

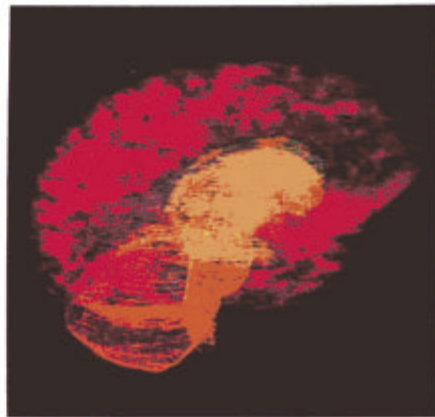
Cerebro, redes neuronales y sistemas dinámicos

Los sistemas de redes neuronales están contribuyendo al entendimiento de las funciones del cerebro y al desarrollo de formas nuevas de computación y de procesamiento de la información que resultarán en una nueva generación de computadoras y robots.

HUMBERTO CARRILLO CALVEY*

En el terreno científico se han sucedido dos revoluciones en las últimas décadas: primero, la de la Dinámica Matemática con el descubrimiento del caos determinístico y sus profundas repercusiones en la física, así como en las ciencias naturales en general, y después la que gracias al desarrollo de los sistemas llamados redes neuronales ha impactado la neurociencia y la tecnología de computadoras. Además de contribuir al estudio del cerebro y del sistema nervioso, los avances logrados en el diseño, análisis y control de las redes neuronales han permitido inventar nuevas formas de computación y de procesamiento de información dando por resultado toda una nueva generación de computadoras y robots.

* Laboratorio de Dinámica no Lineal, Facultad de Ciencias, UNAM.



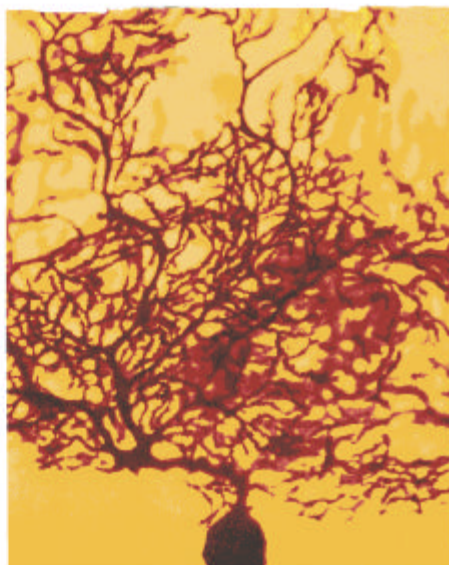
"Un signo vital de la biología moderna ha sido fundamentar cada vez más el conocimiento biológico en principios de física y química, y describir matemáticamente los procesos y las interacciones de los diferentes componentes de un organismo".

Sería muy difícil sostener que el avance explosivo que tuvo el estudio de las redes neuronales en los ochenta es independiente y no debe nada al que tuvo previamente la dinámica en la década de los setenta. Históricamente, el desarrollo de tecnologías de computación ha ocurrido paralelamente al de las matemáticas y ha requerido en cada etapa un nivel más alto de sofisticación matemática. Del uso crucial del código binario en un principio, se ha llegado en la actualidad al diseño de sistemas dinámicos computacionales cuyo análisis recurre a las técnicas y métodos más elaborados de la matemática moderna. Por otra parte, también en las últimas décadas se ha producido un desarrollo acelerado de la biofísica y la biología matemática. Un signo vital de la biología moderna ha sido fundamentar cada vez más el conocimiento biológico en principios de física y química, y describir matemáticamente los procesos y las interacciones de los diferentes componentes de un organismo.

Tratar de descifrar los misterios del funcionamiento del cerebro y el sistema nervioso, o de construir aparatos que emulen estas funciones es un problema clásico que ha sido atacado desde diferentes puntos de vista por distintas disciplinas como la neurofisiología, la psicología, la cibernética y la inteligencia artificial. Los avances recientes en estas áreas y en la tecnología y el análisis matemático de las redes neuronales han tenido un efecto unificador de estas disciplinas que hace apenas diez años estaban desvinculadas entre sí. La similitud matemática de los modelos de redes neuronales con otros sistemas físicos (v. gr.: los vidrios de spin) ha atraído la atención de una multitud de físicos hacia esta área y ha permitido usar la experiencia acumulada por ellos en el tratamiento matemático de sus sistemas de física estadística, para entender las redes neuronales. La confluencia de todas estas disciplinas ha resultado en una revolución generadora de una nueva área de trabajo que integra enfoques y métodos para lograr un objetivo común: entender y emular el funcionamiento del cerebro y la mente. Desde el punto de vista de la ingeniería de autómatas y computadoras se han logrado ya resultados espectaculares y se ve en el horizonte la posibilidad de inventar arquitecturas que ofrezcan la posibilidad de realizar funciones cognitivas como la generalización, la asociación y el aprendizaje.

Redes neuronales

Las redes neuronales son arreglos de proce-



"Las redes neuronales son arreglos de procesadores (células) que tienen un comportamiento análogo al de las neuronas."

sadores (células) que tienen un comportamiento análogo al de las neuronas. Como las células nerviosas, cada uno de estos procesadores puede estar activo o no, y el estado global de la red está determinado por el estado de cada una de sus células. Como en el sistema nervioso, estos procesadores se comunican mediante una red de conexiones de diferente calidad (inhibitorias o excitatorias) y peso.

Se considera que estas conexiones se producen mediante prolongaciones de los procesadores que constituyen una arborización como la que forman los axones y dendritas de las neuronas. Como en fisiología, los puntos de conexión entre estas células son llamados sinapsis. También como las neuronas, los elementos de la red responden a la acción externa como integradores: su estado (respuesta) está en función del efecto que recibe a través de la sinapsis con todos los demás procesadores conectados con él. Así, mediante la interacción de sus células, el estado de la red cambia constantemente en el tiempo. Un sistema de este tipo es llamado sistema dinámico y puede ser modelado matemáticamente por un sistema de ecuaciones diferenciales, si se conocen las leyes físicas que rigen su comportamiento.

Sistemas dinámicos

En general un sistema dinámico de dimensión n es una porción del universo idealizada de tal manera que su estado está caracterizado por una colección $X_1, X_2, \dots, X_n$ de magnitudes cambiantes en el tiempo. Así, la evolución del sistema dinámico está determinada por n funciones $X_1(t), X_2(t)$. En las diferentes aplicaciones se encuentran leyes o principios a partir de los

Ciencias cognitivas

cuales se puede derivar reglas matemáticas que rigen la evolución del sistema. Estas leyes matemáticas de comportamiento permiten determinar las funciones $X_i(t)$ y entonces conocer el comportamiento futuro del sistema. El tratamiento de los sistemas dinámicos requiere del uso del cálculo diferencial e integral que es una matemática útil, no sólo para el estudio del movimiento, sino de los cambios en general. Más específicamente, la matemática que interesa es la teoría de las ecuaciones diferenciales o la dinámica matemática.

Cerebro y computadoras

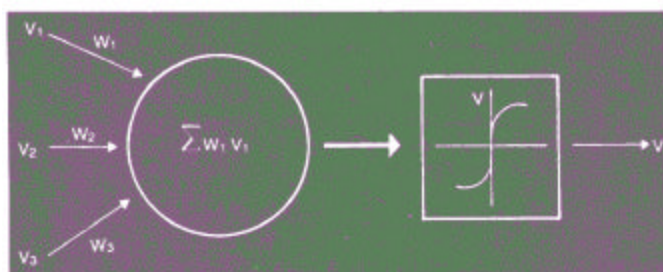
El cerebro humano es seguramente una de las estructuras más complejas del universo. Tan sólo la exploración de su estructura anatómica implica una dificultad colosal. A pesar de esto, el progreso que se ha hecho en la comprensión de su estructura y función ha sido muy importante. En su tiempo, hombres como Descartes trataron de entender los mecanismos mediante los cuales el cerebro y los músculos transmitían información. En ese entonces los fenómenos eléctricos no estaban todavía bien entendidos y no se tenía aún el concepto de neurona que mucho después, con el trabajo del científico español Ramón y Cajal, quedó establecido como el bloque básico con que está compuesto el sistema nervioso.

En los cincuenta el programa de inteligencia artificial empezó con dos objetivos: diseñar programas o máquinas "inteligentes", y entender la inteligencia humana. La interrelación de estos dos objetivos le interesó particularmente a J. von Neumann quien, con este objetivo en mente, desarrolló la teoría de autómatas y estudió las diferencias y similitudes entre las máquinas "naturales" y las "artificiales". Mc-

Culloch y Pitts, interesados en simular las células nerviosas —neuronas formales— con autómatas artificiales mostraron, en 1943, que una red de tales neuronas era capaz de simular una máquina de Turing. Más tarde Rosenblatt, Minsky y Papert, estudiaron redes que llamaron perceptrones y trataron de desarrollar sus modelos de redes formales para hacerlos aprender a resolver problemas. Habiéndose probado que los perceptrones no podían resolver el problema, el interés en estos sistemas decayó durante los años setenta y sólo algunos grupos aislados continuaron sus investigaciones en esta área.

El desarrollo de otras tecnologías como los circuitos integrados, además de los mencionados anteriormente, fue un factor importante para que en los ochenta el interés en las redes neuronales se revitalizara y éstas ocupan hoy día un primer plano en la escena científica. Gracias a esto, hoy se puede probar e implementar físicamente en circuitos reales muchas de las ideas abstractas sobre computación que recientemente se han ido generando. Hace ya bastante tiempo que el hombre produce computadoras que pueden hacer cálculos con más velocidad y exactitud que el cerebro humano. Sin embargo, existen muchas tareas que nosotros podemos hacer con facilidad y son tremendamente lentas o imposibles de realizar en una computadora. ¿Qué hace a las máquinas menos inteligentes que nosotros? ¿Qué diferencia esencial existe entre el cerebro y una computadora, entendidos éstos como unidades cibernéticas? Durante la vida de un ser humano se pierden muchas células nerviosas y conexiones entre ellas sin pérdida de funcionalidad. Incluso, ante la pérdida más drástica que puede ocasionar una lesión, en ocasiones se observa que otras partes del cerebro realizan la función de la región dañada. En cambio, nuestras com-

putadoras están diseñadas de manera que toda parte y toda conexión son imprescindibles para su buen funcionamiento. Si le amputamos un chip o le cortamos un cable limitamos inmediatamente su desempeño. Esto se podría resolver si en cada computadora se tuvieran múltiples copias de cada componente a manera de repuesto; esta multiplicidad haría el equipo más complicado y más caro, pero no mejor, y no parece ser la vía que la naturaleza escogió para diseñar nuestro cerebro. Por el contrario, parece que la operación de nuestro cerebro se da de una manera distri-

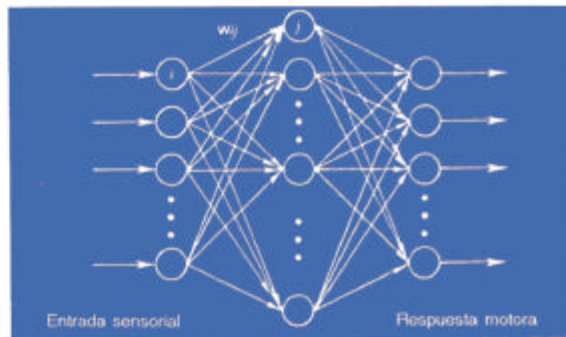


Procesamiento de las señales de entrada (V_i) a una "neurona" de la red. Los pesos sinápticos (W_i) ponderan un efecto de cada entrada linealmente. El resultado es analizado mediante una función de activación sigmoide para producir una respuesta (V).

buida, lo que implica que las funciones están repartidas entre un número muy grande de componentes, y ninguna parte del trabajo se delega exclusivamente a una de ellas. La necesidad de funcionar de esta manera justifica el conexionamiento masivo que revelan los estudios anatómicos del cerebro. Llevar a cabo simultáneamente varios procesos es una capacidad del cerebro necesaria para realizar tareas de alto nivel como controlar visualmente la locomoción. Si no tuviéramos esta capacidad de procesamiento en paralelo no podríamos hacer deporte o tocar un instrumento musical, pues muchas de las acciones que esto requiere tienen que coordinarse colectivamente y ocurrir en un lapso demasiado pequeño para que puedan realizarse en orden secuencial.

Las redes neuronales son sistemas con capacidad de procesamiento paralelo y distribuido. Aunque se han diseñado diversos modelos de computadoras que funcionan con redes neuronales, el paradigma clásico es un arreglo numeroso de procesadores (unidades) altamente interconectados. Generalmente estos se conciben dispuestos por capas unidimensionales o bidimensionales con conexiones que vinculan exclusivamente las unidades de una capa con otra. Esta forma de conexionamiento jerárquico es susceptible de interpretaciones biológicas; por ejemplo, en una red con tres capas se puede pensar que la primera, la capa de entrada, representa neuronas sensoriales; la capa intermedia, las células que hacen el procesamiento interno, y la capa de salida representa motoneuronas (Fig. 1 y 2). Vista así, esta red actúa como si se tratara de un sistema que realiza algún tipo de coordinación sensorio-motora. Para lograr un comportamiento interesante de la red, se considera que la respuesta de los procesadores a los estímulos que recibe ocurre de una manera no lineal, y que la influencia de uno sobre otro depende linealmente del peso de la conexión entre ellos (la fuerza de la sinapsis). En la función de respuesta de cada unidad y en los valores de los pesos w de la conexión entre la i -ésima y la j -ésima unidad, está codificada la naturaleza dinámica de la red. Una vez que los procesadores están dados, el funcionamiento de la red está determinado por los pesos de las conexiones, y al modificar éstos, se modifica el comportamiento de la red.

Las computadoras que funcionan con este tipo de redes, a diferencia de las convencionales, no se programan sino que se entrenan. Después de un periodo de entrenamiento, durante el cual los pesos de la red se van modificando



Red neuronal organizada en capas.

para condicionar a la red a que produzca el comportamiento deseado, viene la etapa de operación, durante la cual la red debe conducirse de manera adecuada ante situaciones que nunca conoció en el periodo de entrenamiento. Una red será más eficiente a medida que tenga más experiencia (por ejemplo, que sus conexiones hayan sido arregladas para dar la respuesta adecuada ante un número mayor de escenarios diferentes). Obviamente, el problema crucial en esta arquitectura es el diseño de métodos y algoritmos para cambiar los pesos secuencialmente, una vez que cierta colección de parejas de estímulos y respuestas han sido dados. Por esto se recurre a métodos matemáticos de optimización, así como a principios y técnicas de la teoría cualitativa de las ecuaciones diferenciales. Modificar los pesos de la red equivale a modificar la estructura del sistema dinámico subyacente para crear en él los atractores y las cuencas de atracción necesarias para reproducir el comportamiento prescrito.

En nuestro cerebro y en estas computadoras (como en la rosa, la espina es el precio del perfume), a cambio de las nuevas capacidades, se pierden la precisión y la infalibilidad de las computadoras convencionales. Un ejemplo espectacular nos lo da la máquina NETalk diseñada por Terrance Sejnowsky y Charles Rosenberg para convertir texto inglés en inglés hablado. Esta operación de lectura la puede realizar la red gracias a un entrenamiento previo durante el cual los pesos de las conexiones han sido cambiados por medio de un algoritmo llamado retropropagación para que la red pueda asociar secuencias de caracteres con una colección de fonemas básicos previamente identificados por especialistas en lingüística. Aunque esta red resultó bastante eficiente leyendo palabras desconocidas, en ocasiones lee las palabras equivocadamente, como también nos ocurre a nosotros.

Lecturas recomendadas

- Arbib, M., *The Metaphorical Brain 2: Neural Nets and Beyond*. Wiley Interscience, N.Y., 1989.
 Rumelhart D.E. y McClelland J.L., *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. The M.I.T. Press, M.A., 1986.