

## Redes neuronales como sistemas complejos adaptativos

Antonio Flores Burgess, Luis Prieto Riascos y Francisco Llaveró Bernal

Estudiantes del Máster Fundamentos Celulares y Moleculares de los Seres Vivos. Universidad de Málaga.

[afbigo@gmail.com](mailto:afbigo@gmail.com) , [ldprieto@msn.com](mailto:ldprieto@msn.com) , [paquitollaveró@gmail.com](mailto:paquitollaveró@gmail.com)

La complejidad es un término que se aplica en diferentes ámbitos y con diferentes significados. Por ejemplo se usa como adjetivo para resaltar la dificultad de comprensión o resolución de un problema o asunto. Pero para el caso que nos ocupa la complejidad supone una serie de reglas y propiedades de los sistemas que podría unificar ampliamente las ciencias de la vida. La palabra complejidad se asocia a dificultad de comprensión y explicación. Por tanto complejidad se aplica a asuntos en los que hay que considerar muchos aspectos, por lo que no son fáciles de comprender o resolver. También, complementariamente, se podría decir que lo comprensible es aquello que se puede simplificar, reducir, comprimir en menos elementos.

Un tipo de sistemas complejos son los adaptativos, sistemas dinámicos no lineales (sensibles a las condiciones iniciales) que tienen la propiedad particular de automodificarse para optimizar su interacción con el resto del universo, de lo que surgen capacidades como el aprendizaje.

Los científicos vienen afirmando desde hace ya varias décadas que la ciencia del siglo XXI será la de los sistemas complejos. Y es que en la base de todo sistema complejo (desde el comportamiento de las moléculas hasta las medidas que deben adoptar los estados para lograr el equilibrio con la naturaleza) subyace una serie de reglas que, una vez identificadas, contribuirán a unificar ampliamente las ciencias de la vida.

La ciencia de la complejidad según Lewin en su libro "Complexity", a partir de las declaraciones de diversos científicos, sería la ciencia que se ocupa de los sistemas complejos adaptativos, la ciencia que estudia los sistemas dinámicos no lineales, los sistemas dinámicos con sensibilidad a las condiciones iniciales. Dicho de otro modo, el cometido de la ciencia de la complejidad sería mostrar que lo que aparentemente complejo no es más que una aparente complicación que desaparece en el momento en que encontramos la expresión matemática (o un modelo simplificador) que la explique. Sencillamente, la complejidad sería el producto de la incapacidad del raciocinio humano para explicar determinadas circunstancias o fenómenos.

Uno de los más destacados investigadores en ciencia de la complejidad, Ricard Solé, contempla el descubrimiento de ciertas propiedades universales que subyacen a la totalidad de las redes complejas, tanto naturales como artificiales, lo que permitiría comprender la naturaleza de lo complejo y sus orígenes. Por ejemplo, podemos percibir a las células o internet como sistemas en los que un fallo en un nodo clave (un gen de acción indirecta o un servidor) puede desencadenar el desastre.

Con esta perspectiva sistémica vamos a mostrar en lo que resta de este artículo aspectos de dos tipos de redes neuronales: artificiales y naturales.

El cerebro humano es un órgano donde se estima que hay unas  $10^{11}$  neuronas interconectadas entre sí por  $10^{14}$  sinapsis. Lo que supone que en el cerebro cada neurona se comunica con otras mil. Esta gigantesca red forma uno de los sistemas dinámicos más complejos conocidos y subyace a procesos como las emociones o la consciencia. Pero el estudio de las neuronas a nivel individual no aporta datos concluyentes sobre una correlación entre la dinámica de transmisión de impulsos nerviosos y las diferentes funciones cerebrales. Esto se debe principalmente a la aparición de propiedades emergentes, propiedades intrínsecas a los sistemas que surgen de la interacción entre los elementos que lo forman sin que se puedan deducir del estudio aislado de estos elementos.

Debido a las capacidades que tiene el cerebro de manejar la información se han intentado crear redes neuronales artificiales (RNA). Las RNA sirven para el análisis de múltiples tipos de datos y lo hacen a partir de un diseño que pretende simular el comportamiento del cerebro humano. Las RNA están formadas por muchos procesadores llamados nodos, neuronas o sensores, interrelacionados por medio de conexiones o canales de comunicación. Cada neurona tiene a su vez un tipo de memoria local ya que interacciona exclusivamente con nodos determinados y a su vez es afectado por un número limitado de entradas que recibe a través de sus conexiones. Generalmente se introducen reglas de aprendizaje en el sistema por las cuales esas conexiones son capaces de ajustarse conforme a sus interacciones con el exterior. En otras palabras, estas redes aprenden a partir de ejemplos.

Las RNA permiten, además de aprender de las experiencias, abstraer características fundamentales de muchos datos y pronosticar futuros sucesos. Uno de los objetivos finales de este tipo de redes es el desarrollo de la inteligencia artificial y la intercomunicación máquina-cerebro. No obstante, hay autores como Roger Penrose que sostienen que hay algo en la naturaleza no computable en las leyes físicas y que describe el pensamiento humano, de forma que no es posible formalizar matemáticamente la forma en que el cerebro maneja la información y por tanto crear un ordenador que piense.

Para el propósito de imitar con un ordenador el cerebro, éste también codifica la información en impulsos digitales. En los humanos las sensaciones se generan digitalmente y se transmiten así a través del sistema nervioso. Con otras palabras, cuando la luz se hace más intensa, el sonido más alto o la presión más fuerte, entonces no es que fluya más corriente a través de los nervios, sino que la frecuencia de los impulsos digitales aumenta. La mayoría de los científicos coinciden en que una RNA es muy diferente (en términos de estructura) de un cerebro animal. Sin embargo, al igual que el cerebro, una RNA se compone de un conjunto masivamente paralelo de unidades de proceso muy simples y es en las conexiones

54

entre estas unidades donde reside la inteligencia de la red. En ambos casos una de las aproximaciones que pueden ayudar modelizar las redes en general y dilucidar parte de las propiedades emergentes que las caracterizan se encuentra en la teoría de grafos. Un grafo no es más que una representación de los elementos de un sistema (nodos) y las interacciones entre ellos (líneas). Pero decir que un grafo es una colección de nodos y líneas es como decir que una canción es un conjunto de notas, sobre todo si intentamos modelar sistemas reales.

Para poder tener una idea más precisa de la estructura neuroanatómica del cerebro debemos considerar la plasticidad sináptica, que permite a las neuronas remodelar las conexiones con sus neuronas vecinas, el número y tipo de interneuronas que tienen las diferentes áreas (redes) del cerebro, la razón de sinapsis excitadoras/inhedoras que llegan a una neurona y dentro de cada sinápsis el perfil de receptores y neurotransmisores que participan. Cada uno de estos aspectos supone un incremento de complejidad en la conectividad del cerebro. Del estudio de la dinámica de transmisión de impulsos que sustenta la red neuroanatómica, surge el concepto de conectividad funcional que se puede definir como las correlaciones temporales entre eventos neurofisiológicos distantes en el espacio. Es decir, siempre que se "encienda" un conjunto de neuronas se "apagará" otro. Aquí es fundamental considerar la resolución de las técnicas con la que obtenemos los datos, ya que los resultados pueden variar. Técnicas que ofrecen lecturas globales de la dinámica de la red son la tomografía por emisión de positrones (PET), electroencefalogramas (EEG)

e imágenes de resonancia magnética funcional (fMRI), entre otras. Son estas dinámicas funcionales las que correlacionan mejor con los diferentes comportamientos de los organismos.

Además algunas de estas dinámicas son autoorganizadas debido al alto grado de fenómenos no lineales que las producen.

Pensemos en que los miembros neuronales de una red están controlados por muchos factores como uniones gap, ambiente iónico, neurotransmisores, temperatura, actividad interneuronal, integración astrocítica y estímulos externos. Todos estos factores hacen que las transmisiones eléctricas entre las neuronas no sean del tipo todo o nada. Existen muchas fuentes que

pueden generar fenómenos subumbrales que deriven en dinámicas autoorganizadas con un patrón impredecible de salida. La autoorganización es una de las propiedades clave en la aparición de las propiedades emergentes en un sistema complejo.

Uno de los mecanismos que podrían originarse es el "burst firing", que consiste en un cambio del patrón temporal en la frecuencia de los potenciales de acción, pasando de un patrón tónico de impulsos a uno de ráfagas repetitivas. Este patrón se ha propuesto como una forma de asegurar la transmisión de la comunicación entre dos neuronas y podría surgir en determinadas neuronas como resultado de la cantidad de estímulos independientes de entrada. También se ha sugerido que este comportamiento puede surgir dentro del núcleo de una red neuronal y que podría implicar un papel fundamental de dicho núcleo en un comportamiento determinado dentro de una red mayor al ser el origen de su activación.

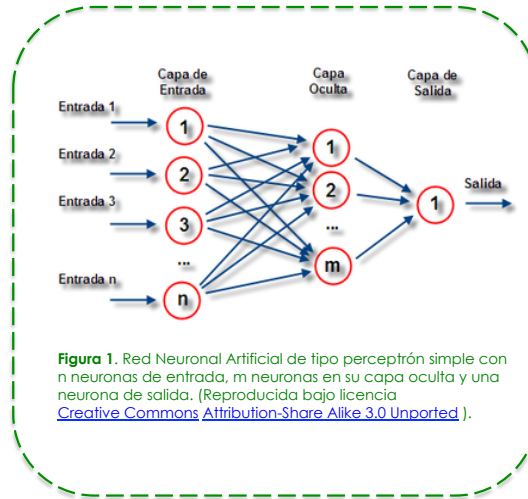


Figura 1. Red Neuronal Artificial de tipo perceptrón simple con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de salida. (Reproducida bajo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported).

### Lecturas recomendadas para saber más:

- Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chávez M, Hwang DU. Complex networks: Structure and dynamics. Physics Reports 424: 175 – 308, 2006.
- Freeman JA, Skapura DM. Neuronal Networks: Algorithms, Applications and Programming Techniques. Addison-Wesley, 1991.
- García-Báez P. Introducción a las redes neuronales y su aplicación a la investigación astrofísica. Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), 2006.
- Lewin R. Complejidad: caos como generador orden. Tusquets Editores, 1995.
- Pazos A. Redes de neuronas artificiales y algoritmos genéticos. Servicios de Publicaciones Universidad da Coruña, 1996.
- Solé R. Redes complejas. Del genoma a Internet. Ricard Solé. Tusquets Editores, 2009.