

SISTEMAS CONEXIONISTAS. TEMARIO 2003/2004

(Parte del profesor Alejandro Pazos)

1. SISTEMAS CONEXIONISTAS: Evolución Histórica

1.1. Sistemas Conexionistas. Evolución, historia y precursores.

1.2. Nacimiento de las Redes de Neuronas Artificiales.

2. FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DE LOS SISTEMAS CONEXIONISTAS

2.1. Neurología

2.2. Neurobiología

2.3. Neuroanatomía

2.3.1. Sistema nervioso de una sola neurona e identificación de circuitos neuronales

2.4. Neurofisiología

2.4.1. La Neurona

2.4.2. Neurotransmisión.

2.4.3. La Sinapsis.

2.5. Neuropsicología

2.5.1. Adquisición y organización cerebral de los conocimientos.

2.5.2. Caracteres del engrama específico o metacircuito.

2.5.3. Metacircuitos primarios y secundarios.

2.5.4. Metaestructura.

2.5.5. El Aprendizaje.

3. MODELOS

3.1. Comparación entre el elemento biológico y el formal

4. METODOLOGÍA EN REDES DE NEURONAS ARTIFICIALES

4.1. Introducción

4.2. Etapas de la Metodología

4.2.1. Identificación del problema

4.2.2. Estudio Bibliográfico

- 4.2.3. Adecuación – Justificación del uso de la RNA
- 4.2.4. Desarrollo – Construcción de la RNA
- 4.2.5. Análisis de las herramientas disponibles en el mercado y selección de las más apropiadas (HW y SW)
- 4.2.6. Instalación de las herramientas HW y SW
- 4.2.7. Construcción de la RNA
- 4.2.8. Preparación de los datos
- 4.2.9. Construcción de los conjuntos de prueba y entrenamiento
- 4.2.10. Entrenamiento de la red
- 4.2.11. Chequeo de resultados
- 4.2.12. Análisis de los resultados
- 4.2.13. Ajuste de parámetros
- 4.2.14. Validación del sistema
- 4.2.15. Transferencia tecnológica

5. SISTEMAS HIBRIDOS (SH)

- 5.1. Modos de Integración
- 5.2. Algunos Ejemplos de Sistemas Híbridos (SH)
 - 5.2.1. R.N.A. y Sistemas Expertos
 - 5.2.2. RNA-BD-BRD (bases de datos- DB relacionales)
 - 5.2.3. RNA y algoritmos genéticos

6. APLICACIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS CONEXIONISTAS

- 6.1. Consideraciones a la Aplicación de Sistemas Conexionistas
- 6.2. Aplicaciones RNA
- 6.3. Hardware Conexionista

TEMA 1: Sistemas Conexionistas: Evolución Histórica

Intentos de simular
facetas de los seres
vivos

- A. **ASPECTO FÍSICO:** Autómatas y Homúnculos
- B. **ASPECTO INTELECTUAL:** Abacos, Máquinas de cómputo, etc.
- C. **ASPECTO METAFÍSICO:** Seres semejantes al hombre mismo "ex nihilo". FRANKENSTEIN, ROBOTS UNIVERSALES DE ROSSUM, etc.

A. Estatuas animadas reproduciendo movimientos cotidianos: EGIPTO; "Paloma de Architas" de Tarente; "Automatismos defensivos en Siracusa" de Arquímedes contra la flota romana; etc.

B.

En la mitología Griega:

- TALO (obra de Hefestos) el defensor de MINOS asesinado por MEDEA.
- ANDROIDES de Hefestos, "de oro macizo y con inteligencia en su mente y capacidad de hablar", según le cuenta TETIS a su hijo AQUILES

En la Edad Media:

- SAN ALBERTO MAGNO CON SU "MAYORDOMO"
- LEONARDO CON SU "LEÓN FLORIDO Y ANIMADO"
- RAMÓN LLUL CON SU "ARS MAGNA". Método lógico que ensaya exhaustiva y sistemáticamente todos los caminos permitidos hasta llegar a una solución (Desde los principios elementales de un problema ensaya todas las posibles combinaciones).

En la Edad Moderna:

- GOLEM DE LOEW (s. XVI)
- ANDROIDES DE LOS HERMANOS DROZ
- TOCADOR DE FLAUTA Y CARAMILLO DE VAUCANSON
- MÁQUINAS DE PASCAL, LEIBNITZ, FREGE, BOOLE, ETC.
- ADA LOVELACE (colaboradora de BABBAGE), establece el régimen "las máquinas sólo pueden hacer todo aquello que sepamos como ordenarle que haga. Su misión es ayudar a facilitar lo ya conocido"
- MALZEC CHESS AUTOMATON de VON KEMPELEN
- GENERAL PROBLEMS SOLVER de Ernst, Newell y Simon.
- PROGRAMA DE DAMAS DE SAMUEL -1959
- ZUSE y SREYERS: 1ª Computadora 1943

Sistemas Conexionistas. Evolución, historia y precursores.

A los precursores de los Sistemas Conexionistas en las **Bases Biológicas** hay que situarlos temporalmente entre los años de 1.890 y 1.940. Se destacará, por su tremenda importancia, al premio Nobel español D. Santiago Ramón y Cajal, al Nobel italiano Camilo Golgi, a Williams que, en 1.890, describe el primer sistema conexionista afirmando: "cuando dos procesos cerebrales están en activo conjuntamente o cuando existe una inmediata sucesión, uno de ellos tiende a propagar la excitación al otro" y a Lashley por ser el primero, en 1.900, en estudiar cómo almacenar y procesar información utilizando para ello una representación distribuida de la misma.

Es el propio McCulloch quien, en 1.952, refiriéndose a las investigaciones de Cajal, dice: "su teoría neuronal ha sido tan fuertemente establecida como la base de nuestra Ciencia, que nosotros ignorábamos qué pasaba antes, y hemos olvidado que él fue el primero que lo propuso". Y ya en 1.895 sienta las bases de lo que él ya llamaba, en aquellos tiempos "Ingeniería Neuronal". Son Cajal con Sherrington y Pavlov los tres hombres que más han hecho por acercar a una explicación experimental el misterio de la vida nerviosa y Cajal, ya en 1.888, postula la llamada "Teoría de la Neurona", en 1.890 propone la "Teoría de la Polarización Dinámica", y en 1.892 describe la "Teoría Neurotrópica". Se considera necesario hacer constar dos reflexiones hechas por Cajal hace casi 100 años y que conservan toda su vigencia: A) al no encontrar diferencias cualitativas entre las células del SN de los humanos y de los animales, decidió postular que, "la superioridad funcional del SN de los humanos estaría relacionada con la abundancia prodigiosa y con la cuantía considerable de las llamadas neuronas de axón corto", y b) "el artificio soberano de la sustancia gris es tan intrincado que desafía y desafiará por muchos siglos la obstinada curiosidad de los investigadores".

Los precursores computacionales de las Redes de Neuronas Artificiales se situarán entre los años 1.940 y 1.960. Son McCulloch y Pitts quienes proponen en 1.943 el modelo de neurona artificial que lleva su nombre (dispositivo binario con dos estados y un umbral fijo que recibe conexiones o sinapsis excitadoras de igual peso e inhibitoras de acción absoluta).

En 1.949 Hebb propone un sistema de aprendizaje para la modificación de la sinapsis denominado "Regla de Aprendizaje Sináptico" o "Regla de Hebb", donde postula que: "una vía de neuronas es reforzada cada vez que dicha vía es usada". Rochester, en los años 50 realiza con relativo éxito modelos de RNA

teniendo en cuenta los trabajos previos de Hebb. En 1.958 se publica el libro "The computer and the Brain" cuyo autor es Von Neumann, quien investiga con nuevos modelos de neuronas artificiales.

Un psicólogo, Rosenblatt, entre 1.958 y 1.962, presenta el Perceptron, máquina con un comportamiento adaptativo capaz de reconocer patrones dotado de la regla del aprendizaje denominado de "autoasociación", donde el estímulo y la unidad de respuesta están asociados por la acción de las entradas.

En 1.959 Widrow y Hoff desarrollan ADALINE (Neurona Adaptativa Lineal) que conformarán las MADALINES, las cuales son las primeras RNA aplicadas a un problema del mundo real, puesto que se utilizaron como filtros adaptativos para eliminar ecos y ruidos en las líneas telefónicas comerciales.

El declive de las Redes de Neuronas Artificiales, hasta casi paralizarse durante casi 20 años, viene a partir de la publicación del libro de Minsky Papert publicado en 1.969 titulado "Perceptrons", donde demuestran las limitaciones en lo que los Perceptrones podían aprender a reconocer y sugieren que, probablemente, no se encontraría solución al problema del aprendizaje en las capas ocultas. Además, también contribuye a este declive el denominado "Informe Lighthill", emitido en 1.973, el cual desautorizó los objetivos de la Inteligencia Artificial al considerar que, desde el punto de vista científico, Godel había demostrado que no era factible formalizar, en lógica de primer orden, las teorías científicas y que, por tanto, no era posible crear una teoría automatizada de la inteligencia.

En el apartado de Resurgir e Impulsores de las Redes de Neuronas Artificiales se destacará a Anderson, un neurofisiólogo que, en esta época, hace las primeras aproximaciones a la "Memoria Lineal Asociativa" en 1.969, a Fukushima que desarrolla el "Cognitron" y el "Neocognitron" y, finalmente a Grossberg, un psicólogo que propone entre otras cosas, en 1.967 la "Teoría de la avalancha" y creará junto con Amari, McClelland, Rumelhart Edelman, Reeke, Kohonen, Kosko y otros investigadores nuevos modelos de células, arquitecturas y algoritmos de aprendizaje que servirán de base a los modelos más investigados actualmente, los denominados "Modelos Biológicos".

El verdadero renacimiento de las RNA ocurre gracias a Hopfield que presenta, con una fuerte fundamentación matemática y de forma coherente, el modo de trabajar de los modelos de RNA. Establece que las RNA deben ser

primero modelos cerebrales y luego dispositivos útiles de procesamiento. Fue clave su claridad y el análisis matemático en los modelos analizados, mostrando cómo deberían trabajar las RNA.

La "Máquina Conexionista" presentada por Daniel Hillis, la cual consta de más de 65.500 elementos de procesamiento de información dispuestos en paralelo, representa quizá el mayor logro "hardware" realizado hasta la fecha dentro del mundo conexionista.

Actualmente las RNA son un campo de gran interés debido a varias causas:

- a) la habilidad de estos sistemas para aprender automáticamente
- b) habilidad para poder funcionar de forma aceptable tanto en presencia de información inexacta como cuando se producen deterioros o fallos en sus componentes
- c) al interés existente por la búsqueda de arquitecturas de computadoras que permitan el procesamiento en paralelo
- d) la similitud con los modelos neurofisiológicos del cerebro, pudiéndose de este modo intercambiar modelos e investigaciones entre los de RNA y Neurociencias, potenciándose ambas.

Nacimiento de las Redes de Neuronas Artificiales.

Se produce, ya se ha comentado, como consecuencia de la aparición de tres trabajos teóricos relativos a lo que ahora se conoce como cibernética y que, curiosamente, se publican todos en el mismo año de 1.943.

"Behaviour, Purpose and Teleology" de Rosemblyeth, Wiener y Bigelow, en el MIT, donde sugieren distintas formas de conferir fines y propósitos a las máquinas, es decir, hacerlas teleológicas. Su finalidad última era encontrar un conjunto de principios sencillos que explicaran las actividades de la mente humana, representando igualmente bien las operaciones del cerebro y las actuaciones de artilugios simuladores, sin necesidad de identificar cerebros con máquinas, ni siquiera de explicar los procesos cerebrales sobre la falsa equidad de procesos mecánicos previamente concebidos que los simulen.

"The Nature of Explanation" de Craik, en la Universidad de Cambridge, quien propone que las máquinas empleen modelos y analogías en la resolución de problemas, esto es, establecer la capacidad de abstracción de las

máquinas. Expresó, hacia un crítico de las limitaciones de las máquinas, algo tan contundente como: "En vez de ser tu teoría tan amplia como la realidad, lo que pasa es que tu percepción de la realidad es tan estrecha como tu teoría. Por eso ambas coinciden".

"A Logical Calculus of the Ideas Inmanent in Nervous Activity" de McCulloch, en la Facultad de Medicina de la universidad de Illinois, y Pitts, matemático del MIT, los cuales basándose en unos trabajos previos de Shannon (creador de la teoría de la comunicación, quien modeló el comportamiento de los circuitos eléctricos con el Álgebra de Boole, estableciendo así la conexión entre la expresión formal de la Lógica y un medio para automatizar esa lógica con circuitos eléctricos) pusieron de manifiesto de que modo las máquinas podían emplear los conceptos de la lógica y de la abstracción, y demostraron cómo cualquier ley de entrada-salida podía modelizarse con una red de neuronas formales por ellos definidas. En ese tiempo se pensaba que las neuronas eran binarias, lo cual era inexacto, resultando por tanto su labor infructuosa en cierta medida, pero que servirá de base para los estudios actuales que buscan leyes y modelos de funcionamiento del sistema nervioso.

A estos tres artículos hay que añadir los trabajos de Von Neumann, "padre" de las computadoras actuales basadas en la lógica booleana, con su arquitectura secuencial, sus trabajos sobre autómatas, y sus relaciones entre cerebro y computadora, y los trabajos de Turing con su computadora "Colossus" para descifrar la máquina alemana del cifrado "Enigma", y por la concepción teórica de la "Máquina de Turing", "madre" de todas las computadoras convencionales actuales, quien además publica en 1.950 un provocador artículo que comenzaba de la siguiente forma espectacular: "Me propongo examinar la pregunta siguiente: ¿pueden pensar las máquinas?".

TEMA 2. FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DE LOS SISTEMAS CONEXIONISTAS

No parece posible entender qué son y cómo funcionan los Sistema Conexionistas sin tener, al menos, un conocimiento somero de cómo es y cómo funciona el sistema nervioso central - en adelante SNC - al que pretenden emular - reproducir tanto en su estructura como en su función -.

Se va a enfocar, en este capítulo, el problema del estudio, desde el punto de vista de los fundamentos naturales, de la estructura y funcionamiento del SN abundando en la multidisciplinaridad dentro de la que se mueven las RNA.

Algunas de las múltiples disciplinas de la Ciencia involucradas en el estudio de los Sistemas Conexionistas se pueden agrupar bajo el título de los fundamentos biológicos de las RNA y, entre ellas, vamos a destacar: la neurología - ciencia encargada del estudio del sistema nervioso, en forma global-, la neurobiología - estudia el sistema nervioso de organismos inferiores y su metabolismo -, la neuroembriología - estudia el desarrollo del SN desde el momento de la concepción hasta el nacimiento -, la neuroanatomía - estudia la disposición física o espacial de los elementos constitutivos del sistema nervioso-, la neurofisiología - rama de la ciencia encargada del estudio del funcionamiento normal de los elementos del sistema nervioso, participa junto con la neurología y la neuroanatomía en el estudio del dispositivo mecánico del sistema nervioso - y la neuropsicología - estudia las conductas adquiridas mediante las que el ser humano mantiene relaciones adaptadas con el mundo exterior que le rodea, incluyendo al resto de los humanos-. Finalmente, se va a citar y reflexionar acerca de una parte del SN que, por la especial importancia que tiene, se tratará como un apartado, y que es el Sistema Glial - en adelante SG-.

Reivindicar, en este punto, la figura del más importante investigador español de todos los tiempos y uno de los más relevantes de la historia de la humanidad, el Premio Nóbel Santiago Ramón y Cajal.

Se puede considerar a Cajal como el padre de todos los estudios referentes al SN por sus investigaciones y aportaciones, tanto desde el punto de vista histológico como embriológico y anatómico. Sus teorías y predicciones, realizadas hace más de 100 años, en las que se fundamentan la inmensa

mayoría de los estudios que se realizan actualmente acerca del SN, todavía no han podido ser rebatidas.

NEUROLOGÍA

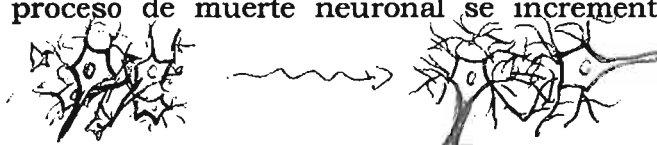
Es la rama de la Ciencia encargada del estudio del SN el cual está considerado como la estructura única más compleja del universo. La función principal del SN, junto con el sistema endocrino, es asegurar el control y la comunicación (homeostasis) dentro del organismo.

El SN recibe aproximadamente 109 bits/seg de una información heterogéneo tanto por su origen espacial como por su intensidad y significado. De toda esta información sólo se admiten conscientemente 102 bits eliminándose, por tanto, un 99% de la información recibida. Por ejemplo, no se es consciente, a menos que se tenga un especial interés por ello en un momento determinado, del contacto de la piel con la ropa o con el aire, o la temperatura en cada célula termo-receptora del epitelio.

La información que llega al SN se codifica y posteriormente se vehiculiza o transmite hasta un destino donde se incorpora a una señal específica que determina la producción de un trabajo intelectual, motor o neurosecretor, como respuesta del sistema a la información que le llega. En última instancia el organismo realiza la integración activa y personal de los estímulos que le llegan, tanto desde el entorno como del propio organismo, para producir una respuesta.

El SN tiene dos tipos de células específicas involucradas en la integración de los estímulos neuronas y células del SG. Se considera a las neuronas como el elemento funcional fundamental del SN, monopolizándose en ellas el procesamiento de la información en el SN. Desde hace unos pocos años el SG va adquiriendo, gracias a nuevas investigaciones en los laboratorios de neurociencias, más funciones y protagonismo en este procesamiento de la información.

En los vertebrados superiores la neoformación de neuronas cesa, como más tarde, el segundo año de vida y, a partir de este momento, va perdiendo elementos hasta el final de su vida. En el hombre adulto se considera que son decenas de miles de elementos los que se pierden cada día. Gracias a este proceso de muerte neuronal se incrementa el campo dendrítico, zona de



recepción de estímulos de las neuronas, y las relaciones interneuronales se hacen más específicas.

Entre las zonas periféricas y centrales del sistema nervioso existe una correspondencia gracias al idioma único, en código de frecuencia, ofrecido por el "transductor" que actúa después de la recepción, impidiéndose de este modo "ver música u oír imágenes". La información va desde los receptores hasta la corteza cerebral, pasando por estaciones intermedias de la médula espinal, tronco cerebral, cerebelo, etc. Se produce una "filtración primaria" en el propio órgano receptor, existiendo posteriores filtros y reelaboraciones de la información en las estaciones intermedias del SN donde la información se clasifica e integra con las que llegan de otras zonas del SN. Todo este conjunto conforma lo que se conoce como división sensorial del SN.

La división motora se encarga de transmitir las órdenes dirigidas a los órganos efectores o ejecutores, en código de frecuencia mediante 2 vías: "piramidal" o voluntaria y "extrapiramidal" o automática. Las partes encefálicas bajas del SN se corresponden con las respuestas automáticas y las altas con acciones deliberadamente controladas por los procesos cognitivos del SN.

La asociación de las informaciones aferentes da una "imagen total" y se realiza en unas zonas cerebrales que se han dado en llamar los "sistemas de asociación" las cuales se encuentran entre las divisiones sensorial - encargada de recibir los estímulos del entorno - y motora - encargada de enviar al entorno las respuestas elaboradas en el SN -, produciéndose en ellos la función integradora del SN continuando el proceso de "evaluación" de los estímulos, tanto internos como externos, para determinar su importancia para el organismo. Es, en este nivel, donde se alcanzan las más altas cotas de potencialidad neuro-glial: capacidad de abstracción, personalidad, generalización, etc.

Los sistemas de integración abarcan a la totalidad del cerebro. Sus estructuras están interrelacionadas condicionándose mutuamente en su actividad y siendo característicos los denominados "circuitos circulares" entre las diferentes estructuras o elementos. Los estímulos que reverberan por estos circuitos recuerdan en cierta medida, a la manipulación de algoritmos en las instalaciones de procesos de datos.



La complejidad del SN aumenta, en general, con el nivel alcanzado por el individuo en el desarrollo filogenético. Dicha complejidad incrementa su capacidad de rendimiento y de adaptación a entornos cambiantes, lo cual va a redundar en una mayor probabilidad de supervivencia.

Marr y Poggio del MIT - Instituto Tecnológico de Massachusetts - formulan tres niveles de comprensión en el cerebro:

- **Nivel de computación:** ¿qué tareas puede/debe llevar a cabo el cerebro?. Por ejemplo, la reconstrucción de un objeto en 3 dimensiones a partir de las recepciones en 2 dimensiones retinales.
- **Nivel algorítmico:** ¿qué secuencia de operaciones hace que la información adquiera una característica útil? Por ejemplo, extraer los datos útiles de las imágenes en 2 dimensiones de la retina.
- **Nivel de mecánica:** ¿cómo puede el aparato disponible ejecutar un algoritmo y realizar por tanto una computación? Por ejemplo, los circuitos nerviosos que ejecutan el algoritmo obtenido.

Una ilustración de todo esto podría ser: identificar una cara es una computación, educir la forma que la aísla de circunstancias cambiantes - luz, ángulos, etc. -, de forma que se pueda comparar con otros parecidos, es ejecutado con un algoritmo, y los circuitos que ejecutan el algoritmo son el dispositivo mecánico. Si analizamos esta formulación vemos, una vez más, que la función viene determinada por la estructura, puesto que la ejecución de un algoritmo cualquiera está condicionada, en primer lugar, por el dispositivo mecánico del cerebro lo que las neuronas y las células gliales pueden ejecutar y, luego, por la naturaleza de la computación que realiza tal dispositivo mecánico.

Aún en el caso de disponer de un esquema con las conexiones del SNC se encontrarían dificultades para interpretar su mecanismo funcional debido a varios factores entre los que cabe destacar: la elevada complejidad del sistema, la multiplicidad de las entradas y salidas de información de cada neurona, la valoración variable que hay que dar a las entradas sinápticas desde el punto de vista cualitativo, cuantitativo, temporal y espacial, la influencia mutua ejercida por las informaciones recibidas con las posibles actividades espontáneas que se producen, y los procesos de inhibición post-excitadores y procesos de excitación post-inhibidores dando, entre ambos, capacidad de adaptación al sistema.

NEUROBIOLOGÍA

Es, hoy en día, una de las disciplinas más dinámicas de las ciencias naturales. Estudia los SN de animales inferiores - virus, bacterias, moluscos, etc.- permitiendo un posterior estudio comparativo con el SN de organismos superiores y, en concreto, de los humanos. Es conveniente resaltar que no es muy seguro que se pueda considerar al SN de los invertebrados como un desarrollo primario de los vertebrados superiores puesto que, bajo el punto de vista de sus rendimientos motores y capacidades sensoriales, pueden incluso superarlos.

Parker descubre, en la boca de ciertas anémonas, el primer circuito neuronal simple, consistente en una línea de conducción de una sola célula y con un funcionamiento predecible por un mecanismo similar a un timbre. Más adelante se descubren en medusas circuitos de dos y más elementos, teniendo esto como significado la necesidad de sinapsis, término utilizado por primera vez por Sherrington en 1887 como una composición del griego "syn" - junto - y "haptein" - unir -. Las sinapsis son las uniones funcionales entre los elementos constituyentes de tales circuitos.

Se considera que el SN se origina cuando un organismo poseyó, por primera vez, una célula o cadena celular que posibilitara la acción intermedia entre los estímulos ambientales y la respuesta del propio organismo. La posterior evolución del organismo exige la aparición de circuitos más complejos.

Salvo en animales poco evolucionados filogenéticamente el sistema nervioso está dividido en: sistema nervioso central - en adelante SNC - y sistema nervioso periférico -en adelante SNP -. El SNC, el que más nos interesa en este campo, está formado por una acumulación compacta de neuronas y células gliales.

Esta acumulación aumenta en dirección del extremo anterior del animal, estando sus zonas de mayor integración y capacidad cognitiva en el polo anterior del cerebro. No existe, en el SN, una minoría selecta de neuronas y mucho menos una célula "presidente". Simula su estructura jerárquica la figura de una pirámide invertida, al revés de lo que ocurre en la sociedad, estando los diferentes sectores del SNC íntimamente interconectados de forma que se condicionan mutuamente en sus funciones haciendo, a veces,

imposible establecer entre ellos una relación jerárquica claramente determinada.

NEUROANATOMIA

Debido a la complejidad del SN en su conjunto se considera más apropiado, para su estudio, dividirlo en unidades anatómicas que están específica e inespecíficamente conexas entre sí. No se tendrán en cuenta las estructuras adyacentes que no están implicadas en el procesamiento de información: barrera hematoencefálica, vasos sanguíneos, vasos linfáticos, etc.

Sistema nervioso de una sola neurona e identificación de circuitos neuronales

Las neuronas no aparecen nunca aisladas en los animales más evolucionados de la escala filogenética sino que siempre conforman estructuras funcionales o circuitos a través de sus prolongaciones y están asociadas a células gliales. Además, es más que probable que los elementos de estos circuitos puedan formar parte de diferentes circuitos simultáneamente.

NEUROFISIOLOGÍA

Se encarga del estudio del funcionamiento normal de los elementos constituyentes del SN.

La Neurona

Es una célula que, a pesar de compartir atributos muy similares al resto de las células como la irritabilidad, se ha diferenciado en la intensidad de respuesta a tres funciones básicas: excitabilidad, conductividad y troficidad, que la convierten en uno de los elementos fundamentales del SN. La neurona constituye, según Cajal, la "unidad morfológica" - Teoría de la Contigüidad de las neuronas -, la "unidad trófica" - sus prolongaciones degeneran si se separan del soma y sólo dicho soma puede regenerarlas-, la "unidad patológica" - su muerte o patología no tiene porque afectar a las células contiguas - y la "unidad funcional" - se consideraba que poseía, hasta el descubrimiento de las nuevas funciones del sistema glial, el monopolio del transporte del influjo nervioso -.

Una neurona típica del SNC (Figura 1) consta de 3 partes bien diferenciadas con una morfología, longitud y tamaño muy variable en cada una de ellas: Cuerpo Celular o Soma, Axón o Neurita y Arbol Dendrítico.

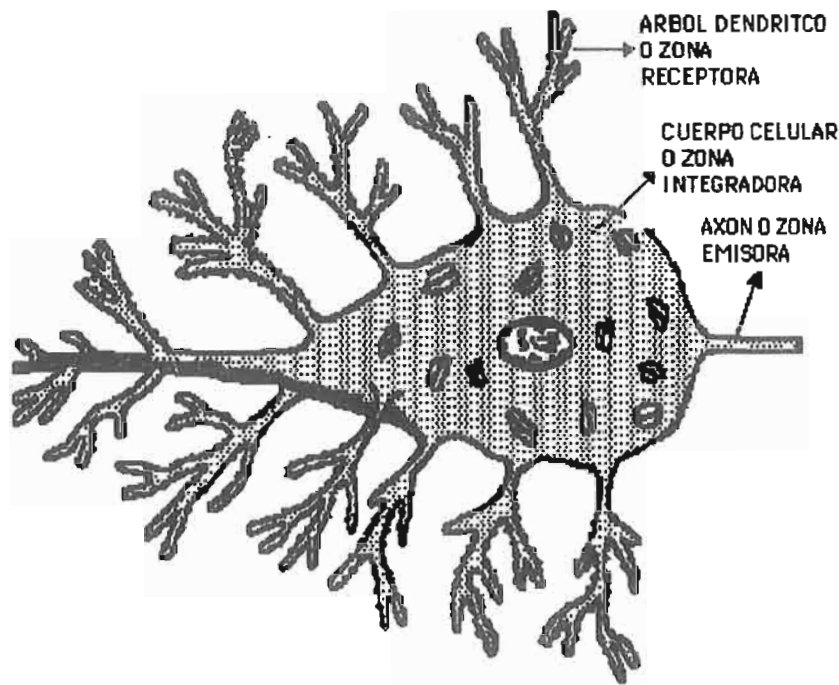


Figura 1.- Neurona Típica.

El soma es el centro metabólico de la neurona y contiene, en su interior, las diversas organelas que controlan y mantienen la estructura neuronal. En el soma se forman muchos de los neurotransmisores - en adelante NT - que se transportan hasta la terminal sináptica donde se almacenan para su posterior liberación. El axón o neurita se origina generalmente a partir de una zona cónica que hay en el soma, es liso y cilíndrico, puede llegar a medir en el hombre más de 1,5 metros y en su extremo terminal se divide en numerosas ramificaciones que terminarán, cada una de ellas, en una estructura denominada "botón sináptico" o "botón terminal" que contacta, sin fusionarse, con otras neuronas o con otras células efectoras por medio de las denominadas "sinapsis". El árbol dendrítico se origina del soma, suele estar compuesto por múltiples raíces extremadamente ramificadas que no miden mucho más de unos pocos milímetros y constituyen la porción receptora de estímulos de la membrana, sobre todo en las zonas llamadas "espinas dendríticas" que pueden ser uno de los puntos de localización de los cambios morfológicos que acompañan al aprendizaje.

Cada neurona tiene una especificidad propia que depende de su forma tridimensional, número, naturaleza y modalidades de sus conexiones sinápticas, y de su localización en el SN. A esta especificidad morfológica y topográfica que hace que ninguna neurona pueda ser considerada exactamente equivalente a su vecina en el plano funcional, se le añade una

especificidad bioquímica que depende del NT que posea. La estructura funcional de la neurona está diseñada para que cumpla, básicamente, tres misiones parciales con la información que llega a ellas en forma de impulsos procedentes de otras neuronas o receptoras:

- a).- la integran en un código de activación propio,
- b).- la transmiten codificada en forma de frecuencia de impulsos a través de su axón, y
- c).- en sus terminaciones transmiten los impulsos a las neuronas subsiguientes o a las células efectoras.

Así pues, desde un punto de vista funcional, puede dividirse a la neurona en tres partes: superficie receptora o región generadora "soma y dendritas", trayecto de conducción y de distribución "axón", y zona de transmisión "terminales sinápticas".

Neurotransmisión.

La sorprendente capacidad del SN para recibir, almacenar, procesar y transmitir una enorme cantidad de mensajes simultáneamente, sin que se confundan entre sí, en un breve tiempo y muy limitado espacio, viene dado por varios factores:

- a) el flujo de corriente que es unidireccional e intracelular;
- b) es posible modificar la velocidad de conducción intracelular e intercelular;
- c) hay un alto grado de aislamiento de la membrana que impide el "lenguaje cruzado" erróneo entre las células nerviosas;
- d) hay un significativo número de mensajeros intercelulares diferentes y especializados para que sólo el receptor adecuado traduzca la información apropiada;
- e) hay unos dispositivos químicos especiales destinados a garantizar, no sólo una transmisión rápida y precisa sino también una igualmente rápida y precisa desaparición de la señal;
- f) hay unas sustancias químicas que determinan cambios, de instauración lenta y de larga duración, en la recepción postsináptica que regula los efectos de los neurotransmisores del sistema nervioso; y
- g) cada neurona recibe información de diversos receptores y/o neuronas "principio de convergencia", los integra y los distribuye, luego, a través

del axón por sus ramificaciones a una serie de neuronas y/o efectores "efecto de divergencia".

La sinapsis.

Es el contacto funcional entre las neuronas, está compuesta por un elemento presináptico que pertenece a la neurona que manda el impulso, un elemento postsináptico de la célula que va a recibirlo, y un espacio intersináptico situado entre ambos elementos. En el mundo animal existen básicamente dos tipos de sinapsis:

a) **sinapsis química**, son la mayoría de las sinapsis. En ellas una neurona libera en el espacio intersináptico una sustancia química "neurotransmisor" que actuará sobre los receptores que son proteínas específicas de la membrana postsináptica. Las sinapsis químicas tienen una característica muy importante que las hace convenientes para la transmisión de señales en la mayor parte del SN y es que transmiten siempre las señales en una sola dirección, desde la neurona presináptica hacia la postsináptica lo que permite, entre otras cosas, que se envíen las señales hacia áreas o puntos específicos del SN.

b) **sinapsis eléctrica**, que se caracterizan porque son conductos directos para el paso del impulso eléctrico de una neurona a la siguiente permitiendo, de este modo, el paso del impulso en ambas direcciones. Estas sinapsis eléctricas están constituidas por unas estructuras tubulares proteínicas que se denominan "uniones de intersticio" que permiten el paso de iones libremente desde el interior de una célula a la siguiente. Se encuentran, únicamente y en muy pequeña proporción, en el SNC y en las uniones del SN con el músculo liso y cardíaco. Son bidireccionales y su función es desconocida.

El predominio de las sinapsis químicas puede ser debido a múltiples factores:

- 1) cambio de codificación "eléctrica-química-eléctrica" que va a permitir la integración de informaciones entre sí elaborándose nueva información,
- 2) su superficie de contacto es inferior que en las eléctricas, permitiendo que una sola neurona realice más de 10.000 contactos, en algunos casos, mientras que, en las eléctricas, una neurona sólo está sinaptada con otra,
- 3) la información sólo se transmite en una dirección "efecto válvula",

- 4) el elevado grado de plasticidad de las sinapsis químicas permiten modificar el proceso de transmisión lo que explica la "canalización de las vías neuronales"; es decir, la aparición de procesos de aprendizaje en el sentido más amplio, y
- 5) permiten la intervención externa en los procesos de transmisión y elaboración de la información.

Por todo lo comentado previamente se considera a la sinapsis como un lugar muy ventajoso para el control de la transmisión de señales pues establece su dirección, puede facilitar, inhibir, debilitar, etc., la transmisión de la señal bloqueando, aumentando o diversificando las direcciones. El impulso al llegar a la sinapsis puede quedar bloqueado, cambiarse de impulso único a impulsos repetitivos, ser integrado con impulsos de otras neuronas para crear tipos complejos de impulsos en neuronas sucesivas o ser transmitido directamente, sin integrar con impulsos procedentes de otras neuronas, a la terminal postsináptica.

NEUROPSICOLOGIA

Estudia específicamente conductas adquiridas mediante las que el hombre mantiene relaciones adaptadas con el mundo exterior que le rodea.

La neuropsicología insiste en el carácter operacional del proceso de la inteligencia, entendida como la facultad de actuar eficazmente ante situaciones nuevas y diversas, lo cual comporta rapidez y originalidad en la actuación. Se considera a un individuo con inteligencia normal cuando es capaz de utilizar sus experiencias antiguas para responder, con una o más conductas adaptadas, a las exigencias de una nueva situación. Este es un proceso dinámico que permite la confrontación de los datos nacidos en esta nueva situación con los "engramas" o sustratos de experiencias pasadas. Este hecho implica que el individuo ha adquirido y conserva en su cerebro los trazos de estas experiencias que, cuando son conductas elaboradas, se comportan como programas que determinan al tiempo la elección de lo que es aprendido y la elección de la respuesta a esta situación.

Adquisición y organización cerebral de los conocimientos.

El tejido cerebral, conformado por un gran número de neuronas interconexas y su tejido glial correspondiente, sugiere un sistema de redes específicas en su topografía y asociación. Este aparato alcanza su maduración

en los alrededores del nacimiento y no serviría de nada, o casi nada, sin la intervención de factores provenientes del medio adquiridos en forma de estímulos que alcanzan los órganos sensoriales. En efecto, el recién nacido no conoce grandes cosas y necesitará un largo aprendizaje incluso para actividades tan simples como coger un objeto o saber mirar.

El niño enriquece progresivamente sus conocimientos bajo el efecto de experiencias vividas, a menudo repetidas y, poco a poco, conocerá a los suyos, aprenderá a andar, reconocerá los objetos corrientes, los denominará, etc..

De como se inscriben estos aprendizajes en el cerebro únicamente se hacen hipótesis, ante la imposibilidad de aislar o disecar el soporte preciso de tal gesto o tal palabra. Sin embargo, se puede admitir que cuando una situación se repite -la repetición resulta un antiazar-, estimulando de manera idéntica los mismos receptores periféricos y conduciendo a un mismo tipo de respuesta, alguna cosa cambia en el cerebro manifestándose por un nuevo nivel de orden, un nuevo tipo de unión y de organización neuro-glial que puede permitir la emergencia de configuraciones neuro-gliales funcionales que son el soporte de cada una de estas experiencias vividas.

Caracteres del engrama específico o metacircuito.

De los millones de estímulos que llegan de los órganos sensoriales del hombre sólo unos pocos tienen "derecho de asilo" en la memoria del individuo, no quedando inscritos más que pequeños fragmentos de experiencias repetidas y siendo únicamente la repetición capaz de crear y mantener formas nuevas de asociación entre las células nerviosas.

Así, cada nueva experiencia sensorio-afectivo-motora vivida, de manera repetida, conlleva una cierta cohesión funcional en el seno de la constelación neuro-glial que resulte influida iterativamente. Se crea, de esta forma, un lazo entre la situación vivida y el nuevo orden impuesto a las células nerviosas interesadas.

Podemos decir que esta constelación celular es el sustento de cierta situación vivida y del nuevo nivel de orden celular impuesto a las células nerviosas interesadas, estableciéndose entre ambos un código de tipo analógico. La repetición, que ha sido indispensable para fundamentar su individualización, va a asegurar también su perennidad o su difuminación y el denominado "olvido fisiológico". Pero, mientras se conserve como una realidad funcional, este conjunto será, dos horas o veinte años más tarde, la

duplicación cerebral de este fragmento específico de conocimiento, de ahí el término de "metacircuito" propuesto en 1.961 por Barbizet.

Es preciso insistir que, en esta concepción, la información que representa dicha experiencia, expresada en un "engrama", no "circula" sino que se "anuncia", es decir, se exterioriza por un comportamiento, en el sentido más amplio del término, cada vez que esta secuencia celular es activada.

Metacircuitos primarios y secundarios.

No parece incorrecto pensar que, al lado de los metacircuitos primarios o "engramas específicos" que representan experiencias sensorio-afectivo-motoras relativamente simples, se pueden crear otros a partir de la integración de experiencias ya adquiridas anteriormente, y que tiene cada uno sus propias constelaciones neurogliales afectadas. A estos los denominamos "metacircuitos secundarios".

Metaestructura.

Un metacircuito, representación específica de un determinado fragmento de experiencia, no está nunca "aislado" en el cerebro sino que coexiste con otros con los que contrae relación de contigüidad. Dicho de otro modo, tiene "su lugar" en el seno de un número extremadamente alto de otros engramas. Es un elemento integrado en una estructura específica compuesta también por el sustrato de múltiples experiencias pasadas almacenadas en el cerebro del individuo y consideradas en un momento dado de su vida.

Esta metaestructura es el sostén de su capital mnésico" -relativo a la memoria- en la medida en que replica, en el cerebro, al conjunto de las experiencias retenidas desde su nacimiento. No se trata, por tanto, de un simple "libro" de su pasado sino de un sistema muy complejo de información en el cual cada elemento tiene su lugar y su probabilidad de emergencia en función de la historia de los "repasos" de lo que tiene en la memoria.

Cada elemento contrae todo un gradiente de lazos o fuerzas de unión con los otros elementos. Además, esta "metaestructura" es muy sensible a los acontecimientos vividos y cada día se modifica de una manera sin duda diversa, poco o mucho, aquí o allí, consolidando ciertos aspectos mientras otros se hacen menos accesibles, enriqueciéndose con algunas nuevas adquisiciones, perdiendo algunas características, o mortificándose en algún aspecto de su organización.

El Aprendizaje.

En el aprendizaje, por repetición de respuestas ante estímulos determinados, se hacen específicos determinados circuitos de SN como substrato física de sus adquisiciones, alterándose las sinapsis existentes y haciéndose precisas "punto a punto" unas proyecciones que previamente eran difusas y superpuestas, conformándose de este modo los "metacircuitos" y "metaestructuras". Esto, añadido a que cada uno somos responsables en gran medida de lo que introducimos en nuestros cerebros, nos viene a demostrar que podemos cambiarnos a nosotros mismos.

El desarrollo individual del aprendizaje de las habilidades del habla y de la escritura, la conservación a lo largo de la vida de capacidades singulares, de los deseos e inapetencias, de las maneras personales de ser y reaccionar, sugieren que son elaboradas ciertas informaciones funcionales en el cerebro que persisten constituyendo el substrato duradero de estas adquisiciones. La forma y la conexión de las células nerviosas permiten considerar que, bajo el efecto de estímulos repetidos provenientes de los receptores sensoriales, se crean en la corteza cerebral unos circuitos en función de estas experiencias diversas.

El estudio de enfermos afectos de alteraciones de la memoria ha conducido a proponer un modelo de comportamiento "mnésico" que se centra en tres puntos:

a) las experiencias vividas dejan un "trazo", "engrama" o "metacircuito" en el cerebro por el efecto de la repetición, cada uno de los cuales reposa en la constelación neuro-glial que ha funcionado en esa experiencia. Progresivamente el cerebro adquiere nuevos metacircuitos que se organizan, entre ellos, de una manera específica, constituyendo una metaestructura que es característica del conjunto de estas adquisiciones;

b) las primeras exposiciones se realizan casi exclusivamente bajo el efecto inmediato del mundo exterior y, el sistema, es capaz de autoorganizarse integrándolas con los circuitos congénitos y genéticos;

c) un constante dinamismo interviene en la adquisición, utilización y mantenimiento de estos múltiples metacircuitos bajo el efecto de "diálogo" que se establece, en el cerebro, entre los estímulos que proceden de la experiencia actual y los engramas que representan experiencias antiguas.

Eccles propone una hipótesis, basándose en las investigaciones de Hill, el cual observa como aumentan de tamaño las áreas de contacto sináptico cuando se transmite información repetida un suficiente número de veces, y postula que gracias a estos aumentos de tamaño se facilita el paso del impulso nervioso.



TEMA 3. MODELOS

El objetivo de este tema es hacer que se comprenda la importancia que tienen los modelos en la investigación experimental realizada en diversas áreas de la ciencia. Actualmente se están empleando mucho en los laboratorios de centros de investigación y de universidades.

La definición sería la siguiente:

Un **modelo** se considera como la representación de un sistema determinado. Gracias a su construcción pueden obtenerse resultados importantes y posee utilidades diversas, como:

- Es un medio que permite resolver **problemas** científicos, estableciendo relaciones entre datos que a simple vista se presentan aislados, pero que realmente tienen una **conexión importante**.
- Sirve para poner a prueba una teoría, suposición o hipótesis, de modo que se pueda verificar si los conceptos que entran en juego en la construcción del modelo explican de manera completa y consistente los fenómenos que han sido supuestos.
- Sugiere nuevas relaciones y hace surgir nuevas dudas e interrogaciones acerca de los sistemas modelizados, lo que llevará a posteriores pruebas y afianzamiento de nuevos descubrimientos.

La **construcción de modelos**, consiste en encontrar un sistema coherente y adecuado que permita interpretar datos experimentales dentro de un marco de referencia apropiado. Aunque sean incompletos, si son suficientemente representativos de nuestro conocimiento de la realidad, pueden darnos una valiosa información sobre las limitaciones a que está sujeta nuestra posibilidad de información, o las limitaciones del sistema debidas a su estructura.

La formalización implícita en la construcción de un modelo puede, por sí sola, representar un considerable progreso. El lenguaje formal en el que se describe un modelo facilita o aumenta el poder discriminar diferentes conceptos, permitiendo formas de pensar y construcciones conceptuales que serían mucho más complejas o incluso imposibles en otro lenguaje.

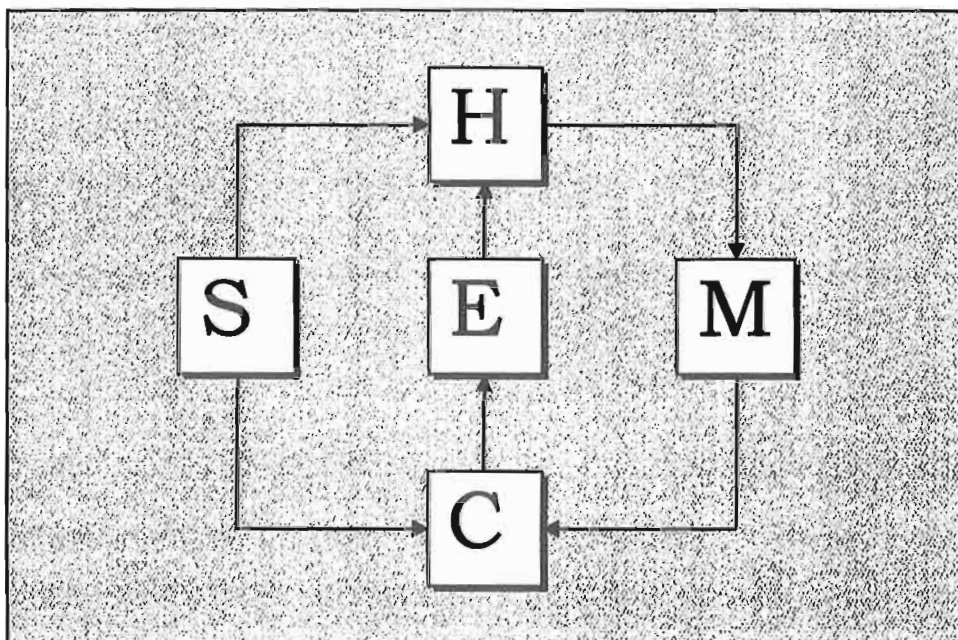
Otra ventaja muy importante de crear modelos es que cuando hay que realizar el análisis de un sistema complejo, el modelo puede abordar el estudio

de dicho sistema descomponiéndolo en elementos más sencillos y, posteriormente, puede ir integrando cada uno de esos elementos para observar los diferentes comportamientos que surgen hasta poder estudiar cómo es el funcionamiento global del sistema. (Ej. Es difícil aislar los subsistemas de un ser vivo y determinar sus límites con precisión, ya que todos están interrelacionados, por eso se emplea un modelo de trabajo muy eficaz como es la simulación que más adelante será tratada detalladamente).

Aunque la utilización de modelos tiene muchas ventajas, hay que manejarlos con cierto cuidado. Por ejemplo, si consideramos que a un sistema le llega una entrada del exterior, el sistema la analiza, modifica y produce una salida al exterior. La señal de entrada puede ir acompañada de ruido, no suele ser perfecta. Por tanto, la equivalencia entre el comportamiento de un sistema real y el modelo puede no ser total, pero de todas formas, el modelo dará una idea de lo que ocurre en el sistema real. Normalmente, el comportamiento de cualquier modelo sometido a excitaciones adecuadas, “simulará” el funcionamiento real del sistema estudiado.

Además, las diferencias comprobadas entre los resultados de la simulación y la experimentación permiten mejorar la construcción del modelo, dando la posibilidad así de adaptar mejor el modelo al sistema real.

Podemos ver, según lo dicho, el proceso de modelización:



Se considera que el modelo y el sistema teórico a modelizar son equivalentes si ofrecen el mismo comportamiento frente a excitaciones equivalentes.

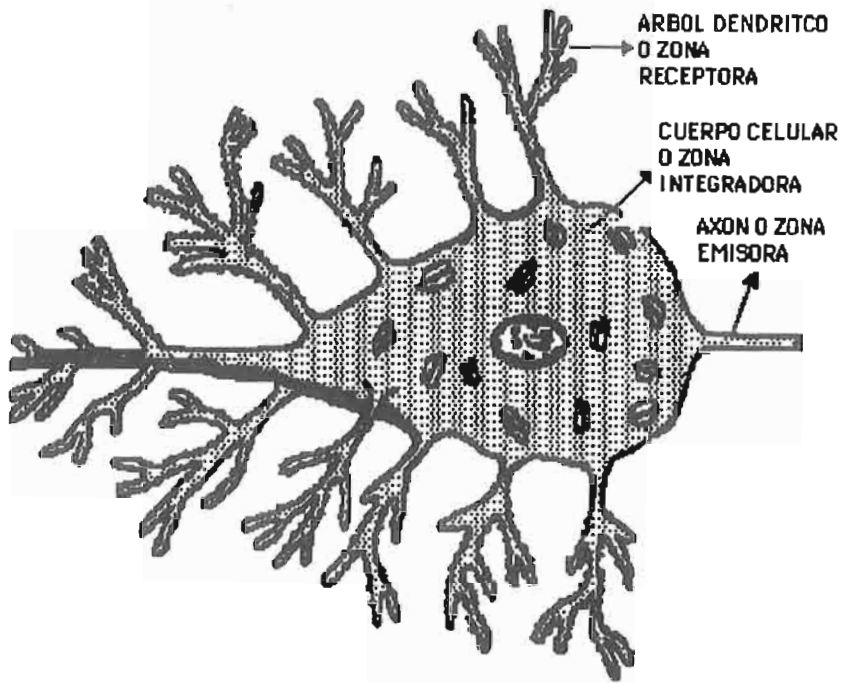
También se procura que el modelo posea el número de características más simplificado posible que dé origen al comportamiento esperado, cuidando no omitir ningún parámetro importante.

PASOS A SEGUIR:

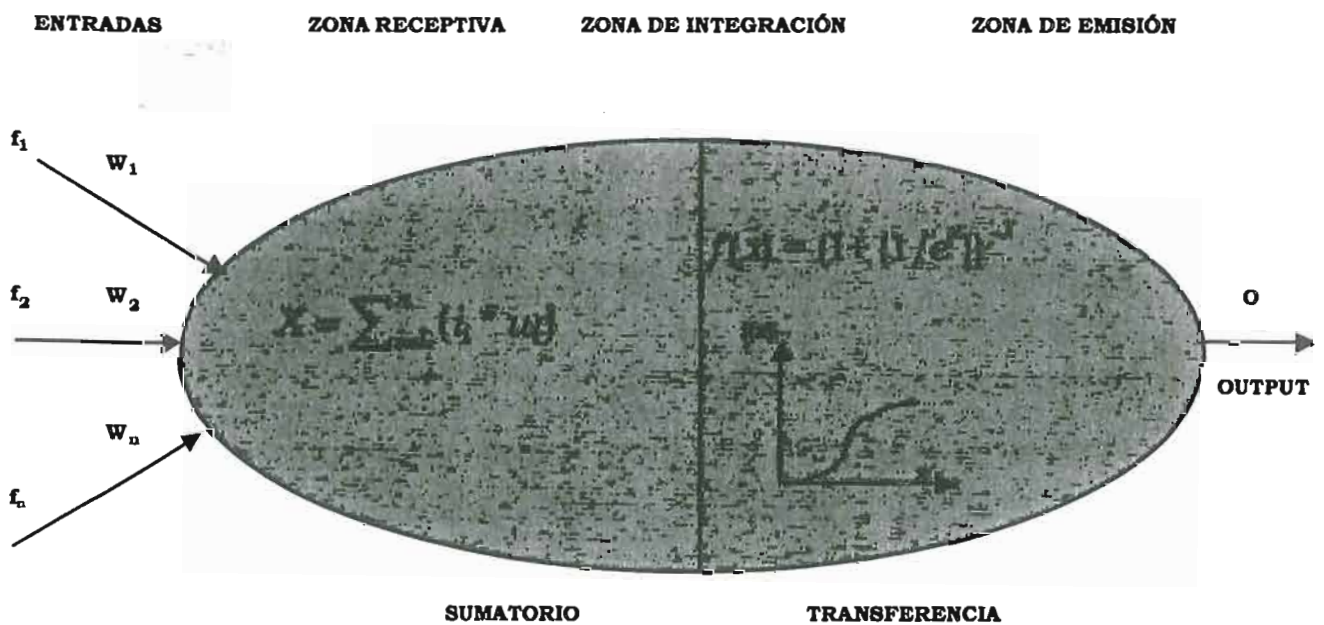
- I. Primero se tiene S, que es el sistema que se desea modelizar.
- II. Se crea el modelo M introduciendo en él las hipótesis H encontradas sobre el funcionamiento del sistema.
- III. El elemento comparador C emite estímulos equivalentes al modelo M y al sistemas S. Si ambos tienen la misma salida se concluye que son equivalentes.
- IV. Si el modelo construido no actúa como el sistema real, un elemento elaborador E realizará las mejoras necesarias en las hipótesis H, introducirá o quitará algunas de ellas, hasta conseguir la equivalencia.

Comparación entre el elemento biológico y el formal

Elemento Biológico:



Elemento Formal:



Tema 4. Metodología en Redes de Neuronas Artificiales

Introducción

1. Ninguna bien definida

Siempre se sigue el proceso metodológico: Implícita o Explícitamente (aun inconscientemente). Si es explícitamente es más infrecuente saltarse pasos, involuntariamente, que pongan en peligro el éxito del desarrollo.

2. Criterios Básicos de Necesidad Metodológica. Efectividad y Confiabilidad.

3. Menor importancia en campo teórico: Oportunidad y Tiempo. Son más importantes, incluso determinantes, en el campo de las aplicaciones prácticas (empresa). No olvidar el criterio de Documentación, importante en el futuro del producto (modificar, rectificar).

4. Basada en propia experiencia y en la de otras ciencias (IC). Hemos desarrollado una metodología propia, teniendo en cuenta otras desarrolladas para áreas afines (Watterman, Maté-Pazos, etc) como la IDEAL (Identificación, Desarrollo y Alcance Tecnológico).

Etapas de la Metodología

1. Identificación del problema:

Discernir entre:

- Contexto Teórico: Aquí es menos importante el criterio de falta de oportunidad, y el de tiempo no suele ser tan crítico en el desarrollo de los proyectos.
- Contexto práctico o de Aplicaciones.
- Problema de la sensibilización social: requiere un análisis más riguroso de la adecuación de la solución aportada, haciendo más imprescindible una metodología explícita.
- Una vez definido el problema, hay que plantearse cuáles son las variantes que intervienen en el mismo y sus posibles valores. A continuación, se analizan qué cosas o circunstancias aportarían o podrían aportar algo positivo a su resolución (técnicas y métodos a utilizar).

2. Estudio Bibliográfico:

Se hará una vez identificado el problema en toda su extensión analizando tanto los éxitos como los fracasos de:

- Otras técnicas aplicadas al mismo o parecido problema, o a partes del mismo.
- Problemas parecidos abordados con esta técnica por otros autores.
- Nuestras propias aplicaciones de esta técnica y métodos a problemas más o menos similares (por ejemplo diagnóstico industrial y médico).

3. Adecuación – Justificación del uso de la RNA:

Determinante, ya que si la respuesta no es razonablemente positiva, implicaría la no aplicación de los Sistemas Conexionistas al problema en cuestión.

El uso de Sistemas Conexionistas sólo es justificable desde el punto de vista de que otras técnicas de computación convencional, o incluso de I.A., fallen por uno u otro motivo, no pudiendo abordar eficientemente el problema a resolver.

Así, son adecuadas a:

- Problemas donde se demostraron útiles previamente, o problemas similares.
- Problemas no abordables eficientemente con otras técnicas y métodos de computación convencional o, incluso, de I.A.
- Necesidad de rápida respuesta (tiempo real) y/o precisen gran cantidad de componentes.
- Se dispone de un mínimo de recursos computacionales (compilador y procesador superior a 486)
- La solución no requiere explicación.
- Hay suficientes ejemplos bien etiquetados y con adecuada variabilidad, incluyendo ruidos y/o contradicciones.
- No se dispone de expertos genuinos capaces de explicar su conocimiento adecuadamente (algoritmos, reglas, etc.)

4. Desarrollo – Construcción de la RNA:

Previo a la implementación en sí, es conveniente hacer unas **consideraciones previas** a la implementación del Sistema Conexionista:

- Se debe intentar utilizar alguno de los modelos básicos o paradigmáticos ya que estarán más y mejor verificados y validados.
- Dos niveles de decisión: los elementos de proceso y las conexiones entre ellos. Pueden hacerse dos aproximaciones; la más común es plantearse, primero, el tipo y las características individuales de los EP, en función de los datos de los ejemplos (valores continuos, discontinuos, positivos, negativos, etc.)
 - **Elementos:** función de entrada (suma o suma ponderada), función de activación (identidad, umbral, sigmoide, etc.), función de transferencia, función de salida, salidas. Todas estas funciones vendrán determinadas por los valores de los datos que ha de manejar el sistema.
 - En segundo término se valorarán las **conexiones:** topología, dinámica y mecanismo de aprendizaje. No todos los elementos, incluso los de una capa, tienen que poseer iguales características. Es conveniente manejar este tema con cuidado para no caer en inconsistencias del sistema.

Principales factores a tener en cuenta:

- Tamaño de la red: hace referencia al número de elementos de procesamiento, de interconexiones y de redes que han de trabajar simultáneamente, pues precisan una perfecta definición y precisión entre ellas para funcionar adecuadamente de forma simultánea. Los tres factores (Eps, Interconexiones y Redes) estarán relacionadas en su número con la complejidad de los problemas a resolver).
- Rapidez de la red: se refiere al número de interconexiones procesadas por segundo (CUPS) o interconexiones por segundo (IPS). Se habla de rapidez en aprendizaje y en ejecución, cuando nos referimos al Sistema Conexionista en sus fases de aprendizaje y ejecución respectivamente. En el modo de aprendizaje, los Sistemas Conexionistas (feed-forward) son más lentos que en el operacional o en ejecución, ya que tienen el trabajo adicional de ajustar los pesos de las conexiones en cada ciclo.

- Funciones de los Eps: pueden ser distintas en cada nivel de la red. Se determinan las mejores por el método de “ensayo-error”, eligiendo la que mejores resultados ofrezca. Este método consiste en hacer una prueba con una de las posibilidades (a la que se conceda mayor credibilidad “a priori”) y, si no da el resultado esperado se prueba con otra, y así sucesivamente hasta dar con la adecuada (si existe). Para empezar, por ejemplo, sigmoides si los datos se mueven en el intervalo $[0, 1]$, e hiperbólica-tangente si están en $[-1, 1]$.

Elección del modelo:

Hay múltiples maneras de poder realizar la implementación de un Sistema Conexionista, pero lo más seguro y menos problemático será disponer de uno de la docena de modelos básicos o paradigmáticos sobre el que se trabajará intentando adaptarlo al problema particular.

Esta elección depende, en gran medida, de lo que se espera que haga el Sistema Conexionista. Si nos movemos en el ámbito de la investigación, son importantes las facilidades del modelo de la RNA para poder cambiar sus parámetros, sus funciones, etc. e investigar qué sucede cuando se hacen estos cambios, y resulta menos importante la interfase con el usuario. En el ámbito de la producción interesa más, al menos en un principio, que el sistema admita modificaciones mínimas en aras de una mayor eficacia en el entrenamiento, y que la interfase sea buena. Se valorará, sobre todo, rapidez y coste.

Topología:

Se habrá de elegir el número de capas (se utiliza una RNA multicapa en problemas complejos o con gran diferencia entre los datos de entrada y salida) y de conexiones entre los elementos de las capas (mayor número a mayor complejidad; en el límite, totalmente conectadas).

Cuando son muy distintos los datos de la entrada y de la salida se precisa una representación interna de los datos, lo cual implica la existencia de más de una capa, que le servirán de intermediarios entre las entradas y las salidas.

La habilidad del Sistema Conexionista para procesar información compleja aumenta proporcionalmente al número de capas, pero se complica el entrenamiento del mismo.

También es importante seleccionar el número de elementos por capa. En las capas de Entrada y Salida están predeterminados por los datos que se aportan y por los que se esperan del sistema, pero en las capas intermedias es intuitivo. Una regla es:

$$\frac{(x+1)+(x-1)}{2} = \text{número_de_elementos_de_la_capa_}x$$

Hay que elegir entre modelos con alimentación hacia delante (F.F.) que son más rápidas y siempre alcanzan la estabilidad, o con retroalimentación (F.B.) (propriadamente dicha, lateral, y redes totalmente recurrentes, donde se forman bucles cerrados) más hábiles representando problemas no lineales. Estas últimas pueden tener problemas de estabilidad y recomputan continuamente la información hasta que alcanzan un estado estable (cuando lo alcanzan); siendo preciso, a veces, pasarle en muchas ocasiones el conjunto de entrenamiento. Las F.B. suelen usarse para representar sistemas no lineales o donde se pretenda controlar, en cierta medida, la salida de los Eps.

Si es posible, se debe empezar sin retroalimentación, a no ser que se le quieran conferir a los Sistemas Conexionistas determinadas cualidades como: desactivación progresiva de unos elementos, que el Sistema Conexionista tenga en cuenta las respuestas previas que ha dado, etc.

Aprendizaje:

Entendido como la “capacidad de modificar adecuadamente la conducta del sistema de acuerdo a las modificaciones de los estímulos y/o del entorno; y como un resultado de las experiencias pasadas para el establecimiento de nuevos patrones de respuesta a estímulos externos”.

Es algo tan fundamental e inherente a la naturaleza humana, que pocas veces nos paramos a analizar cómo sucede en la realidad; y, por otra parte, es tan complejo que los resultados son poco espectaculares y nada concluyentes, hasta la fecha, a pesar del gran esfuerzo que a él se aplica.

Según la cantidad y tipo de los datos que tengamos se elegirá entre:

- **Aprendizaje Supervisado** (off-line): regla delta, retropropagación, por refuerzo, estocástico, etc.,
- O, cuando sólo se conoce cómo debería ser el comportamiento en general, y no se dispone de un ejemplo completo del comportamiento deseado, **No Supervisado** (refuerzo de elementos activos o de Hebb,

competitivo o de Kohonen, avalancha-olvido fisiológico o de Grossberg, etc.). Si hay un conjunto de ejemplos con la respuesta adecuada a cada estímulo que se dé como entrada al sistema, se utilizará prioritariamente el supervisado. En otro caso, el no supervisado. Según la naturaleza del problema se propone una u otra “tasa de convergencia” que, cuando se alcanza, indica que se debe finalizar la fase de entrenamiento. Debe vigilarse el sobreentrenamiento, ya que hace perder la capacidad de generalización.

Puntos a tener en cuenta en el aprendizaje:

- Hay que controlar el valor de la “tasa de aprendizaje” o “ganancia”, valor de la variación que se quiere que ocurra en los pesos de las conexiones de los Eps con cada ejemplo que se pase al sistema. Esta tasa será razonablemente grande para que aprenda rápido, y suficientemente pequeño para que no oscile a ambos lados del valor de convergencia adecuado. Es conveniente que sea variable, además de en las distintas capas ya que acelera el entrenamiento, en las distintas partes de la fase de entrenamiento. Al principio que sea elevada y al final, cuando se va acercando a la convergencia, se va disminuyendo.
- Manejar adecuadamente el MOMENTUM: Acelera el aprendizaje sin incrementar la tasa de aprendizaje. Más importante en el aprendizaje “por lotes”. Consiste en que una porción de la variación del peso de la conexión previa influye en la actual. Actúa como filtro pasa-bajo ya que refuerza las tendencias generales y cancela “por si” las oscilatorias.
- Si la derivada de la función error, para una determinada conexión, tiene el mismo signo algebraico durante varios pasos del algoritmo, el parámetro ganancia para dicha conexión debería ser incrementado, reduciéndose, por tanto, el número de pasos requeridos para moverse de un sitio a otro de la superficie de error. Por el contrario, si cambia el signo de la derivada, la ganancia debería decrecer, ya que este cambio de signo significa la existencia de picos y valles en la superficie de error y con una ganancia grande se oscilaría alrededor del valle en su punto mínimo.
- Para poder aplicar los criterios es preciso que puedan existir diferentes ganancias (fases de aprendizaje) para cada conexión ajustable de la estructura y que cada parámetro de control de velocidad debe variar de

un paso a otro, debido a que la superficie de error tiene diferentes formas en un mismo espacio, por lo cual parece apropiado poder modificar la ganancia en función de estas formas diferentes.

- Inicializar aleatoriamente los pesos de las conexiones (en general).
- Ojo con los mínimos locales, ya que cesa el aprendizaje sin alcanzarse el mínimo global. Cuando se cae en un mínimo local se debe intentar: cambiar la topología (por ejemplo el número de capas), modificar parámetros de aprendizaje, modificar los pesos iniciales, el conjunto de entrenamiento o presentar los patrones en distinta secuencia.
- Puede aplicarse un término de decaimiento (regla de OJA en el aprendizaje Hebbiano) que cuanto mayor sea hará que el Sistema Conexionista recuerde menos de lo aprendido en los pasos previos.

5. Análisis de las herramientas disponibles en el mercado y selección de las más apropiadas (HW and SW).

Precio: Todo proyecto de ingeniería (tanto de investigación como empresarial) está sujeto a un presupuesto previo que no puede alterarse significativamente, lo cual le da al factor peso un peso específico decisivo a la hora de la selección de las herramientas.

Potencia: Que sea adecuada al producto a desarrollar.

Conocimiento previo por el equipo investigador: es conveniente que el equipo de desarrollo conozca, cuanto más mejor, las herramientas que ha de utilizar. Esto redundará en una reducción del tiempo de construcción y en una optimización de los recursos en cuanto atañe a la corrección de errores, alteraciones en el diseño, etc.

Portabilidad: muy importante a la hora de seleccionar las herramientas que los productos por ellas desarrollados sean, luego, ejecutables en la mayor variedad posible de computadoras, con lo que se facilitará la posterior transferencia tecnológica del producto. Elegir, si es posible, herramientas software que estén disponibles para computadoras de todo tipo: portátiles, personales, estaciones minis, vectoriales, etc.

Facilidades de modificación: es conveniente utilizar herramientas flexibles y que permitan las mayores capacidades de modificación en todas las variables del Sistema Conexionista para adecuarlo al problema concreto a

abordar. Son más aconsejables las herramientas más flexibles. Lo más flexible son los lenguajes de programación.

Amplitud de posibilidades de modificación: sin perder de vista el punto anterior, son preferibles las herramientas software que traen prefijado el mayor número posible de paradigmas de Sistemas Conexionistas básicos.

Facilidad de control de los procesos: sobre todo en el entrenamiento.

Integración con otros productos de computación: siguiendo la filosofía de la implementación de “sistemas híbridos” son convenientes herramientas que permitan integrar los Sistemas Conexionistas con Sistemas Expertos, Bases de Datos Relacionales.

Familiaridad con ellas de los futuros usuarios: siempre que sea posible, pues podrán hacer así, requerimientos más razonables si tienen idea de la potencialidad y los límites de las herramientas utilizadas.

6.- Instalación de las herramientas HW y SW:

- Mejor seguir las especificaciones del fabricante en los manuales del producto. Es importante controlar versiones y compatibilidad con normas de seguridad establecidas para evitar funcionamientos inadecuados posteriores.
- Suele ser un proceso sencillo y rápido.
- Observar fielmente las indicaciones del fabricante.

7.- Construcción de la RNA.

Este es el momento en que hay que ponerse en la computadora a implementar los requerimientos específicos iniciales de los apartados previos de la metodología, en concreto los referentes a topología, dinámica, tipo de aprendizaje, etc.

Comenzar por las aproximaciones más sencillas para ir complicándolas a medida que el sistema requiera mayor complejidad, de esta forma se va a facilitar la realización de estudios posteriores que pueden sugerir cambios en las selecciones previas, gracias a un análisis secuencial de dichas aproximaciones.

8.- Preparación de los datos:

Datos de entrada y salida, (deseados y computados). Su preparación constituye el punto clave del proceso de entrenamiento (o, al menos, uno de los puntos clave de este proceso). A veces, es necesario normalizar algunos

valores de estos datos para adecuarlos a las funciones seleccionadas para los elementos.

9.- Construcción de los conjuntos de prueba y entrenamiento:

Obviamente, en este punto nos estamos refiriendo a procesos de aprendizaje con un algoritmo supervisado, ya que en los otros no existen estas fases, de entrenamiento y ejecución.

Es conveniente para obtener resultados más objetivos, que sean distintos los elementos de ambos, que son más confiables los resultados así obtenidos que si se reutilizan algunos de estos datos (dependiendo del número de casos disponible el conjunto de entrenamiento va desde el 20-30% de los datos disponibles hasta el 85-90%, dejando los restantes para el de prueba). Cuanto menor sea el porcentaje utilizado en el conjunto de entrenamiento, mayores serán las dificultades del entrenamiento, pero, por el contrario, será mejor el posterior proceso de verificación. Hay que tener en cuenta que, a partir de un tamaño, las mejoras del proceso de entrenamiento gracias a su aumento pueden no compensar en tiempo y esfuerzo.

Utilizar el mayor número posible de casos típicos y alguno atípico o especial o incluso que sea contra ejemplo para proporcionarle una mayor capacidad de generalización y no se centre, únicamente, en los casos típicos.

10.- Entrenamiento de la red.

Puede estar condicionado por dos variables con marcado carácter subjetivo en su valoración: el tiempo de entrenamiento y el porcentaje de error permitido; ambas relacionadas entre sí y con la capacidad computacional y el número de ejemplos disponibles, por lo que no es fácil emitir normas generales sobre ellos. Además, a veces el porcentaje de error permitido depende del área del problema y de la sensibilización social a la solución del mismo.

En todo caso, hay que decidir definitivamente el grado de convergencia (error que permitimos a la red), la tasa de aprendizaje es representada por la amplitud del cambio que se quiere que ocurran en los pesos de las conexiones cuando se produce el error en la salida (puede ser gradual a medida que avanza el proceso) y el número de ciclos de entrenamiento (influye directamente en el tiempo de entrenamiento y la capacidad de generalización que es menor, a medida que le pasemos más veces el conjunto de entrenamiento, una vez que ya está entrenado. De los que se trata es de que aprenda, generalice y no memorice los casos de entrenamiento.

Cuanto menor sea el conjunto de entrenamiento, **más** veces es necesario pasárselo al sistema, pudiendo alcanzar un sobreentrenamiento con la consecuente pérdida de generalización del sistema. A veces, es conveniente sacrificar algo los resultados de determinados parámetros, para mejorar otros.

11.- Chequeo de resultados:

Aquí ya no se vean a modificar los pasos de las conexiones; se saldrá, por tanto de modo de entrenamiento para pasar al modo de ejecución.

En dos niveles: primero con el conjunto de entrenamiento (completo o sólo con parte) y después con el conjunto de prueba.

Comprobamos la seguridad del entrenamiento y la respuesta del sistema al ruido u otros agentes distorsionantes. En el segundo nivel se hace una primera verificación del funcionamiento del sistema.

12.- Análisis de los resultados:

Se procede a comprobar los resultados obtenidos con el conjunto de entrenamiento y luego con el de prueba y compararlos entre si.

Si el resultado es satisfactorio se concluye el entrenamiento, al menos por ahora. Ante resultados no satisfactorios se ajustan los parámetros, se aumenta el número de ciclos o se cambia el conjunto de entrenamiento. Es común que el causante de problemas de entrenamiento del sistema conexionista sea la confección del conjunto de entrenamiento.

Análisis estadístico de los resultados. Puede hacer conveniente cambiar los elementos del conjunto de entrenamiento (eliminar redundancias, introducir ruido, etc.).

Análisis estadístico de las entradas. Se puede asumir que, cuando no se logran grandes mejoras en el sistema utilizando un mayor número de ciclos o ajustando los parámetros y las variables, lo que se debe hacer es, sin perder demasiado tiempo en las dos variables citadas, transformar directamente el conjunto de datos, que con ello, probablemente se soluciona el problema.

13.- Ajuste de parámetros:

Sobre todo repararemos en:

- Modo y tasa de aprendizaje, topología del sistema, dinámica, funciones de entrada, activación, transferencia o salida de los elementos, etc.

- La magnitud del ajuste dependerá (además de su necesidad en función de los resultados obtenidos) de la flexibilidad de la herramienta utilizada o si la hemos construido completamente nosotros el sistema conexionista sin utilizar herramientas, (lo cual no se aconseja como primera opción por múltiples motivos de costes y eficacia), en cuyo caso se podrán alterar todas y cada una de las variables que se hayan implementado en la construcción.

14.- Validación del sistema:

Control del funcionamiento del producto en su ambiente de funcionamiento preferiblemente por un equipo distinto al que lo construyó y con un conjunto de datos reales y desconocidos por el sistema conexionista.

15.- Transferencia tecnológica:

- Puede ser, incluso, un equipo ajeno al de desarrollo del producto.
- Proporcionar una adecuada interfaz de usuario.
- Instalación en su lugar de actuación definitivo.
- Entrenamiento del futuro usuario para su manejo para que pueda sacarle el mayor rendimiento posible al sistema.

TEMA 5. SISTEMAS HIBRIDOS (SH)

MODOS DE INTEGRACIÓN

- **Aislados:** No interaccionan sino es para comprobar los resultados obtenidos con una y otra técnica. Pueden ser muy útiles en sistemas usados en toma de decisión (para verificar entre si sus resultados)
- **Transformación:** Se transforma un sistema conexionista, previamente entrenado, en una base de conocimiento de un sistema experto, o viceversa, etc. Los componentes no interactúan entre sí.

Se están utilizando para verificar tendencias y relaciones entre datos, como ayuda en toma de decisión en “Marketing”.

El sistema tiene la limitación de que sólo usa las capacidades de la técnica que está siendo ocupada en cada momento.

- **Con acoplamiento débil:** conexión indirecta entre los componentes del sistema híbrido, a través de interfases, ficheros, etc. El sistema usa los componentes para beneficiar el funcionamiento de otros componentes. Por ejemplo, el sistema conexionista se usa para analizar los datos dados por el sistema experto. Precisa de gran cantidad de conexiones entre los componentes, lentifica el funcionamiento del sistema y, además, no hay acceso directo entre los distintos componentes del sistema.
- **Con acoplamiento fuerte:** conexión directa entre los componentes del sistema híbrido, siendo cooperativos y mejorando el tiempo de ejecución del sistema respecto a los anteriores. Además, cada parte ayuda al control de las otras. Un ejemplo es una RNA imbuida en un S.E. donde la RNA controle el proceso de inferencia enfocando adecuadamente los procesos de búsqueda y de equiparación de patrones (en este caso reglas). Otro ejemplo sería un sistema experto imbuido en una RNA proporcionando conectividad entre las partes de la RNA o de ella con otras RNA y pudiendo ofrecer algún tipo de explicación de actuaciones.

Se están usando en el campo de la robótica y educación.

- **Totalmente integrados:** son sistemas conexionistas que simulan o actúan como sistemas expertos o bases de datos relacionales o viceversa.

Sus principales características positivas son: robustez, mejora de la eficiencia del sistema y un incremento en los posibles problemas a solucionar.

Si están bien integrados pueden ofrecer: gran capacidad de adaptación, generalización, tolerancia a ruido, justificación, deducción lógica, rapidez de proceso.

Son los modelos integrados más avanzados y están, todavía, en fase de prototipo en la inmensa mayoría de los casos por lo que aún quedan muchas dificultades a superar (algunas todavía por descubrir).

Los SH pueden explicar mejor las transiciones entre las partes más primitivas y más elaboradas de las tareas cognitivas que tomando sus componentes por separado (RNA, SE,...).

ALGUNOS EJEMPLOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (S.H.)

No siempre van a coexistir en los sistemas híbridos las posibilidades de componentes distintos. Es más, casi nunca coexisten todos. Lo más común es que coexistan dos o tres componentes distintos. Se verán, a continuación algunos ejemplos de esto:

R.N.A. y Sistemas Expertos

Es uno de los campos abiertos más amplios de la investigación actual en Inteligencia Artificial.

Su conjunción está soportada, de forma teórica, por la forma de procesar la información de los humanos, donde se aprecian, ante determinadas situaciones, una respuesta rápida, no consciente, gobernada por el simple reconocimiento de patrones (ejemplo: actos reflejos ante dolor), y, complementándose con lo anterior se requiere otro procesamiento de la información que puede precisar de más datos y tiempo, pero que es consciente y proporciona una mayor "calidad" en la respuesta.

Las RNA pueden ser una buena interfase entre el mundo real (difuso) y los sistemas expertos en cuanto a la adquisición de conocimientos o a la captación de informaciones (datos, noticias y conocimiento) se refiere. La aproximación inversa sería que: (1) el S.E. toma los datos del exterior (puede hacer preguntas a usuarios, conectarse a una base de datos, puede introducir fácilmente heurísticas, etc.); (2) la RNA, una vez entrenada, analiza los datos de forma completa, rápida y masiva; y (3) los resultados de la evaluación de

los datos (utilidad y consistencia de los resultados o conclusiones de la RNA) la realiza el S.E.: analizando, por tanto, y validando las salidas de la RNA.

Otra posible utilización compuesta de RNA y S.E. es: la RNA genera proposiciones y constricciones para los sistemas expertos, educiendo el conocimiento que no es capaz de elicitar el experto. Además pueden completar (gracias a la capacidad de las RNA de restaurar patrones incompletos) antecedentes o consecuentes incompletos de las reglas de producción de la base de conocimientos de sistema experto.

Además, las RNA pueden usarse para validar los sistemas expertos, para actualizar parámetros estadísticos en módulos de sistemas expertos, etc.

Finalmente, la RNA puede realizar un refinamiento del sistema experto: (1) insertar en la RNA el conocimiento del sistema experto; (2) se entrena la RNA con ejemplos clasificatorios; y (3) se extrae el conocimiento de la RNA en forma de reglas de producción: "SI... ENTONCES" y se introduce en la base de conocimientos del sistema experto.

RNA-BD-BRD (bases de datos- DB relacionales)

Se usan las RNA para extraer conocimiento de grandes bases de datos, por ejemplo examinando patrones de atención clínica en relación con el resultado de esta atención (éxito o fracaso). Las RNA hacen más "inteligentes" las bases de datos ya que les permiten actualizar y adecuar su contenido mediante algoritmos de aprendizaje.

Por otra parte la RNA puede extraer reglas de la base de datos e incluso incluirle heurísticas de búsqueda.

Un ejemplo más sofisticado es una "base de datos consejera" que utiliza:

1. Un sistema experto para: a) determinar las variables tiempo, recursos y esfuerzos; y b) aconsejar al usuario sobre el coste y la organización óptima.
2. Una RNA para determinar la cantidad de esfuerzo y tiempo requeridos. Así, el sistema experto recoge información del usuario acerca del trabajo anterior al diseño de la base de datos y obtiene unos valores que serán los de entrada a la RNA que calcula la cantidad de esfuerzo y tiempo necesario para concluir el proyecto, devolviendo la RNA el número de personas más requeridas y el tiempo total necesario. Esta información la usa el sistema experto para concluir el coste, número de personal requerido y un esquema organizado de los recursos.

RNA y algoritmos genéticos

Se utilizan los algoritmos genéticos para entrenar eficientemente las RNA gracias a las propiedades de los algoritmos genéticos para: seleccionar la población inicial; cruzarse con pérdida mínima de información y mutarse (actúan como un operador que impide que el espacio de búsqueda sea 0 en ningún momento). Estas propiedades de los algoritmos genéticos se aplican sobre los pesos de las conexiones de la RNA y junto con otra propiedad de los algoritmos genéticos que es la “reproducción” (sólo sobreviven y se reproducen las mejores soluciones), se consigue obtener el esquema de pesos óptimos para la RNA sin precisar del entrenamiento (se reduce el coste en tiempo y poder computacional). Además se permite obtener los pesos óptimos de la RNA como si estuviese entrenado, pero sin tener que prefijar ni la “tasa” ni la regla de aprendizaje a utilizar por la RNA (puntos siempre conflictivos).

Suelen utilizarse, por tanto, los algoritmos genéticos en: (1) optimización topológica (selecciona la arquitectura y conectividad óptimas para la RNA en ese dominio concreto) y (2) optimización de los pesos de las conexiones.

Este tipo de sistemas híbridos (algoritmos genéticos – RNA) se usó con éxito en problemas de predicción (económica y evaluación de impacto ambiental) y refinamiento de bordes en zonas de baja calidad radiográfica.

TEMA 6. APLICACIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS CONEXIONISTAS

1. RECONOCIMIENTO DE PATRONES: Voz, imágenes, objetivos en Radar, etc.
2. CLASIFICACIÓN: Etiquetar a todos los elementos iguales con la misma etiqueta.
3. AGRUPAMIENTO (CLUSTERING): Poner en un mismo grupo patrones parecidos.
4. OPTIMIZACIÓN: Reconoce el mejor patrón entre varios (Ej. Problema del viajante).
5. DIAGNÓSTICO: En función de 1 y 2 concluye una sentencia.
6. PREDICCIÓN: En función de datos previos ofrece patrones futuros. Muy adecuados en series temporales (índices socioeconómicos, de producción, de ventas, etc.), sobre todo con ventana temporal fija.
7. TOMA DE DECISIÓN: Teniendo a 5 en cuenta ordena la ejecución de una acción.
8. ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS, NOTICIAS Y CONOCIMIENTOS: Incluso cuando son ambiguos y/o implícitos.
9. SIMULACIÓN: Generación de patrones en función de datos, incluso dinámicos. Por ejemplo fenómenos atmosféricos, flujo cardíaco, estudios de penetración aerodinámica, etc.
10. FILTRADO: Eliminación de datos incorrectos o “ruido” en señales y/o imágenes.
11. CONTROL DE SISTEMAS: Incluso multivariantes: Desde electrodomésticos a robots y vehículos móviles y articulados.
12. ALMACENAJE DE PATRONES ESPACIO-TEMPORALES: Clasificación en tiempo real.

CONSIDERACIONES A LA APLICACIÓN DE SISTEMAS CONEXIONISTAS

- Se usan, sobre todo en tareas tediosas, molestas o inadecuadas para el ser humano o para otras técnicas de computación.
- Tener cuidado con los productos de desarrollo que se ofrecen.
- Solo se publican los éxitos, no los fracasos; y a veces, no son tales.
- Se comienza a percibir una falta de fundamentos teóricos sólidos para todas las aplicaciones que se pretenden en la actualidad por parte de algunos investigadores y, sobre todo, de las casas comerciales.
- Se espera que los Sistemas Conexionistas sean libres de error, cosa no cierta, y si fallan se descalifican totalmente sin razón.
- Se están haciendo investigaciones para dotar a los Sistemas Conexionistas de capacidad de explicación del porqué de sus conclusiones. Todavía sin demasiado éxito (Gallant).
- Pueden actuar en tiempo real.

APLICACIONES RNA

- **Biológicas:** Simbiosis con Neurociencias. Identificación del Genoma. Simulación de partes y circuitos cerebrales.
- **Económico-Financieras:** Adjudicación de créditos, reconocimiento de morosos, selección de candidatos a empleos, etc.11
- **Robótica:** Control de brazos articulados, vehículos sin conductor, control de automatismos, etc. Muy útiles en situaciones críticas que requieran una respuesta rápida. Planificación de tareas.
- **Manufactura-Industria:** Control de calidad y selección de partes en cadenas de montaje, modelización de procesos químicos estables y/o reacciones dinámicas, control de sistemas de producción, etc.
- **Defensa-Policiales:** Reconocimiento de objetivos ambiguos en entornos cambiantes, discriminación de amigo-enemigo, detección de explosivos, reconocimiento de sospechosos, control de trayectorias balísticas, optimización de recursos logísticos, etc.

- **Electrónica:** Diseño y prueba de circuitos, detección de “chips” defectuosos, etc.
- **Ecología:** Predicción Atmosférica, evaluación del Impacto Ambiental, etc.
- **Telecomunicaciones:** Eliminación de ruidos de canal, adjudicación de prioridades, “routing”, encriptado de mensajes (codificación-decodificación de caracteres).
- **Visión Artificial:** Mejora de imágenes, reconocimiento de patrones con alteraciones de tamaño, angulación, incompletos, interpretación de imágenes, etc.
- **Transportes:** Planificación de viajes: horarios, itinerarios, etc. Control y pilotaje automático de trenes, coches y aviones.
- **Reconocimiento de caracteres escritos y hablados.**
- **Geología:** Reconocimiento de yacimientos y movimientos sísmicos.
- **Biomédicas:** Reconocimiento y manipulación de señales e imágenes biomédicas, toma de decisión, diagnóstico clínico, predicción de actuaciones terapéuticas, control de terapias, rehabilitación y ortopedia, etc.
- **Lenguaje:** Procesamiento de la voz, eliminación de ruido en sonidos, conversión de texto a voz y viceversa, reconocimiento de caracteres escritos, etc.
- **Informática:** Análisis y optimización de estructuras de datos y programas.
- **Neurocontrol:** Control preciso en situaciones difusas.

HARDWARE CONEXIONISTA

TABLAS COPROCESADORAS: Son un punto intermedio entre la simulación software en computadores digitales secuenciales, cierta dosis de procesamiento paralelo de la información; ganando, por tanto, en tiempo de ejecución y en capacidad de cómputo.

IMPLEMENTACIONES “PIPELINE” DE TECNOLOGÍA DIGITAL VLSI: Constituyen la 1ª generación de HW conexionista ya que tenían un cierto nivel de procesamiento paralelo de la información. Algunos ejemplos de productos de este tipo son: TRW, MARK III, SIGMA I, etc, los cuales se encuentran actualmente disponibles comercialmente. Suelen tener aproximadamente

60.000 elementos de procesamiento y manejar aproximadamente 106 conexiones (aproximadamente 10-30 veces la potencia de un VAX 11/780 de Digital). Se utilizó un chip VLSI para reconocimiento de patrones de objetivos en Radar.

VERDADERO HW CONEXIONISTA: Los primeros productos datan de los años 50 y fueron desarrollados, en los laboratorios Bell, para efectuar filtrado de comunicaciones y evitar ruidos en telefonía. Estos filtros fueron perfeccionándose, desde los que tenían implementados las RNA MADALINE de Widrow y Hoff hasta los actuales con 256 elementos de proceso y 130.000 conexiones implementando “máquinas de Boltzmann”.

También en los años 50, a mediados, el Perceptrón fue implementado en Hw por F.Roseblatt en la Universidad de Cornell.

Tras pasar por casi dos décadas de ostracismo, en los primeros años 80 se vuelve a trabajar en HW conexionista, siendo los laboratorios militares los que tienen mayor actividad; por ejemplo el de DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). También se detecta inquietud en el mundo universitario (MIT, CALTECH, CORNELL) y en el mundo empresarial (ATT-BELL; NESTOR; THINKING MACHINES; etc.).

A finales de los 80 comienzan a aparecer máquinas conexionistas con las más variadas topologías y dinámicas. (Connection Machine, Hipercubo) y también comienza la aplicación industrial más o menos generalizada (búsqueda de yacimientos petrolíferos en Denver, simulación de procesos industriales complejos, etc.).

La Connection Machine 2 multiplica por 500 la velocidad del VAX 11/780.

Estas máquinas suelen estar controladas por computadores secuenciales tipo SUN-HP-SILICON en su funcionamiento.

Con la llegada de la tecnología óptica se comienza la era de los “NEUROCOMPUTADORES ÓPTICOS” que llegan a manejar asociativamente millones de patrones de imágenes en muy poco tiempo haciendo “feedback óptico”. El uso de cristales foto-reactivos facilita el cambio de valor de las conexiones pudiéndose implementar aproximadamente 10⁸⁻⁹ pesos/cm². Este tipo de máquinas se han probado, muy satisfactoriamente, con modelos de HOPFIELD y de BACKPROPAGATION.

En el CALTECH (Instituto Tecnológico de California) Dimitri Psaltis está desarrollando un HW electro-óptico con chips Gallium-Arsenio, separados por cristales fotoreactivos alterando sus propiedades eléctricas y generando hologramas que representan el cableado entre los chips; pudiendo, de este modo, alcanzarse 109 conexiones/cm². Tiene el problema del control flujo de la información que no es excesivamente adecuado.

Últimamente, también están apareciendo implementaciones conexionistas HW para emular el funcionamiento de determinadas zonas del SW biológico; por ejemplo el “chip coclear” o un sistema que emule parte del aparato visual, otro el hipotálamo, etc.

Finalmente, comentar que el futuro parece pasar por la implementación de HW Conexionista Biológico. Esto es, utilizando elementos biológicos (en concreto proteínas con propiedades fotorreactivas como la raddomiosina) para sustituir a los elementos de proceso (EP) incrementando tanto el número de EPs como de conexiones por cm² sin padecer los problemas típicos de una excesiva integración (calor e interferencias).