

2. MODELO NEURONAL DESCRIPTIVO

En este punto queremos introducir una serie de definiciones relativas a la naturaleza biológica de la neurona. Lo más reseñable en este punto del informe es que el sistema nervioso se comporta como un conjunto de circuitos por donde pasan impulsos eléctricos, siendo ésto una característica fundamental para el desarrollo del proyecto. Por tanto, gracias al estudio de su constitución se planteará un modelo que simule (de manera lejana) alguna de sus funciones.

2.1. LA NEURONA

La neurona es un tipo de célula del sistema nervioso con unas componentes estructurales básicas que le permiten llevar a cabo la función de transmitir cierto tipo de mensajes, a los que se conoce como impulsos nerviosos. Su principal característica es la excitabilidad eléctrica de su membrana plasmática. Debido a esta cualidad están especializadas en la recepción de estímulos y conducción de los impulsos nerviosos [15].

Algunas de las partes que forman las neuronas son similares a las de las demás células, pero hay otras partes que son distintas. Por eso, no podemos tener el mismo tratamiento que tenemos con el resto de células. A continuación se listan las estructuras principales de la neurona [16]:

- Soma o cuerpo celular: Esta parte incluye el núcleo. Al igual que todas las demás células, las neuronas tienen un núcleo. En esta parte es donde se produce la energía necesaria para el funcionamiento de la neurona.
- Dendritas: Son prolongaciones que salen de diferentes partes del soma, suelen ser muchas y ramificadas. Las dendritas recogen información

2. MODELO NEURONAL DESCRIPTIVO

proveniente de otras neuronas u órganos del cuerpo y la concentran en el soma de donde, si el mensaje es intenso, pasa al axón.

- **Axón:** Es una sola prolongación que sale del soma en dirección opuesta a las dendritas. La función del axón es la de conducir un impulso nervioso desde el soma hacia otra neurona, músculo o glándula del cuerpo. El axón está compuesto por una capa de mielina (fabricada a su vez por las células de Schwann, también incluidas en el axón) y nódulos de Ranvier que tienen como misión facilitar la transmisión del impulso nervioso. La onda electromagnética producida como impulso nervioso recorre las neuronas recubiertas por mielina, saltando de nodo en nodo de Ranvier.

En la Fig. 1 podemos apreciar todas las componentes que forman la neurona, definidas en este punto [15].

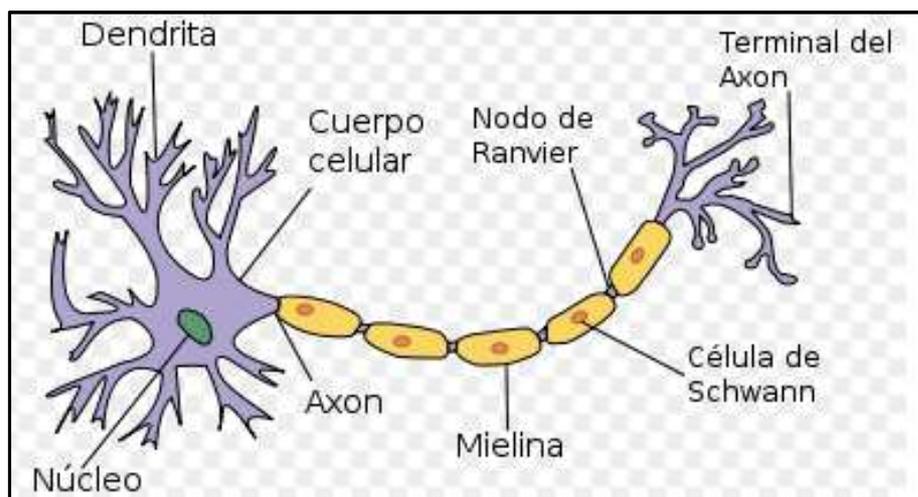


Figura 1. Neurona.

Como hemos comentado, los impulsos nerviosos viajan por toda la neurona comenzando por las dendritas, hasta que llegan a los botones terminales que pueden conectar con otra neurona, fibras musculares o glándulas. Debido a esta función, las neuronas conforman e interconectan los tres componentes del sistema nervioso: sensitivo, motor e integrador o mixto; de esta manera, un estímulo captado en alguna región sensorial entrega cierta información que es conducida a través de las neuronas y es analizada por el componente integrador, que es capaz de elaborar una respuesta cuya

2. MODELO NEURONAL DESCRIPTIVO

señal es conducida también a través de las neuronas. Dicha respuesta es ejecutada mediante una acción motora, como la contracción muscular o secreción glandular.

2.2. IMPULSO NERVIOSO

El impulso nervioso es una onda eléctrica originada como consecuencia de un cambio transitorio en la permeabilidad de la membrana plasmática de la neurona. Su propagación se debe a una diferencia de potencial (surgido por las distintas concentraciones de iones a ambos lados de la membrana) entre la parte interna y externa de la célula. La carga de una célula nerviosa inactiva se mantiene en valores negativos (el interior respecto al exterior) y varía sólo dentro de unos estrechos márgenes. Cuando el potencial de la membrana de una célula excitable llega más allá de un cierto umbral debido a un estímulo externo (por ejemplo cuando una neurona sensorial capta una señal), la neurona dispara un impulso nervioso gracias a esta diferencia de potencial creando así una corriente eléctrica. Este proceso dura apenas unos milisegundos.

La cantidad de estímulo necesario para provocar la actividad de una neurona se denomina umbral de excitabilidad. Alcanzado este umbral, la respuesta es efectiva independientemente de la interrupción o aumento del estímulo. Durante la despolarización la neurona no es excitable, es decir, está en periodo refractario. Durante la hiperpolarización subsiguiente la neurona es parcialmente excitable y parcialmente refractaria, por tanto, necesitamos un estímulo más intenso para provocar un nuevo potencial de acción ya que ha aumentado el umbral de excitabilidad. Estos factores se debería tener en cuenta a la hora de simular el sistema nervioso [17] [18].

2.3. SISTEMA NERVIOSO

El sistema nervioso es un conjunto de órganos compuesto de unos tejidos y unas células muy similares (por eso se dice que es un sistema y no un aparato) cuya unidad básica es la neurona. Su función primordial es la de captar y procesar rápidamente las señales ejerciendo control y coordinación sobre los demás órganos, para así lograr una oportuna y eficaz interacción con el medio ambiente cambiante. Podemos resumir las actividades del sistema nervioso como una serie de procesos en el que la información sigue un circuito más o menos estándar. Normalmente la señal se inicia en una neurona sensorial aferente, la cual recoge la información a través de su axón (denominado fibra aferente). Esta neurona sensorial transmite la información a otra aledaña (interneurona), de modo que termine accediendo a un centro de integración donde se procesa la información. Para que la señal llegue a este centro de procesamiento tendrá que pasar por múltiples neuronas que estarán conectadas mediante sinapsis. Finalmente, la respuesta dada irá a parar a las neuronas eferentes que controlan músculos, glándulas u otras estructuras anatómicas. Por tanto, podemos concluir que el circuito neuronal está compuesto por neuronas aferentes, eferentes e interneuronas [19].

Como se aprecia en la Fig. 2 podemos resumir brevemente el sistema nervioso en tres acciones: detección de estímulos, transmisión de información y coordinación general (procesamiento y realización de la acción) [19].

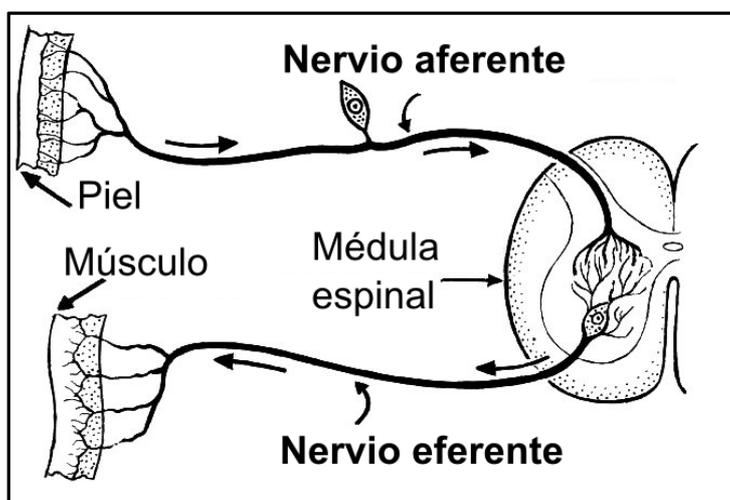


Figura 2. Diagrama aferente-eferente.

2.4. SINAPSIS

La conexión entre una neurona y otra se denomina sinapsis, más concretamente la unión entre el axón de una y la dendrita de otra. Este enlace intracelular lleva a cabo la transmisión del impulso nervioso desde una célula nerviosa a otra. Se inicia con una descarga química que origina una corriente eléctrica en la membrana de la célula sensorial aferente (célula emisora), que como ya hemos dicho es la neurona capaz de captar un evento. La acción de esta componente del sistema nervioso tiene lugar en una etapa presináptica. Una vez que este impulso nervioso alcanza el extremo del axón (la conexión con la otra célula), la propia neurona segrega un tipo de proteínas (neurotransmisores) que se depositan en el espacio sináptico (espacio intermedio entre neurona sensorial y la neurona de salida). Estos neurotransmisores son los encargados de excitar o inhibir la acción de la neurona de salida. La acción que ocurre en ésta última, tiene lugar en la etapa postsináptica. Es muy importante la acción que ocurre en la neurona de salida ya que es en esta etapa donde podemos localizar el aprendizaje del sistema nervioso [20].

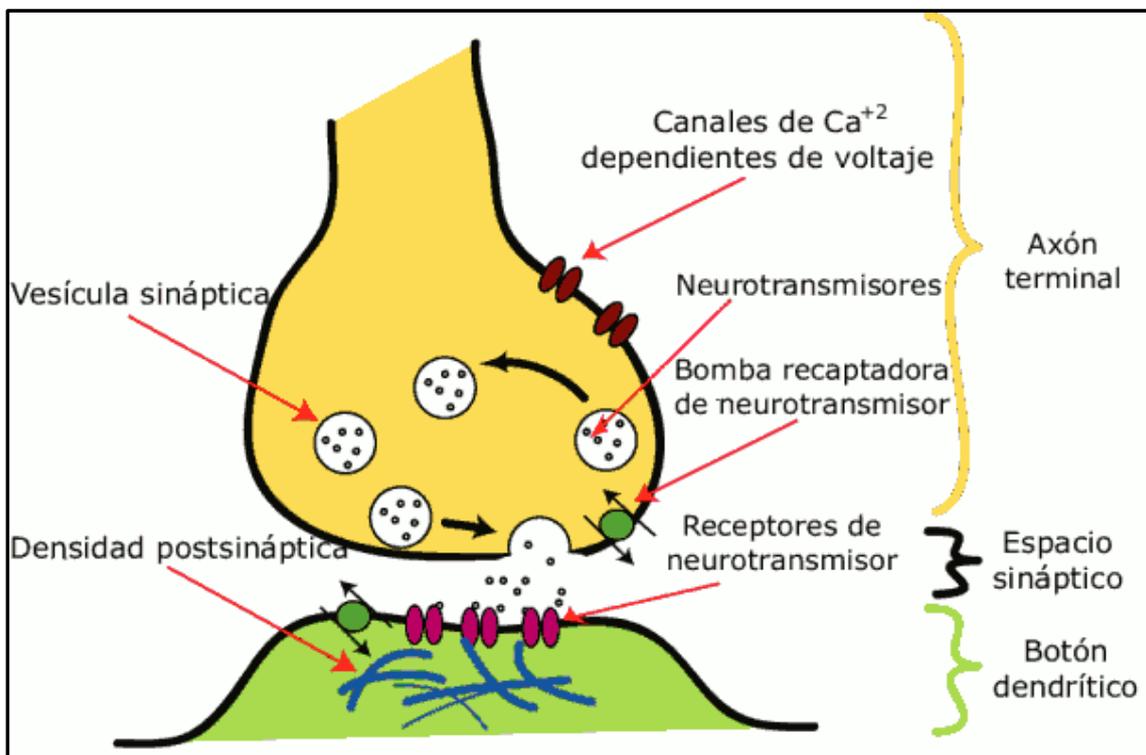


Figura 3. Sinapsis.

La sinapsis se produce en el momento en que se registra actividad químico-eléctrica presináptica y postsináptica. Si esta condición no se da, no se puede hablar de sinapsis. En dicha actividad se liberan neurotransmisores ionizados con base química cuya cancelación de carga provoca la activación de receptores específicos que, a su vez, generan otro tipo de respuestas químico-eléctricas.

Las sinapsis se pueden definir de manera simplificada como un cable. El conjunto de todas ellas permiten a las neuronas del sistema nervioso central formar una red de circuitos neuronales. Una vez que las neuronas son capaces de aprender un determinado suceso, que ocurre repetidas veces, se hacen selectivas. Con esto se quiere decir que son capaces de detectar un evento memorizado con respecto a otro aleatorio, formando unos circuitos virtuales específicos (cuyas neuronas tienen como nexo de unión las sinapsis) para realizar la acción asociada al suceso detectado. Estos circuitos los llamamos virtuales al no ser permanentes, ya que las neuronas pueden olvidar lo aprendido. Por tanto, dicho camino recorrido puede cambiar gracias a una reasignación o modificación de los pesos asociados a cada conexión o sinapsis.

Se distinguen tres tipos principales de transmisión sináptica; los dos primeros mecanismos constituyen las fuerzas principales que rigen la circulación de impulsos nerviosos por los circuitos neuronales:

- Transmisión excitadora: Aquella que incrementa la posibilidad de producir un potencial de acción. La membrana postsináptica reacciona ante el neurotransmisor disminuyendo su potencial de reposo. Por lo tanto, disminuyendo la negatividad interna se aumenta la excitabilidad.
- Transmisión inhibitoria: Aquella que reduce la posibilidad de producir un potencial de acción. La membrana postsináptica se hiperpolariza por el neurotransmisor. Por lo tanto, aumentando la negatividad interna se disminuye la excitabilidad.
- Transmisión moduladora: Aquella que cambia el patrón y/o la frecuencia de la actividad producida por las células involucradas.

El que la acción en una sinapsis sea excitatoria o inhibitoria no depende exclusivamente del neurotransmisor (ya que puede actuar indistintamente de las dos

formas), sino de las características de la membrana postsináptica. Los receptores determinan su respuesta ante un neurotransmisor determinado.

La fuerza de una sinapsis viene dada por el cambio del potencial de la membrana. Dicho cambio ocurre cuando se activan los receptores, ante unos neurotransmisores determinados, alojados en la dendrita de la neurona de salida. Este cambio de voltaje se denomina potencial postsináptico, y es resultado directo de los flujos iónicos a través de los canales receptores. Los cambios en la fuerza sináptica pueden ser:

- A corto plazo y sin cambios permanentes en las estructuras neuronales, con una duración de segundos o minutos.
- De larga duración LTP (*Potenciación a Largo Plazo*), en que la activación continuada o repetida de la sinapsis implica la inducción de la síntesis proteica en el núcleo de la neurona, alterando la estructura de la propia neurona.

Podemos concluir que el aprendizaje y la memoria son resultado de cambios a largo plazo en la fuerza sináptica, mediante un mecanismo de plasticidad sináptica [21].

2.5. PLASTICIDAD NEURONAL

La plasticidad neuronal, también denominada neuroplasticidad, es la propiedad que emerge de la naturaleza y funcionamiento de las neuronas cuando establecen comunicación entre ellas. Es capaz de modular la percepción de los estímulos con el medio, tanto los que entran como los que salen. Por tanto, la red neuronal es un elemento dinámico en continua evolución, donde cualquier pequeño cambio puede producir como resultado una respuesta diferente. Esta propiedad le ha permitido adaptarse al medio sin gran dificultad, pudiendo llegar a asumir una neurona el papel de otra neurona que esté lesionada.

Para subsanar células dañadas el sistema nervioso puede reorganizar el conjunto de sinapsis intervinientes. Para ello, se surte de acciones reguladoras modulando el proceso a través de la aplicación de impulsos excitatorios o inhibitorios según lo requiera. Ésto es posible ya que existen numerosas uniones replicadas, pudiendo así tomar caminos alternativos. Está demostrado que existen conexiones neuronales que incrementan su nivel de actividad cuando ocurre la muerte de un grupo de neuronas que lideraban una determinada función (*desenmascaramiento compensatorio*).

Pero no sólo queda ahí la cosa, porque si la situación lo requiere, el sistema nervioso puede crear nuevas conexiones para que otro grupo de neuronas actúen sustituyendo a las erróneas. Así que, podemos clasificar las acciones del sistema nervioso como:

- Constructivas: Cuando crea y amplía nuevas conexiones neuronales.
- Destructivas: Cuando elimina los enlaces poco activos o incluso totalmente inactivos.

La plasticidad anatómica de las neuronas en el sistema nervioso es un fenómeno común en las sinapsis, en las que tanto los estímulos fisiológicos como las condiciones del entorno pueden dar origen a ciertos cambios morfológicos y numéricos. La capacidad de cambio de estos factores es conocido como plasticidad sináptica que a su vez es culpable en gran medida de la facultad de memorizar y olvidar. Por tanto, se demuestra que el aprendizaje y reparación del sistema nervioso es un elemento vivo que

evoluciona con el paso del tiempo, donde diversos sucesos aprendidos pueden ser olvidados y viceversa [21].

2.5.1. APRENDIZAJE Y MEMORIA

La memoria humana es una función cerebral que es resultado de conexiones sinápticas entre neuronas, mediante la que el ser humano puede retener experiencias pasadas. La memorización se obtiene reforzando las conexiones entre las neuronas, a su vez estas uniones se obtienen mediante el continuo entrenamiento al que se le somete. La experiencia sensorial del sistema nervioso es la causa por la que se produce el aprendizaje. A través de la captación de señales se modifica las propiedades de las sinapsis, provocando en ellas:

- Cambios funcionales (reducción del umbral de excitación, mayor liberación de neurotransmisores, mayor persistencia del contacto entre neurotransmisores y receptores, etc.).
- Cambios estructurales (aumenta el número de sinapsis, cambian los contactos sinápticos preexistentes, etc.).

La memoria se puede clasificar según su persistencia. Podemos diferenciar tres grandes grupos: a corto, medio y largo plazo. En la etapa de entrenamiento del sistema se va modificando las uniones sinápticas establecidas, reflejándose en un cambio en la amplitud del potencial de la neurona de salida. Este potencial es responsable de la acción postsináptica, su modificación se puede clasificar en:

- Potenciación sináptica: Aumento de la amplitud de los potenciales en respuesta a impulsos de entrada sucesivos.
- Depresión sináptica: Disminución de la amplitud de los potenciales de la neurona de salida en respuesta a eventos de entrada sucesivos.

Los dos procesos sinápticos mencionados se producen como resultado de cambios en la cantidad de neurotransmisor liberado por cada evento captado. Gracias a esta modificación se va modelando el tipo de memorización según su persistencia. Podemos aplicar de manera global los procesos de modificación de potencial de la neurona de la siguiente forma:

- **Suma Espacial:** Supongamos que, de entre las 10.000 sinapsis posibles, 3.000 están recibiendo señales de excitación y otras tantas de *inhibición*. La suma espacial es el proceso que hace la neurona al elaborar todas esas señales en un mismo ciclo de proceso y producir una respuesta. La respuesta puede aplicar tanto a niveles de potencial de acción como de metabolización de proteínas, neurotransmisores o cualquier otra molécula sea capaz de portar información.
- **Suma Temporal:** Partiendo del mismo supuesto que en el caso de la suma espacial, tomamos como ejemplo una dendrita, en donde se establece sinapsis con una terminación axónica de otra neurona. Si la neurona presináptica produce una ráfaga de estímulos muy seguidos en el tiempo, la neurona que los recibe ha de sumarlos en el tiempo. Se aplica un proceso mediante el cual la neurona establece un resultado a esos estímulos.

En la Fig. 4, se ve cómo va aumentando el potencial de la neurona debido a la acción conducida por las sinapsis. Habrá un momento en que la neurona no pueda aguantar más la presión y dispare para descargar toda la energía acumulada [21].

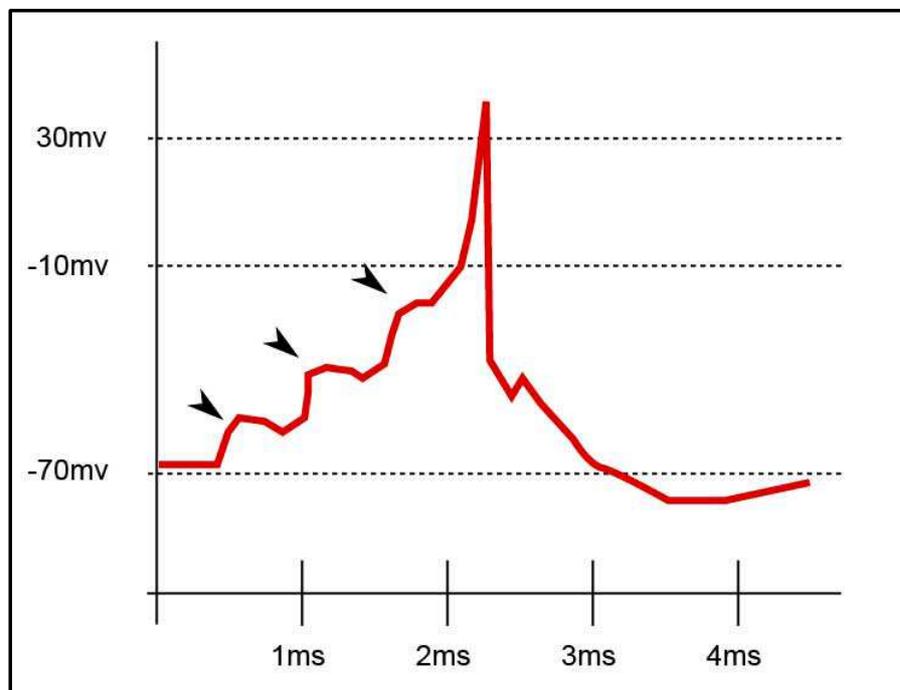


Figura 4. Aumento del potencial almacenado por la neurona debido a la contribución de los impulsos sinápticos.

De aquí se deduce la gran importancia espacio-temporal de los impulsos que transitan las sinapsis. No solo es importante la conexión por la que circula el impulso, sino que también hay que tener en cuenta el momento en el que tiene lugar y el número de veces sucesiva que ocurre el proceso. Ésto será un factor determinante en la memorización del evento captado. Cuánto más se repite el suceso más se refuerza la unión sináptica, contribuyendo así a la asimilación del aprendizaje [21].

Para entender un poco mejor como influye la plasticidad sináptica en el aprendizaje y memorización por parte de una neurona vamos a introducir un pequeño ejemplo. En las Fig. 5, 6 y 7 ilustran dicho ejemplo muy simplificado de un sistema bioinspirado basado en el mecanismo STDP (que a posteriori vamos a desarrollar más detenidamente). En estas figuras se representa una neurona de salida conectada a 3 neuronas que representamos como $c1$, $c2$ y $c3$ que producen un determinado patrón codificado en sus pulsos. Como se puede ver el orden de disparo de las neuronas siempre va a ocurrir en este caso es: primero $c1$, después $c2$ y finalmente $c3$ (como viene representado por la curva de estímulo). El peso de las neuronas se representan en las figuras como un punto negro en las conexiones (cuanto mayor es su tamaño mayor es su valor). Al principio (*paso 1*), todas las conexiones tienen igual valor (los pesos de las 3 sinapsis están pre-configurados con la misma inicialización de $1/3$), de modo que cada vez que llega un pulso a la neurona de salida su potencial se ve incrementado por el peso correspondiente a cada conexión. Se puede ver que en la primera iteración la neurona alcanza el umbral de disparo (de valor '1') cuando le llega el pulso procedente de la neurona $c3$ (instante $t3$). En el primer caso, como el disparo de la neurona de salida se produce posteriormente a los pulsos de entrada, las 3 conexiones se ven reforzadas actualizándose sus valores con un incremento de $1/3$, $2/3$ y 1 respectivamente. En la segunda repetición del patrón de entrada (*paso 2*), será la neurona $c2$ (por tener un *peso*= $2/3$) la que produzca la activación de la neurona de salida en el instante $t2$, con lo cual las conexiones con $c1$ y $c2$ se verán reforzadas y la conexión con $c3$ atenuada debido a que la acción ocurre después de la repuesta de la salida (el peso disminuye en $2/3$) [22].

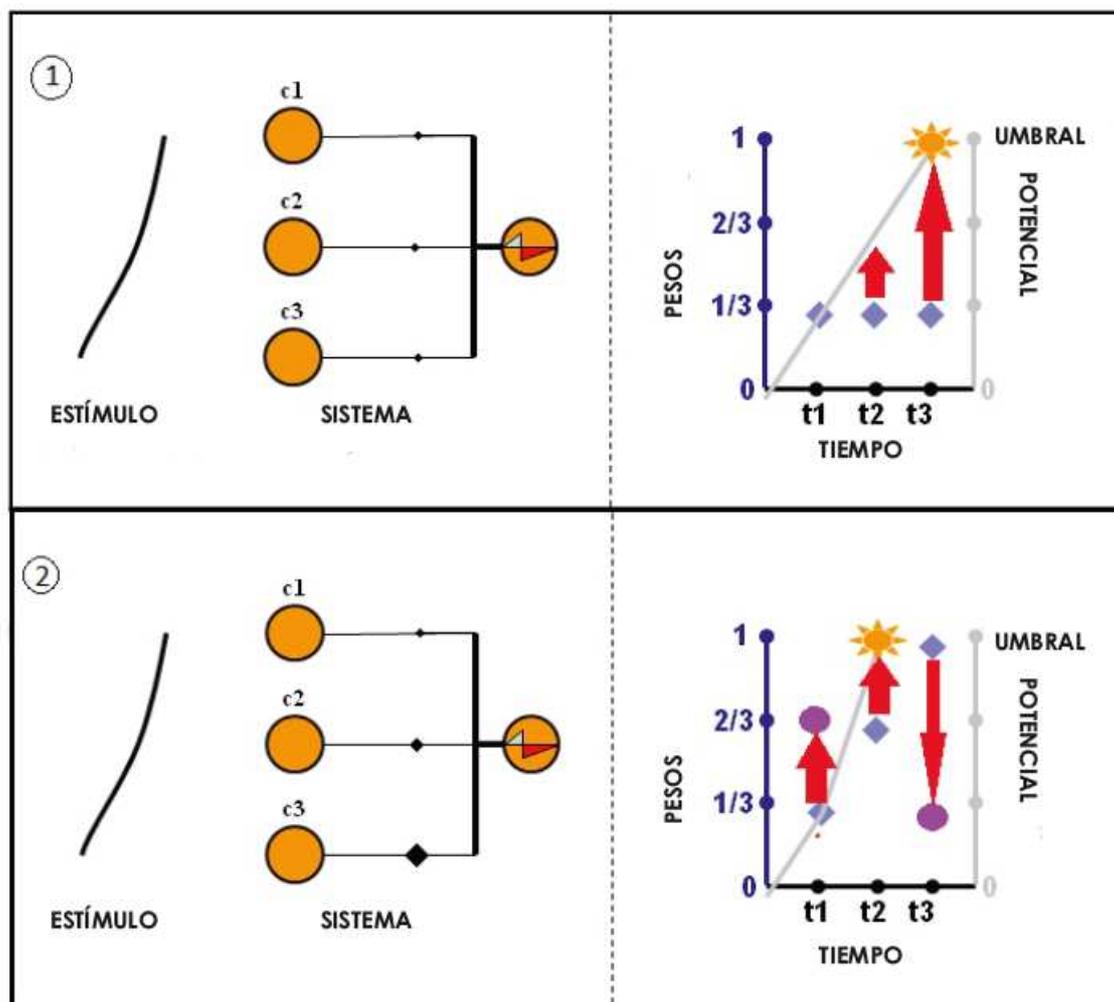


Figura 5. Ejemplo de un mecanismo bioinspirado de aprendizaje STDP (Parte 1).

En una tercera iteración (*paso 3*), será la neurona $c2$ de nuevo la causante de producir un disparo a la salida en el instante $t2$, con lo cual la conexión con $c1$ será reforzada de nuevo y la conexión con $c3$ se verá atenuada totalmente. En la cuarta iteración del ejemplo (*paso 4*), la conexión con la neurona $c1$ ya tiene un peso de valor '1' y por tanto es suficiente para activar la neurona de salida por sí misma en el instante $t1$ [22].

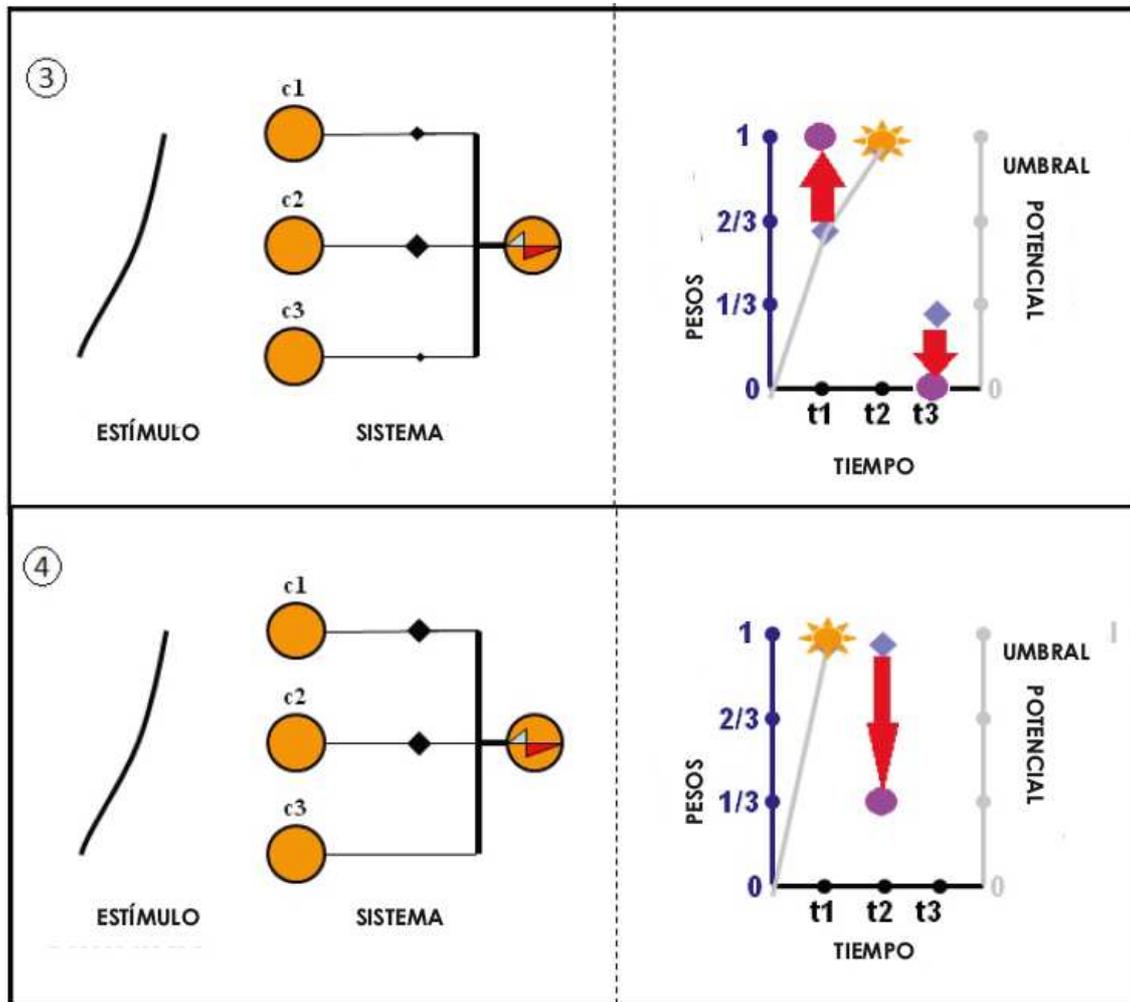


Figura 6. Ejemplo de un mecanismo bioinspirado de aprendizaje STDP (Parte 2).

Las otras dos conexiones (con $c2$ y $c3$) se ven atenuadas completamente, como se puede observar sucesivamente en los pasos 5 y 6, donde su contribución a la respuesta del sistema se puede considerar prácticamente nula. En un estado estacionario las conexiones con $c2$ y $c3$ estarán inhibidas y la conexión con la neurona $c1$ bastará para producir la activación con la neurona de salida. Nótese que esto es lo que se esperaba pues la neurona $c1$ es la más activa y la más rápida, y el algoritmo de aprendizaje STDP ha permitido que la neurona de salida aprenda esto. La rapidez de este mecanismo beneficia a la detección del patrón sin tener que estudiar por completo el estímulo de entrada.

2. MODELO NEURONAL DESCRIPTIVO

Como hemos descrito anteriormente la neurona al final siempre responde a la excitación transmitida para la neurona *c1*, pero puede llegar a ocurrir que esto deje de cumplirse y empiece a responder al resto de entradas. Esto puede deberse a que deje de recibir estímulos de la neurona *c1* y empiece a olvidar lo aprendido hasta ahora. Gracias al mecanismo bioinspirado STDP (como haría cualquier sistema “vivo”), el sistema se adapta a la situación y es capaz de aprender a reconocer otro patrón. Por tanto, podemos decir que el sistema es capaz de reciclarse, como ocurre en los sistemas biológicos. Es por ello que podemos asemejar las conexiones establecidas por las sinapsis a circuitos virtuales, ya que tras un largo periodo de inactivación de entradas que contienen el patrón entrenado pueden pasar a estar inactivas. En cambio otras sinapsis que antes estaban inactivas pueden pasar a un estado de pleno funcionamiento [22].

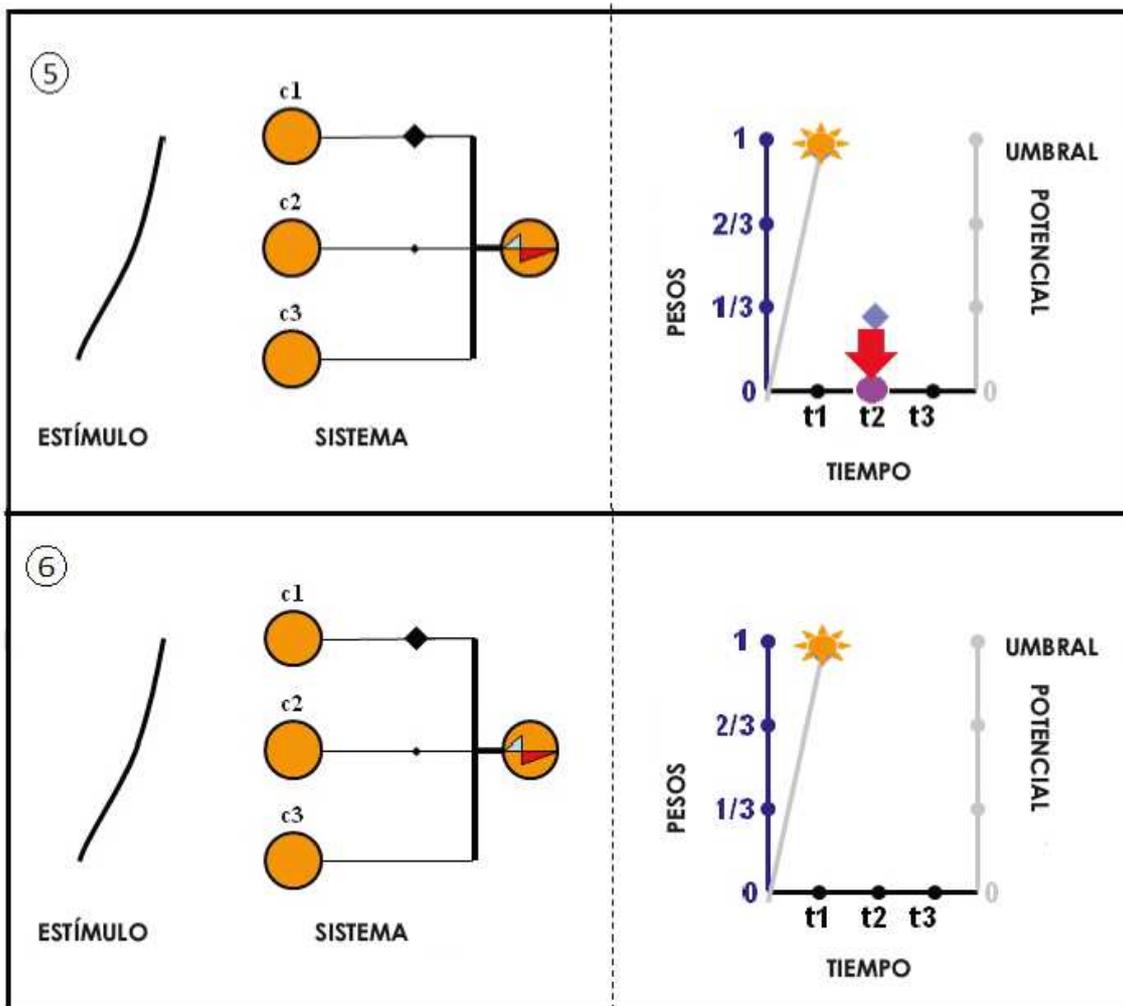


Figura 7. Ejemplo de un mecanismo bioinspirado de aprendizaje STDP (Parte 3).

2. MODELO NEURONAL DESCRIPTIVO

Quede constancia de que el ejemplo descrito es muy sencillo y que sólo trata de ilustrar la idea que se esconde detrás del mecanismo biológico STDP. Cuando lo aplicamos a un sistema un poquito más complejo, como el de nuestro experimento, el número de combinaciones y conexiones es mucho mayor.