

LA MÍMESIS BIOLÓGICA UNA APROXIMACIÓN HACIA UN NUEVO PARADIGMA

J.A. MARTÍN-PEREDA

Catedrático del Departamento de Tecnología Fotónica de la ETSIT de Madrid. Ha trabajado en temas relacionados con las Comunicaciones Ópticas y la Fotónica. Su actividad actual se centra en el estudio de la mimesis de sistemas biológicos y la neurobiología computacional. Es Académico de la Academia de Ingeniería de España.

A. GONZÁLEZ-MARCOS

Miembro de la Universidad Alfonso X el Sabio, trabajó previamente en el Departamento de Tecnología Fotónica de la ETSIT de Madrid, donde desarrolló trabajos de investigación en estructuras de Computación Óptica y Conmutación Fotónica. Es miembro, a título personal, del Steering Group del Programa SFS de la NATO. Su interés actual se centra en las redes neuronales y el modelado neurobiológico.

Tras una serie de consideraciones sobre el papel de los paradigmas en Ciencia y Tecnología, se presenta uno de los posibles avances que podrá tener lugar en los próximos años, basado en el estudio de los sistemas biológicos como modelos para la realización de funciones concretas. Según se muestra, este nuevo planteamiento podría desarrollar una forma mucho más efectiva de consecución de objetivos que la actualmente obtenida con sistemas artificiales. Como ejemplo concreto se muestra el caso de la visión en los mamíferos.

Según pasan los años, los hombres y las ciencias van encontrando las ideas generales que subyacen tras un aparente marasmo inicial. Estas ideas marcan a partir de entonces, de forma clara e inequívoca, cómo y por qué ocurren determinadas cosas y de qué manera se puede trabajar con ellas. Así, por ejemplo, si la Química fue durante todo el siglo XIX tan sólo una especie de mero catálogo de elementos con sus propiedades, y hubo de esperarse a la llegada de Mendeleiev para que los dispusiera en la forma simple de la Tabla Periódica, e igualmente todos los espectros de esos mismos elementos y sus compuestos se habrían acumulado, sin explicación plausible, durante esos mismos años, y tuvo que aparecer la Mecánica Cuántica u Ondulatoria para que tuvieran interpretación, en todas las ciencias ha ocurrido, y afortunadamente sigue ocurriendo, lo mismo. Cada uno de esos momentos se corresponde con el concepto de "paradigma" que acuñó T.S. Kuhn en su "The structure of scien-

tific revolutions" [1]. A partir de ese instante, más o menos concreto en el tiempo, la Ciencia toma un rumbo nuevo y nada ya vuelve a ser como antes.

Pero, así como en Ciencia estos paradigmas suelen ser bastante claros, en Tecnología no suele ocurrir igual. Nadie discute, por ejemplo, que la teoría de la evolución de Darwin o la de la relatividad de Einstein, o el sistema planetario de Copérnico, constituyen paradigmas innegables. Pero, por ejemplo, en Electrónica, ¿cuáles son los posibles paradigmas? ¿O en ordenadores? Podrían plantearse, otra vez como ejemplo, el primer diodo de vacío, el transistor, el primer circuito integrado, la máquina analítica de Babbage, el ENIAC... Pero el grado de acuerdo nunca sería tan absoluto como en los anteriores casos.

No es éste el momento ni el lugar para seguir avanzando por este camino. Únicamente hemos querido empezar por él para intentar mostrar, aunque muy levemente, que así

como los caminos de la Ciencia son relativamente claros y que los saltos, cuando se producen, son reconocidos por todos, en Tecnología no pasa igual. En Tecnología las cosas van evolucionando de una manera más continua, no hay apenas saltos bruscos, casi todo se basa en lo anterior y, aunque a veces la velocidad del cambio sea muy grande como ocurre hoy en algunos entornos, no existen apenas discontinuidades. Si éstas aparecen son derivadas, en la mayor parte de los casos, de las surgidas en la Ciencia.

El concepto de paradigma en Tecnología debería asimilarse más al hecho de la introducción de conceptos nuevos en técnicas anteriores, o en la unión de tecnologías previas, antes disjuntas, para hacer surgir otra. Dos ejemplos de ello han sido presentados por los autores del presente artículo, en estas mismas páginas, hace algún tiempo [2][3]. Una era la Computación Óptica, en la que si apenas nada de lo que allí se veía era, por sí sólo,

esencialmente nuevo, el conjunto, la idea, el trabajar con luz en lugar de con electrones para procesar señales, sí lo era. El otro era el la Teoría del Caos. Con ella se intentaban justificar fenómenos previamente injustificables, llamar caos a lo que antes, en algunas ocasiones, se llamaba ruido, y pretender que de aquel marasmo pudieran surgir ideas nuevas. Aunque, también como en el caso de la Computación Óptica, casi nada de todo aquello era nuevo. Sólo se habían juntado, entre otras muchas otras, la Física de Fluidos con la Teoría del Láser, la Meteorología con la Electrónica, la dinámica de poblaciones con las de ciertas reacciones químicas. Tanto en un caso como en otro, el recorrido que es preciso efectuar es todavía bastante largo antes de que pasen a ser instrumentos de la vida diaria. Pero los inicios se han marcado y a partir de ellos, no cabe ninguna duda, se avanzará con mayor o menor velocidad, según las necesidades y los esfuerzos que se dediquen, pero el camino está ya trazado.

En esta ocasión se pretende traer aquí otro de los posibles caminos que se llevan recorriendo desde hace bastantes años y que puede marcar, quizás con más fuerza que los dos anteriores, un nuevo discurrir de la Tecnología en los próximos años. De hecho, muchos estiman que éste puede ser el camino del siglo XXI. Si el siglo XX fue el siglo de la Física y todas las tecnologías de ella derivadas, el XXI puede ser

INFORME ESPECIAL

el de las Ciencias de la Vida. Y aquí, las “viejas tecnológicas”, la Electrónica, la Informática, las Comunicaciones, pueden tanto ayudar a transitar por ese camino, como sacar enseñanzas de las que están naciendo y revitalizarse con ellas. Éste será el objetivo del presente artículo: intentar ver qué pueden aprender unas de otras y cuáles son las bases conceptuales de esa interconexión.

LAS METÁFORAS DEL CEREBRO

El cerebro humano, con sus limitaciones y sus fragilidades, sigue siendo, a pesar de todo, la máquina más poderosa que existe para realizar

de todo el mundo, a intentar extraer lecciones de cómo procesa el cerebro para poder imitarle. Derivados de ese intento han surgido conceptos tales como las Redes Neuronales o la Inteligencia Artificial, con los que se ha intentado remedar el comportamiento cerebral.

Pero, curiosamente, el camino en un principio común se ha ido distanciando con el tiempo. Las redes neuronales, tras los primeros inicios con McCulloch y Pitts en los que intentaban tomar a las neuronas como base de posteriores desarrollos, han avanzado de una manera casi autónoma, dando en la mayor parte de las ocasiones más énfasis al software que a

te en el libro de M. Arbib “The Metaphorical Brain”. A lo largo de la historia, los modelos del cerebro se han ido amoldando a lo que en esa época era lo más conocido. Así, desde la época presocrática, y hasta bien entrada la latina, predominaron los modelos hidráulicos. Galeno llegó a plantear la teoría de los “espíritus animales”, fluidos rarificados que circulaban por los nervios, como base para el comportamiento humano. Estos conceptos llegaron incluso a la época victoriana y en estructuralistas como Freud o Marx, algunos opinan que sigue subyaciendo un modelo de este tipo. De análoga manera a cómo la presión de una caldera de vapor no puede crecer indefinidamente, las presiones internas, psíquicas o sociales, deben expresarse finalmente de una forma u otra.

Existen modelos mecánicos, al menos, desde 1664, en que Descartes publicó su “Traité de L’homme”, y adquirieron su máximo exponente con La Mettrie, en 1748 y su “L’Homme Machine”. Allí indica que “el hombre es un conjunto de muelles que se activan recíprocamente unos a otros”. Un año después, Hartley proponía, en “Observations on Man”, que todos los fenómenos mentales eran el resultado de movimientos vibratorios en el cerebro, que daban lugar al nacimiento de las ideas.

Como es lógico, el siglo XX ha visto el nacimiento de nuevas metáforas sobre el cerebro basadas en la Electrónica, la Óptica y, principalmente, en los ordenadores. La idea de que la neurona trabaja como una puerta o un relé refleja las ideas primeras de los dispositivos electromecánicos para comunicaciones y ordenadores.

Así, aparecen ecos de los relés electromecánicos en la teoría de Hebb, en 1949, en relación con los circuitos que sustentan a la memoria. Y los sistemas de comunicaciones, y en particular la telegrafía, dieron lugar a la metáfora de Helmholtz del nervio y, en los años cincuenta, la ecuación del telegrafista fue la base para el desarrollo del modelo del cable de la neurona, adoptado por Hodgkin y Huxley en 1952, y por el que recibieron el premio Nobel.

Por otro lado, las metáforas ópticas se han basado, sobre todo, en la Holografía, por el sentido global y distribuido de memoria que poseen tanto los hologramas como el propio cerebro. El hecho de que una pequeña lesión en éste, y un ligero desperfecto en una parte de aquél, no afecten a sus respectivos comportamientos generales, hizo plantear a Pribram, en 1969, la semejanza entre ambos sistemas. Esta modelización se ha seguido desarrollando desde entonces.

Y se llega ya, finalmente, a la situación presente: a la metáfora computacional. En su núcleo, esta metáfora sobre la función del cerebro invoca la noción de reglas formales para el manejo de símbolos, así como algunas ideas sobre la estructura de los datos para representar a la información. El hecho curioso es que, a pesar de su popularidad, no existen evidencias claras de manejo de símbolos o de reglas lógicas formales, a nivel neurobiológico, en la fisiología animal. Únicamente en el terreno del lenguaje existen unos pequeños indicios de que lesiones específicas en el cerebro pueden afectar a ciertos errores sintácticos. Pero nada más. Por ello, y a pesar de

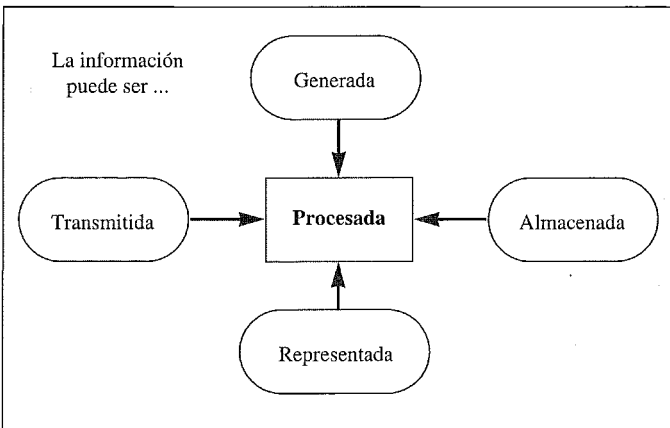


Figura 1. Esquema de las distintas formas de procesar información.

una serie de funciones. Si un niño de pocos años es capaz de diferenciar, con una simple mirada, una hoja de un árbol de una cuartilla, cualquiera de los ordenadores actuales requeriría un complejo algoritmo y un sistema de procesado muy elaborado, para realizar la misma función. Igual podría decirse con los leves matices de un determinado color o con las entonaciones de una palabra. Todo ello ha llevado, desde los años 40, a una larga lista de centros e investigadores

los propios circuitos que las configuran. Más que extraer enseñanzas del propio cerebro lo que se ha pretendido es intentar simularle creando máquinas que obtengan resultados similares a los que él obtiene. Y de ese resultado, en algunas ocasiones, a veces se llega a la conclusión de que el cerebro también debe trabajar así. Lo cual, evidentemente, es falso.

Nos encontramos así ante lo que J.G. Daugman [4] denomina “la metáfora del cerebro” y que tiene su preceden-

que se la considere como un hecho bien asentado, algunos autores opinan que sólo debe considerarse como una conjetura hipotética, o quizás histórica, sobre el cerebro.

¿Cómo se puede seguir avanzando? Hay, como en todo, muchos caminos posibles y, de la misma manera, sólo el tiempo podrá decir cuál es el más adecuado. Afortunadamente, muy pocas veces sólo se opta por uno sino que, en paralelo, se suelen seguir varios. Con ello las posibilidades de no equivocarse son mucho mayores. Una de ellas será la que se adoptará aquí y que, según lo dicho antes, podrá ser o no la correcta, pero es una de ellas.

LA METÁFORA CEREBRAL

Así como las distintas tecnologías existentes en cada momento servían para dar soporte a posibles modelos del comportamiento cerebral, el cerebro puede, a su vez, servir de base para la realización de múltiples sistemas de apoyo al ser humano. O dicho de otra manera: de forma análoga a cómo la tecnología de cada época ha servido para interpretar el funcionamiento del cerebro, ya ha llegado la hora de que se intente encontrar la forma en la que realmente trabaja éste para que pueda servir de base en la creación de nuevos sistemas o nuevas tecnologías. Es lo que podría denominarse "ingeniería biológica inversa": tomar el modelo de cómo funcionan los sistemas biológicos y desarrollar sistemas o productos basados en ellos. Una razón para hacerlo es muy evidente: la Naturaleza, a lo largo de 2.000 millones de años, ha producido estructuras y dado soluciones a una serie de problemas de una forma mucho

más eficaz y con mayor rendimiento que las actuales diseñadas por la ingeniería.

Como ejemplo de lo anterior puede tomarse el caso concreto de la forma de tratar la información. En general, las cuatro posibilidades de procesado que pueden llevarse a cabo con ella son, en grandes bloques: generarla, transmitirla, almacenarla y representarla (figura 1). ¿Cómo se han conseguido en ingeniería y en la naturaleza? Una representación esquemática aparece en la figura 2.

mas artificiales mediante cables coaxiales o fibra óptica. En los seres vivos esa conducción de señales se realiza a través de su sistema nervioso que, además de transmitirla, bajo ciertas condiciones puede realizar incluso un cierto procesado de la misma para su más fácil interpretación por el cerebro. Éste, a su vez, realiza la función de almacenamiento mediante el proceso de memoria, memoria que tiene unas características bastante más activas que la efectuada por las arti-

Siguiendo este modelo de mimesis, en muchos campos de la Ciencia y la Tecnología se han llevado a cabo estrategias de diferente tipo para intentar llevar al mundo de la creación humana reflejos de lo que el propio ser humano es. Uno de los más característicos es el representado por los dos bloques de la figura 3. En ella se representan, a un lado, algunas de las que posiblemente, son las funciones más características del cerebro, ya que se derivan a partir de él mediante

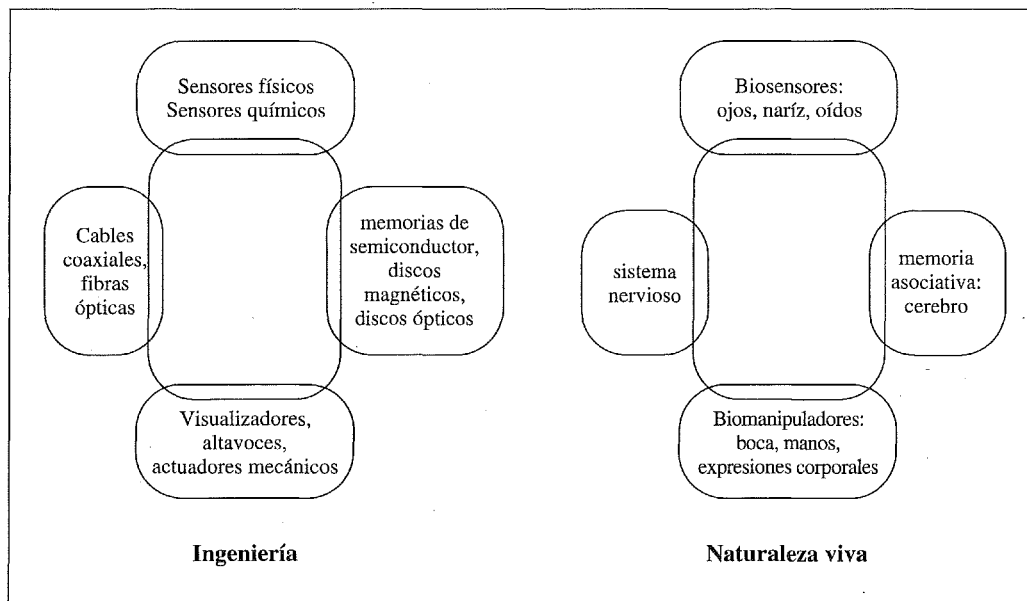


Figura 2. Procesado de la información en ingeniería y en sistemas biológicos.

En ella se muestran, de manera comparada, las dos estrategias adoptadas en una y en otra. La generación de información, esto es, la conversión de una señal externa en otra que pueda ser interpretada, bien por el organismo, bien por un sistema artificial, se realiza en los seres vivos mediante sus elementos sensoriales (ojos, nariz, oídos...). En ingeniería se realiza mediante la presencia de sensores que, de acuerdo con sus características, pueden ser físicos o químicos. La transmisión se efectúa en los siste-

ficiales, simbolizadas en las memorias de semiconductor o en los discos magnéticos u ópticos. La memoria biológica puede desempeñar una función mucho más interactiva con la acción de procesado, debido al carácter asociativo que posee. Finalmente, de igual manera a como los sistemas creados por el hombre hacen llegar la información al exterior mediante altavoces, pantallas o actuadores mecánicos, los seres vivos lo hacen por medio de su boca, manos o expresiones faciales o corporales.

capas superpuestas y en las que el nivel de abstracción va siendo más elevado según se acercan al centro. En la otra aparecen funciones análogas, llevadas a cabo de manera no biológica, y de acuerdo con una configuración semejante a la anterior. Por ello, en cierta manera se la podría denominar un intento de aproximarse a lo que podría ser una "inteligencia artificial". Uno de los objetivos, como puede apreciarse, lo constituye una de las ramas de la Tecnología más usuales en nuestros días: la

Robótica. La base de todo el entramado, el equivalente al bloque central de la otra que era el cerebro, aparece aquí esquematizado en una de las técnicas empleadas hoy en este terreno: el Procesado Simbólico. Pero ya se ha señalado antes que la semejanza con la realidad del procesado mental no pasa de ser una mera conjetura.

Parece oportuno que, derivado del hecho anterior, se pase a comentar algunas de las limitaciones que presenta el anterior planteamiento, como consecuencia de las diferencias fundamentales que ofrece el comportamiento de las redes neuronales biológicas y las neuronales artificiales.

LIMITACIONES DE LAS REDES NEURONALES RESPECTO A LAS BIOLÓGICAS

Una de las limitaciones más significativas que tienen las redes neuronales artificiales con respecto a las neuronales biológicas es su comportamiento más rígido. Existe una gran cantidad de información sobre cómo evolucionan temporalmente determinados sistemas biológicos e indica que, en la mayor parte de los casos, esa evolución no satisface a ningún tipo de regla fija y determinada sino que, por el contrario, aparece una dinámica que es esencialmente de tipo complejo, aproximándose en muchos casos al de un verdadero caos, en el sentido de la teoría ya conocida del mismo. Así, por ejemplo, del análisis de los datos de un electroencefalograma se desprende que la actividad cerebral humana se parece más a la de un sistema no lineal que a la de otro que sigue normas fijas y establecidas. Del estudio del ritmo del corazón se detecta que el reco-

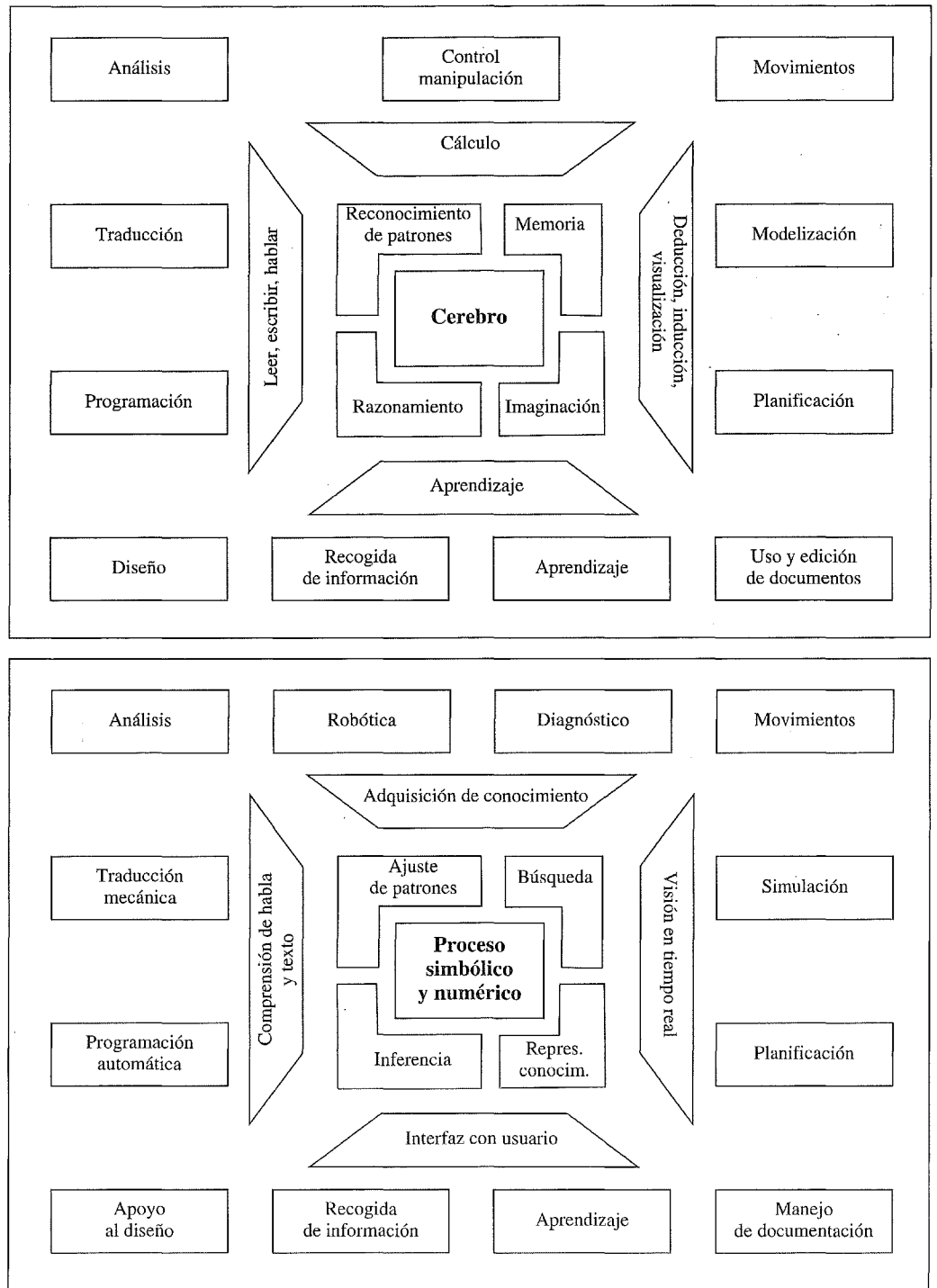


Figura 3. Estrategias de enfrentamiento con el medio externo en (a) el cerebro y (b) los sistemas artificiales.

gido en personas sin ningún tipo de patología es notoriamente más complejo que el correspondiente a las que tienen algún tipo de trastorno coronario, en las que puede

llegarse a registrar un ritmo totalmente regular, en número de latidos por minuto.

Estos hechos, entre otros muchos posibles, indican que los organismos vivos poseen

una complejidad muy alta. De hecho, es muy superior a la que ofrecen las simulaciones que se intentan realizar de ellos, a través de técnicas como las derivadas de las re-

des neuronales. Así, en contraste con las máquinas de estados finitos, que operan con simples bits de información, los seres vivos parecen moverse con complejos bloques de información. Por ello, trabajar con modelos basados en teoría de sistemas dinámicos clásicos es trabajar con un conjunto de limitaciones que pueden impedir el desarrollo de generalizaciones más amplias. Parece procedente analizar, aunque sea rápidamente, algunas de estas limitaciones.

La primera limitación que puede señalarse es que el comportamiento de las redes neuronales artificiales es colectivo pero no paralelo: cualquier cambio que se realice en la actividad de la neurona i-ésima afecta instantáneamente a todas las demás.

Los sistemas biológicos, por el contrario, presentan al mismo tiempo un comportamiento paralelo y colectivo. Por ejemplo, las manos derecha e izquierda son mecánicamente independientes, lo que quiere decir que trabajan en paralelo. Pero, al mismo tiempo su actividad está coordinada por el cerebro, lo que implica que su comportamiento es colectivo.

La segunda limitación es que en las redes neuronales su comportamiento viene determinado, de manera unívoca, por sus condiciones iniciales. El sistema nunca olvida estas condiciones y las lleva consigo hasta un tiempo infinito. Para cambiar dicho comportamiento, las entradas externas han de sobrepasar de manera significativa a la inercia del pasado. Por el contrario, los sistemas biológicos son mucho más flexibles, poseen una inercia mucho menor y adaptan su comportamiento a los cambios del entorno.

Finalmente, las características de los sistemas artificiales son de la misma escala y están aislados del micromundo por una gran diferencia de magnitudes. Los sistemas biológicos, en cambio, involucran mecanismos que abarcan el margen completo de magnitudes, desde la molecular hasta la macroscópica.

Todo lo anterior conduce a la conclusión de que, para que un sistema pueda simular a uno biológico, debe partirse de postulados diferentes a los enunciados para las redes neuronales convencionales. No es éste el momento de completar este camino, pero sí parece conveniente, al menos, iniciar algunos pasos para configurarlo. Esto será lo que se hará en los siguientes apartados.

NIVELES PARA EL ESTUDIO DEL SISTEMA NERVIOSO

Resulta lógico que, antes de iniciar cualquier tipo de estudio, se proceda a definir los límites dentro de los cuáles va a realizarse. De igual manera que no es lo mismo intentar explicar las propiedades de un cuerpo partiendo de las propiedades de los niveles atómicos de los elementos que lo componen, que adoptando un enfoque macroscópico, tampoco es indiferente el nivel en el que un estudio del sistema nervioso se sitúe. Marr y Poggio [5], en 1976, y Marr [6], en 1982, articularon un marco de referencia en torno al cual podían moverse los distintos planteamientos posibles. Los tres niveles básicos eran los basados en: un nivel de análisis abstracto del problema, un nivel algorítmico (que especifica el procedimiento formal por el que para una entrada dada se puede obtener la salida deseada) y

un nivel de la implementación física.

El punto fundamental de la doctrina de Marr era que, cuanto más alto fuera el nivel que se tomara, menos importaba lo que ocurría en los niveles inferiores. De esta forma, los problemas computacionales del nivel más alto podrían ser analizados independientemente de si se entendía o no el algoritmo que realizaba la computación. Era una estrategia "de arriba a abajo" en la que, yendo ya al caso concreto tratado aquí,

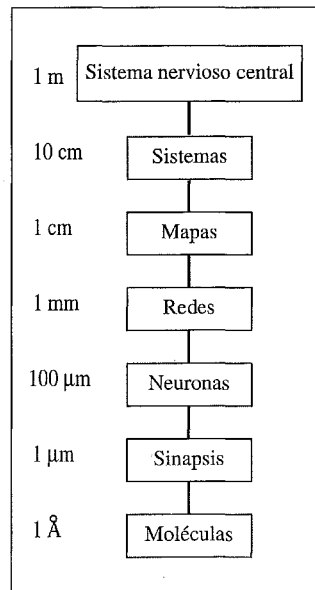


Figura 4. Niveles estructurales en los que se configura el sistema nervioso de los mamíferos.

importaba poco cómo funcionaban las sinapsis, o lo que es lo mismo, la conexiones entre neuronas, si a lo que se quería llegar era a entender la forma de trabajar del cerebro humano.

Pero la realidad es que si se intenta hacer corresponder a estos niveles de análisis con los niveles de organización en que está configurado el cerebro y cómo trabaja, el ajuste que puede hacerse es, como mostraron Churchland y Sejnowski en 1988 [7], prácticamente nulo. En la fi-

gura 4 aparecen los principales niveles estructurales en que está configurado el sistema nervioso y que, como puede verse, abarcan desde las simples moléculas y las sinapsis, hasta el Sistema Nervioso Central, pasando por neuronas, redes neuronales, mapas y sistemas particulares, como el olfativo o el visual. Como también puede apreciarse, cubre más de ocho órdenes de magnitud, desde las dimensiones moleculares, medidas en Angstroms (10-10 m), hasta las fibras nerviosas, que pueden alcanzar varios centímetros.

Por otra parte, no es sólo muy amplio el abanico de dimensiones espaciales que abarca el sistema nervioso; también lo es el de las temporales. En un mismo sistema pueden encontrarse fenómenos que van desde algunas decenas de microsegundos, como es el caso de la apertura de los canales iónicos de las membranas nerviosas, hasta días e incluso semanas, como son los procesos relacionados con la memoria. Si antes se abarcaban ocho órdenes de magnitud, ahora puede llegarse a doce.

EL PARADIGMA DE LA VISIÓN

Al inicio de este artículo se mencionaba la presencia de paradigmas perfectamente claros en la Ciencia y de la dificultad de encontrar equivalentes en el campo de la Tecnología. También se señalaba que los existentes en Ciencia repercutían, tarde o temprano, en Tecnología. El hecho planteado aquí es la posibilidad de que uno de los paradigmas que impliquen un nuevo avance en la mayor parte de los entornos científico-técnicos en los próximos años puede ser el del conoci-

miento de la forma de funcionar del cerebro. De las enseñanzas que se pueda extraer de su forma de trabajar podrán, sin duda, surgir nuevos desarrollos que impliquen un salto cualitativo y cuantitativo en el desarrollo del hombre.

Pero dado que, según todos los estudios que se llevan a cabo en las diferentes ramas de la neurofisiología y de la biología molecular, llegar al conocimiento completo de cómo y por qué actúa el cerebro como lo hace, puede ser una tarea demasiado compleja para poder ser atacada en su totalidad, parece conveniente iniciar el camino por una de sus funciones y, luego, pasar de ella a las demás. El proceso sería equivalente al planteamiento de las leyes de Newton. Evidentemente, con ellas no se planteó el llegar a explicar la razón última de las fuerzas de la Naturaleza. Eran solamente la justificación de una parte de ellas. Tomándolas como base se han ido descubriendo después otras leyes y otros comportamientos que, tomados en su conjunto desde un principio, habría sido imposible abarcar. La situación puede ser aquí análoga.

Y de todos los sistemas que están coordinados por el cerebro, el que en un principio parece más tentador para iniciar la marcha es, sin duda, el sistema visual de los mamíferos. Una razón para ello es que aproximadamente el 60% de toda la información sensorial percibida por éstos llega a través de dicho sistema. A su vez, cerca del 50% de toda la corteza cerebral está destinada a procesar la información que se recibe por ese camino. Es evidente, por otra parte, el interés tecnológico que tiene conocer cómo procesan los seres vi-

vos. El rendimiento del sistema visual de los vertebrados es, con mucho, infinitamente más eficiente que el de cualquier sistema artificial creado por el hombre. Resulta conveniente, a este respecto, hacer unas pequeñas comparaciones entre cómo procesan los seres vivos la información que perciben y cómo se lleva a cabo en los sistemas creados artificialmente.

La mayor parte de los equipos digitales destinados al procesamiento de la información visual basan su funcionamiento en la conversión de señales en símbolos mediante algoritmos más o menos complejos con una base de software muy fuerte. Su eficiencia es bastante reducida debido al hecho de la gran potencia computacional necesaria para procesar y extraer información de cualquier imagen variable en el tiempo, como las que existen a nuestro alrededor. En [8] se señala, como ejemplo,

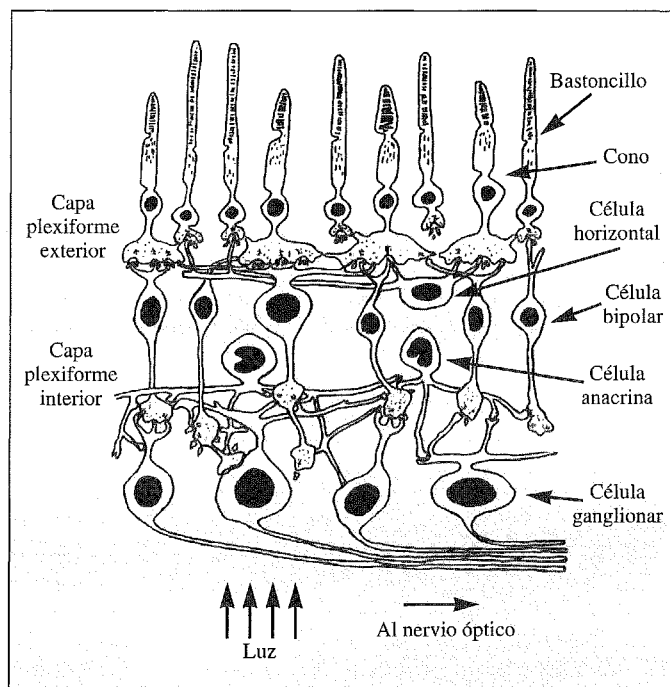
que si de una imagen convencional, con unos 750.000 pixels (puntos de pantalla), que varíe a la velocidad convencional de treinta imágenes por segundo, se quiere extraer tan sólo una simple instrucción por pixel, sería preciso un ordenador que fuera capaz de realizar del orden de 23 millones de instrucciones por segundo. El caso más real, en el que aparecen más de una instrucción por pixel lleva a la necesidad de procesadores cada vez más rápidos.

Por el contrario, el sistema visual de los mamíferos es capaz de reconocer cambios en una imagen que duren entre 70 y 200 ms. Y todo el procesamiento lo llevan a cabo con neuronas que, curiosamente, no son mucho más rápidas que algunos de los circuitos electrónicos presentes hoy en el mercado: su velocidad de respuesta es de unos 2 ms. Por otra parte, en los sistemas artificiales de procesamiento de imágenes cualquier al-

goritmo secuencial implementado en un ordenador digital convencional requiere millones de operaciones, mientras que en los sistemas biológicos no tienen lugar más de 46 etapas de transformación de la señal. O dicho de otra forma: el rendimiento en cada etapa de procesamiento es millones de veces superior en los seres vivos que en las máquinas creadas por el hombre.

Existe, además, otro hecho que parece oportuno resaltar. Es el que se refiere a la comparación entre el espacio requerido para contener el sistema de procesamiento en un ordenador convencional y en un mamífero. Es éstos, el tamaño viene limitado por una característica puramente biológica como es el sistema reproductor. En los mamíferos, el tamaño de la cabeza viene limitado por el volumen de la cavidad pélvica. Esto hace que la longitud de "cableado" entre los elementos básicos del sistema nervioso no pueda aumentarse indefinidamente. Y esto se consigue haciendo que el rendimiento y la efectividad del mismo sean las más altas posibles. Como datos concretos hay que partir del hecho de que la longitud aproximada de conducción que existe en el cerebro humano es del orden de 10^8 metros, mientras que el volumen total del cráneo no sobrepasa habitualmente los 1,5 litros. Una de las estrategias que adopta éste para economizar cableado es la de agrupar las unidades de procesamiento de tal forma que en las estructuras próximas se procesan representaciones similares. La otra estrategia consiste en compartir dichas conducciones, de manera que un mismo axón puede utilizarse para codificar un número muy elevado de codificaciones diferentes.

Figura 5. Esquema aproximado de las diferentes capas celulares de la retina.



Finalmente, y para resaltar mucho más aun el rendimiento del cerebro comparado con los sistemas artificiales de procesado de la información, es preciso señalar que una neurona emplea tan sólo 10^{-15} J de energía por operación que realiza, mientras que la tecnología de silicio más efectiva empleada hoy descende como mucho a los 10^{-7} J. Por ello puede decirse que el cerebro es del orden de siete a ocho órdenes de magnitud más eficiente en el consumo de energía. Este hecho debe ponerse en paralelo con el de la velocidad de procesado, mucho más alta que en los actuales ordenadores. Para complementar este dato, podemos recordar que uno de los más rápidos existentes hoy alcanza las 10^9 operaciones por segundo, mientras que el cerebro, cuando está incluso en reposo, llega a las 10^{11} . Y eso a pesar de que, como ya se ha dicho antes, las neuronas son elementos realmente lentos comparados con los actuales dispositivos integrados: 10^{-3} s en aquellos, frente a los 10^{-9} s de éstos.

Resulta por ello evidente que entender cómo procesa el cerebro, y más en concreto cómo se procesa la información visual en él, puede ser una tarea mucho más fructífera que seguir tratando de crear máquinas artificiales basadas en principios no derivados de los que ofrece la biología.

ALGUNAS IDEAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA RETINA

Sin pretender plantear aquí un modelo cercano a lo que puede ser la forma de trabajar del sistema visual de los vertebrados, sí parece procedente dar algunas pinceladas de algunas de sus caracterís-

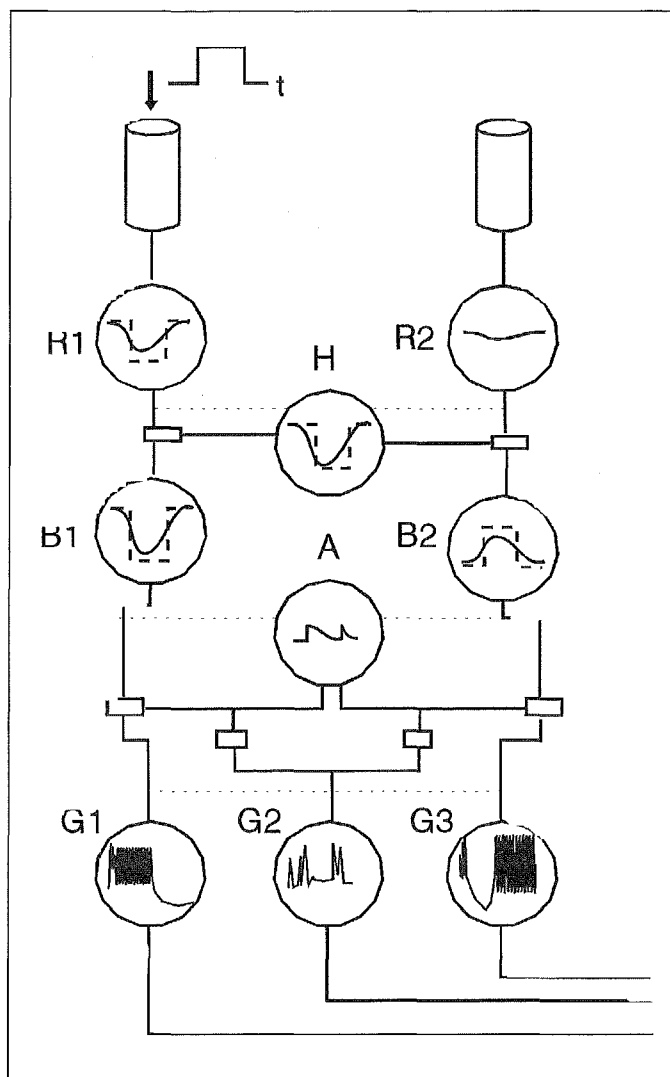


Figura 6. Modelo de Dowling de la retina de los vertebrados (R: fotorreceptores, H: células horizontales, B: células bipolares, A: amacrina, G: células ganglionares).

ticas más señaladas y, como conclusión, mostrar uno de los primeros modelos que se han realizado del mismo, siempre desde una perspectiva de mimesis biológica y no de interpretación fenomenológica.

Para ello, y a modo de recordatorio, en la figura 5 se muestra la representación de una parte de la retina de los mamíferos. Como puede apreciarse, cinco son los tipos diferentes de células que están presentes: fotorreceptores, horizontales, bipolares, amacrinas y ganglionares.

De ellas, tres se corresponden con un proceso de transmisión hacia adelante de la señal: fotorreceptores, bipolares y ganglionares, mientras que las otras dos tienen como misión la de interrelacionar horizontalmente las señales que se propagan por las otras. Existe, además, entre ellas otra diferencia muy importante. Mientras que las tres primeras, ante un pulso de luz que incida sobre los fotorreceptores, responden con un potencial eléctrico análogo a la señal incidente, en el caso de

las amacrinas y las ganglionares la respuesta es un tren de impulsos cuyas características dependen del tipo de célula que se considere y de su situación respecto a los fotorreceptores que recibieron la señal. De acuerdo con ello, existen diferentes tipos de células ganglionares y amacrinas cuyo detalle no se va a comentar aquí, pero que pueden consultarse en cualquier libro de neurofisiología de la visión.

Uno de los modelos más sencillos de la retina fue el presentado por Dowling en 1970, y que aparece en la figura 6. Se trata de un sencillo esquema compuesto por dos únicos fotorreceptores cuyas salidas actúan sobre las correspondientes células bipolares, que se encuentran unidas habitualmente por una única célula horizontal. Los extremos de las bipolares, unidas entre sí por una amacrina, alimentan tres células ganglionares, dos de ellas conectadas directamente a las dendritas de su correspondiente bipolar y la tercera a dendritas de la amacrina. Cada una de estas ganglionares da lugar a un tipo diferente de potenciales de acción, esto es, de trenes de impulsos que, en este caso, y sin detallar su comportamiento, se corresponden en neurología con las conocidas como tipo OFF X/beta, ON X/beta y una mezcla de las OFF Y/alfa y ON Y/alfa.

Este modelo biológico ha servido a los autores del presente artículo para la realización de un sistema de reconocimiento de movimientos y cuyo detalle puede verse en [9][10][11]. Uno de los puntos fundamentales del mismo, y sin entrar en sus características particulares, es que los elementos básicos que han servido para su realización son las unidades básicas

que constituyeron la base para el desarrollo de una arquitectura de computación óptica anunciada con anterioridad. Esto quiere decir que, a pesar de la aparente diferencia que existe entre el tema en el que se ha centrado el artículo hoy y el tratado en anteriores ocasiones, las conexiones son mayores de lo que parecen. Y con ello se llega a la conclusión final del presente artículo: Ningún tema constituye una isla separada del resto. Entre la mayor parte de los entornos por los que se mueve el conocimiento humano existen nexos de unión que, descubriéndolos, pueden ayudar a descubrir nuevos horizontes.

Nota

Una parte de este trabajo fue presentado por uno de los autores (AGM) en el "Curso de Especialización en Ingeniería Biomédica", Universidad de Alcalá de Henares, Febrero, 1995.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Thomas S. Kuhn, "The Structure of Scientific Revolutions". Segunda edición. The University of Chicago Press. Chicago. 1970.
 [2] J.A. Martín-Pereda & A. González Marcos, "Panorámica global de la Computación Óptica: Una visión parcial", *Mundo Electrónico*, 208, 55-66 (1990).
 [3] J.A. Martín-Pereda & A. González Marcos, "Teoría del Ca-

os en Electrónica y Fotónica: Caminos a seguir", *Mundo Electrónico*, 235, 43-50 (1993).

[4] John G. Daugman, "Brain Metaphore and Brain Theory". En "Computational Neuroscience", ed. E.L. Schwartz. The MIT Press. Cambridge, Mass. 1990.
 [5] D. Marr y T. Poggio, "Cooperative computation of stereo disparity". *Science*. 194. 283-287 (1976).
 [6] D. Marr, "Vision". Freeman. San Francisco (1982).
 [7] P.S. Churchland y T.J. Sejnowski, "Neural representations and neural computations". En "Biological computation", ed. L. Nadel. The MIT Press. Cambridge, Mass. (1988).
 [8] M.M. Gupta & G.K. Knoff, "Neuro-Vision Systems: A Tutorial". En "Neuro-Vision

Systems", eds. M.M. Gupta & G.K. Knoff. IEEE Press. New York (1993).

[9] J.A. Martín-Pereda & A. González-Marcos. "An Approach to Visual Cortex Operation: Optical Neuron Model". En "Conference on Lasers and Electro-Optics" CLEO/Europe'94. Amsterdam. Holanda (1994).
 [10] J.A. Martín-Pereda. "Some Connections between Cardiology-Psychiatry and Electronics-Photonics based on the Theory of Complexity". En "Fluctuation Phenomena: Disorder and Nonlinearity". IEO Workshop. San Lorenzo de El Escorial (1994).
 [11] A. González-Marcos & J.A. Martín-Pereda. "A Model of Amacrine and Ganglion Cells for Optical Information Processing". LEOS'94. Boston (1994). 