

A las puertas del siglo XXI: Lógica difusa - una tecnología que está revolucionando el mundo

Adolfo Serrano M.
María Teresa Amorocho G.
Arturo Aldana P.
Henry Lovera B.

RESUMEN: El presente artículo presenta una recopilación de información sobre la lógica difusa, presentando los conceptos básicos que la definen, el estado del arte, algunas aplicaciones tecnológicas que la utilizan y la prospectiva al año 2005 de esta tecnología de base. La lógica difusa o borrosa se ha desarrollado como respuesta a la necesidad de trabajar con el razonamiento aproximado, tal como lo hace el hombre: con imprecisión, diversos grados de verdad y realizando inferencias.

La lógica difusa pertenece al ámbito de la inteligencia artificial, y se ha desarrollado especialmente en el área de control de procesos. Actualmente existen gran cantidad de productos, principalmente japoneses, que utilizan esta tecnología. El artículo muestra algunos de estos productos, y también las áreas donde se están desarrollando investigaciones. También se presenta un análisis de posibles impactos de esta tecnología en Colombia, y se muestra cómo el futuro depende de las acciones que se tomen en el campo tecnológico.

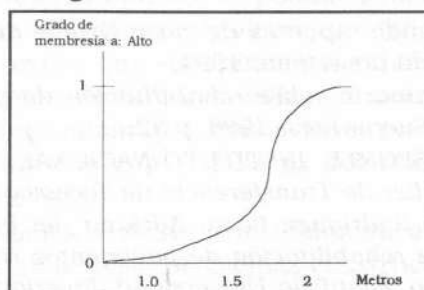
1. DEFINICION DE LA TECNOLOGIA

La lógica difusa o borrosa, también conocida como "fuzzy logic", es un acercamiento entre la precisión de las matemáticas clásicas y la sutil imprecisión del mundo real, nacido de la incesante búsqueda humana por lograr una mejor comprensión de los procesos mentales y del conocimiento. La teoría fue presentada junto con los subconjuntos difusos por el Dr. Lofti Zadeh de la Universidad de Berkely en la década de los sesentas, como un medio para modelar la incertidumbre del lenguaje natural.

La lógica difusa se ha convertido en una de las tecnologías más exitosas para el desarrollo de sistemas de control sofisticados. La lógica difusa es muy «Humana» con infinitos matices entre lo verdadero y lo falso, entre un SÍ y un NO, pues nuestro lenguaje es justamente vago, difuso y eminentemente subjetivo. Matemáticamente la lógica difusa es un superconjunto de la lógica convencional (Booleana) que ha sido extendida para manejar el concepto de verdad parcial - valores de verdad entre lo completamente verdadero y lo completamente falso.

Por ejemplo, cuando en lenguaje natural decimos «Claudia es alta», estamos expresando un concepto vago, impreciso y subjetivo. Al decir «Claudia tiene una altura de 1,52 mts», no estamos expresando que ella es alta, o que tan alta es. (muy alta, algo alta, más bien alta). (Figura 1).

Figura 1. Grado de membresía



Los valores de verdad en la lógica difusa o la membresía o pertenencia a un conjunto son indicadas por un rango de valores entre 0 y 1.

Por ejemplo si enunciamos: «Claudia es anciana»

y Claudia tiene 75 años, podríamos asignar a este enunciado un valor de verdad de 0.80. i.e.

$$(1) m_{\text{Ancianos}}(\text{«Claudia»}) = 0.80$$

Donde m es la función de membresía que opera sobre el conjunto difuso Ancianos.

Otro factor importante es la definición de las operaciones VACIO, IGUAL, COMPLEMENTO, CONTENIDO EN, UNION E INTERSECCION que se realizan matemáticamente de acuerdo con los valores de verdad del subconjunto.

Básicamente es un cálculo con predicados tanto nítidos como vagos construido sobre unos objetos que anteriormente habían sido considerados marginales por los matemáticos; se trata de las clases inexactas o subconjuntos borrosos de un universo bien definido de objetos. Es un cálculo lógico que engloba al cálculo lógico clásico; y es "lógico" por cuanto considera predicados compuestos a través de conectivas lógicas y/o modificadores NO, MUY, BASTANTE...; cuantificadores TODOS, ALGUNOS, MUCHOS... etc. y hace inferencias. Sin embargo, a diferencia de una gran parte de la lógica clásica, los cálculos dependen fuertemente del contexto y, si se requiere, no hay monotonía, es decir, al aumentar la información desaparecen conclusiones anteriormente obtenidas. Es un cálculo lógico basado en las matemáticas, pero no creado para el razonamiento rígido, formal, típico de ellas, sino para el razonamiento flexible típico del sentido común, del razonamiento humano en resumen. Disciplinariamente pertenece al ámbito de la Inteligencia Artificial (IA) y permite representar tanto parte del conocimiento de sentido común, como efectuar inferencias (más provisionales que definitivas) con ese conocimiento en un contexto dado.

De hecho, hasta hoy, el único campo de la IA del que se puede decir que ha entrado en los mercados de gran consumo es la lógica difusa y los productos obtenidos con base en ella.

En los últimos años la lógica difusa, como herramienta del razonamiento aproximado, ha encontrado numerosas aplicaciones que van desde el campo de las finanzas hasta la ingeniería de terremotos. Todas ellas corresponden a problemas muy complejos o mal conocidos que no se pueden tratar con la lógica clásica. De hecho ha permitido modelar y resolver situaciones que tradicionalmente se consideraban como intratables, y en este sentido ha constituido una revolución en muchos campos.

Puede considerarse que la lógica difusa surgió como respuesta a la necesidad de disponer de modelos de inferencia para tratar el conocimiento impreciso básicamente en el contexto de la construcción de sistemas expertos. Sin embargo, actualmente su mayor y más conocida aplicación está en el control de procesos, un campo muy alejado de aquel que la impulsó en sus primeras etapas.

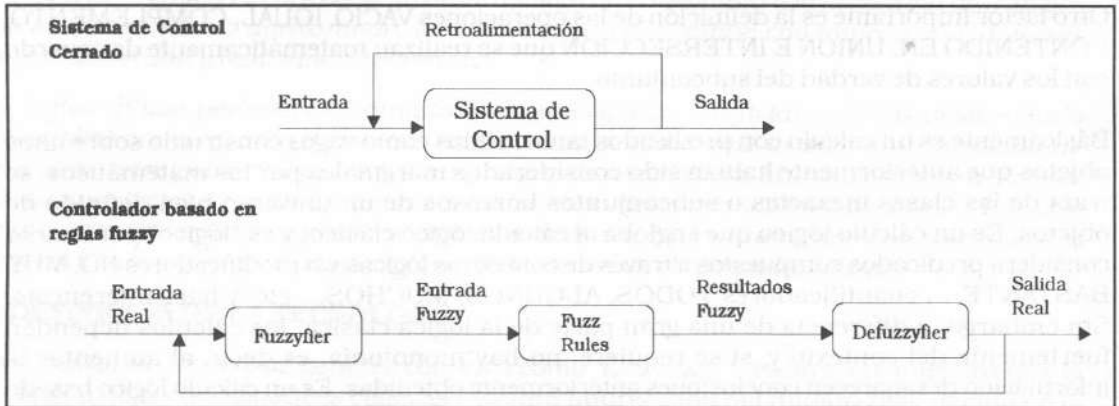
2. ESTADO DEL ARTE

- La lógica difusa o borrosa cubre todo aquello que involucra el conocimiento aproximado, como: Ingeniería del conocimiento, Lenguajes naturales, Inteligencia

artificial, Redes neuronales, Autómatas celulares, Robótica, Sistemas de control, Toma de decisiones, Sistemas expertos y Realidad virtual.

- En la actualidad se ha desarrollado la teoría de autómatas por medio de máquinas de estado finito utilizando la lógica difusa para modelos determinísticos y no determinísticos.
- Ha contribuido al desarrollo de la teoría de decisiones.
- Se han desarrollado sensores, acelerómetros, radares, digitalizadores, sistemas de control de ciclo cerrado, los cuales han alimentado el desarrollo de la robótica y los procesos de automatización. (Figura 2).

Figura 2. Comparación entre un sistema de control cerrado y uno basado en reglas fuzzy.



- Desde su surgimiento alimentó el desarrollo de lenguajes naturales y sistemas imprecisos que con las mallas o redes neuronales son hoy pilar de la investigación en inteligencia artificial y sistemas expertos.
- A la par con digitalizadores se ha avanzado considerablemente en reconocimiento de imágenes y de escritura. Especialmente en áreas de morfología y estructuras.
- Se ha mejorado el comportamiento de los algoritmos genéticos con técnicas basadas en lógica difusa.
- Se ha diseñado un procesador VLSI - very large set instructions - para inferencia difusa utilizando tecnología CMOS que puede procesar cincuenta millones de reglas difusas por segundo. La arquitectura diseñada es capaz de trabajar a un alto grado de paralelismo. La estructura interna del procesador está organizada como una cascada de conexiones, las cuales permiten la ejecución paralela de procesos en los que una inferencia puede descomponerse. Un elemento importante del diseño es la definición de puertas difusas (fuzzy-gate) que ejecutan cómputos difusos elementales.
- La producción de este procesador permitirá grandes avances en productos finales para los usuarios.
- Robot móvil autónomo. El consorcio europeo encargado del proyecto Esprit desarrolló "Marie : Movil Autonomus Robot in Industrial Environment ". El objetivo era la generación de las técnicas necesarias para que un robot móvil se moviese en un entorno industrial semidesconocido. (Principal diferencia con los actuales robots industriales).

- Sistemas basados en reglas: Modelos de factores de certeza para dar cabida a imprecisión no probabilística: se han investigado sistemas de representación y propagación de la incertidumbre. Manejo de predicados imprecisos en la descripción de reglas o en la información disponible acerca de los hechos. Investigación en métodos de inferencia más potentes.
- En la mayor parte de las aplicaciones actuales de la lógica difusa se emplea el software para la implementación de los algoritmos difusos y las reglas de control, y últimamente se están aumentando las investigaciones en la implementación de hardware.
- Software y bases de datos difusos: Con los requerimientos de la inteligencia artificial han aparecido modelos y métodos donde se representa y maneja incertidumbre no aleatoria o vaguedad por medio de subconjuntos difusos, y esto ha recibido el nombre de software difuso. La programación difusa ha avanzado en dos vertientes principales: programación estructurada difusa y programación lógica difusa. En la vertiente de la programación estructurada solo se han desarrollado implementaciones parciales y orientadas a aplicaciones concretas, mientras en el enfoque lógico o declarativo existen ya varias implementaciones de Prolog Difuso.
- Software de aplicación: Herramientas para desarrollo de controladores difusos. La mayor parte de los productos de software difuso de aplicación se encuentra en el control de sistemas donde se pueden distinguir dos grandes categorías:
 - * a) Herramientas para la utilización de hardware difuso : Se trata de productos pensados para su utilización conjunta con un procesador difuso. Un ejemplo es el software de inferencia difusa FS-10AT comercializado por OMRON que puede ser utilizado sobre un PC y generar código objeto para ser utilizado por el procesador difuso FP-3000 y por la placa de inferencia difusa FB-30AT de la misma casa.
 - * b) Herramientas independientes del hardware: Son productos de software que aunque pueden ser utilizados con procesadores difusos no necesitan de ellos. Generalmente son entornos de desarrollo de software como por ejemplo Fuzzy Tech desarrollado por IMFORM que puede producir código aceptable por un compilados ANSI C o código objeto que puede ser ejecutado en un procesador FP3000.
- Bases de datos difusas: Los trabajos en esta área plantean: ¿ Qué hacer con la información imprecisa? Para responder esto las investigaciones están desarrollándose en tres áreas, para lograr llegar a las bases de datos relacionales difusas. Estas tres áreas son:
 - * a) Preguntas cuyas constantes asociadas no estén bien definidas. Por ejemplo "encontrar todos los individuos jóvenes con un salario no muy alto", si en la base de datos se considera que la edad y el salario son campos numéricos.
 - * b) Valores de atributos poco definidos, por ejemplo "la edad de Pedro está entre 30 y 35 años".
 - * c) Asociaciones entre ítems no muy bien conocidos o inciertos, por ejemplo " la pieza x fue suministrada casi seguramente por el proveedor A pero existe la leve posibilidad que fuese suministrada por el proveedor B".
- Desde 1985 se observó un cambio sustancial en la orientación de las investigaciones hacia la consecución de productos efectivamente comerciales. Los responsables de este cambio fueron los investigadores japoneses. En la Tabla 1 se relacionan algunos de los productos que se han desarrollado utilizando lógica difusa.

Tabla 1. Productos desarrollados utilizando lógica difusa.

Producto	Fabricante	Papel de la lógica difusa
Acondicionador de aire	Hitachi, Matsushita	Evita las oscilaciones entre el exceso y el defecto de temperatura y consume menos energía intermitente
Frenos antibloqueo	Nissan	Controla los frenos en los casos peligrosos a partir de la velocidad y de la aceleración del automóvil y de la velocidad y aceleración de las ruedas
Motor de automóvil	NOK / Nissan	Controla la inyección de combustible y la ignición a partir de la disposición de las válvulas, el contenido de oxígeno, el agua de refrigeración.
Transmisión de Automóvil	Honda, Nissan, Subaru	Selecciona la relación de las marchas a partir del rendimiento del motor, el estilo de conducción y las condiciones de la carretera
Mezclador químico	Fuji	Mezcla compuestos químicos a partir de las condiciones de la planta
Fotocopiadora	Cannon	Ajusta el voltaje del tambor, a partir de la densidad de la imagen, la temperatura y la humedad
Lavaplatos	Matsushita	Ajusta el ciclo de lavado y enjuague y los programas de lavado a partir del número de platos del tipo y cantidad de la comida adherida
Secadora	Matsushita	Convierte el tamaño de la carga, el tipo de tejido y el flujo de aire caliente, en tiempos y programas de secado
Sistema de vigilancia de la salud	OMROM	Más de 500 reglas siguen y evalúan la salud y buena forma del empleado
Humidificador	Casio	Ajusta el contenido de humedad a las condiciones de la habitación
Control de acería	Nippon Steel	Mezcla las entradas y determina temperaturas y tiempos
Horno de microondas	Hitachi, Sanyo, Sharp, Toshiba	Establece y afina el programa de energía y cocción
Ordenador manual	Sony	Reconoce los caracteres Kanji escritos
Grabación por plasma	Mitsubishin Electric	Establece el tiempo y programa de grabado
Nevera	Sharp	Establece los tiempos de descongelación y enfriamiento a partir del uso que se haga. Una red neuronal aprende los hábitos de uso y afina las reglas borrosas en consecuencia
La olla de arroz	Matsushita, Sanyo	Establece los tiempos y método de cocción a partir del vapor, la temperatura y el volumen de arroz
Sistema de ducha	Matsushita (Panasonic)	Suprime las variaciones en la temperatura del agua
Camara fija	Canon, Minolta	Encuadra el objeto en cualquier parte del encuadre, ajusta el autoenfoco
Transacciones bursátiles	Yamaichi	Se encarga de paquetes de acciones japonesas a partir de los datos macro y microeconómicos

3. PROSPECTIVA AÑO 2005 - TENDENCIAS MUNDIALES

El futuro estará plagado de objetos borrosos o difusos; tendrán un gran coeficiente de inteligencia maquina, y quizá no se parezcan en nada a las cámaras, máquinas de afeitar y lavadoras borrosas de hoy. Los habrá cuyo coeficiente de inteligencia maquina sea mucho mayor que el del ser humano. En nuestras vidas, nuestro trabajo, nuestros juegos habrá pequeños computadores rápidos por todas partes; y los grandes sistemas y las redes también serán inteligentes.

Las máquinas con múltiples sensores y procesadores desarrollarán sus propias reglas borrosas con redes neuronales; pintarán imágenes del mundo con mapas cognitivos borrosos; lo harán en una escala pequeña pero vasta y veloz.

Con el desarrollo de computadores con lógica difusa y el desarrollo de la inteligencia artificial tendremos asistentes electrónicos personales, que reconocerán el habla y nos darán sus sugerencias de acuerdo con el entorno. En conjunto con la robótica tendremos robots nodrizas o domésticos, robots tutores, y robots auxiliares. Estas máquinas ayudarán al hombre en el control de la producción, el diagnóstico médico, las finanzas, la toma de decisiones, entre otros.

Existirá una amplia gama de computadores difusos como por ejemplo aquellos que controlarán automotores y diferentes tipos de máquinas, aquellos que ayudarán a los médicos a determinar por qué un paciente está enfermo, aquellos que ayudarán al hombre de negocios a predecir las tendencias del mercado y aquellos que ayudarán a los ingenieros a diseñar puentes y edificios; más aún, tendremos edificios inteligentes que se adaptarán a las condiciones existentes en cada momento.

En control de tráfico vehicular tendremos que los sistemas de control operarán de acuerdo con las condiciones existentes, y no como funcionan actualmente basados en sistemas de tiempo determinístico. De esta manera, se podrá contar con un mejor flujo vehicular cuyo control es automático e inteligente.

A nivel de las ingenierías encontraremos muchos cambios gracias a la lógica difusa: Cuando en ingeniería civil se realizan inspecciones en una obra, se cuenta con información subjetiva e imprecisa, basándose en la experiencia e intuición, además de la subjetividad del inspector. En el futuro contaremos con la ayuda de analizadores de estructura y fatiga de materiales que utilizarán la lógica difusa para realizar un análisis que incorpore todos los factores que lo afectan de tal forma que sus resultados serán más reales que aquellos obtenidos subjetivamente por un inspector.

En la ingeniería industrial y mecánica tendremos la posibilidad de analizar mejor el comportamiento de materiales y piezas bajo diferentes condiciones de operación, y aún que nos avisen cuando hay que cambiarlas, ó que con la ayuda de la ingeniería molecular los materiales se adapten a las condiciones, logrando con esto tener máquinas casi perfectas, cuya operación no sea necesario detener ya que cualquier posible falla de algunas de sus partes es avisada antes de que tal falla ocurra.

En conjunto con la ingeniería molecular tendremos "nanobots", es decir robots nanodiminutos, máquinas que construyen o arreglan piezas molécula a molécula, o que las destruyen molécula a molécula. Con este avance tendremos "nanobots" que esparcidos en el ambiente pueden absorber la contaminación y mantener fuerte la capa de ozono. Pueden existir ejércitos de "nanobots" que pasan mensajes y razonan con diminutos cerebros borrosos, y que se reproducen como virus cuando es necesario. En teoría estos "nanobots"

pueden matar el SIDA, el cáncer y las células enfermas, y podrán reparar y reanimar las células y órganos viejos. Podremos reconstruir los patrones de las moléculas del cuerpo humano molécula a molécula, y célula a célula y finalmente mejorarlos. Es aquí donde podríamos decir que el concepto de vida en el hombre es también borroso: qué tan vivos o qué tan muertos estamos?

Japón será el centro de la tecnópolis del siglo XXI, ya que hoy día tiene más de 20 centros de alta tecnología, en los cuales la lógica y los sistemas borrosos tienen gran desarrollo. Los japoneses saben que el conocimiento y no sólo la información es la mercancía del futuro, y por lo tanto son los líderes y seguirán siéndolo si ningún otro país se preocupa por este campo como lo han hecho ellos. Esto causará que la brecha entre los países que desarrollen esta tecnología y los que no lo hagan se hará más grande.

4. IMPACTO SOBRE COLOMBIA DE LA TECNOLOGIA FUZZY

Aunque en Colombia no se estén desarrollando productos de tecnología fuzzy, indirectamente los productos que consumimos y que consumiremos tendrán incorporada esta tecnología.

Con la apertura económica no sólo podremos tener productos de consumo masivo, sino que también nuestras industrias para sobrevivir en el mercado tendrá que utilizar estas tecnologías en sus máquinas y en sus diferentes procesos. Por tal motivo es importante que más que importar la tecnología la apropiemos dando lugar a una gran oportunidad para las universidades y centros de investigación de aprender, desarrollar y evolucionar esta tecnología en conjunto con otras relacionadas para brindar un impulso económico y tecnológico a nuestro país. Si nuestra industria no se desarrolla tecnológicamente, muy pronto todas las industrias o empresas tecnificadas serán extranjeras, disminuyendo en gran proporción la inversión colombiana en la industria.

Si aprovechamos y desarrollamos esta tecnología, podríamos tener un resurgimiento de nuestros campos de forma tecnificada, con controladores difusos que ayudarían en las cosechas, la recolección, el procesamiento de alimentos y hasta la distribución y exportación de productos como los requiere el consumidor.

A nivel industrial podríamos ser competitivos, y brindar productos más variados tanto para el consumo interno como para exportación; transformando nuestra propia materia prima en productos finales, extendiendo la cadena productiva tanto como se pueda (Explotación - recolección - procesamiento - producción - comercialización - distribución).

En Colombia ha aumentado considerablemente la participación de los sectores de servicios y de comercialización. No hay cosas más difusas como estas áreas, donde gran parte del producto es intangible. La tecnología fuzzy puede mejorar y hacer más natural la prestación de estos servicios, incorporando la vaguedad de términos como cliente poco satisfecho, o cliente muy satisfecho de tal forma que se tengan sistemas inteligentes que adapten las empresas día a día según las necesidades, requerimientos y satisfacción de los clientes.

Es triste ver como muchas empresas productoras o fabricantes, ante el atraso tecnológico y la gran competencia para no desaparecer han tenido que convertirse en comercializadoras o distribuidoras de productos extranjeros. Por tal motivo, y como ya lo hemos mencionado es importante atacar las diferentes áreas de la cadena productiva.

Colombia debe también preocuparse por tomar medidas de fondo que le permitan investigar en altas tecnologías, entre las cuales está la lógica difusa. Una de estas medidas es la

creación de centros de alta tecnología apoyados por la industria privada, donde se desarrolle tecnología borrosa. Es posible que no podamos desarrollar chips borrosos, pero lo importante sería incorporarlos a máquinas o elementos desarrollados por nosotros, o aplicarlos a procesos que realizamos y podemos mejorar.

REFERENCIAS

- [1] *IEEE transactions on fuzzy systems* - Vol. 2 número 2 - mayo de 1994. Artículo "A VLSI fuzzy inference processor based on a discrete analog approach" - Bincenzo Catania y otros.
- [2] *Revista Arbor: Ciencia, Pensamiento y Cultura*. - Razonar como la gente: la lógica borrosa. Enric Trillas.. Septiembre-Octubre de 1993. No. 573-574.
- [3] *Mathematical Methods for Artificial Intelligence and Autonomous Systems*. Edward R. Dougherty, Charles R. Giardina. Prentice Hall International Editions. 1988
- [4] *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications*. George J. Hlir / Bo Yuan. Prentice Hall. 1995.
- [5] *Notas de clase del Profesor Eduardo Estrada. Ciencias Básicas - Universidad Javeriana 1997.*
- [6] *Pensamiento Borroso*. Bart Kosko. Traducción realizada por Juan Pedro Campos. Crítica (Grijalbo Mondadori S.A.). 1995.
- [7] *Direcciones electrónicas consultadas:* <http://www.austinlinks.com/fuzzy/>, http://decsau.ugr.es/tr_decsai.html, <http://www.amarillas.com/varias/cripto/cripto7.html>