

UNA SINAPISIS ELECTRÓNICA

BASILIO A. KOTSIAS

E-mail: kotsias@yahoo.com

La Inteligencia Artificial (IA) ha llegado para quedarse, aunque aún sabemos poco sobre ella. Su funcionamiento es opaco, ya que quienes la utilizan no la programan -de allí lo difícil de su interpretación- y desconocemos las referencias en las que se basa para generar sus respuestas. A esto se suma la abundante vaguedad y ambigüedad presentes en los libros y artículos que proliferan sobre el tema: un vasto territorio aún por explorar, en el que emergen voces que prometen avances deslumbrantes, mientras que otras, similares a las de los predicadores, advierten que podría socavar los cimientos de nuestra civilización. En este dilema nos encontramos al abordar el tema de la potenciación a largo plazo (LTP, por sus siglas en inglés), como modelo de “chips neuromórficos”, basados en el uso del memristor, un componente electrónico que, con ciertas reservas, puede imitar la interacción entre las neuronas del cerebro. Esta propuesta difiere de las redes neuronales tradicionales, que son un *software* estadístico implementado en el *hardware* de la computación estándar, ya que se trata de un dispositivo físico con una arquitectura novedosa, utilizado en aplicaciones de IA.

Recordemos que la potenciación a largo plazo (LTP, por sus siglas en inglés) es un aumento persistente en la amplitud de la transmisión sináptica glutamatérgica, que ocurre tras una estimulación de alta frecuencia de los axones presinápticos y la consecuente despolarización de la neurona postsináptica. Fue descubierta hace más de medio siglo por Bliss y Lomo en el hipocampo de conejos, y con el tiempo se ha demostrado su ubicuidad en diversas áreas cerebrales y especies estudiadas^{1,2}. La LTP se caracteriza por su rápida inducción: en menos de 1 segundo ya es detectable, y el fenómeno puede durar desde

minutos hasta días, dependiendo de la especie, la metodología utilizada y otros factores.

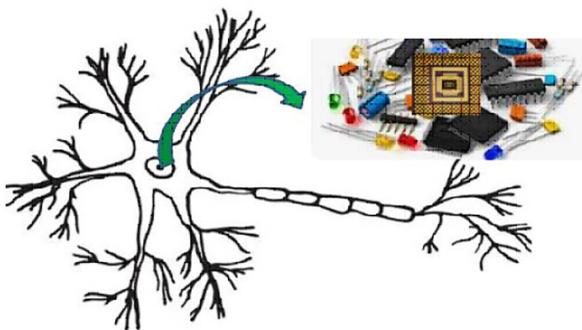
La LTP ocurre en las dendritas, cuando se activan los canales iónicos NMDA y AMPA, que son transportadores de Ca^{2+} . Esto sucede tanto por la despolarización postsináptica generada por los estímulos presinápticos como por la propagación retrógrada de un potencial de acción desde el soma hacia las sinapsis a través de las dendritas^{3,4}. El influjo de Ca^{2+} conduce a una mayor liberación de neurotransmisores y, por ende, a una mayor amplitud de la respuesta sináptica.

La LTP es específica para las neuronas involucradas y puede ser inducida por un estímulo que recluta un mayor número de axones, lo que a su vez estimula más intensamente a la neurona postsináptica (cooperatividad). Estas propiedades hacen que la LTP sea una de las principales bases celulares de la memoria y el aprendizaje³, en el marco de la plasticidad neuronal, que es la capacidad de ajustar la respuesta de las neuronas a los estímulos que reciben.

El memristor, un término derivado de la combinación de las palabras “memoria” y “resistencia”, es un componente electrónico pasivo cuya resistencia varía en función de la cantidad de carga que ha pasado a través de él, es decir, de su “historia”. Este comportamiento es similar al de la neurona postsináptica cuando es estimulada, tal como se describió más arriba. Su composición se caracteriza principalmente por un material de transición, el óxido de titanio (TiO_2), en el que los iones de oxígeno y titanio se desplazan dentro del material bajo la influencia de un campo eléctrico. Este desplazamiento altera la estructura del material y, por lo tanto, su resistencia, todo ello con un bajo consumo energético. El memristor “recuerda” su estado y actúa en

consecuencia, permitiendo el paso de mayor o menor corriente eléctrica, y este cambio persiste incluso cuando se corta la corriente. Por esta razón, se considera una memoria “no volátil”^{5,6} y es clave en la construcción de circuitos electrónicos diseñados para las aplicaciones de la IA (Figura).

La estructura del memristor lo acerca al funcionamiento de los procesos sinápticos que generan la LTP. Así, una mayor resistencia eléctrica del mismo reduce la corriente transportada en el circuito electrónico del que forma parte, de manera similar a lo que ocurre con una menor actividad sináptica. Por el contrario, cuando su resistencia eléctrica es baja, se obtiene una mayor respuesta, lo que refleja un aumento en la transmisión sináptica. Esta propiedad, que per-



mite que el memristor modifique su resistencia y, por lo tanto, su respuesta, se asocia en los dispositivos electrónicos y en las redes neuronales con el concepto de peso o fuerza sináptica⁷.

Estos dispositivos neuromórficos se emplean en sistemas de estimulación eléctrica para lesiones medulares, como aquellos que utilizan prótesis o exoesqueletos con una interfaz cerebro-computadora. La interfaz captura las señales cerebrales, las procesa mediante el “chip simulador” y las traduce en impulsos eléctricos, los cuales estimulan los segmentos de la médula espinal que se han desconectado de los centros nerviosos superiores. Este proceso ocurre en tiempo real, adaptándose a las necesidades del paciente y mejorando la respuesta del dispositivo ante los intentos de movimiento⁸.

Así, tanto la LTP como sus análogos en forma de chips neuromórficos permiten que las neuronas motoras reconozcan los patrones de sus aferencias, facilitando, por ejemplo, una contracción muscular más fuerte y precisa, en función de la experiencia y el entrenamiento. Dos dominios, uno biológico y el otro electrónico, comparten un principio básico de adaptación a la actividad previa, tanto en la estructura química del memristor como en la maquinaria sináptica neuronal. El futuro ya ha llegado y en lo que se refiere a estas aplicaciones, para el bien.

Bibliografía

1. Bliss TV, Lomo T. Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol* 1973; 232: 331-56.
2. Dringenberg HC. The history of long-term potentiation as a memory mechanism: Controversies, confirmation, and some lessons to remember. *Hippocampus* 2020; 9: 987-1012.
3. Caya-Bissonnette L, Béique J-C. Half a century legacy of long-term potentiation. *Curr Biol* 2024; 34: R640-62.
4. Spruston N, Schiller Y, Stuart G, Sakmann B. Activity-dependent action potential invasion and calcium influx into hippocampal CA1 dendrites. *Science* 1995; 268:297-300.
5. Li D, Liang X. Neurons mimicked by electronics. *Nature* 2018; 554 :472-3.
6. Duan X, Cao Z, Gao K, et al. Memristor-based neuromorphic chips. *Adv Mater* 2024; 36: e2310704.
7. Park S-O, Jeong H, Park J. Experimental demonstration of highly reliable dynamic memristor for artificial neuron and neuromorphic computing. *Nat Commun* 2022; 13: 2888.
8. Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface. *Nature* 2023; 618: 126-33.