

# ¿CUALES SON LAS APLICACIONES DE LA LOGICA BORROSA?

*(Which Are Some of the Applications of Fuzzy Logic?)*

Senén BARRO  
Alberto J. BUGARIN\*

\* Departamento de Electrónica e Computación, Universidade de Santiago de Compostela, 15706 Santiago de Compostela. E-mail: elsenen@usc.es

BIBLID [ISSN 0495-4548 (1996) Vol. 11: No 27; p. 149-161]

**RESUMEN:** Este trabajo orienta su contenido a las aplicaciones de la lógica borrosa, pero no desde una aproximación que trate de abordar ciertas características relevantes de algunas de ellas y/o comentar sus coincidencias y discrepancias desde el punto de vista del soporte dado por la lógica borrosa. Existen excelentes y abundantes revisiones de este estilo (véanse, por ejemplo, Zadeh, Yager 1992), por lo que nosotros hemos optado por introducir algunas reflexiones a modo de respuesta a preguntas formuladas al hilo de la más general que da título al trabajo. Contestar a algunas de ellas es, sin duda, un cometido realmente arriesgado, como ocurre al tratar de plasmar, por ejemplo, y aunque sea con trazos "borrosos", cuáles serán las aplicaciones futuras de la lógica borrosa. Esperamos que se nos disculpe si el acierto torna a ser escaso.

**Descriptores:** Control Fuzzy, Soft Computing, Sistemas Expertos Fuzzy.

**ABSTRACT:** *This paper discusses about the field of fuzzy logic applications, but not from the point of view of its importance or commenting their main features and how they are formally supported by fuzzy logic. Very good (Zadeh, Yager 1992), exist in this field, and so we decided to present some reflections trying to answer very general questions about this issue. Answering, for example, to the question about possible future applications of fuzzy logic is, no doubts, a very risky task. We look forward to be forgiven if our approach proves not to be very successful.*

**Keywords:** *Fuzzy Control, Soft Computing, Fuzzy Expert Systems.*

## Introducción

Antes de comenzar, y aunque resulte paradójico hablando de la lógica borrosa, creemos que conviene ser algo precisos con el lenguaje, por lo que haremos una matización relativa al significado que vincularemos al término "lógica borrosa" (*fuzzy logic*). Así, si bien por lógica borrosa se quiere designar a la lógica que estudia la relación de consecuencia en argumentos que incluyen enunciados vagos o imprecisos, a menudo se hace una extensión de su semántica, que busca abarcar todos los métodos, las técnicas y las herramientas basadas en la teoría de los conjuntos borrosos. Esta acepción de muy amplio espectro será la que seguiremos aquí, por ser normalmente asumida en el contexto de las aplicaciones.

Al contrario que la lógica clásica, la lógica borrosa permite ir mucho más allá del sí o del no, del verdadero o del falso, permitiendo formalizar matemáticamente

enunciados vagos como "presión arterial baja" o "presión arterial muy baja", susceptibles de verificarse en cualquier grado en un continuo entre lo absolutamente verdadero y lo totalmente falso. No se trata de volver gris lo blanco o lo negro, sino de ser conscientes de que abunda mucho más lo gris, con sus infinitas gamas, que lo absolutamente negro o blanco, y que no por ello estamos abocados a la indefinición de nuestro razonamiento o a la indeterminación en nuestras acciones. Hemos aprendido a desenvolvemos con soltura en un mundo donde la incertidumbre y la imprecisión lo inundan casi todo. ¡Lo gris es mayoría!. Incluso solemos sacar provecho de ello; cuando hablamos o escribimos introducimos frecuentemente términos imprecisos o vagos, constituyendo una suerte de economía en el lenguaje. Lo implícito y lo impreciso hacen flexible al lenguaje humano. En este orden de cosas, la lógica borrosa permite dar nuevos pasos en aquellos dominios de aplicación en los que es necesario capturar la gama de matices y de valores intermedios que existen, por ejemplo, en lo observado, en nuestro conocimiento o en nuestro lenguaje. Es decir, en el "mundo que conocemos y que nos rodea". En definitiva, en el ámbito de las aplicaciones reales. Este es, sin duda, el motivo por el que la lógica borrosa ha penetrado de una forma tan intensa y explosiva en el mundo de la ingeniería en los últimos años.

Aunque las aplicaciones de la lógica borrosa son muy recientes, al menos aquellas que han trascendido de los laboratorios de investigación al ámbito de la empresa, la teoría en la que se sustentan tiene un nacimiento bastante anterior. Concretamente, éste se sitúa en el año 1965, en el que se publicó el trabajo señero del Profesor Lotfi Zadeh titulado "Fuzzy Sets" (1965). Desde entonces no ha sido únicamente el Profesor Zadeh quién ha contribuido a desarrollar tan significativamente la lógica borrosa, tanto en su vertiente teórica como en la tecnológica. Por supuesto, a ello han ayudado una pléyade de científicos en todo el mundo. No obstante, pensamos que aun siendo considerado un "teórico" de la lógica borrosa, el Profesor Zadeh ha contribuido también significativamente al impresionante desarrollo de su vertiente aplicada. En primer lugar, por haber sabido intuir, ya desde el principio, las posibilidades prácticas a las que la lógica borrosa podía dar lugar. De hecho, ya en el año 1972, antes incluso de la primera publicación relativa a la aplicación de la lógica borrosa al control (Mamdani, 1974), el Profesor Zadeh apuntó las posibilidades que la lógica borrosa podía brindar al control de procesos (Zadeh, 1972). Si se nos permite, ahora sí nos gustaría forzar el lenguaje para decir que Zadeh es un "cientigeniero", tratando de designar con ello a una *rara avis* que participa como científico de la búsqueda y creación del conocimiento, pero que se preocupa, y de hecho tiene una sutil habilidad para ello, por ver la potencialidad de sus resultados de investigación en el terreno de lo práctico. También posee, y lo ha dejado patente en muchas de sus publicaciones, una excelente cualidad para hacer ver los conceptos más importantes que subyacen en el formalismo de la lógica borrosa, lo que permite a los no expertos y/o no teóricos, poder asimilarlos y posteriormente aplicarlos al dominio de lo real. Quizás también, por último, su incansable esfuerzo como embajador de la lógica borrosa en multitud de reuniones, conferencias, foros de debate, congresos, etc., es también una ayuda a su difusión, si bien es cierto que en buena medida la popularidad que le ha permitido ser tal embajador ha venido de la mano de las primeras aplicaciones significativas de la lógica borrosa.

## ¿Qué hace que la lógica borrosa tenga interés práctico?

La lógica borrosa se muestra como una muy potente herramienta formal para el tratamiento de conceptos imprecisos, tan intrincadamente ligados al razonamiento humano. Así, por ejemplo, la lógica borrosa permite representar el conocimiento de un experto en un determinado dominio bajo un soporte matemático, el de la teoría de subconjuntos borrosos, y el razonamiento o inferencia a través de un cálculo lógico sustentado en un conjunto de operadores borrosos (implicación, conjunción, etc.). En general, la mayor parte de las aplicaciones de la lógica borrosa (control, análisis de sistemas, etc.), se sustentan en el razonamiento cualitativo, como modo de razonamiento en el que la relación entrada-salida de un sistema se expresa como un conjunto de reglas borrosas, *si-entonces*, en las que el antecedente y el consecuente involucran a variables lingüísticas (Zadeh, 1973; 1975).

Aunque a menudo se apunta que la lógica borrosa permite solucionar problemas que serían irresolubles bajo otro tipo de aproximaciones, conviene matizar lo que hay de verdad en esta expresión. La precisión en la resolución de muchos problemas complejos supone un gasto económico, de tiempo humano y de computación que pueden ser tremendos. Si a esto añadimos que en muchos de estos problemas no se requiere tal precisión, encontraremos una de las causas principales de que la lógica borrosa esté considerándose como una herramienta clave en el desarrollo de los denominados sistemas inteligentes. Pensemos en el ya clásico ejemplo de aparcar un coche. Cuanta más holgura tengamos para hacerlo, menos maniobras tendremos que realizar y éstas podrán ser menos precisas. La lógica borrosa, al igual que nosotros, explota la tolerancia frente a la imprecisión, lo que al nivel de resolución de problemas significa, sobre todo, una reducción de coste y de esfuerzo. Resulta muy clarificador a este respecto valorar los resultados que presenta von Altrock (1995) en un reciente análisis de la experiencia de diversas empresas en la realización de diseños basados en la lógica borrosa. De un total de 311 empresas consultadas, prácticamente en ningún caso se utilizó la lógica borrosa para reemplazar controladores PID o controladores multivariable convencionales. En buena medida sí consideraron que había servido para reducir el coste del hardware de control y, sobre todo, el de los sensores. En lo que mayoritariamente sí se pusieron de acuerdo fue en considerar la significativa reducción en los costes de producción o el incremento en el valor del producto y el importante ahorro en el tiempo de diseño de éste (en general superior a un 50%). Todas estas consideraciones hicieron que 303 de las 311 empresas considerasen su experiencia un éxito y se mostrasen plenamente a favor de repetirla. En cuanto a quiénes están apostando más fuertemente por la tecnología borrosa, es incontestable el liderazgo que Japón ejerce en el mercado internacional. Si bien es cierto que no se trata de una excepción dentro del ámbito de las tecnologías (podríamos poner muchos otros ejemplos, incluso en el caso concreto de las tecnologías de la información y las comunicaciones, como las pantallas de visualización o las memorias), parece claro que existen razones peculiares para que así sea en el caso de la tecnología borrosa. En buena medida es posible que estemos ante otro ejemplo en el que aspectos de la idiosincrasia de las sociedades, totalmente ajenos en principio a cuestiones relativas a la política científica de las mismas, acaban marcando su interés y la forma en que afrontan vías y

resultados de investigación y desarrollo tecnológico. Y es que, en una frase que ya suena a tópico, pero que resume muy bien esta idea, la lógica borrosa empieza donde acaba la rigidez del pensamiento occidental.

Mientras que en Estados Unidos, cuna de la lógica borrosa, se ha venido ignorando y en muchas ocasiones minando cualquier iniciativa relativa a la "herejía *fuzzy*" (de lo borroso), Japón ha sabido sacar un enorme partido a la lógica borrosa. Ya en el Congreso IFSA (*International Fuzzy Sets Association*) de Tokio, en 1987, Matsushita Electric Industrial Co. Ltd presentó un cabezal de ducha como el primer producto de consumo basado en la lógica borrosa. Sin embargo, fue en 1990 cuando esta empresa empezó a comercializar una lavadora que integraba tecnología *fuzzy*, momento en que comenzó la "fiebre por lo *fuzzy* y dicho término se introdujo en la sociedad japonesa como sinónimo de "inteligencia", dando pie a un crecimiento de aplicaciones casi exponencial. Una mirfada de productos de todo tipo (cámaras, aspiradoras, sistemas de aire acondicionado, refrigeradores, hornos microondas, etc.) que incorporan sistemas de control que intentan modelar a través de la lógica borrosa el conocimiento y la experiencia acumulados por expertos humanos sobre el proceso a controlar, han comenzado a inundarnos desde entonces. Y es que no es para menos, ya que los resultados obtenidos son excelentes. En el caso de la lavadora de Matsushita, por ejemplo, el usuario sólo tiene que llenar la lavadora y darle al interruptor de encendido. A través de dos sensores ópticos se analiza la carga y la suciedad de la ropa, y a partir de ahí el lavado, el aclarado y el tiempo se seleccionan, de entre 600 posibles combinaciones, por medio de la lógica borrosa. Las prestaciones apoyan un excelente resultado desde un punto de vista económico, ya que el valor añadido que supone el conocimiento borroso integrado en estos productos es realmente significativo.

Estos "artilugios borrosos" con que los orientales han empezado a bombardearnos han hecho que el mundo occidental haya empezado a despertar de su letargo inicial en relación a la tecnología borrosa. En Europa y EEUU son ya muchas las empresas que comercializan productos que, de un modo u otro, integran lógica borrosa: Philips, Siemens, Daimler-Benz y Thomson, por Europa; General Electric, General Motors, Hewlett-Packard, Honeywell y Rockwell, por EEUU, son sólo algunos ejemplos. De hecho, la primera compañía del mundo en crearse para la comercialización de productos de y para la lógica borrosa, Togai Infralogic Inc., fue fundada en 1987 en EEUU. Sin embargo, y estamos de nuevo ante una situación paradójica, su producción ha sido masivamente exportada a Oriente hasta que recientemente ha trasladado su sede a Japón. También ha ocurrido que habiendo sido Europa la que ha aportado la primera aplicación industrial de la lógica borrosa (Mamdani, 1974), hemos tenido que esperar hasta aproximadamente el año 1990 a que, coincidiendo con el auge de la lógica borrosa en Alemania, se hayan comenzado a desarrollar aplicaciones de un modo frecuente.

Por contra, España, a pesar de contar ya desde los años 70 con una producción muy importante y de gran prestigio internacional a nivel teórico en lógica borrosa, no ha alcanzado todavía un nivel semejante en la tecnología borrosa. Si analizamos las contribuciones que se han recogido en las actas del congreso anual de la Asociación Española de Tecnologías y Lógica Fuzzy, que se viene celebrando desde el año 1991, se puede observar una preponderancia muy destacable de las contribuciones de corte fundamentalmente teórico frente a aquellas que describen aplicaciones o realizaciones

en ámbitos de la tecnología (algo menos del 30%, frente a un porcentaje a nivel mundial en los últimos años superior al 50% de publicaciones sólo en control borroso respecto al total). Es de destacar, sin embargo, que estas diferencias tienden a acortarse, y que las empresas de nuestro país comienzan a interesarse por el tema, como se ha puesto de manifiesto recientemente en las primeras Jornadas sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy, celebradas en Murcia.

### ¿Qué es el control borroso?

El ámbito del control borroso es el dominio de aplicación donde la teoría de conjuntos borrosos ha demostrado más ampliamente su eficacia en el diseño de soluciones sencillas, rápidas y poco costosas.

El control de un sistema consiste, a grandes rasgos, en modificar los valores de determinados "actuadores" sobre el sistema (llamados variables de control), de modo que otros elementos que describen la situación del sistema (variables de estado) tomen siempre valores entre ciertos límites prefijados que garantizan un funcionamiento adecuado del sistema. Permítasenos describir un ejemplo doméstico de proceso de control que todos hemos efectuado en numerosas ocasiones, como es la regulación de las llaves de paso del agua fría y caliente de una ducha para conseguir una temperatura y una presión de salida del agua agradables. En este ejemplo, un experto humano que deba realizar el control pone en juego su experiencia y conocimiento del sistema para llevar a cabo la tarea. Dentro de cierto grado de consenso, todos podríamos estar más o menos de acuerdo en que dicho conocimiento puede formularse en forma de reglas como, por ejemplo,

"Si la temperatura es alta y la presión baja, debo abrir un poco el agua fría"

o

"Si la temperatura es muy alta y la presión correcta, debo abrir bastante el agua fría"

A través de éstas y otras reglas similares, es posible conseguir que las variables de estado (temperatura del agua y presión de salida) se encuentren dentro de márgenes razonables, sin más que realizar una ejecución repetitiva de las mismas hasta alcanzar una situación aceptable. Este ejemplo nos sirve como paradigma que ilustra la necesidad de incluir definiciones lingüísticas, vagas o imprecisas, en la expresión del conocimiento acerca del sistema que deseamos controlar (conceptos como "temperatura ALTA", "abrir UN POCO el agua fría"), cuya definición se realiza en este contexto mediante conjuntos borrosos.

Hemos esbozado, acaso de una forma en exceso intuitiva, la realización de una de las etapas constituyentes del diseño de un controlador borroso: la elaboración de una base de conocimiento borroso (BCB) que recoge, en forma de reglas como las descritas anteriormente, la información que describe de forma lingüística el comportamiento del sistema a controlar y la formulación de la estrategia de control a seguir. En aplicaciones reales, la procedencia de estas reglas puede ser muy diversa: pueden ser formuladas directamente a partir de la experiencia y/o el conocimiento que un experto

humano tenga acerca del proceso, o bien pueden generarse de forma automática a partir del proceso controlado manualmente. Sobre la BCB se llevará a cabo un proceso de razonamiento mediante el cual a partir de los valores observados en un momento dado para la(s) variable(s) de estado (en el ejemplo, temperatura y presión del agua) se obtienen los valores adecuados para la(s) variable(s) de control (apertura de los grifos). Estas últimas actuarán sobre el sistema, dando lugar a modificaciones sobre el mismo que se verán reflejadas en una posterior evaluación de las variables de estado, que derivará en una nueva acción de control, repitiéndose el proceso de forma continua.

En cada regla, este proceso de razonamiento persigue, en primer lugar, estimar en qué medida se verifica dicha regla, para los valores observados en las variables de estado. Este grado de verificación se expresa normalmente como un valor numérico en el intervalo  $[0,1]$ , que indica la adecuación de los valores observados a los descritos en la regla (1: total adecuación, 0: ninguna adecuación). Este valor se utiliza, además, para calcular el valor inferido para las variables de la parte consecuente de la regla (variables de control), mediante un proceso de modulación del conjunto borroso correspondiente. En cierto modo, pues, la contribución de una regla al valor de una variable de control dependerá del Grado de Verificación de dicha regla (es decir, de cuán adecuada es ésta respecto de los valores que se han observado para las variables de estado).

En los controladores borrosos se tienen en cuenta, además, las aportaciones de todas las reglas cuyo grado de verificación no sea nulo, así que resulta necesario realizar un proceso de agregación de todos los conjuntos borrosos inferidos para una misma variable de control y, de este modo, dar lugar al valor final inferido por el controlador para dicha variable. De esta forma, el resultado final viene a ser una interpolación de los valores inferidos por cada regla de manera aislada. Puesto que el resultado de la agregación es también un conjunto borroso, y la acción de control debe tener siempre un valor concreto (p. ej., el grifo ha de girarse un ángulo determinado:  $15^\circ$ ,  $27^\circ$ ,...) es necesario incorporar una última etapa que "desborrosifique" el valor obtenido en un valor numérico preciso suficientemente representativo.

En la Figura 1 se ilustra como ejemplo la ejecución de dos reglas de un controlador borroso, a partir de un valor concreto observado para las variables de estado. Una vez realizado el proceso de razonamiento en ambas reglas, que produce sendos conjuntos borrosos para la variable de control, se ilustra igualmente el proceso de agregación y una posible *desborrosificación* que da lugar a la acción de control concreta a realizar.

En el funcionamiento que acabamos de describir existen algunos aspectos que incorporan criterios de flexibilidad en el diseño del controlador: la elección del operador que permite calcular el grado de verificación de la regla y el operador que realiza la modulación (suele escogerse en ambos casos un operador t-norma) y el método de "desborrosificación" (acostumbra a utilizarse el centro de gravedad del conjunto borroso inferido). En la fase de diseño del controlador resulta vital, por otra parte, la etapa de descripción mediante conjuntos borrosos de los distintos valores lingüísticos y la propia formulación de las reglas. Ambos procesos suelen requerir un proceso de refinamiento recíproco y sucesivo que evite disfunciones como, por ejemplo, la ausencia de control para algunos valores de las variables de estado. Estos puntos no están exentos, ciertamente, de una relativa arbitrariedad, lo que hace que no

exista una sistemática rigurosa de diseño ni herramientas adecuadas para el análisis de su estabilidad. Esto se ha presentado en ocasiones como un grave inconveniente para la aplicación del control borroso, y como una clara ventaja de la aproximación clásica al control de sistemas. Sin embargo, creemos que precisamente en esta flexibilidad radica una de las grandes virtudes del control borroso, que le permite adaptarse a numerosas situaciones, algunas de las cuales no tienen respuesta (al menos en un tiempo razonablemente corto) utilizando técnicas tradicionales de diseño. En cualquier caso, es creciente el interés que se está tomando la comunidad científica en cuanto a establecer una fundamentación teórica sólida del control borroso, lo que nos hace ser altamente optimistas en este aspecto.

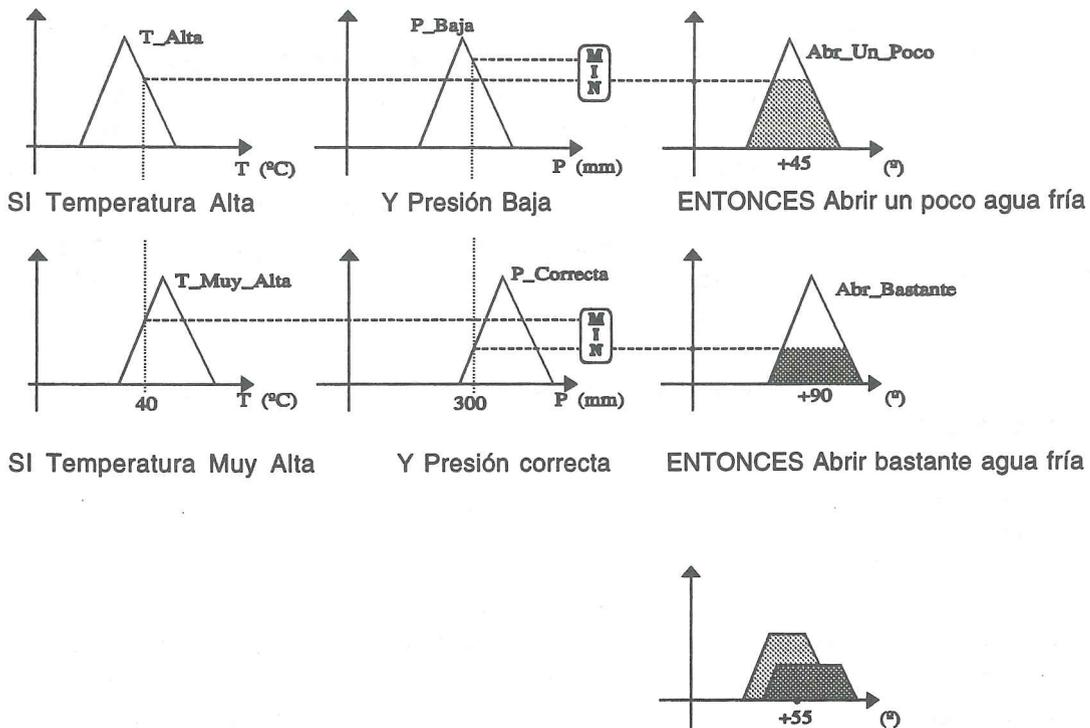


Figura 1: Ejecución de dos reglas en un controlador borroso para la regulación de la temperatura y presión de salida del agua. Los valores observados para las variables de estado (ficticios) son 25°C para la temperatura y 300 mm para la presión. Después de la ejecución de las reglas, agregación de los conjuntos borrosos inferidos y la *desborrosificación* consiguiente, el valor del giro de la llave del agua fría obtenido es +55°.

**¿Por qué es el control de procesos el ámbito con mayor presencia de aplicaciones de la lógica borrosa?**

Sin duda son varias las razones del espectacular crecimiento del área de control borroso. Quizás podamos resumirlas en cuatro aspectos centrales: oportunidad,

sencillez, economía y robustez. Aquellos casos en los que no existe un modelo preciso del proceso o sistema a controlar, o bien resulta difícil y/o costoso de obtener, son terrenos abonados para la presencia de soluciones basadas en control borroso. Nos encontramos con abundantes ejemplos en el ámbito de la medicina (Akay, 1994), en plantas de depuración de aguas, comunicaciones, etc. (Kandel y Langholz, 1994). Por otra parte, los controladores borrosos son relativamente sencillos de diseñar. El punto de partida es el conocimiento y experiencia de operadores humanos en relación al modo de operar de y sobre el proceso a controlar. La forma de representar el conocimiento, mediante reglas condicionales borrosas, relativamente sencillas de construir, facilita la aproximación a este tipo de soluciones de personas expertas en control pero no en ingeniería del conocimiento. Recientemente, además, se han propuesto multitud de técnicas para la síntesis o sintonización automática de reglas de control borroso basadas principalmente en redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos. Por otra parte, los criterios de economía son muy importantes, y en este sentido ya hemos apuntado el enorme ahorro en tiempo de diseño que suponen los controladores borrosos en relación a otras aproximaciones más tradicionales. La creciente disponibilidad de herramientas de apoyo al diseño de sistemas borrosos tiende a aumentar todavía más las diferencias. También es importante considerar la economía en la implementación, en la que el hardware borroso y, sobre todo, la posibilidad de utilizar microcontroladores de muy reducido coste, juegan un papel principal. Por último, la robustez de los controladores borrosos permite diseñar sistemas que degradan sus prestaciones de un modo más suave a medida que se alejan de las zonas de operación usuales para las que han sido diseñados.

### **¿Hay otros ámbitos de importancia en relación a las aplicaciones de la lógica borrosa?**

Aunque, como hemos dicho, es el ámbito del control de procesos el que se está beneficiando principalmente de la introducción de la lógica borrosa en el terreno de las aplicaciones, no es, ni mucho menos, el único. Los sistemas expertos (con una infinidad de orientaciones, como el diagnóstico o el asesoramiento en la toma de decisiones), la investigación operativa y los problemas de clasificación (donde el reconocimiento de patrones ocupa un lugar muy destacado (Bezdek y Pal, 1992)), son quizás los campos más activos en relación a la utilización de aproximaciones basadas en la lógica borrosa (una revisión de algunos de estos ámbitos de aplicación puede encontrarse en Trillas y Gutiérrez (1992), Sobrino y Barro (1993), Trillas (1994) y Yen y col. (1995).

Prácticamente puede decirse que casi cualquier ámbito de aplicación donde resulte de interés disponer de un sistema experto va a ser un ámbito propicio para la incorporación de la lógica borrosa. Ello es así en la medida en que es difícil apartarse de situaciones donde el conocimiento y/o los hechos que deben ser valorados por dicho conocimiento estén exentos de incertidumbre o imprecisión. Pensemos, por ejemplo, en muchos problemas médicos. Al hilo de este comentario, conviene plantear ciertas diferencias entre lo que entendemos por sistema experto y los sistemas de control borroso, ajenos normalmente a dicha consideración. Así, y aún considerando sistemas expertos basados en reglas, existen ciertas características que suelen ser propias de

éstos: un número muy alto de reglas; bases de conocimiento con reglas encadenadas; modularización del conocimiento; múltiples y complejas formas de manipulación del conocimiento; necesidad de tratar la incertidumbre y la imprecisión desde diversas formas, aun pensando en una aproximación basada en la lógica borrosa (por ejemplo, puede ser necesario utilizar distintos métodos de propagación y combinación de la certidumbre, a modo de lógicas locales (López de Mántaras y col., 1992)).

Por otra parte, al abordar la tarea genérica de clasificación y ante la necesidad de agrupar o discriminar los objetos de un dominio de aplicación, existen al menos dos consideraciones que dificultan operar bajo la clasificación o discriminación booleana o clásica:

a menudo es necesario operar mediante atributos descriptivos dados u obtenidos de modo impreciso y las clases a discernir pueden estar mal definidas, al menos dentro de un espacio de atributos tratable. Ante estas dificultades, la interpretación borrosa de un proceso de clasificación da lugar a una manera natural e intuitiva de abordar su resolución (Barro y col., 1994), por ejemplo, aportan soluciones en esta línea a problemas de clasificación en el ámbito de la cardiología, y desde la doble perspectiva que ha predominado en la clasificación borrosa, la basada en ejemplos (Cabello y col., 1991) y la de carácter heurístico (Barro y col., 1990)). De hecho, los desarrollos iniciales de la teoría de conjuntos borrosos fueron motivados en buena medida por problemas de clasificación de patrones (Bellman y col., 1966) y análisis de agrupamientos (*clusters*) (Ruspini, 1969).

En relación al ámbito de la investigación operativa, ha habido un trabajo intenso en los últimos años, aunque de menor impacto social que en relación a los anteriormente comentados. En esta línea deben tener una mención especial los trabajos iniciados en Europa, ya en los años 70, por el Profesor Zimmermann.

Finalmente, es importante indicar que las aplicaciones de la lógica borrosa, y en especial las aplicaciones de control, hacen a su vez que el mercado de las tecnologías borrosas se abra a otros dos elementos: las herramientas de apoyo al desarrollo de las mismas (Chiu, 1995) y los circuitos integrados que soportan su ejecución. Respecto a estos últimos, en ellos se incluyen no sólo aquellos diseñados específicamente para ejecutar software basado en lógica borrosa (ámbito en que han sido pioneros Yamakawa (Yamakawa, 1985) y Togai (Togai, 1985)) sino, y mayoritariamente, los microcontroladores de propósito general. Concretamente, en el creciente mercado de los circuitos integrados utilizados en la síntesis de sistemas basados en la lógica borrosa (absorbidos mayoritariamente por las áreas de la automoción y los productos de consumo), los de aplicación específica únicamente suponen alrededor de un 10% del total.

### **¿Qué ámbitos absorberán las próximas aplicaciones de la lógica borrosa?**

Una vez que hemos tratado lo que podríamos resumir como posibilidades de aplicación ya contrastadas de la lógica borrosa, sería conveniente recoger algunas reflexiones sobre las posibilidades todavía por venir.

En referencia a las grandes áreas de organización del conocimiento, entendemos que aquellas que más se beneficiarán en el futuro de las aplicaciones más valiosas de la lógica borrosa serán las ciencias sociales y las ciencias de la salud. Curiosamente, ya en su trabajo del año 1965 Zadeh indicó que él veía como principales ámbitos de aplicación de la teoría de conjuntos borrosos los sistemas económicos, la lingüística, la psicología, los sistemas biomédicos, los sistemas sociales, etc. En estos campos las variables involucradas en la resolución de un problema son difíciles de cuantificar y las dependencias entre las mismas no suelen admitir una caracterización precisa en términos de modelos matemáticos que involucren formulaciones clásicas a través de, por ejemplo, ecuaciones diferenciales o de diferencias. A nuestro entender, no se ha equivocado de ámbitos, pero sí en relación al momento en que en ellos se darán espectaculares avances guiados por la lógica borrosa. ¡Todavía no están maduras las uvas!

Otro área donde tendrá gran influencia la lógica borrosa será en la interacción con las autopistas de la información. Caminamos hacia una gran base de datos, de información y de conocimiento distribuidos, de acceso rápido y económico, pero en la que una de las necesidades más importantes será sin duda la navegación inteligente, en la que la identificación, localización, recuperación, tratamiento y almacenamiento tendrán que ser tremendamente flexibles y esta flexibilidad vendrá favorecida por la lógica borrosa. Del mismo modo que a todos nos parece una buena idea disponer de cámaras que ajusten automáticamente el zoom, el flash y reduzcan significativamente los movimientos en la imagen, ¿quién no querría sentarse ante su ordenador y navegar por las autopistas de la información en un diálogo fluido y casi natural?.

Otro aspecto importante es el hecho de que actualmente está clarificándose un tanto el panorama del hardware de soporte de sistemas basados en la lógica borrosa hacia un incremento en la utilización de hardware de propósito general, cuando menos a nivel de las aplicaciones en control, donde, como ya hemos apuntado, son los microcontroladores los que se llevan la palma. Cabe pensar, por tanto, que el hardware borroso necesita dar el salto hacia circuitos más sofisticados, que permitan la ejecución flexible de conocimiento mucho más complejo tanto desde el punto de vista estructural (soportando el encadenamiento entre reglas, por ejemplo) como funcional (mayor flexibilidad en el uso de operadores y en la ejecución de formas complejas de representación del conocimiento borroso).

Por último, podemos encuadrar las posibilidades y aplicaciones de la lógica borrosa, tanto las actuales como las futuras, en el contexto más general de lo que ha dado en llamarse computación blanda (*soft computing*). Bajo este nombre se designan aquellos paradigmas de computación que ofrecen soluciones aproximadas a problemas que o bien no admiten soluciones precisas o éstas no son necesarias o son demasiado costosas de obtener (desde un punto de vista del tiempo de diseño de una solución, del coste de su implementación o del tiempo de computación asociado a su ejecución). En la medida en que este tipo de problemas son frecuentes en multitud de ámbitos, entre los que se encuentran, además de los apuntados, el procesado de señales e imágenes, la robótica, la interacción persona-máquina (para la búsqueda "lingüística" en bases de datos e imágenes, interacción con programas de simulación, de diseño, sistemas expertos), los sistemas multimedia, etc., es en ellos donde previsiblemente

encontraremos en el futuro los avances más espectaculares de la tecnología o ingeniería borrosa.

## Conclusiones

La lógica borrosa no es una moda sino un avance científico cuyas consecuencias tecnológicas sólo han empezado a vislumbrarse. Tampoco es cierto que exista la misma radical dicotomía entre lo blanco y lo negro, por una parte, y lo gris y todo lo demás, por otra. Lo gris participa de lo blanco y de lo negro, como lo regular lo hace de lo bueno y de lo malo. Así lo manejamos en nuestro pensamiento y comportamiento y, claro está, así queremos que lo hagan las máquinas, para que, como nosotros, no se sientan impotentes ante la imprecisión y la incertidumbre que nos rodea. La posibilidad de percibir, manejar o almacenar lo borroso es lo que distingue a la inteligencia humana de la de las máquinas. Para aproximar ambas inteligencias debemos transportar al dominio computacional este mundo de grises del que no podemos deshacernos y al que sacamos partido. Para eso debe servir la lógica borrosa, no para cambiar nuestra forma de pensar, y de ahí surgirán las innumerables aplicaciones que todavía están por venir.

## BIBLIOGRAFIA

- Akay, M. (ed.): 1994, 'Applications of fuzzy logic', Monográfico de la revista *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* vol. 13, No. 5.
- Barro, S., Ruiz, R., Mira, J.: 1990, 'Fuzzy beats labelling for intelligent arrhythmia monitoring', *Computers and Biomedical Research* 23, 240-258.
- Barro, S., Bugarín, A., Félix, P., Ruiz, R., Marín, R., Palacios, F.: 'Fuzzy Logic applications in cardiology: study of some cases', in *5th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems IPMU '94*, 2, 885-891.
- Bellman, R., Kalaba, R., Zadeh, L.A.: 1966, 'Abstraction and pattern classification', *J. Math. Anal. Appl.* 13, 1-7.
- Bezdek, J.C., Pal, S.K. (eds.): 1992, *Fuzzy models for pattern recognition*, IEEE Press.
- Cabello, D., Salceda, J.M., Barro, S., Ruiz, R., Mira, J.: 1991, 'Fuzzy K-nearest neighbor classifiers in Cardiology', *International Journal of Bio-Medical Computing* 27, 77-93.
- Chiu, S.: 1995, 'Software tools for fuzzy control', in Yen, J., Langari, R., Zadeh, L.A. (eds.): *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Cap. 15, 313-340, IEEE Press.
- Kandel, A., Langholz, G.: 1994, *Fuzzy Control Systems*, CRC Press, Inc.

- López de Mántaras, R., Agustí, J., Plaza, E., Sierra., C.: 1992, 'MILORD: A Fuzzy Expert Systems Shell', in Kandel, A. (ed.): *Fuzzy Expert Systems*, CRC Press.
- Mamdani, E.H.: 1974, 'Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant', *IEEE Proceedings* 121 (12).
- Ruspini, E.H.: 1969, 'A new approach to clustering', *Information and Control* vol. 15, No. 1, 22-32.
- Sobrino, A., Barro, S., (eds.): 1993, *Estudios de lógica borrosa y sus aplicaciones*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Santiago de Compostela.
- Terano, T., Asai, K., Sugeno, M.: 1992, *Fuzzy systems theory and its applications*, Academic Press.
- Togai, M., Watanabe, H.: 1985, 'A VLSI implementation of fuzzy inference engine: toward an expert system on a chip', *Information Science* vol. 38, No. 2, 147-163.
- Trillas, E., Gutiérrez-Ríos, J. (eds.): 1992, *Aplicaciones de la lógica borrosa*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Trillas, E. (ed.): 1994, *Fundamentos e introducción a la ingeniería fuzzy*, Madrid, Omron Electronics, S.A.
- von Altrock, C.: 1995, 'Fuzzy logic applications in Europe', in Yen, J., Langari, R., Zadeh, L.A. (eds.): *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Cap. 14, 277-310, IEEE Press.
- Yamakawa, T., Miki, T., Ueno, F.: 1985, 'The design and fabrication of the current mode fuzzy logic semi-custom IC in the standard CMOS IC technology', in *Proc. 15th International Symposium on Multi-Valued Logic*, IEEE Press, 76-82.
- Yen, J., Langari, R., Zadeh, L. (eds.): 1995, *Industrial applications of fuzzy logic and intelligent systems*, IEEE Press.
- Zadeh, L.A.: 1965, 'Fuzzy sets', *Information and Control* 8, 338-353.
- Zadeh, L.A.: 1972, 'A rationale for fuzzy control', *Trans. ASME J. Dynam. Syst. Measur. Control* 94, 3-4.
- Zadeh, L.A.: 1973, 'Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes', *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics* 3, 28-44.
- Zadeh, L.A.: 1975, 'The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning', *Information Science*, Parte I: vol. 8, 199-249; Parte II: vol. 8, 301-357; Parte III: vol. 9, 43-80.
- Zadeh, L.A., Yager, R.R. (eds.): 1992, *An Introduction to Fuzzy Logic applications in Intelligent Systems*, Kluwer.

**Senén Barro** received the Ph. D. degree in physics from the University of Santiago de Compostela, Spain in 1988, where he is currently a Professor and Head of the Department of Electronics and Computing. His research focuses are on signal and knowledge processing (mainly in medical domains), mobile robotics, intelligent fuzzy systems and artificial neural networks (applications and biological modelling).

**Alberto Bugarín** received the Ph. D. degree from the University of Santiago de Compostela in 1994, where he is currently an Associate Professor at the Department of Electronic and Computing. His research interests are efficient computation in fuzzy knowledge systems, fuzzy temporal reasoning and fuzzy control architectures.