

INTELIGENCIA COMPUTACIONAL: REDES NEURONALES Y SISTEMAS BORROSOS

*El no espíritu no piensa no pensamientos
acerca de no cosas.*

Buda.

*El verdadero problema no es si las máquinas
piensan, sino si lo hacen los hombres.*

B. F. Skinner.

Javier AZNAR ALMAZÁN



Introducción



L paradigma de procesamiento de la información desarrollado a finales del siglo XIX y principios del XX, que conforma el binomio lógica booleana —máquina de Turing (o arquitectura Von Neumann, si se prefiere)—, constituye la base de nuestros actuales sistemas digitales de procesamiento (computadores o sistemas basados en microprocesadores). No obstante su indiscutible potencia, este esquema presenta numerosos problemas a la hora de abordar determinadas tareas, especialmente aquellas denominadas «del mundo real», donde la información que se presenta es masiva, redundante, imprecisa y distorsionada.

Para tratar este tipo de problemas, desde hace algún tiempo se vienen proponiendo una serie de modelos alternativos, de los cuales las Redes Neuronales Artificiales (ANS) y los sistemas basados en la lógica borrosa (*fuzzy logic*) son los que cuentan mayor popularidad y utilización.

Estos nuevos modelos de procesamiento y control, junto con algunos otros, se engloban dentro de las denominadas tecnologías emergentes o *soft computing*.

El trabajo en este tipo de materias, hasta hace poco considerado como disciplinas minoritarias, constituye hoy en día algunos de los esfuerzos más dinámicos dentro del I+D de países como Japón o Estados Unidos. De todas ellas, nos centraremos en la lógica borrosa o difusa, si bien haremos referencia a las redes neuronales, bien como patrón de comparación,

bien para aclarar algunos conceptos, debido a su extraordinaria aplicabilidad práctica.

Las *redes neuronales artificiales* (*artificial neural networks*), mediante un estilo de computación paralelo, distribuido y adaptativo, son capaces de aprender a partir de ejemplos. Estos sistemas imitan esquemáticamente la estructura *hardware* (neuronal) del cerebro para tratar de reproducir algunas de sus capacidades.

Por su parte, los *sistemas borrosos* (*fuzzy systems*) se introducen para manejar eficazmente conceptos vagos o imprecisos, como los empleados en la vida cotidiana. A partir de estos conceptos y como generalización de las reglas de la lógica booleana, base de nuestros sistemas digitales, los sistemas borrosos llevan a cabo un tipo de razonamiento aproximado semejante al desarrollado por el cerebro.

El camino hacia la construcción de máquinas inteligentes

Sin remontarnos a épocas históricas, donde los intentos resultaban prematuros en relación con la tecnología disponible, podemos considerar que el camino hacia la construcción de máquinas inteligentes comienza en la segunda guerra mundial, con el diseño de calculadores analógicos para el control de la artillería o como ayuda a la navegación.

Algunos investigadores observaron entonces que existía una semejanza entre el funcionamiento de estos dispositivos de control y los sistemas reguladores de los seres vivos. De este modo, combinando las nuevas teorías sobre la realimentación, los avances de la electrónica de la posguerra y los conocimientos disponibles sobre los sistemas nerviosos de los seres vivos, se construyeron máquinas capaces de responder y aprender como los animales. Norbert Wiener acuñó el término *cibernética* para designar este estudio unificado del control y de la comunicación en los animales y en las máquinas. Ejemplos clásicos desarrollados en los años cincuenta son las tortugas de W. Grey Walter, que exhibían comportamientos sociales, o la «Bestia» de J. Hopkins, que guiada por un sonar y un ojo fotoeléctrico era capaz de encontrar un enchufe para *alimentarse*.



Tras dos décadas de vigencia, la vieja cibernética comenzó su declive, coincidiendo con la primera época de auge de las redes neuronales, que surgieron también como intento de emular las estructuras biológicas.

A la par que los ordenadores analógicos y la cibernética, se inició el desarrollo de los ordenadores digitales tal y como los conocemos hoy,

basados en la separación de estructura y función (*hardware* y *software*), corriente que se denomina *computación algorítmica*. Puede decirse que esta tendencia comienza en 1937, cuando Alan Turing emprendió el estudio formal de la computación.

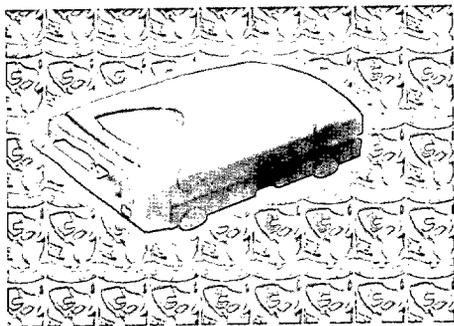
El siguiente paso conceptual importante en esta línea se debe a Von Neumann, quien en los años cuarenta concibe una computadora basada en la lógica digital, que opera ejecutando en serie (una tras otra) las instrucciones que componen un algoritmo que se codifica en forma de programa, el cual se encuentra almacenado en memoria. Debido a su eficacia, flexibilidad y versatilidad, y soportado por el impresionante desarrollo de las tecnologías electrónicas, éste ha sido el enfoque dominante en las últimas décadas, de modo que el binomio lógica booleana —máquina Von Neumann— es la base sobre la que se asientan las mayor parte de nuestros actuales computadores digitales.

La computación algorítmica se basa, por tanto, en resolver cada problema mediante uno o varios algoritmos y es ejecutado en una máquina en forma secuencial. Como desarrollo natural de esta tendencia, algunos pioneros, como Turing o Von Neumann, abrigaban las esperanzas de que pudiera incorporarse en una de estas máquinas, la capacidad de pensar racionalmente, en la forma de un *software* complejo. En este sentido, en 1950 Shannon y el mismo Turing diseñaron los primeros programas que permitían a un ordenador digital razonar y jugar al ajedrez. A lo largo de los años cincuenta se prosiguió trabajando en este sentido. En 1957, A. Newell, H. Simon y J. Shaw presentaron el *Teórico Lógico*, primer programa capaz de razonar sobre temas arbitrarios. Hacia 1960 John Mc Carthy acuña el término *Inteligencia Artificial* o *IA* para definir los primeros métodos algorítmicos capaces de hacer pensar a los ordenadores. En 1965, Marvin Minsky, Newell y Simon habían creado programas de IA que demostraban teoremas de geometría.

Aunque importantes, los desarrollos citados (y otros muchos también basados en la manipulación de la información simbólica) «solamente» eran capaces de resolver aquellos problemas para los que habían sido construidos. Sin embargo, los resultados eran tan alentadores que a finales de los años sesenta los investigadores llegaron a creer que en una década se conseguiría construir una máquina realmente inteligente.

Un cuarto de siglo más tarde, los ordenadores son miles de veces más potentes que los de la época de los pioneros de la IA y, sin embargo, no resultan mucho más inteligentes. El rápido progreso de la IA culminó en los años setenta, con la introducción de los *sistemas expertos*, programas de computador en los que se codifica el conocimiento de expertos en una cierta materia (diagnóstico, cálculo, decisión, etc.), en forma de reglas de decisión.

El problema radica en que el binomio lógica booleana —máquina Von Neumann— sobre el que se asienta la IA, pese a su gran potencia, presenta problemas a la hora de abordar ciertas tareas, como aquellas denominadas «del mundo real», donde la información que se presenta es masiva, imprecisa



y distorsionada. Para abordar este tipo de tareas, desde hace unos años (década de los ochenta, principalmente) se han vuelto a retomar (o han surgido) una serie de paradigmas de cómputo alternativos, como las redes neuronales, los sistemas borrosos, los algoritmos genéticos o la computación evolutiva, de los cuales los dos primeros quizá sean los más relevantes y empleados.

Así, el resurgimiento de las redes neuronales, también denominadas Sistemas Neuronales Artificiales (ANS) se debe, por una parte, a la citada dificultad para resolver con la eficiencia deseada problemas como los de reconocimiento de patrones o los de aprendizaje. Además, y debido a los elevados requerimientos computacionales de este tipo de tareas, la arquitectura Von Neumann no resulta apropiada y la introducción de sistemas de cálculo paralelo resulta ineludible si se quieren lograr respuestas en tiempo real.

Por otro lado, los sistemas borrosos inciden directamente sobre el otro miembro del binomio, la lógica booleana o digital. En ésta, una sentencia sólo puede ser verdadera o falsa (1 ó 0), una cualidad está presente o no lo está; pero en el mundo real las cosas no son verdaderas o falsas, 1 ó 0. Según el criterio de un ser humano una habitación no solamente puede estar fría o caliente, sino que también puede definirse como gélida, fría, fresca, templada, caliente o muy caliente.

Los sistemas borrosos pueden describirse como un tipo de lógica multivaluada, que permite manejar estos conceptos borrosos o difusos (*fuzzy*) típicos del mundo real, y que emula el tipo de razonamiento que los seres humanos realizamos con ellos haciendo uso de sentencias como «SI la habitación está muy fría, ENTONCES poner la calefacción al máximo». Podemos decir que mientras las redes neuronales artificiales emulan la *hardware* del cerebro, los sistemas borrosos se ocupan más del lado del *software*.

En definitiva, hoy en día vuelven a coexistir dos corrientes importantes dentro de la búsqueda de la «inteligencia», que son, más que alternativas, *complementarias*. Por una parte, la IA «convencional», basada en algoritmos manipuladores de información simbólica que se ejecutan sobre ordenadores Von Neumann y operan sobre la base de la lógica digital. Por otra parte, suelen agruparse las redes neuronales, los sistemas borrosos y otras técnicas, que se incluyen en lo que se ha dado en denominar *inteligencia computacional, computación emergente o soft computing*, que en cierta medida imitan las construcciones desarrolladas por la naturaleza. Así, con el término *ABC de la Inteligencia*, pueden contemplarse sus tres facetas: artificial, biológica y computacional.

Lógica borrosa

Los sistemas de control basados en la lógica borrosa combinan unas variables de entrada (definidas en términos de conjuntos borrosos o imprecisos) por medio de grupos de reglas borrosas y que producen unos valores de salida, que son, normalmente, desborrosificados, y que los hacen especialmente aptos para ser aplicados prácticamente en problemas no lineales o no bien definidos. De la misma manera, los sistemas borrosos permiten modelar cualquier proceso no lineal, y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje (a veces tomados de otros campos, como las propias redes neuronales o los algoritmos genéticos). No obstante, a diferencia de los sistemas neuronales, los basados en lógica borrosa permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema, bien directamente, bien como punto de partida para una optimización automática, al formalizar el conocimiento a veces ambiguo de un experto (o el sentido común) de una forma realizable. Además, gracias a la simplicidad de los cálculos necesarios (sumas y comparaciones, fundamentalmente), normalmente pueden realizarse en sistemas baratos y rápidos.

Sistemas de control borroso

Hay que señalar que dentro de los sistemas borrosos se incluyen diversas teorías, como la teoría de conjuntos borrosos, extensión de la teoría de conjuntos clásica, o la lógica borrosa, que puede considerarse una ampliación de las lógicas no valuadas propuestas por Lukasiewicz en 1930, y que son, a su vez, extensión de la lógica trivaluada (verdadero, falso, indeterminado).

No obstante, la principal aplicación de la lógica borrosa son los *sistemas de control borrosos*, que utilizan las expresiones de la lógica borrosa para formular reglas orientadas al control de sistemas. Dichos sistemas pueden considerarse una extensión de los sistemas expertos, pero superando los problemas que estos presentan en el razonamiento en tiempo real, causados por la explosión exponencial de las necesidades de cálculo requeridas para el análisis lógico completo de las amplias bases de reglas que manejan.

Reseñaremos que este control de sistemas puede ser realizado a muy diferentes niveles. En el nivel inferior, un controlador borroso puede, por ejemplo, realizar el control en bucle cerrado de una determinada magnitud física de un sistema, con el fin de mantenerla en torno a un valor de referencia. Por otro lado, aplicado a los niveles superiores de planificación, un controlador borroso puede, por ejemplo, aconsejar los grados de almacenamiento necesarios para mantener una eficiencia determinada y teniendo en cuenta los datos históricos.

Interés en el empleo de la lógica borrosa. Fusión de tecnologías

Podemos decir que los sistemas basados en la lógica borrosa pueden ser aplicados prácticamente a los mismos problemas que las redes neuronales. Ambos resultarán especialmente interesantes en problemas no lineales o no linealmente separables.

El otro gran denominador común de ambas técnicas es su orientación hacia el tratamiento de tareas que involucran el procesamiento de cantidades masivas de información de tipo redundante, imprecisa y con ruido, que aparecen en problemas tecnológicos cruciales (por ejemplo, un sistema de combate, un sistema de guerra electrónica, etc.), a los que en la actualidad se enfrenta el ser humano.

No obstante las ventajas e inconvenientes que cada enfoque puede presentar, el futuro apunta en la dirección de combinar distintas técnicas para resolver problemas complejos. Los problemas tecnológicos del mundo real resultan en general de gran complejidad, por lo que para su resolución es necesario dividirlos en partes más simples, de manera que cada una pueda ser resuelta mediante la técnica más indicada, sea ésta procedente de la estadística, procesamiento de señal, reconocimiento de patrones, redes neuronales, sistemas borrosos, algoritmos genéticos o cualquier otra.

Debemos recordar en esta línea de razonamiento que no existe la panacea, no existen soluciones simples a problemas complejos. Estas nuevas tecnologías emergentes aportan características sumamente interesantes, pero por sí solas no resolverán todos nuestros problemas tecnológicos; pero contribuirán, y de forma muy importante, en determinados aspectos, si bien otros seguirá siendo mejor abordarlos mediante técnicas «tradicionales». En este sentido, no conviene forzar la aplicación de cierta nueva técnica a determinado problema simplemente por su novedad, sino que ello solamente debe realizarse en aras de conseguir un mayor rendimiento o una mayor sencillez de implementación.

Esto último es una de los aspectos más destacables de la lógica borrosa, su relativa sencillez de aplicación. A veces, mediante un sistema borroso no se logra un rendimiento superior (ni inferior) al que se alcanza con un enfoque clásico, pero el tiempo de desarrollo es con frecuencia inferior, y el sistema final resulta más barato.

Para concluir, y retomando la línea de la fusión de tecnologías, merece la pena recordar el intenso trabajo que se desarrolla en sistemas neuroborrosos. Así, los sistemas borrosos pueden aprovechar la capacidad de aprendizaje de la red neuronal para optimizar su funcionamiento. Por otro lado, la equivalencia que se establece entre ciertos modelos neuronales y borrosos puede ser empleada para extraer las reglas que una red neuronal ha encontrado en su entrenamiento, eliminando así uno de los grandes problemas clásicamente achacados a los sistemas neuronales artificiales, su operación en forma de caja

negra. Por todo ello, la combinación de redes neuronales y sistemas borrosos es un campo de intensa actividad en la actualidad, del que ambas técnicas se benefician.

Conclusiones

La lógica borrosa tiene una historia corta, pero un rápido crecimiento debido a su capacidad para resolver problemas relacionados con la incertidumbre de la información o del conocimiento de los expertos. Además, proporciona un método formal para la expresión del conocimiento en forma comprensible por los humanos. Estas cualidades le aseguran un amplio campo de aplicabilidad y un alto interés para las aplicaciones militares, presentes y futuras.

Tanto las redes neuronales como los sistemas borrosos se aplicarán especialmente allá donde los comportamientos no lineales sean importantes.

Cuando no se disponga de un modelo suficientemente bueno, pero sí se disponga de un amplio conjunto de ejemplos (casos experimentales), el empleo de una red neuronal puede ser muy útil, y podemos dejarla trabajar para que, mediante un proceso de entrenamiento, ella misma encuentre el modelo a aplicar a las características más relevantes.

Sin embargo, cuando se disponga de un conjunto de reglas proporcionadas por los expertos en un determinado tema, el empleo de sistemas basados en lógica borrosa puede ser tremendamente útil.

No obstante, de la combinación de ambas técnicas, y de estas con otras más clásicas, se esperan mejores resultados todavía.

