misma presenta los estados resistivos remanentes de las redes cuya dimensión lateral se especifica en el eje de las abscisas (N).

En todos los experimentos resumidos en la Fig. 5a la fuente se conecta simétricamente como lo indica la Fig. 4a mientras que en aquellos reflejados en la Fig. 5b la conexión corresponde a aquella representada en la Fig. 4b.

A grandes rasgos la Fig. 5a posee dos características notables: una tendencia general a estabilizar la resistencia (la envolvente puede considerarse asintótica) y una reducción sistemática de los valores asociados a redes de dimensión lateral par con respecto a su caso inmediato anterior. Analicemos cada uno de estos aspectos con mayor detalle.

La resistencia de la red es mínima cuando la red está conformada por un único memristor ('1'). A medida que aumenta la dimensión lateral de la red (N) la resistencia aumenta. Dado que a cada red se le aplican 10 ciclos de una señal triangular de amplitud 1500 u.a., los estados resisti-

⁴Como mencionamos en el caso del memristor individual, los primeros ciclos se consideran transitorios ya que permiten estabilizar la distribución de vacancias. A continuación, el sistema sigue evolucionando pero con una variabilidad menor.

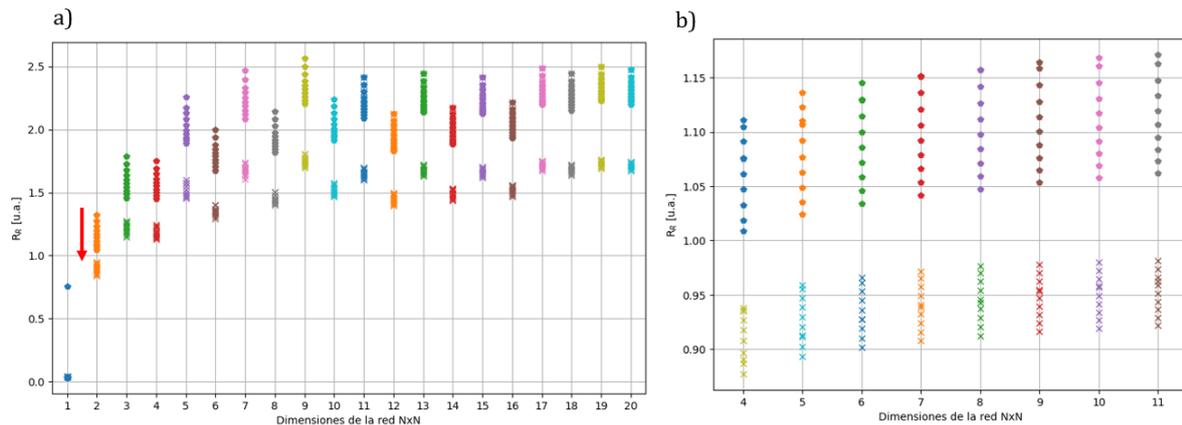


FIG. 5: Resistencia remanente de redes bidimensionales con forma de grilla ($N \times N$) en función de la dimensión lateral de la red, N . Los experimentos cuyos resultados se resumen en (a) y (b) corresponden a los esquemas de conexión de la fuente indicados en las Figs. 4(a) y 4(b), respectivamente. La flecha en el caso de $N = 2$ de (a) ilustra el sentido de evolución conforme progresan los ciclos.

vos altos (círculos) y bajos (cruces) evolucionan conforme transcurren los ciclos de tensión. Una flecha en el caso de $N = 2$ ilustra el sentido de evolución conforme progresan los ciclos. Así para cada N fijo, se observa una paulatina disminución de la resistencia debida al reacondicionamiento de las vacancias en el volumen del dieléctrico. Este comportamiento puede explicarse apelando a la evolución del estado interno de las distintas unidades memristivas. La Fig. 6 presenta la resistencia en función de la tensión desplegada para los 10 ciclos aplicados para los memristores M1 y M8 de una red de 3×3 . Cualitativamente puede notarse cierta semejanza entre las respuestas de estructuras simétricas y asimétricas. Cuantitativamente, puede notarse en los valores del eje x que la tensión máxima aplicada a cada uno de ellos es distinta. Si bien ambos memristores se definen iguales y asimétricos, la diferencia en los estados resistivos individuales alcanzados radica en la tensión aplicada a cada uno de ellos, producto de la posición relativa que ocupan en la red (y, en particular, con respecto a la ubicación de la fuente). El memristor M1 que está sujeto a una mayor variación de tensión, presenta dos estados resistivos remanentes (recordemos que R_{rem} se mide a $V = 0$ u.a.) que se distinguen en un 30 %,

$$R_{rem}^{M1} = \begin{cases} 1.20 \text{ u.a.} \\ 0.80 \text{ u.a.} \end{cases} \quad (2)$$

Respecto al perfil aserrado de la resistencia remanente que se observa en la Fig. 5a, conforme aumenta el número de nodos, consideramos que el conexionado de la fuente en diagonal a la red (Fig. 4a) genera una simetrización en las caídas de tensión e hipotetizamos que esto se debe a un efecto de la geometría de la red y su conexionado según se alterna la cantidad de nodos pares e impares. El agregado de nodos adicionales incrementa la cantidad de memristores pero por una combinación de geometría de conexión y elección de nodos accesibles resulta equivalente a la conexión de memristores en paralelo que disminuyen la resistencia del conjunto. Para probar esta hipótesis repetimos los experimentos pero utilizando el conexionado de la Fig. 4b. Tal como se puede observar en la Fig. 5b la resistencia remanente de la red aumenta de manera uniforme, validando

la explicación ofrecida. Esto es particularmente interesante por sus implicancias experimentales, pues indica que la resistencia de la red no necesariamente aumenta de manera monótona con la densidad de juntas. De hecho, en el caso experimental, no se conoce la distribución de juntas de antemano ni tampoco se puede asegurar la uniformidad de todas ellas, sugiriendo un nivel de complejidad difícilmente apreciable mediante la sola utilización de la información macroscópica de la resistencia de la red (empleando sólo dos terminales)

Es importante destacar que el valor de saturación observado en las Figs. 5a y 5b es distinto. Esto implica que, dependiendo de la ubicación de los nodos entre los que se aplica la señal eléctrica externa, el estado resistivo remanente de la red puede diferir dejando de manifiesto que dicha medición macroscópica constituye un pobre indicador de la composición de la red.

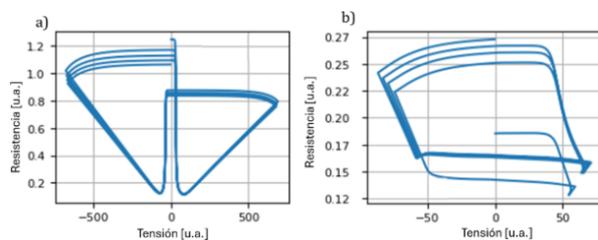


FIG. 6: Resistencia individual en función de la tensión de los memristores (a) M1 y (b) M8 en una red cuadrada de 3×3 con conexión simétrica de la fuente de alimentación (Fig. 4a).

Condiciones ambientales

Como se explicó previamente, se consideraron los efectos de la temperatura en el mecanismo de conmutación mediante su influencia en la movilidad de las vacancias. Para analizar el impacto de la temperatura en las redes de memristores, se llevó a cabo una serie de experimentos variando el parámetro que define la movilidad de las vacancias en una red de 5×5 nodos con un voltaje máximo constante ($V_{max} = 1500$ u.a.). En la Fig. 7a se grafica la resistencia remanente de una red 5×5 en función de la movilidad de las vacancias. Como se puede observar, la resistividad de la red disminuye conforme aumenta la movilidad de las

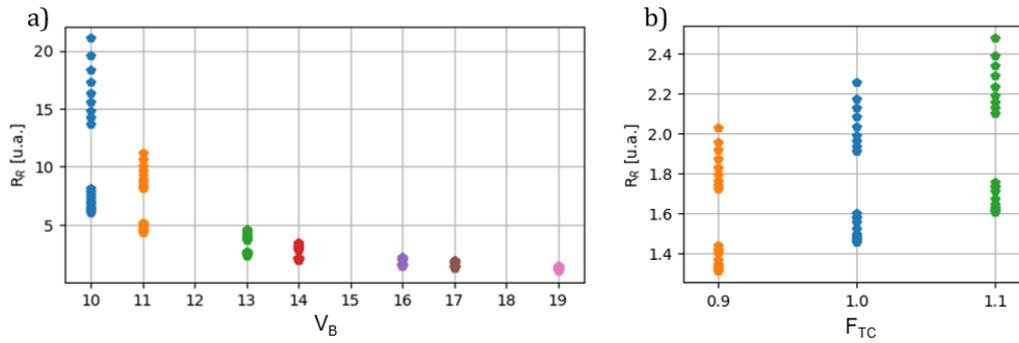


FIG. 7: Variaciones en la respuesta eléctrica de redes de 5×5 en función de condiciones ambientales. (a) Resistencia remanente en función de la movilidad de las vacancias (refleja el impacto de la temperatura en el mecanismo de conmutación). (b) Resistencia remanente en función del FTC (refleja el impacto de la temperatura en el mecanismo de conducción).

vacancias. Una mayor movilidad de las VO implica que cada semiciclo de tensión positiva y negativa puede llenar y vaciar las celdas interfaciales asociadas a cada barrera de potencial con mayor facilidad. Por lo tanto, la persistencia de las vacancias que se refleja en la resistencia remanente medida al apagar la fuente externa (condición $V = 0$ u.a.) es menor y la ventana que distingue a los estados asimétricos (de alta y baja resistencia) se desvanece, véase la Fig. 7a.

Por otra parte, los experimentos efectuados empleando distintos valores del factor FTC se resumen en la Fig. 7b. En ese caso, es sencillo identificar que el factor multiplicativo aplicado a la resistividad impacta en la resistencia de cada memristor y, consecuentemente, en la resistencia global de la red de manera directamente proporcional.

Finalmente, se ejecutaron experimentos en redes de 5×5 destinados a analizar la influencia de la humedad. Sin embargo, los estados resistivos de la red no resultaban estables por tratarse de un sistema abierto. La falta de convergencia del modelo memristivo individual de las unidades que conformaban la red implicaba una demanda computacional que resultó excesivamente elevada, impidiendo la obtención de resultados satisfactorios. Esto ha sido reportado anteriormente por otros autores [20]. No obstante, debe aclararse que un análisis cualitativo del modelo memristivo implementado permitía prever la obtención de resultados inconsistentes con los indicios experimentales. En nuestro modelo, la humedad se introduce como la disponibilidad de VO cuya probabilidad de absorberse o liberarse depende del valor configurado al interior del dieléctrico. De la absorción o liberación de VO, indirectamente vinculado con la resistencia memristiva individual, depende el valor de la resistencia remanente de la red. No obstante, Díaz Schneider *et al.* [21] mostraron experimentalmente que la resistencia de la red disminuye de manera sostenida a medida que aumenta la humedad. Los argumentos ofrecidos en dicho trabajo apelan a la mediación de las moléculas de agua en la electroquímica de la juntura, un aspecto que dista de la modelización fenomenológica implementada en la presente plataforma. Probablemente este aspecto particular deba ser abordado apelando a un modelo más detallado respecto a la naturaleza de los materiales en las juntas.

IV. CONCLUSIONES

Durante el transcurso de este trabajo se implementó una plataforma numérico-computacional que simula el comportamiento de redes de memristores. Tanto las características individuales de los memristores como los experimentos planteados mantienen una relación de correspondencia con los rasgos experimentales de los autoensamblados de nanohilos de plata. Si bien la dimensionalidad de las redes y la distribución de los nodos accesibles dista de ser realista, las propiedades materiales de las juntas así como el potencial impacto de las condiciones ambientales fueron definidas según el conocimiento que se tiene del sistema experimental.

Empleando la plataforma para conducir experimentos con redes bidimensionales de memristores y analizando la información resultante, expresada como la resistencia de la red medida a dos terminales y los estados resistivos de cada memristor individual, se logró interpretar la respuesta eléctrica de las redes en las distintas situaciones exploradas. El aumento de las dimensiones de la red, equivalente al aumento de la densidad de nanohilos en el sistema experimental, presenta un aumento inicial de la resistencia que luego se estabiliza. Este efecto se debe a la elección de un voltaje máximo aplicado que, conforme aumenta la cantidad de memristores de la red, implica una caída de tensión menor para cada uno de ellos. Eventualmente, la caída de tensión por unidad memristiva es tan pequeña que no logra modificar el estado resistivo de cada memristor, estabilizando el valor de resistencia en torno a la sumatoria de estados resistivos iniciales determinada por la conexión particular empleada. Por otra parte, es notable el efecto que produce la localización de los nodos accesibles en los que se aplica la señal externa. La comparación entre los resultados obtenidos para redes de igual dimensión y características memristivas pero estimuladas por medio de nodos con distinta ubicación enfatiza el rol de la distribución interna de las caídas de tensión.

Los efectos que la temperatura provoca en la respuesta de la red se abordaron de manera cualitativa demostrando que incluso pequeños cambios impactan no sólo en los valores resistivos sino en la propia capacidad de presentar múltiples estados remanentes distinguibles.

Finalmente, a pesar de haber alcanzado exitosamente la simulación de redes de hasta 20×20 nodos, compuesta

por 760 memristores, los requisitos computacionales experimentan un crecimiento proporcional al escalado de las dimensiones de la red. En este sentido, el modelo implementado en Python exhibe una notable escalabilidad y permite su fácil paralelización para operar en un clúster de computadoras. Esta característica facilitará la exploración y análisis de redes de mayor envergadura y complejidad, generando nuevas perspectivas y oportunidades de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Juan Ignacio Díaz Schneider y a Pablo Levy por las discusiones que alimentaron la reflexión sobre la tesis de maestría que le da origen a esta publicación. Este trabajo fue económicamente apoyado por los siguientes instrumentos: ANPCyT-FONCyT PICT 2021-0876, PICT 2018-02366 y PICT INVI-2022-01097, CONICET PIBAA 2022-2023 28720210100975CO y PIP 2023-2025 11220220100508CO .

REFERENCIAS

- [1] Y. LeCun, Y. Bengio y G. Hinton. Deep learning. *Nature* **521**, 436-444 (mayo de 2015). ISSN: 1476-4687. <http://dx.doi.org/10.1038/nature14539>.
- [2] K. Roy, A. Jaiswal y P. Panda. Towards spike-based machine intelligence with neuromorphic computing. *Nature* **575**, 607-617 (nov. de 2019). ISSN: 1476-4687. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-1677-2>.
- [3] D. Ielmini y V. Milo. en *Handbook of Memristor Networks* 495-525 (Springer International Publishing, 2019). ISBN: 9783319763750. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-76375-0_17.
- [4] D. Marković, A. Mizrahi, D. Querlioz y J. Grollier. Author Correction: Physics for neuromorphic computing. *Nature Reviews Physics* **3**, 671-671 (jul. de 2021). ISSN: 2522-5820. <http://dx.doi.org/10.1038/s42254-021-00358-7>.
- [5] D. V. Christensen, R. Dittmann, B. Linares-Barranco, A. Sebastian, M. Le Gallo, A. Redaelli, S. Slesazeck, T. Mikolajick, S. Spiga, S. Menzel, I. Valov, G. Milano, C. Ricciardi, S.-J. Liang, F. Miao, M. Lanza, T. J. Quill, S. T. Keene, A. Salleo, J. Grollier, D. Marković, A. Mizrahi, P. Yao, J. J. Yang, G. Indiveri, J. P. Strachan, S. Datta, E. Vianello, A. Valentian, J. Feldmann, X. Li, W. H. P. Pernice, H. Bhaskaran, S. Furber, E. Neftci, F. Scherr, W. Maass, S. Ramaswamy, J. Tapson, P. Panda, Y. Kim, G. Tanaka, S. Thorpe, C. Bartolozzi, T. A. Cleland, C. Posch, S. Liu, G. Panuccio, M. Mahmud, A. N. Mazumder, M. Hosseini, T. Mohsenin, E. Donati, S. Tolu, R. Galeazzi, M. E. Christensen, S. Holm, D. Ielmini y N. Pryds. 2022 roadmap on neuromorphic computing and engineering. *Neuromorphic Computing and Engineering* **2**, 022501 (mayo de 2022). ISSN: 2634-4386. <http://dx.doi.org/10.1088/2634-4386/ac4a83>.
- [6] S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* (Prentice Hall, 1999).
- [7] Y. V. Pershin y M. Di Ventra. Self-organization and solution of shortest-path optimization problems with memristive networks. *Physical Review E* **88** (jul. de 2013). ISSN: 1550-2376. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.013305>.
- [8] H. G. Manning, F. Niosi, C. G. da Rocha, A. T. Bellew, C. O'Callaghan, S. Biswas, P. F. Flowers, B. J. Wiley, J. D. Holmes, M. S. Ferreira y J. J. Boland. Emergence of winner-takes-all connectivity paths in random nanowire networks. *Nature Communications* **9** (ago. de 2018). ISSN: 2041-1723. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-05517-6>.
- [9] A. Diaz-Alvarez, R. Higuchi, P. Sanz-Leon, I. Marcus, Y. Shingaya, A. Z. Stieg, J. K. Gimzewski, Z. Kuncic y T. Nakayama. Emergent dynamics of neuromorphic nanowire networks. *Scientific Reports* **9** (oct. de 2019). ISSN: 2045-2322. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-51330-6>.
- [10] R. Zhu, J. Hochstetter, A. Loeffler, A. Diaz-Alvarez, T. Nakayama, J. T. Lizier y Z. Kuncic. Information dynamics in neuromorphic nanowire networks. *Scientific Reports* **11** (jun. de 2021). ISSN: 2045-2322. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-92170-7>.
- [11] L. Chua. Memristor-The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory* **18**, 507-519 (1971). ISSN: 0018-9324. <http://dx.doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>.
- [12] C. Yakopcic, T. M. Taha, G. Subramanyam y R. E. Pino. en *Advances in Neuromorphic Memristor Science and Applications* 211-244 (Springer Netherlands, 2012). ISBN: 9789400744912. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4491-2_12.
- [13] J. J. Yang, D. B. Strukov y D. R. Stewart. Memristive devices for computing. *Nature Nanotechnology* **8**, 13-24 (dic. de 2012). ISSN: 1748-3395. <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2012.240>.
- [14] M. J. Rozenberg, M. J. Sánchez, R. Weht, C. Acha, F. Gomez-Marlasca y P. Levy. Mechanism for bipolar resistive switching in transition-metal oxides. *Physical Review B* **81** (mar. de 2010). ISSN: 1550-235X. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.115101>.
- [15] J. Furlanetto. *Modelización de sistemas neuromórficos altamente interconectados* <https://nuclea.cnea.gov.ar/items/d04f35fa-246b-412e-a045-8c6b8035a2f3>.
- [16] I. Roppolo, M. Castellino, K. Bejtka, G. Rizza, D. Perro-ne, P.-E. Coulon, A. Chiappone, K. Rajan, S. Bocchini, C. Ricciardi, C. F. Pirri y A. Chiolerio. Resistive Switching in Polymer Nanocomposites by Matrix-Controlled in Situ Nanoparticles Generation. *The Journal of Physical Chemistry C* **121**, 14285-14295 (jun. de 2017). ISSN: 1932-7455. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02981>.
- [17] Q. M. Saqib, M. U. Khan y J. Bae. *Polymer Nanocomposites for Resistive Switching Memory* mar. de 2021. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527826490.ch8>.
- [18] S. Zafar, R. E. Jones, B. Jiang, B. White, P. Chu, D. Taylor y S. Gillespie. Oxygen vacancy mobility determined from current measurements in thin Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ films. *Applied Physics Letters* **73**, 175-177 (jul. de 1998). ISSN: 1077-3118. <http://dx.doi.org/10.1063/1.121746>.
- [19] D. Klaassen. A unified mobility model for device simulation—II. Temperature dependence of carrier mobility and lifetime. *Solid-State Electronics* **35**, 961-967 (jul. de 1992). ISSN: 0038-1101. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90326-8](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101(92)90326-8).
- [20] M. Leal Martir. *Estudio del comportamiento memristivo en films bicapa TiOx/TaOx* Tesis doct. (Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2021). https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/seminario/document/seminario_nFIS000130_LealMartir.

- [21] J. I. Diaz Schneider, P. C. Angelomé, L. P. Granja, C. P. Quinteros, P. E. Levy y E. D. Martínez. Resistive Switching of Self-Assembled Silver Nanowire Networks Governed by Environmental Conditions. *Advanced Electronic Materials* **8** (ago. de 2022). ISSN: 2199-160X. <http://dx.doi.org/10.1002/aelm.202200631>.