

Fundamentos de las redes neuronales artificiales

Breve introducción biológica

Antes de iniciar el estudio de las redes neuronales artificiales (RNAs), es conveniente exponer algunos conceptos básicos de los sistemas neuronales biológicos, para poder establecer más fácilmente el paralelismo existente entre ambos.

La historia de las RNAs comenzaría con el científico aragonés Santiago Ramón y Cajal, descubridor de la estructura neuronal del sistema nervioso. A finales del siglo XIX la teoría reticularista, que sostenía que el sistema nervioso estaba formado por una red continua de fibras nerviosas, era la creencia extendida. Sin embargo, después de largos años de trabajo aplicando y perfeccionando la técnica de tinción de Golgi, en 1888 Ramón y Cajal demostró que **el sistema nervioso en realidad estaba compuesto por una red de células individuales, las neuronas, ampliamente interconectadas entre sí**. Pero no sólo observó al microscopio los pequeños espacios vacíos que separaban unas neuronas de otras, sino que también estableció que **la información fluye en la neurona** desde las dendritas hacia el axón atravesando el soma. Este descubrimiento, básico para el desarrollo de las neurociencias en el siglo XX, causó en la época una verdadera conmoción en la forma de entender el sistema nervioso, Ramón y Cajal obtuvo el nobel de medicina junto con Camilo Golgi en 1906.

Gracias al advenimiento de la microscopía electrónica y a la introducción de otras importantes técnicas, se ha llegado a profundizar mucho más en el estudio de la neurona. Para este breve resumen, nos centraremos en un nivel de descripción que nos permitirá mostrar el paralelismo existente entre las redes neuronales biológicas y las artificiales.

Se estima que el sistema nervioso contiene alrededor de cien mil millones de neuronas. Vistas al microscopio, **este tipo de células puede presentarse en múltiples formas**, aunque **muchas** de ellas **presentan un aspecto similar** muy peculiar (figura 1), con un **cuerpo celular o soma** (de entre 10 y 80 micras de longitud), del que surge un denso **árbol de ramificaciones (árbol dendrítico)** compuesto por las **dendritas**, y del cual parte una **fibra tubular denominada axón** (cuya **longitud varía desde las 100 micras hasta el metro** en el caso de las neuronas motoras¹), que también se ramifica en su extremo final para conectar con otras neuronas.

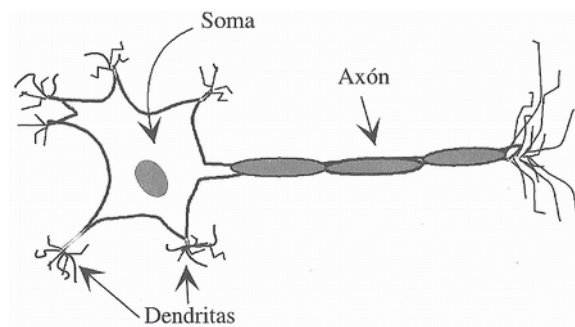


Figura 1: Estructura de una neurona biológica.

¹ Lo que constituye el nervio.

Desde un punto de vista funcional, las neuronas constituyen procesadores de información sencillos. Como todo sistema de este tipo, poseen un canal de entrada de información, las dendritas, un órgano de cómputo, el soma, y un canal de salida, el axón². En las interneuronas el axón envía la información a otras neuronas, mientras que en las neuronas motoras lo hace directamente al músculo. Existe un tercer tipo de neuronas, las receptoras o sensoras, que en lugar de recibir la información de otras neuronas, la reciben directamente del exterior (como sucede por ejemplo en los conos y bastones de la retina). Se calcula que una neurona del córtex cerebral recibe información, por término medio, de unas 10,000 neuronas (convergencia), y envía impulsos a varios cientos de ellas (divergencia).

En el córtex cerebral se aprecia la existencia de una organización horizontal en capas (se suelen señalar unas seis capas), coexistiendo una organización vertical en forma de columnas de neuronas. Hay grupos neuronales, compuestos por millones de neuronas pertenecientes a una determinada región del cerebro, que constituyen unidades funcionales especializadas en ciertas tareas (por ejemplo, existe un área visual, un área auditiva, un córtex senso-motor, etc); todos los subsistemas juntos conforman el encéfalo. Se tiene evidencia de que el procesamiento en el sistema nervioso involucra la actuación de muchos de tales subsistemas, que intercambian continuamente información.

Generación y transmisión de la señal nerviosa

La unión entre dos neuronas se denomina sinapsis. En el tipo de sinapsis más común no existe un contacto físico entre las neuronas, sino que éstas permanecen separadas por un pequeño vacío de unas 0.2 micras. En relación a la sinapsis, se habla de neuronas presinápticas (la que envía las señales) y postsinápticas (la que las recibe). Las sinapsis son direccionales, es decir, la información fluye siempre en un único sentido.

Las señales nerviosas se pueden transmitir eléctrica o químicamente. La transmisión química prevalece fuera de la neurona, mientras que la eléctrica lo hace en el interior. La transmisión química se basa en el intercambio de neurotransmisores, mientras que la eléctrica hace uso de descargas que se producen en el cuerpo celular y se propagan por el axón.

El fenómeno de la generación de la señal nerviosa está determinado por la membrana neuronal y los iones presentes a ambos lados de ella (figura 2). La membrana se comporta como un condensador, que se carga al recibir corrientes debidas a las especies iónicas presentes. La membrana contiene canales iónicos selectivos al tipo de ión, algunos son pasivos (consisten en simples poros de la membrana) y otros activos (poros que solamente se abren ante ciertas circunstancias).

En esencia, las especies iónicas más importantes, que determinan buena parte de la generación y propagación del impulso nervioso, son Na^+ , K^+ y Ca^{2+} . Además de los iones de proteínas, que denotaremos genéricamente por P^{2-} , y que se originan por pérdida de los anteriores.

² En realidad, en el árbol dendrítico también se lleva a cabo un cierto cómputo; por otro lado, el soma también puede recibir información directamente de otros axones, sin la mediación de las dendritas.

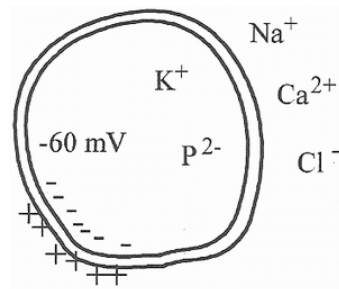


Figura 2: Distribución de los iones en la neurona dentro y fuera de la membrana celular.

En estado de reposo el protoplasma del interior de la neurona permanece cargado negativamente en relación al medio externo existiendo entre ambos una diferencia de potencial de unos -60mV . La existencia de este potencial de reposo se debe a las concentraciones de Na^+ , K^+ y Ca^{2+} , y se mantiene mediante el flujo de iones Na^+ y K^+ a través de la membrana. El interior de la neurona está cargado negativamente puesto que, debido a su gran tamaño, los iones P^{2-} quedan dentro, al no poder atravesar la membrana. Los canales de K^+ son pasivos y se comportan como simples poros. Por su parte, los de Na^+ son activos, y se convierten en permeables a este ión cuando el potencial del soma desciende por debajo de unos -45mV . Por ello, en condiciones de reposo, la membrana es permeable al K^+ , pero no al Na^+ , y sus concentraciones se generan y mantienen por la acción de la denominada bomba de Na^+-K^+ , que por cada 2 iones K^+ que introduce extrae 3 iones Na^+ al exterior. Este bombeo de iones se realiza a costa de un gasto de energía, de ahí que la neurona sea una célula de alto consumo energético. El resultado final es que la concentración de K^+ y P^{2-} es alta en su interior, y la de Na^+ lo es en el exterior, siendo la diferencia de potencial debida a sus concentraciones de unos -60mV .

La forma de comunicación más habitual entre dos neuronas es de tipo químico. La neurona presináptica libera unas sustancias químicas complejas denominadas neurotransmisores (como el glutamato o la adrenalina), que atraviesan el vacío sináptico. Si la neurona postsináptica posee en las dendritas o en el soma canales sensibles a los neurotransmisores liberados, los fijarán, y como consecuencia de ello permitirán el paso de determinados iones a través de la membrana. Las corrientes iónicas que de esta manera se crean provocan pequeños potenciales postsinápticos excitadores (positivos) o inhibidores (negativos), que se integrarán en el soma, tanto espacial como temporalmente; éste el origen de la existencia de sinapsis excitatorias y sinapsis inhibitorias³. Si se ha producido un suficiente número de excitaciones, la suma de los potenciales positivos generados puede elevar el potencial de la neurona por encima de los -45mV (umbral de disparo): en ese momento se abren bruscamente los canales de sodio, de modo que los iones Na^+ , cuya concentración en el exterior es alta, entran masivamente al interior, provocando la despolarización brusca de la neurona, que pasa de un potencial de reposo de -60mV a unos $+50\text{mV}$. A continuación la neurona vuelve a la situación original de reposo de -60mV ; este proceso constituye la generación de un potencial de acción (figura 3), que al propagarse a lo largo del axón da lugar a la transmisión eléctrica de la señal nerviosa. Tras haber sido provocado un potencial de acción, la neurona sufre un período refractario, durante el cual no puede generarse uno nuevo.

³ Hay evidencias experimentales que indican que un axón sólo puede generar sinapsis excitatorias o inhibitorias, pero no de ambos tipos.

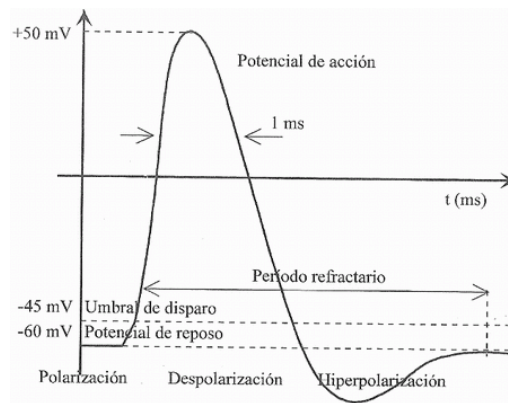


Figura 3: Potencial de acción.

Un hecho importante es que el pulso así generado es “digital”, en el sentido de que existe o no existe impulso, y todos ellos son de la misma magnitud. Por otra parte, ante una estimulación más intensa disminuye el intervalo entre pulsos, por lo que la neurona se disparará a mayor frecuencia cuanto mayor sea el nivel de excitación. Es decir, la excitación queda codificada en la frecuencia de los pulsos producidos. Por otra parte, la frecuencia de disparo de la neurona no puede crecer indefinidamente, sino que existe una frecuencia máxima de respuesta debida a la existencia del periodo refractario. En resumen, ante un estímulo mayor la frecuencia de respuesta aumenta, hasta que se alcanza una saturación conforme nos acercamos a la frecuencia máxima.

De este modo, la función de respuesta de la neurona, frecuencia de disparo frente a la intensidad de estimulación, tiene el aspecto mostrado en la figura 4, que se emulará en muchos de los modelos de neurona artificial. La frecuencia de disparo oscila habitualmente entre 1 y 100 pulsos por segundo, aunque algunas neuronas pueden llegar a los 500 durante pequeños períodos de tiempo. Por otra parte, no todas las neuronas se disparan generando un tren de impulsos de una frecuencia aproximadamente constante, pues la presencia de otras especies iónicas hace que diferentes tipos de neuronas posean patrones de disparo distintos, en forma de trenes puros, paquetes de pulsos, o presentando patrones más complejos.

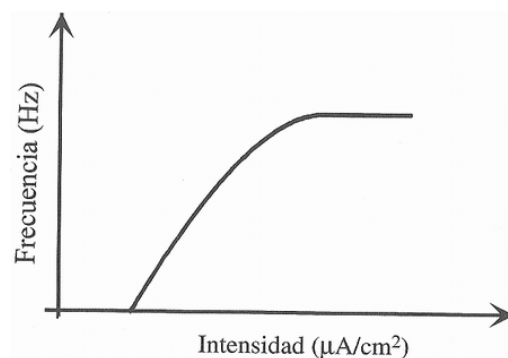


Figura 4: Función de respuesta de la neurona biológica ante estímulos del exterior.

Generando un pulso eléctrico por el soma, el transporte activo que se produce a lo largo del axón permite que pueda transmitirse a grandes distancias (hasta un metro) sin degradarse. En los extremos del axón existen unas pequeñas vesículas sinápticas que almacenan paquetes de neurotransmisores: así, ante la aparición de un pulso eléctrico proveniente del cuerpo celular, y por mediación de los iones Ca^{2+} , se produce la liberación de neurotransmisores en cantidades cuantificadas (correspondientes a un

número de vesículas). El número de pulsos que llegan y su frecuencia determinan la cantidad de neurotransmisor liberado, que a su vez producirá nuevas excitaciones o inhibiciones en otras neuronas.

El mecanismo aquí descrito, constituye la forma más común de transmisión de la señal nerviosa, pero no el único. Cuando la distancia que debe recorrer la señal es menor de 1 mm la neurona puede no codificarla en frecuencia, sino enviar una señal puramente analógica. Es decir, la evolución biológica encontró que a distancias cortas la señal no se degradaba sustancialmente, por lo que podía enviarse tal cual, mientras que a distancias largas era preciso codificarla para evitar su degradación y la consiguiente pérdida de información. La naturaleza descubrió que la codificación en forma de frecuencia de pulsos digitales proporcionaba calidad, seguridad y simplicidad en la transmisión.

Aprendizaje

La intensidad de una sinapsis no viene representada por una cantidad fija, sino que puede ser modulada en una escala temporal mucho más amplia que la del disparo de las neuronas (horas, días o meses). Esta plasticidad sináptica se supone que constituye, al menos una buena medida, el aprendizaje tal y como postuló Hebb en 1949, encontrándose posteriormente evidencias experimentales de ello.

Durante el desarrollo de un ser vivo, el cerebro se modela, de forma que existen muchas cualidades del individuo que no son innatas, sino que se adquieren por la influencia de la información que del medio externo proporciona sus sensores. Existen diferentes formas de modelar el sistema nervioso: por el establecimiento de nuevas conexiones, ruptura de otras, modelado de las intensidades sinápticas (plasticidad) o incluso mediante muerte neuronal. Este tipo de acciones (en especial la modificación de las intensidades sinápticas) serán las que utilicen los sistemas neuronales artificiales para llevar a cabo el aprendizaje.