

PROCESO DE LA GENERACIÓN DE UN SPIKE EN UNA NEURONA BIOLÓGICA

Candidato a Ingeniero en Biónica
Barranco Alavez Nohemi, Dr. en C. Álvaro Anzueto Ríos
Unidad Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas
Instituto Politécnico Nacional
nohemib2702@gmail.com, aanzueto@ipn.mx

Boletín No. 98, 1º de septiembre de 2023

Resumen

Desde sus comienzos las redes neuronales artificiales han tenido como objetivo reproducir el comportamiento de las neuronas biológicas, así se han producido modelos simples para describir dicho funcionamiento, estos modelos tratan de emular el proceso de comunicación a través de la sinapsis y la plasticidad sináptica, y la modificación o engrosado de las terminales sinápticas al producirse una actividad en ellas. Es por ello que en este trabajo se presenta una breve descripción del proceso biológico de la actividad de una neurona y se plantea una representación eléctrica, con el futuro de generar arquitecturas neuronales artificiales que se comporten mucho más apegados a las redes de neuronas biológicas. En años recientes se ha visto el incremento en trabajos que presentan estudios y aplicaciones de redes neuronales nombradas *spikings*. El estudio de estas redes surgió ante la evidencia acumulada que apuntaba a que las neuronas biológicas utilizaban el tiempo de potencial de membrana, también conocido como *spikings*, para codificar y procesar información.

1. Introducción

Las células neuronales son únicas en el sentido de que son las únicas capaces de propagar señales eléctricas a largas distancias. Una neurona recibe entradas de más de 10,000 neuronas a través de los contactos dendríticos llamados sinapsis. Además, las neuronas son capaces de activarse o generar disparos gracias a la recepción de picos, también llamados *spikes*, provenientes de otras neuronas, siendo esta la principal forma de comunicación entre ellas.

Al entender cómo se comporta una neurona biológica y conocer el mecanismo a través del cual se comunican con otras neuronas, los modelos de redes neuronales artificiales siempre han tenido el objetivo de aproximarse al comportamiento de las neuronas, tratando de emular el proceso de comunicación a través de las sinapsis. Así, los modelos de redes neuronales por *spikes* (Spiking Neural Network, en inglés), han sido llamados la 3ª generación de redes neuronales artificiales, ya que, al incorporar el tiempo, aumentan la cercanía con una simulación neuronal biológica.

2. Partes de una Neurona Biológica

Una neurona, también conocida como célula nerviosa, está formada por tres partes principales: soma, dendritas y axón. Siendo el soma la parte central de esta célula, cuyo diámetro típico es de aproximadamente 20 μm , y dentro de la cual fluye una solución acuosa llamada citosol que está formada por diferentes organelos, entre ellos, el núcleo, retículo endoplasmático rugoso y suave, el aparato de Golgi y la mitocondria.

En cada neurona se encuentran unas ramas que se extienden del soma, las cuales son conocidas como dendritas. Su función es la de detectar los diferentes neurotransmisores presentes en la hendidura sináptica a partir de proteínas especializadas llamadas receptores.

Analizando las células nerviosas, llegaremos a una de sus componentes llamada axón, quien se encarga de transportar los impulsos nerviosos desde el propio cuerpo de la neurona. Los axones, debido a que pueden

conectar áreas en distintas partes del cuerpo, suelen ser largas y estar cubiertas por una capa de mielina, la cual permite aumentar la velocidad en la transmisión de las señales. Su diámetro en los humanos suele ser de entre 1 mm a 25 mm, lo cual genera una variación en la propagación de la señal eléctrica (impulso nervioso), ya que cuanto más grueso es el axón, más rápido viaja el impulso.

Todos los axones están formados por una parte inicial llamada "axon hillock", una parte intermedia (axon proper) y una parte final, llamada "axon terminal". Esta última parte se conoce como sinapsis, y es el punto de contacto entre una neurona y otra a partir de la cual comparten información.

3. Membrana Neuronal en Reposo

Comprender los mecanismos biológicos a partir de los cuales, el sistema nervioso, recopila, distribuye e integra información, es el objetivo de la neurofisiología celular.

La neurona, es la célula por medio de la cual se transmite la información a distancia mediante señales eléctricas que recorren el axón. Esta carga eléctrica es transportada por átomos cargados eléctricamente, conocidos como iones.

Gracias a las propiedades de la membrana del axón, se transporta una señal conocida como impulso nervioso o potencial de acción, los cuales tienen un tamaño y duración fijos. Las células que tienen una membrana excitable pueden generar y propagar potenciales de acción. Si el citosol al interior de la membrana está cargado eléctricamente negativo en comparación con el exterior, se dice que está en reposo, lo cual impide la generación de estos impulsos.

3.1 Movimiento de los Iones

Para generar estos potenciales de acción, la membrana celular tiene grandes moléculas de proteína que forman canales a través de los cuales los iones pueden fluir, pero se necesitan de fuerzas externas para impulsar el movimiento de los iones de sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y cloro (Cl^-), los cuales están influenciados por dos factores: la difusión y la electricidad.

La difusión, se refiere a un movimiento neto de iones desde zonas de alta a zonas de baja concentración, generando un gradiente de concentración. Por lo cual, para poder mover iones a través de la membrana, se necesita que esta tenga canales permeables a estos iones, además de que exista un gradiente de concentración entre el interior y el exterior de la membrana.

Por medio de la generación de un campo eléctrico, también se puede inducir la propagación neta de iones, esto se da gracias a que los iones son partículas cargadas eléctricamente.

Al movimiento de carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (I). La cantidad de esta corriente que fluye está determinada por el potencial y la conductancia eléctricos. La diferencia de carga entre el ánodo y el cátodo generan una fuerza sobre una partícula cargada eléctricamente, esto se conoce como potencial eléctrico (V). Una carga eléctrica tiene la capacidad de moverse de un punto a otro, lo cual se conoce como conductancia eléctrica (g) y depende de la cantidad de partículas disponibles y la facilidad con la que estas transportan carga eléctrica. Esta propiedad también es conocida como resistencia eléctrica (R), la cual se trata de la incapacidad de una carga eléctrica para moverse.

Se pueden relacionar estos tres términos a través de la Ley de Ohm como $I = gV$, esto es, si la conductancia es cero, no fluirá corriente, aunque la diferencia de potencial sea muy grande, de igual forma, si la diferencia de potencial es cero, tampoco fluirá corriente, aunque la conductancia sea muy grande.

De esta manera, el potencial de membrana V_m se trata del voltaje a través de la membrana neuronal en cualquier momento. Al ser el exterior de la neurona eléctricamente positivo con respecto al interior, se permite que el potencial de realimentación se mantenga, aunque la neurona no esté generando impulsos. Este potencial de reposo es de aproximadamente 65 mV.

Además, se conoce como potencial de equilibrio iónico (E_{ion}) a la diferencia de potencial eléctrico que equilibra un gradiente de concentración.

Referente a la generación de los potenciales de acción, es necesario mencionar 4 puntos importantes:

1. Las grandes cargas en el potencial de membrana son causadas por cambios minúsculos en las concentraciones iónicas.
2. La diferencia neta en la carga eléctrica se produce en el exterior e interior de la membrana, lo cual genera que esta almacene carga eléctrica, conocido como capacitancia.
3. Los iones pasan a través de la membrana a una velocidad que es proporcional a la diferencia entre el potencial de membrana y el potencial de equilibrio ($V_m - E_{ion}$), conocido como fuerza impulsora iónica.
4. Al conocer la diferencia de concentración en la membrana para un ion, es posible calcular el potencial de equilibrio para ese ion.

Por lo tanto, el potencial de membrana neuronal depende de las concentraciones iónicas a ambos lados de la membrana. El medio extracelular tiene una alta concentración de (Na^+) y (Cl^-) y una concentración relativamente alta de (Ca^{2+}), mientras que el espacio intracelular contiene moléculas cargadas negativamente y altas concentraciones de (K^+).

4. Potenciales de Acción

Las señales neuronales consisten en breves impulsos eléctricos, conocidos como potenciales de acción o *spikes*, los cuales tienen una amplitud de unos 100 mV y una duración típica de 1-2 ms. Estos potenciales de acción están formados por una primera parte conocida como la fase de crecimiento o ascendente, en la cual, se presenta una rápida despolarización de la membrana hasta llegar a un valor pico de unos 40 mV, una segunda parte, nombrada como "overshoot", que se considera presente cuando la parte interna de la neurona se carga positivamente con respecto al exterior, lo que provoca una rápida repolarización presentando una fase descendente hasta lograr que la membrana se vuelva más negativa que el potencial de reposo y se genere la tercera parte, conocida como "undershoot".

Al detectar la presencia de un estímulo conocido, el sistema nervioso abre, primeramente, los canales afines al (Na^+); debido a la presencia de un gradiente de concentración y la carga negativa asociada al citosol, los iones de sodio ingresan al sistema a través de estos canales. Estos iones logran despolarizar la membrana volviendo al interior menos negativa, de tal forma, que si esta despolarización aumenta hasta alcanzar un nivel crítico (umbral), la membrana será capaz de generar un potencial de acción, por lo que es nombrado potencial generador.

La tasa de generación del potencial de acción depende de la magnitud de la corriente despolarizante continua. Aunque la frecuencia de disparo aumenta con la cantidad de corriente despolarizante, existe un límite en la velocidad a la que una neurona puede generar potenciales de acción, lo cual es una frecuencia máxima de disparo de 1000 Hz. Una vez que se inicia un potencial de acción, es imposible generar otro durante aproximadamente 1 ms, este periodo de tiempo se conoce como período refractario absoluto.

Consecuentemente, podemos decir que la entrada de iones de sodio a través de la membrana logra la despolarización de la célula en el periodo que se da al potencial de acción, como complemento, la repolarización se logra con expulsión de los iones de potasio.

Considerando ahora a una neurona ideal, en la que su membrana tiene tres tipos de moléculas de proteína: bombas de sodio y potasio, canales de potasio y canales de sodio. Los gradientes de concentración se establecen y se mantienen de manera continua gracias al trabajo constante de las bombas. Suponiendo que el K^+ se concentra veinte veces dentro de la célula y que el (Na^+) se concentra diez veces fuera de la célula, se establecen tres puntos:

1. El movimiento neto del ion (K^+) a través de la membrana es una corriente eléctrica, representada como (I_k).
2. El número de canales de potasio abiertos es proporcional a la conductancia eléctrica, representada como (g_k).
3. La corriente de potasio de membrana, fluirá solo mientras (V_m) sea diferente de (E_k), la fuerza motriz sobre el (K^+) se define como la diferencia entre el potencial de membrana real y el potencial de equilibrio, y se escribe como (V_m) - (E_k).

De tal forma, que existe una relación simple entre la fuerza impulsora iónica, la conductancia iónica y la cantidad de corriente que fluirá, la cual, se representa mediante la Ecuación (1).

$$I_{ion} = g_{ion}(V_m - E_{ion}) \quad (1)$$

5. Modelo Eléctrico de una Neurona Biológica

Es común emplear circuitos eléctricos para analogizar y poder describir las propiedades eléctricas de las membranas celulares. La suma de la corriente capacitiva de la membrana celular $C\dot{V}$ y todas las corrientes iónicas, es la corriente total I que fluye a través de un parche de membrana celular, según la Ley de Kirchoff. La ecuación (2) expresa esta idea.

$$I = C\dot{V} + I_{Na} + I_{Ca} + I_K + I_{Cl} \quad (2)$$

Donde $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ es la derivada de la variable de tensión V con respecto al tiempo t . La derivada surge porque lleva tiempo cargar la membrana. Se puede escribir esta ecuación en el sistema dinámico estándar como se muestra en la Ecuación (3), lo que es equivalente a la Ecuación (4).

$$C\dot{V} = I - I_{Na} - I_{Ca} - I_K - I_{Cl} \quad (3)$$

$$C\dot{V} = I - g_{Na}(V - E_{Na}) - g_{Ca}(V - E_{Ca}) - g_K(V - E_K) - g_{Cl}(V - E_{Cl}) \quad (4)$$

Si no hay fuentes de corriente adicionales como corriente sináptica, corriente axial o corriente tangencial a lo largo de la superficie de la membrana, o corriente inyectada a través de un electrodo, entonces $I = 0$. En este caso, el potencial de membrana normalmente está limitado por el potencial de equilibrio en el orden mostrado en la Ecuación (5).

$$E_K < E_{Cl} < V_{reposo} < E_{Na} < E_{Ca} \quad (5)$$

De modo que (corrientes de entrada) < (corrientes de salida). Las corrientes internas aumentan el potencial de membrana, es decir, lo hacen más positivo (despolarización), mientras que las corrientes externas lo disminuyen, es decir, lo hacen más negativo (hiperpolarización). (I_{Cl}) se denomina corriente hacia el exterior, aunque el flujo de iones (Cl^-) es hacia el interior; los iones traen carga negativa dentro de la membrana, lo que equivale a iones cargados positivamente que salen de la célula, como en (I_K).

Conclusiones

Como se analiza en este boletín, las neuronas biológicas tienen un comportamiento conocido y puede ser modelado eléctricamente, por lo que, es factible determinar los potenciales y la corriente de iones que son generadas en una actividad produciendo un *spiking*. Los modelos eléctricos obtenidos son simulados por ecuaciones dinámicas sencillas que permiten de manera artificial replicar los comportamientos de las neuronas biológicas, obteniendo así, las llamadas redes neuronales artificiales de 3ª generación, que se vislumbra como una nueva rama de las llamadas redes neuronales artificiales.

Referencias

- [1] Anzueto-Rios, A., Gomez-Castaneda, F., & Moreno-Cadenas, J. A. (2020). "Spiking neural network architecture comparison by solving the non-linear XOR problem". *2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*.
- [2] Bear, M., Connors, B., & Paradiso, M. A. (2020). *Neuroscience: Exploring the brain enhanced edition* (4ª ed.). Jones and Bartlett.

[3] Izhikevich, E. M. (2006). *Dynamical systems in neuroscience: The geometry of excitability and bursting*. The MIT Press.

[4] Vazquez, R. A., & Chacón, A. (2010). "Integrate and Fire neurons and their application in pattern recognition". *2010 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control*, 424--428.

Barranco, N. & Anzueto, A. (1 de septiembre de 2023). *Proceso de la generación de un SPIKE en una neurona biológica*. *Boletín UPIITA*. 18 (98).