

## ¿Qué hace bien el cerebro humano y qué podría hacer mejor?

Guillermo Alvarez de Toledo  
Departamento de Fisiología Médica y Biofísica  
Facultad de Medicina  
Universidad de Sevilla

Entender cómo funciona el cerebro humano ha sido uno de los objetivos de la filosofía y de la investigación científica durante siglos. Sin embargo, a pesar de los grandes esfuerzos del pensamiento humano, no se ha avanzado desde mi punto de vista, en una revolución conceptual que nos ayude a entender cómo funciona el cerebro. Los esfuerzos por entender el funcionamiento del cerebro se han multiplicado en las dos últimas décadas, hay que recordar que la década de los 90 en los Estados Unidos, se designó como la década del cerebro, donde se hicieron grandes esfuerzos materiales y de potencial humano para desenmarañar los misterios que encierra. En las páginas que siguen expondremos algunos aspectos de cómo funciona el cerebro humano y cuáles son sus deficiencias.

Desde que Stanley Kubrick estrenó su película "2001: una Odisea del espacio", muchas personas han imaginado, o temido, que en un futuro no muy lejano las máquinas podrían imitar y comportarse como el cerebro humano. Las escenas de esta película donde se muestra como un pequeño hecho realizado por un homínido, como es el uso de una piedra de bordes afilados, conduce al descubrimiento de las herramientas para descuartizar a sus presas de caza, o la extensión en el uso de las mismas para infligir daño a los enemigos; o el momento en que el computador Hall 9000 decide acabar con la vida de los tripulantes de la nave espacial ya que les había descubierto en un complot para desconectarlo. Estas son escenas que implican que un pequeño cambio de un sistema cerebral, como el de los homínidos, o un pequeño cambio electrónico en una máquina pueden conducir a respuestas conductuales drásticas y complejas.

¿Es comparable el poder de computación de un ordenador, al poder de computación del cerebro humano? Esta cuestión es difícil de resolver, pero intentemos a través de la comparación entre los elementos que determinan el funcionamiento del cerebro, las neuronas, y la base de funcionamiento de los ordenadores, los transistores, llegar por lo menos en términos numéricos a establecer una relación. El cerebro humano consta aproximadamente de entre 100,000 y un millón de millones de neuronas ( $10^{12}$ ). Asumiendo que el comportamiento neuronal es como el de un transistor (que no lo es) podríamos hacernos la pregunta de en qué momento un ordenador tendría en su CPU el mismo número de transistores que neuronas hay en el cerebro humano. La tecnología del estado sólido ha avanzado mucho, y desde 1970, cada dos años (Ley de Moore de los microprocesadores) se ha ido duplicando el número de transistores que hay en el microprocesador de un ordenador. Actualmente, un procesador de última generación (Intel Core Extreme MP E7440) tiene 1900 millones de transistores. Si la Ley de Moore se sigue cumpliendo, y esto ha sido así desde 1970, para el año 2028 un procesador tendría el mismo número de transistores que neuronas hay en el cerebro humano. Sólo hasta entonces deberíamos preocuparnos.

¿Realmente funcionan de la misma forma los transistores que las neuronas? Probablemente no. Cada neurona conecta a su vez por término medio con otras mil neuronas y cada contacto con una neurona vecina, a través de la sinapsis, dispone de un arsenal de respuesta graduada, ya que disponen de unas 100-200 vesículas sinápticas y además están sujetas a fenómenos de

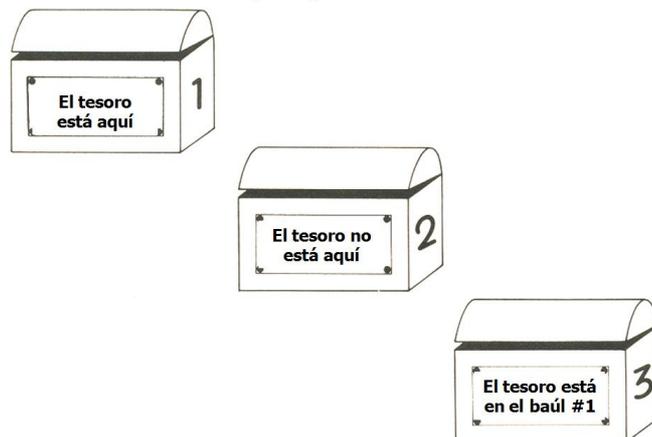
modulación (plasticidad sináptica a través de la potenciación o la depresión). Quizás las neuronas del cerebro humano trabajan en sistema gradual (quizás superior al decimal), mientras los ordenadores se basan en un sistema binario donde sólo coexisten dos estados (ON-OFF). Así pues, aunque para el año 2028 el número de transistores de una CPU de ordenador disponga del mismo número que neuronas hay en el cerebro, su poder de cálculo probablemente sea inferior al de un cerebro. Eso sí, habría que hacerse la pregunta de si la gran velocidad de computación de un microprocesador (gigahercios) podría compensar la velocidad a la que funciona una neurona (milisegundos, 1 kHz).

### ***El tendón de Aquiles del cerebro humano. El cálculo numérico y la lógica***

Pero el cerebro es más cualitativo que cuantitativo. No está diseñado para realizar el cálculo numérico ni aplicar la lógica de manera sistemática. Son infinita la cantidad de eventos cotidianos donde un razonamiento con aparente sencillez y lógica puede verse desviado de su conclusión lógica por hechos que aparentemente son insignificantes y colaterales a la situación. Un ejemplo que ilustra la falta de preparación en este sentido es si preguntamos a alguien la siguiente cuestión sencilla. Por ejemplo, si en un estanque conviven patos y tortugas, y en total de 56 ojos y 80 patas (de las de andar) ¿Cuántos patos y tortugas hay en el estanque? Este sencillo problema es difícil de resolver de memoria, sin embargo la aplicación de un algoritmo que resuelva un sistema de ecuaciones lo resuelve instantáneamente un ordenador. Lógicamente la respuesta sería mucha más sencilla para nosotros si reducimos el cálculo, a por ejemplo, 2 ojos y 4 patas. Pero, sólo cuando se dan estas circunstancias de un cálculo sencillo es cuando el cerebro humano se siente a gusto para llegar a una conclusión.

Aplicar razonamientos lógicos tampoco es una actividad que a veces le resulta fácil resolver al cerebro humano. Por ejemplo, en el siguiente problema, quizás no es obvia la conclusión.

Sólo uno de estas afirmaciones es correcta  
¿En qué baúl está el tesoro?



La única posibilidad de que se cumpla la afirmación de la figura, es si el tesoro se encuentra en el baúl 3. Por exclusión, la única afirmación correcta es la del baúl 2 y las otras dos son falsas. Si el tesoro estuviera en el baúl 1, habría tres afirmaciones correctas. Si el tesoro estuviera en el baúl 2, las afirmaciones de los baúles serían todas falsas.

Dada la dificultad de aplicar razonamientos lógicos, existen reglas que facilitan a labor para obtener una conclusión. Por ejemplo, en el siguiente silogismo.

Algunos apicultores son artistas  
Ningún químico es apicultor  
Por tanto, algunos artistas no son químicos

Sin embargo no es completamente obvia la conclusión. Es difícil imaginar el vínculo entre apicultores, artistas y químicos. Si el cerebro no detecta un patrón que pueda reconocer y del que pueda obtener una información útil, la conclusión obtenida de un silogismo bien planteado carece de sentido. Para aplicar la lógica el cerebro necesita un contexto interpretativo a partir del cual pueda obtener una conclusión. Por ejemplo, observe el siguiente silogismo:

Algunos mamíferos pueden volar  
Ningún pájaro es mamífero  
Por tanto, algunos animales que vuelan no son pájaros

En esta ocasión, resulta más evidente la conclusión. Pensamos en mamíferos que vuelan, murciélagos por ejemplo, y posteriormente extraemos la conclusión del silogismo, la cual tiene ahora más sentido. El cerebro trata de obtener conclusiones a partir de información previamente existente. Sin embargo el cálculo exacto numérico o la aplicación de razonamientos sin un contexto previo, son tareas de difícil ejecución en el cerebro humano.

### ***Supresión y complementación de información***

El cerebro humano utiliza la información que es relevante y le sirve para comparar con un patrón previamente reconocido, y elimina la información repetitiva y que no aporta información adicional. Un ejemplo, se muestra en la siguiente frase.

FINISHED FILES ARE THE RESULT OF YEARS OF  
SCIENTIFIC STUDY COMBINED WITH THE EXPERIENCE OF YEARS

Si en una audiencia se presenta esta frase durante unos segundos y se pregunta cuántas letras "F" hay. Un porcentaje elevado (60%) responderán que 3, y el resto dirán que hay 4, 5 ó 6. El motivo de que la mayor parte de la población cuenta tres letras "F" se debe a que son las letras "F" de palabras que contienen información útil (Finished, Files y ScientiFic). Las letras "F" de la preposición OF son eliminadas en la interpretación, ya que no aportan un dato útil de información al cerebro humano. Este ejemplo es muy significativo pues revela que el cerebro procura obtener información útil sin prestar demasiada atención al número o palabras que no aportan más información.

Guiarse de un patrón previo para obtener información es crítico. Muy espectacular sobre este comportamiento es el siguiente ejemplo:

Seugn lsa ivnestigicianoes, no ipomrta caul es el odren de las lteras  
de una palarba, mniertas que la prierma y la utlima etesn en el luagr coerrcto.  
Etso se dbee a que la metne hunama no lee cdaa lerta por si msima,  
snio la palbara cmoo un tdoos

La información contenida en esta frase radica en la primera y última letra de cada palabra. El resto de las letras están en distinta posición, sin embargo somos capaces de leer con una gran rapidez el sentido de la frase. Este es un buen ejemplo de cómo sintetiza información el cerebro y de cómo obtiene información muy útil a pesar del “ruido” introducido en el sistema por el orden alterado de las letras. Otro ejemplo donde se puede observar cómo el cerebro completa información es en la siguiente imagen.

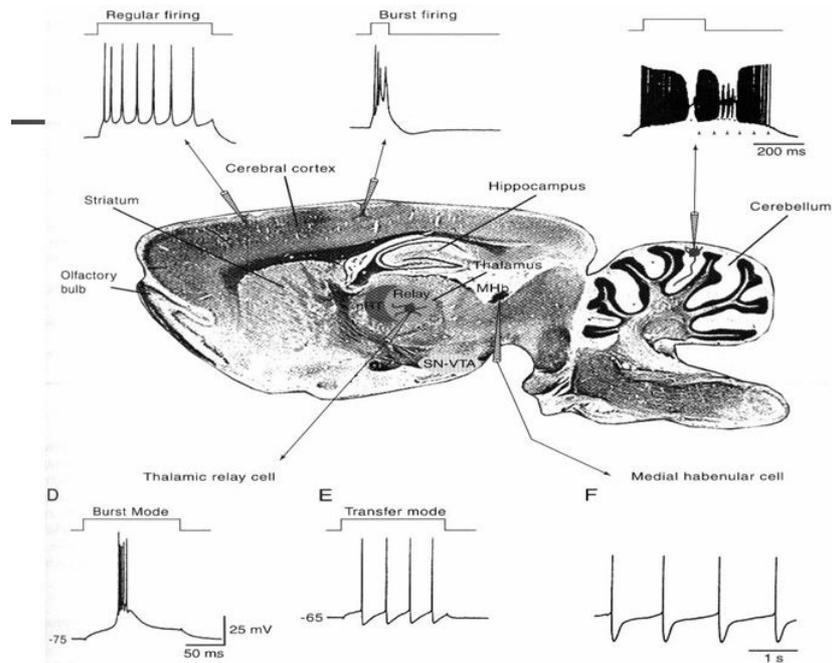


Somos capaces de leer o intuir las letras que están escritas detrás de esta imagen. Sin embargo, nuestro cerebro selecciona aquella que tiene más sentido o que concuerda con un patrón previamente establecido. Por ejemplo, un español, leería o interpretaría la palabra RED, como artilugio de pesca, mientras que si uno se encuentra en un entorno donde se utilizan palabras en inglés, tendería a pensar que lo que está escrito es la palabra RED (rojo) en inglés.

Los ejemplos que se han ilustrado muestran que el cerebro genera un patrón con la experiencia y que en todo momento contrasta la información que le llega con los patrones que ha experimentado con anterioridad. Las redes complejas que genera el cerebro almacenan esta información y por mecanismos que aún están por descubrir, compara y genera una señal que determina la identificación de objetos, la generación de recuerdos o la aplicación de razonamientos distintos a los realizados por la lógica.

### ***La organización neuronal y el código de frecuencia de potenciales de acción***

La unidad de transferencia de información en el sistema nervioso radica en la propagación del impulso nervioso (potencial de acción) entre las neuronas. En las páginas anteriores se mostró en términos cuantitativos algunos cálculos numéricos que sirven para comparar de manera grosera el poder de cálculo de un ordenador con el del cerebro. En realidad, el cerebro posee un arsenal de mecanismos de transferencia de información más amplio y diverso que las señales TTL de un ordenador. Cada estructura del cerebro está especializada en enviar información codificada en la frecuencia de potenciales de acción, que son específicas de cada estructura cerebral. Por ejemplo, en el tálamo, lugar donde parece que sirve de marcapasos de actividad cerebral, sus neuronas tienen un patrón de disparo en forma de brotes de potenciales de acción. Las neuronas talámicas, además pueden cambiar su patrón de disparo a una forma más tónica si el nivel de activación es distinto. Los patrones rítmicos de las neuronas talámicas, por ejemplo, parecen ser las responsables del ritmo alfa característico del estado de vigilia.



Otras neuronas, por ejemplo, las neuronas de Purkinje del cerebelo poseen un patrón característico de faltas de actividad cuando se activan por las fibras paralelas. Neuronas de la corteza pueden tener distintos patrones, bien fásica (brotes) o en forma tónica. Estos ejemplos muestran la gran diversidad de actividad eléctrica cerebral en forma del impulso nervioso. Cada tipo neuronal está especializado en un patrón de disparo de potenciales de acción. Desvelar el significado de por qué éstos son así y la manera que tienen los distintos cerebrales en sincronizar y extraer la información es uno de los objetivos de la Neurociencia actual. Se conocen bien las características electrofisiológicas, las bases iónicas y la distribución de las mismas en los distintos segmentos de la neurona. Conocemos por qué las neuronas de proyección de una estructura tienen unas características morfológicas distintas a las interneuronas e incluso por qué algunas estructuras alteran su patrón de disparo de potenciales. Sin embargo, no conocemos las reglas ni el procesamiento de información, ni la forma de almacenarse en muchos casos la información para que pueda ser recuperada para su posterior uso.

### **Las redes neuronales**

Idealmente, lo que a un neurocientífico le gustaría saber es cómo el cerebro procesa la información y genera una respuesta ante un estímulo. Descifrar esa caja negra de transferencia de información es el sueño de muchos investigadores, y para ello se han realizado una gran cantidad de experimentos mediante la colocación de electrodos múltiples en determinadas zonas del cerebro e intentar explicar el comportamiento del sujeto experimental en función de las entradas a las que se ha sometido el sistema. Otro abordaje para el estudio de la función cerebral ha sido el uso de animales que carecen de un gen y se ha estudiado su capacidad de memorizar un circuito al objeto de estudiar la memoria. Sin embargo, llegar a conocer el funcionamiento de un sistema observando el comportamiento puntual de zonas del mismo quizás no sea útil, ya que la visión parcelada de un sistema de procesamiento no indique la salida del sistema. Por ejemplo, podríamos entender cómo

funciona un ordenador al ver la secuencia de señales TTL que fluyen por el “bus” del ordenador sin saber exactamente de donde procede, cuál ha sido la señal de sincronización, cómo se ha codificado la información, etc.

Sin embargo, la aplicación de principios básicos de funcionamiento del cerebro, han servido para establecer las bases de la aplicación de teoría de redes neuronales para la resolución de problemas cuyo abordaje matemático es muy complejo. Por ejemplo los trabajos clásicos de Warren McCulloch & Walters Pitts (1943) sirvieron para establecer un modelo de comportamiento de una animal con un sistema de solamente dos entradas sensoriales y una neurona de integración que genera una salida en función de un umbral de decisión. El incremento en el número de neuronas de integración y el número de capas de integración forman lo que es en la actualidad el procesamiento mediante redes neuronales. Las redes neuronales artificiales, entrenadas adecuadamente al ser expuestas a patrones de estimulación conocidos, son muy útiles para reconocer un patrón nuevo que se presenta. Sin embargo, si nos fijamos en la respuesta de las neuronas de las capas de integración quizás, no entendamos cuál va a ser la salida del sistema. Las redes neuronales son muy útiles, pero quizás no sirva de gran ayuda mirar lo que pasa en su interior para entender cómo funciona el sistema. En esta situación, estaríamos ante el mismo problema con el que se enfrentan los neurocientíficos, a la hora de intentar entender cómo procesa la información el cerebro humano. Quizás no podamos entender nunca, o al menos con la visión que la ciencia actual tiene de entender las cosas, el funcionamiento del cerebro y tendremos que seguir viéndolo como un sistema compuesto por una caja negra que de forma maravillosa pondera y procesa la información que le llega.