

Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso

An overview of fuzzy theory and systems focused on fuzzy control

Panayotis Tremante, Ebert Brea

Palabras Clave: Teoría difusa, sistemas difusos, control difuso.

Key words: Fuzzy Theory, Fuzzy Systems, Fuzzy Control.

RESUMEN

La teoría difusa y los sistemas difusos han tenido un importante progreso en muchas aplicaciones desde sus comienzos. En el campo de la ingeniería, numerosas aplicaciones industriales han alcanzado buenos resultados. En este artículo, son considerados varios puntos de vista de la teoría difusa con el fin de estudiar su evolución en el control difuso. Para ello, se realizó una amplia investigación documental, la cual es reportada en este trabajo. Por otra parte, se presenta un breve estudio de los sistemas difusos para encontrar las respuestas a: ¿Qué son? y ¿Por qué y dónde han sido utilizados los sistemas difusos? Este enfoque permitió establecer la relación entre los sistemas difusos y el control difuso; donde existen sistemas que no se pueden medir con precisión al conjunto de variables de control, resultando que el control difuso es un buen enfoque para el control de sistemas reales.

INTRODUCCIÓN

La palabra "difusa" o "difusa" que en inglés es "fuzzy", se puede interpretar como "borroso, indistinto, impreciso, confuso, vago", pero se debe desatender esta definición y ver la palabra "difusa" como un adjetivo. Esencialmente, lo que se quiere enfatizar es que aún cuando los fenómenos que caracterizan a la teoría difusa o a los sistemas difusos pueden ser difusos, la propia teoría es precisa. De hecho, casi todas las teorías en ingeniería caracterizan al mundo real de una manera aproximada. Por ejemplo, la mayoría de los sistemas reales son no lineales, pero su tratamiento se realiza como un sistema lineal poniendo mucho esfuerzo en el estudio de sistemas lineales. Una buena teoría en la ingeniería

ABSTRACT

Fuzzy theory and fuzzy systems have had an important progress in many applications from its beginning. In the engineering field, several industrial applications have achieved well results. In this paper, we have considered several viewpoints of the fuzzy theory in order to study its evolution into fuzzy control. Hence, a wide documental research has been reported by the authors in this article. On the other hand, a brief study of fuzzy systems is presented for finding answer to: What is it? Why and where have been used fuzzy systems? This approach allowed establishing the relationship between fuzzy systems and fuzzy control, where the set of control variables cannot accurately be measured, and as a result of this situation the fuzzy control could be the best approach for the control of real systems.

debe ser precisa en la magnitud que caracteriza los rasgos importantes del mundo real y, al mismo tiempo, permitir el análisis matemático (Wang, 1997).

La teoría difusa se basa en la teoría de los conjuntos difusos introducida por el profesor Lotfi Asker Zadeh en 1965 (Zadeh, 1965), profesor de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley. En el artículo publicado por Zadeh se introdujo por primera vez la palabra "fuzzy" en la literatura técnica y describe con la teoría matemática de conjuntos clásicos, como se puede trabajar matemáticamente con expresiones imprecisas, tal como lo hace el ser humano. La teoría de los conjuntos difusos es una extensión de la teoría de conjuntos clásicos, que relaciona la pertenencia de

la clase de un objeto con un cierto grado, sin haber fronteras abruptas entre una clase de objetos y otros; en el caso clásico un elemento puede pertenecer o no a un cierto conjunto. En la teoría de conjuntos difusos, el elemento tiene un grado de pertenencia en el cual puede ir desde un grado de pertenencia máximo hasta un grado de pertenencia mínimo, que sería la no pertenencia.

La teoría difusa y la aplicación de los sistemas difusos surge para el tratamiento de la incertidumbre del mundo real; los problemas en el mundo real están caracterizados por tener que procesar información con incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, vaguedad o información incompleta. La teoría difusa es considerada una nueva tendencia para el tratamiento de la incertidumbre con mucha aplicabilidad en diferentes campos.

Antes de comenzar a trabajar con la teoría difusa, Zadeh trabajaba con la teoría de control. En los comienzos de la década de los 60, Zadeh pensó que la teoría del control clásico había puesto demasiado énfasis en la precisión y por consiguiente no podría manejar los sistemas complejos con incertidumbre. Zadeh (1962), comentó: "necesitamos un tipo de matemática sumamente diferente, la matemática de cantidades difusas o borrosas que no sean describibles en términos de una distribución probabilística", es por esta razón, que propone la teoría de los conjuntos difusos.

El control difuso es un sistema difuso y ambos son parte de la teoría difusa. Los sistemas difusos y el control difuso han tenido un rápido progreso motivado por el éxito práctico del control difuso en equipos electrodomésticos y en procesos industriales. Ha habido un crecimiento vertiginoso de trabajos publicados en el estudio teórico de los sistemas difusos y el control difuso. Muchos investigadores han sistematizado las aproximaciones existentes y han explicado el porqué los resultados prácticos son buenos. Como complemento a estos esfuerzos se desarrolla el presente escrito para conocer los orígenes de la teoría difusa y los trabajos que contribuyeron de

alguna forma a colocar un grano de arena en el desarrollo de los sistemas difusos y el control difuso.

En el presente trabajo se estructuró en dos partes: la primera trata sobre la teoría difusa con sus ramas, antecedentes y breve historia que conllevaron al control difuso, y la segunda parte está enfocada a los sistemas difusos, que son, los diferentes tipos, el porque y donde han presentado una relevante aplicación.

TEORÍA DIFUSA

Muchas situaciones han conllevado al desarrollo de la teoría difusa, como es el caso de las mediciones cuando se quiere hacer énfasis en la precisión. En el siguiente ejemplo extraído de Farías, 2002, se plantea esta situación: todos han visto una montaña y quisieran saber su altura, pero se pueden imaginar lo difícil que debe ser medir, con tanta precisión, la montaña más alta del mundo. Este es el caso del Everest, donde se dice que tiene una altitud de 8849,9 metros, lectura proveniente de un receptor GPS (Global Positioning System - sistema de posicionamiento global). Sin embargo, este número no está totalmente exento de duda. Para empezar, el margen de error reconocido es de $\pm 2,13$ metros; muy pequeño, porcentualmente, pero grande, si se toma en cuenta, que según los expertos, toda la cordillera del Himalaya se desplaza cada año algunos centímetros hacia el norte y algunos milímetros hacia arriba. Por otra parte, está el problema de la nieve. Pues, todas las medidas obtenidas hasta ahora se refieren a la altura de la nieve acumulada sobre la cima de la montaña, no a la cima misma, que nadie sabe a qué profundidad se encuentra. Mejor dicho, a qué profundidad se encuentra cada día, porque la cantidad de nieve varía hasta 90 centímetros, según si es invierno o verano; y por si fuera poco, está el problema de la línea o punto de referencia. Determinar el nivel del mar en el Himalaya, es algo muy abstracto, y requiere un denso estudio de las "líneas equipotenciales" de gravedad en la zona, tarea que la topografía misma del terreno hace virtualmente

imposible. Además, el nivel real de los océanos fluctúa periódicamente, y según parece, está subiendo en forma rápida y sostenida con el calentamiento global. Así, que lo mejor sería calcular la distancia de la cima al centro de la Tierra, pero como se sabe, nuestro planeta no es una esfera uniforme o perfecta, sino un cuerpo irregular, cuya forma se describe por modelos llamados "geoides". De manera que a ese margen de error, ya citado, de $\pm 2,13$ metros, habría que sumarle una serie de márgenes de variabilidad e incertidumbre, y de convenciones o simplificaciones que desdibujan la precisión con que se había comenzado. Se podría pensar que este ejemplo se ha elegido maliciosamente, a fin de cuestionar lo incuestionable. Pero, este caso no tiene especialmente nada fuera de lo común. Reconocer, fenómenos que se tenían por estáticos son en realidad dinámicos; tropezarse con factores impredecibles o caóticos, como el clima; descubrir que lo más concreto que se puede imaginar algo depende al mismo tiempo de la mente del observador; o en general, experimentar grandes dificultades para conciliar la teoría con la práctica; son cosas que tienden a pasar cuando se entra en detalles, sin demasiados prejuicios, en los más variados campos de la investigación científica. En definitiva, se aprecia como una situación que parecía sencilla, que es medir la altura de una montaña, se nos vuelve en un problema a la hora de observar minuciosamente la realidad de las cosas. Por lo tanto, la teoría difusa se plantea como un método para resolver este tipo de problemas. A continuación se presenta las diferentes ramas en que se divide la teoría difusa y sus antecedentes con una breve historia.

Ramas de la teoría difusa

La teoría difusa contempla un amplio campo teórico-práctico con una gran variedad de temas de investigación y se divide en varias disciplinas, en la Figura 1 se indican las diferentes ramas de la teoría difusa (Wang, 1997). Hay cinco grandes ramas: (i) la matemática difusa, que extiende los conceptos de la matemática clásica reemplazando

los conjuntos clásicos con los conjuntos difusos; (ii) la lógica difusa y la inteligencia artificial, donde se introducen aproximaciones a la lógica clásica y se desarrollan sistemas expertos basados en la información difusa y el razonamiento aproximado; (iii) sistemas difusos que incluyen el control difuso y las aproximaciones difusas en el procesamiento de señal en el área de comunicaciones; (iv) la incertidumbre e información, que engloba la teoría de posibilidades y el análisis de las diferentes clases de incertidumbres; y (v) toma de decisión difusa ("fuzzy decision making") donde se consideran problemas de optimización y la programación matemática difusa. Estas cinco ramas no son independientes, son interdisciplinarias y hay interconexiones fuertes entre ellas. Por ejemplo, en el control difuso se usan conceptos de la matemática difusa y la lógica difusa. En la práctica, muchas aplicaciones se han concentrado en los sistemas difusos, especialmente en el control difuso, que es una de las áreas de mayor investigación en los procesos industriales.

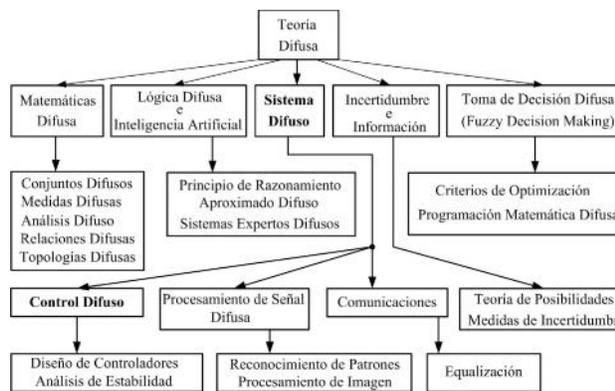


Figura 1. Ramas de la Teoría Difusa.

Antecedentes. Breve Historia

Aunque pareciera, así lo indican varios escritos, literaturas y publicaciones, que la teoría difusa comenzó en 1965 con la publicación de conjuntos difusos de Zadeh (Zadeh 1965), se puede ir más atrás en el tiempo y ver que no es así. Se podría decir, que es en la Grecia antigua, donde se fijan las bases para crear la lógica difusa. Desde

hace mucho tiempo y en muchos sistemas, siempre posibles, verdadero ó falso. La lógica clásica tiene sus orígenes en la antigua Grecia, donde el filósofo griego Aristóteles (384-322 a. C.) propuso la teoría lógica y matemática llamada las "Leyes del Pensamiento" y una de esas leyes es la "Ley del Excluyente Medio" ("Law of the Excluded Middle") (Brule, 1985; Jang et al. 1995) o "Principio del Tercero Excluido" (Fingermann, 1981) o "Ley del Tercero Excluido" (Suppes, 1975), que enuncia que cada proposición puede ser verdadera o falsa. Aún cuando el filósofo Parménides (¿504-450?, a. C.) propuso la primera versión de esta ley, alrededor de los 400 a. C. hubo fuertes e inmediatas objeciones, una de ellas fue la del filósofo Heráclito (¿540?-475 a.C.) que propuso que el pensamiento puede ser simultáneamente verdadero y falso. Fue el filósofo Platón (427-347 a. C.) quien fija las bases de la lógica difusa, indicando que había una tercera región entre el verdadero y falso (Brule, 1985). Aunque Aristóteles fue discípulo de Platón (O'Connor, 1976), la tesis de Platón no fue tomada en cuenta. El discípulo superó al maestro y la fama de Aristóteles oscureció a la de Platón, prevaleciendo el postulado de Aristóteles por miles de años.

En el párrafo anterior se atribuye el origen de la lógica difusa en la Grecia antigua, pero, según Kosko (1995) se originó mucho antes, en la India, con la filosofía que predicó Buda en la cual practicaba la creencia de aceptar las contradicciones, que se basan en A y no A. Buda murió en la India casi cien años antes que Aristóteles naciese en Grecia, no fue un teórico de la borrosidad en el sentido matemático y no escribió artículos sobre conjuntos o sistemas difusos, pero, tuvo la idea de los matices del gris: toleraba A y no A; Buda parece ser el primer pensador que rechazó el mundo blanquinegro de la bivalencia por completo.

Pasaron muchos siglos para que otros estudiosos expusieran sus ideas que tuviese relación con la lógica difusa y fue en el siglo XVIII cuando el filósofo escocés David Hume (1711-1779), creía en la lógica del sentido común y planteaba que el razonamiento basado en el conocimiento se

se ha considerado la lógica clásica con dos estados adquiere en forma ordinaria mediante vivencias en el mundo (Corzo, 2004). Por tanto, el conocimiento no es algo deducible a priori, sino algo que sólo la experiencia puede dar (Salvat, 1976a). El filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804), profesor de lógica y metafísica influenciado por Hume, desarrolló su labor que se equipara por su importancia a la de Aristóteles y Platón (Cárdenas, 1963); él emprende una indagación sobre las condiciones de posibilidad del pensamiento objetivo, es decir, con vistas a la síntesis de lo a priori con lo a posteriori, según la existencia de universalidad y necesidad (Salvat 1976b). El filósofo, físico y matemático norteamericano Charles Sanders Peirce (1839-1914), fundador de la escuela filosófica americana llamada pragmatismo, echó las bases de la lógica de relaciones (Cárdenas, 1963) y fue el primero en considerar "vaguedades", más que verdadero o falso, como acercamiento al mundo real y a la forma en que la gente funciona (Corzo, 2004). Otro que estudió las vaguedades a comienzo del siglo XX fue el filósofo y matemático inglés Bertrand Russell (1872-1970) que utilizó la palabra "vaguedad" para referirse a la polivalencia de las cosas en cuanto a las diferentes paradojas existentes. Por ejemplo, si en la placa de un carro se escribe "confiar en mí"; si se confía o no en el conductor, o se realizará en cierto grado, pero si se supone que se escribe en la placa "no confiar en mí"; ¿Se confía en el conductor?, de acuerdo con esa instrucción, no se debe confiar. Si no se confía en el conductor, entonces, acorde también con la instrucción, es que sí, se ha confiado. Al final, se acaba confiando y no confiando del conductor (Kosko, 1995). Asimismo, el filósofo austríaco Ludwig Wittgenstein (1889-1951), planteó cómo una sola palabra puede ser empleada para muchas cosas que tienen algo en común.

Albert Einstein (1879-1955) también le había dado vueltas a lo de la grisura, al decir: "En la medida en que las leyes de las matemáticas se refieren a la realidad, no son ciertas y en la medida en que son ciertas, no se refieren a la realidad" (Kosko, 1992, p. 263), él mismo dudo de la matemática de la ciencia blanca y negra que había ayudado a construir.

En 1920 el filósofo Jan Lukasiewicz (nacido en Lvov, ciudad cerca de Polonia hoy territorio de Ucrania, 1878-1951), tratando de explicar matemáticamente el modo de pensar de las personas, se convierte en el primero que propuso una alternativa sistemática para los dos valores lógicos de Aristóteles (Brule, 1985; Mora, 1975). Lukasiewicz publicó el estudio "Sobre la lógica trivalente", en la que considera tres valores en vez de los dos tradicionales (verdad y falsedad) (Salvat, 1976c; Mora, 1975; Lukasiewicz 1920). Lukasiewicz acordó darle el valor de $\frac{1}{2}$ a una proposición, lo que da un cálculo trivalente con los valores posibles: 0, $\frac{1}{2}$, 1. El valor arbitrario de $\frac{1}{2}$ se toma por razones de simetría: $\frac{1}{2}$ está igualmente distante de la verdad (1) que de lo falso (0) (Orellana, 1999). En 1921 Emil Post presentó una lógica finitamente polivalente, donde hay n finitos valores (Núñez 2002).

Hacia el año 1927, el físico Alemán Werner Heisenberg (1901-1976) planteó que no todas las proposiciones científicas son verdaderas o falsas. Al formular su principio cuántico de incertidumbre, según el cual en el campo subatómico no es posible establecer con certeza la posición de una partícula, conocida su velocidad, sino que sólo se puede señalar su posición probable, se introduce un nuevo valor para la calificación de las proposiciones; con ello la física desborda el modelo del razonamiento aristotélico. Este planteamiento impulsa las investigaciones sobre lógica polivalente. Posteriormente, en 1930, Lukasiewicz dedicó gran atención a la lógica polivalente y en colaboración con el lógico Polaco Alfred Tarski (1901-1983), desarrollaron la lógica infinitamente polivalente con un número infinito de valores (Orellana, 1999; Núñez, 2002; Mora, 1975).

Para 1937 el filósofo cuántico norteamericano Max Black (aunque nacido en Bakú Azerbaidján, pero nacionalizado norteamericano, 1909-1988) aplicó la lógica continua (lógica polivalente) a conjuntos clásicos. Históricamente, Black fue el primero en tratar de desarrollar matemáticamente la pertenencia de los elementos de un conjunto con una curva de membresía (O'Connor, 2001) dedujo

la primera función de pertenencia de conjuntos difusos y llamó a la incertidumbre "vaguedad" (Kosko 1992). Todo esto lo publicó en su artículo "Vagueness: An Exercise in Logical Analysis" (Black 1937), el cual utilizó el término de "conjunto vago" y que ahora se conoce como "conjunto difuso" (O'Connor, 2001), pero, su artículo no logró llamar la atención y pasó inadvertido por las comunidades científicas, sino, ahora se estaría hablando de la lógica vaga, no de la lógica difusa.

Transcurrieron algunos años hasta mediados de la década de los 60, en 1965 cuando Lotfi A. Zadeh (nacido en Azerbaidján, 1921-) publica su artículo "Fuzzy Sets" ("Conjuntos Difusos") (Zadeh 1965). Es, en el año 1965 que se considera como el inicio de la teoría difusa, ya que, comienza una nueva ola de interés en estructuras matemáticas con múltiples valores. Además, como se comentó, fue Zadeh el primero en utilizar el término "fuzzy" ("difuso") en las publicaciones científicas y también se considera esa publicación como la formalización del estudio de la incertidumbre (Orellana, 1999). Como hecho curioso, cabe mencionar que el lógico Polaco Alfred Tarski, discípulo de Lukasiewicz, fue profesor en Berkeley (Salvat, 1976d), lo cual podría haber tenido alguna influencia sobre Zadeh.

Desde su nacimiento, la teoría difusa ha presentado muchas controversias. Algunos investigadores vieron la idea de la lógica difusa como un principio en contra de las ciencias básicas. Sin embargo, la discusión más grande vino de matemáticos en estadística y probabilidades quienes reivindicaron que la probabilidad era suficiente para caracterizar la incertidumbre y cualquier problema que la teoría difusa pudiera resolver, podrá ser resuelto de igual manera pero no mejor que la teoría de probabilidades. Debido a que al principio no había ninguna aplicación realmente práctica de la teoría difusa, era difícil defenderla, sólo se podía refutar desde un punto de vista completamente filosófico. Casi la mayoría de los institutos de investigación del mundo no vieron la teoría difusa como un campo de investigación serio (Tremante 2006).

El establecimiento de la teoría difusa como un campo independiente se debe principalmente a la dedicación y el trabajo excelente de Zadeh. La mayoría de los conceptos fundamentales en la teoría difusa fueron propuestos por Zadeh entre los finales de los 60 y comienzos de los 70. Después de la primera publicación de los conjuntos difusos en 1965, él propuso los conceptos de los algoritmos difusos, "fuzzy algorithms" en 1968 (Zadeh, 1968a) y la medida probabilística de eventos difusos, "probability measures of fuzzy events" (Zadeh, 1968b). Hay un trabajo que no fue realizado por Zadeh, pero, contribuyó en el desarrollo de la teoría difusa que fue el de (Wee et al, 1969) donde plasmó una formulación de un autómata difuso y su aplicación como un modelo de un sistema de aprendizaje, "A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning systems".

Si bien, la teoría difusa no entró en una corriente de estudio, había muchos investigadores alrededor del mundo dedicados a este nuevo campo. En la década de los 70, la teoría continuó creciendo y aparecieron las aplicaciones reales. Al comienzo del año 70, Zadeh junto con Bellman publican "Decision Making in a Fuzzy Environment" ("Toma de Decisión en un Ambiente Difuso") que trata sobre la toma de decisión difusa (Bellman 1970). Luego Zadeh, individualmente, publica los artículos "Quantitative Fuzzy Semantics" ("Semántica Difusa Cuantitativa") (Zadeh 1971a), "Similarity Relations and Fuzzy Ordering" ("Relaciones de Similitud y Ordenamiento Difuso") (Zadeh 1971b) donde introduce los elementos formales de la lógica difusa con algunas aplicaciones y "A Rationale for Fuzzy Control" (Zadeh 1972) fue un trabajo considerado como pionero en la explicación de las razones en que se fundamenta el control difuso.

El profesor Toshiro Terano de la Universidad de Hosei, inspirado en el trabajo de Zadeh introduce la idea de la teoría difusa en la comunidad investigadora de Japón en 1972, la cual fue aceptada con entusiasmo debido al pensamiento cultural que ellos poseen de la ambigüedad de la naturaleza humana (Feigenbaum et al. 1993) y se

crea el Grupo de Investigación de Sistemas Difuso (Soft 2003).

En 1973 Zadeh publica, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes" (Zadeh 1973) ("Lineamientos de una Nueva Aproximación para el Análisis de Sistemas Complejos y Procesos de Decisión") que estableció las bases del control difuso. En esta publicación, se introdujo el concepto de las variables lingüísticas y se propuso el uso de reglas difusas SI-ENTONCES para formular el conocimiento humano.

Un gran evento ocurrió a mediados de la década de los 70, que fue el nacimiento del primer controlador difuso para un sistema real. En 1974 y 1975, Mamdani y Assilian del Queen Mary College (Inglaterra) aplicaron un controlador difuso para controlar una Máquina de Vapor. Primero Mamdani publica "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant" (Mamdani 1974) ("Aplicación de un Algoritmo Difuso para el Control de un Planta con un Dinámica Simple") en este artículo se describe un esquema en el que un algoritmo difuso es aplicado al control de una máquina de vapor de laboratorio. Posteriormente, los resultados se publicaron en: "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller" (Mamdani et al. 1975) ("Un Experimento en Síntesis Lingüística de un Controlador con Lógica Difusa"). Ellos encontraron que el controlador difuso era muy fácil de construir y que trabajaba notablemente bien. Así, a partir de este año, se comenzó en Europa el desarrollo de sistemas con control difuso.

En el año 1978 Lauritz Peter Holmblad y Jens-Jurgen Ostergaard, en Dinamarca, desarrollaron el primer controlador difuso para el control industrial de un horno de cemento (Wang 1997). Esta aplicación fue un gran éxito industrial al ahorrar combustible y mejorar la función de los operadores humanos. En este mismo año Braae y Rutherford realizaron un análisis de algunos algoritmos de control con lógica difusa (Lee 1990a; Lee 1990b) en los siguientes trabajos: "Fuzzy Relations in a Control Setting" ("Relaciones

Difusas en un Ambiente de Control”) (Braae et al. 1978) y “Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller” (“Selección de Parámetros para un Controlador con Lógica Difusa”) (Braae et al. 1979). Para el mismo año otra investigación de relevancia introdujo Zadeh, fue el concepto de probabilidad borrosa (Zadeh, 1978), prestando atención a una incertidumbre que no consideraba probabilística sino posibilística (Beltran, 2002) y se lanza el primer ejemplar del Journal of Fuzzy Sets and Systems publicado por Elsevier.

Se podría decir que se establecieron las bases de la teoría difusa en la década de los 70. Con la introducción de nuevos conceptos, el cuadro de la teoría difusa como un nuevo campo comenzaba a establecerse. Las aplicaciones iniciales, como el controlador difuso de una máquina de vapor y el controlador difuso de un horno de cemento mostraron lo prometedor de un control difuso.

En los comienzos de la década de los 80, hubo escaso progreso desde el punto de vista teórico. Se propusieron pocos nuevos conceptos y aproximaciones durante este período; simplemente, porque había muy pocas personas trabajando en el área de la teoría difusa y fueron las aplicaciones en el campo del control difuso que validó el desarrollo de las investigaciones en la teoría difusa.

No obstante, entre los finales de los 70 y comienzos del 80 se desarrollaron las primeras aplicaciones y se establecieron las bases del control difuso, en los Estados Unidos no se realizaron muchas investigaciones por no tener un importante apoyo de los institutos de investigación; los departamentos académicos no promocionaban a quienes se dedicaban a la investigación difusa, las oficinas gubernamentales no subvencionaban la investigación en el nuevo campo, pocas revistas o congresos aceptaban artículos sobre la teoría difusa y fueron los Japoneses, los primeros en tener un marcado interés en el área.

Los ingenieros japoneses, con su sensibilidad a una nueva tecnología, encontraron rápidamente que los controladores difusos eran muy fáciles de diseñar y trabajaban muy bien en muchos problemas. Como el control difuso no requiere de

un modelo matemático del proceso, podría aplicarse a muchos sistemas donde la teoría del control convencional no podía ser usada por falta del modelo matemático. En los años 80 comenzaron las aplicaciones masivas de la teoría difusa. En 1980, Tong, del Instituto de Tecnología de Tokio, empezó a crear la primera aplicación de un control difuso en Japón en una planta purificadora de agua de Fuji Electric (Tong et al. 1980) y Fukami, Mizumoto y Tanaka desarrollaron la inferencia condicional difusa (Fukami et al. 1980); además se establece el Grupo de Investigación de Ciencias Difusa (Soft, 2003).

La primera sociedad difusa en Norte América (North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS) se formó en 1981 y su primer encuentro se realizó en Logan Utah, Mayo de 1982 (Nafips, 2004).

Para 1983 algunos trabajos notables fueron: el análisis y síntesis de sistemas difusos con la utilización de conjuntos probabilísticos por Hirota y Pedrycz (Hirota et al. 1983), la derivación de las reglas de un controlador difuso por Takagi y Sugeno (Takagi et al. 1983), y el control difuso predictivo por Yasunobu y Miyamoto (Yasunobu et al. 1983), con este trabajo empezaron a desarrollar, para la empresa Hitachi, un sistema de control difuso para el metro de Sendai con la meta de implementar un sistema de control que regulara los cambios, no solo en el momento de producirse sino anticipándose a ellos.

Otro trabajo pionero fue el primer robot difuso, en el aparcamiento de un automóvil que fue controlado mediante comandos remotos, esto fue un automóvil en miniatura con capacidad de reconocimiento del habla y de comprensión, adaptando las instrucciones “con sentido común”, a las condiciones concretas de la conducción (Lozano, 1998), realizado por Sugeno y Murakami en 1984 (Sugeno et al. 1984). Este mismo año se establece la Asociación Internacional de Sistemas Difusos, International Fuzzy System Association (IFSA) y en 1985 se lleva a cabo el primer congreso mundial sobre sistemas difusos por la IFSA, en la Isla de Palma de Mallorca en España (Tremante, 2006).

El primer circuito integrado difuso se produjo en 1986 por Togai y Watanabe (Togai et al. 1983) que procesaba unas 80.000 inferencias lógicas difusas por segundo y el primer Hardware de un controlador difuso por Yamakawa en 1988 (Yamakawa, 1988).

En julio de 1987, el segundo congreso de la Asociación Internacional de Sistemas Difuso (IFSA) se realizó en Tokio. La conferencia empezó tres días después de la puesta en funcionamiento del metro de Sendai, el sistema de metro más avanzado en el mundo para el momento, y los asistentes al evento realizaron un paseo en el metro controlado con lógica difusa. En la conferencia se mostró un brazo robot difuso que jugaba Ping-Pong en dos dimensiones en tiempo real realizado por Hirota y Yamakawa mostró un sistema difuso que equilibró un péndulo invertido; los trabajos fueron publicados en (Hirota et al. 1989) y (Yamakawa 1989), respectivamente. Antes de este evento, la teoría difusa no era bien conocida por la sociedad Japonesa. Luego de esto, una ola de sentimiento pro difuso arrebató el campo de la ingeniería, gobierno y las comunidades comerciales. En los principios de los años 90, un gran número de productos electrodomésticos difusos aparecía en el mercado Japonés superando la cifra de los mil millones de dólares en ventas anuales de productos con lógica difusa (Kosko 1995).

Para el año 1989 se crea el Laboratory for International Fuzzy Engineering (LIFE) auspiciado por el Ministerio de Comercio Internacional e Industria de Japón con el objetivo de consolidar y promover las investigaciones en el campo de la teoría difusa, este instituto comenzó operaciones a comienzos del año 1990 a cargo del profesor Toshiro Terano y contemplaba entre otros programas, la computación difusa, la cual se desarrolló para implementar los sistemas difusos con la tecnología que sea necesaria (Feigenbaum et al. 1993). Igualmente se establece la sociedad Japonesa para la teoría difusa (Japan Society for Fuzzy Theory, SOFT) que luego en 2003 se convirtió en la sociedad Japonesa para la teoría

difusa e inteligencia informática (Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, SOFTII). Un proyecto relevante que se conoció en el año 1989, fue la "Memoria Asociativa Difusa" (Fuzzy Associative Memory, FAM) que se basó en el planteamiento de Wittgenstein, donde cualquier concepto puede ser reemplazado por otro, de este modo se forma una representación distribuida del conocimiento (Orellana 1999).

En California, Estados Unidos, específicamente en la Universidad de California en Berkeley se propusieron crear el Berkeley Initiative in Soft Computing (BISC) en Octubre de 1990 y se consolidó su creación en Marzo de 1991, el BISC dentro de sus principales áreas de investigación se encuentra la lógica difusa y sus aplicaciones (Bisc 2006).

En los años 90 aparecieron más desafíos. El éxito de los sistemas difusos en Japón sorprendió a los investigadores de las principales corriente en los Estados Unidos y Europa. Algunos todavía criticaban la teoría difusa, pero muchos otros habían cambiado su manera de pensar y le dieron una nueva oportunidad a la teoría difusa para ser tomada en serio. En febrero de 1992, la primera Conferencia Internacional de la IEEE sobre sistemas difusos se realizó en San Diego, California EE.UU. Este evento simbolizó la aceptación de la teoría difusa por la IEEE. En 1993, se inauguraron la IEEE "Transactions" sobre Sistemas Difusos (Transactions on Fuzzy Systems). Para Mayo de 1994 se reportaron aproximadamente 20.000 trabajos en el área de la teoría difusa (Haber 1994). A finales del siglo XX y comienzo siglo XXI una gran cantidad de trabajos, publicaciones, conferencias y congresos se han realizado. Por mencionar algunas conferencias o congresos relevantes como el de mayo de 2002 donde se realizó la décima primera Conferencia Internacional de la IEEE sobre sistemas difusos en Hawaii EE.UU. y en 2003 el décimo congreso de la IFSA en Estambul, Turquía.

En resumen, se podría decir que la teoría difusa comenzó en los Estados Unidos de Norte América en 1965, pero, no es tomada en cuenta y se introduce en 1972 en Japón. La lógica difusa no se

hizo adulta en las universidades, sino en el mercado comercial y salto por encima de las objeciones científicas occidentales (Kosko 1995). En la década de los 70 se realizan un gran número de investigaciones en Japón, en la década de los 80 se investiga en Europa y se desarrollan las primeras aplicaciones en Japón y Europa; en esta misma década se conoce la lógica difusa en la sociedad Japonesa convirtiéndose en una moda. Finalmente, en la década de los 90 vuelve a los Estados Unidos de Norte América desarrollándose grandes investigaciones y aplicaciones. Hoy en día, en el siglo XXI, prácticamente en todo el mundo se trabaja con la teoría difusa como una rama más de las ciencias aplicadas.

Desde el punto de vista teórico, los sistemas y el control difuso avanzaron rápidamente al final de la década del 80 y comienzos de la década del 90. Se desarrollaron sistemas híbridos en conjunto con los sistemas difusos. Por ejemplo, se han usado técnicas de redes neuronales para determinar el número de funciones de pertenencia de una manera sistemática y han aparecido análisis rigurosos de la estabilidad en sistemas de control difuso. Aunque todo lo correspondiente a sistemas difusos y la teoría de control difuso cada día está más avanzada, mucho trabajo falta por hacer en la búsqueda de un mayor desarrollo.

Sistemas Difusos

Un sistema difuso es un sistema no lineal con una base de conocimiento que consiste en reglas difusas SI-ENTONCES. El valor de entrada al sistema difuso se transforma en un valor de salida utilizando la lógica difusa. A la base de conocimiento también se le llama base de reglas y es el corazón del sistema difuso. En el diseño de un sistema difuso, la base de reglas es el punto inicial para construir el sistema, debido a que en ella se tienen los valores posibles de las variables de entrada para concluir con la acción a efectuar a la salida, en términos lingüísticos de funcionamiento.

Las reglas difusas SI-ENTONCES son de naturaleza aproximada, debido al hecho de que en muchos casos, provienen de un experto humano que conoce muy bien

el proceso al cual se le implementará el sistema difuso. Por tanto, la colección de las reglas difusas es un razonamiento aproximado. Un sistema difuso basado en reglas SI-ENTONCES, difiere de un sistema experto que también está formado por una serie de reglas SI-ENTONCES. En las reglas del sistema difuso el antecedente y la consecuencia están formados por conjuntos difusos, mientras que en las reglas del sistema experto no. Por ejemplo, una regla difusa SI-ENTONCES es: SI la velocidad de un automóvil es alta, ENTONCES aplicar menos fuerza al acelerador; donde las palabras "alta" y "menos" están caracterizadas por las funciones de pertenencia mostradas en las Figuras 2 y 3, respectivamente.

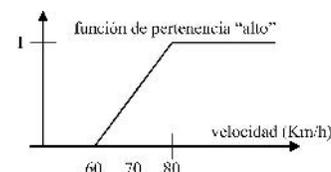


Figura 2. Función de pertenencia "alto". Eje horizontal velocidad del carro y eje vertical el valor de pertenencia para "alto".



Figura 3. Función de pertenencia "menos". Eje horizontal fuerza aplicada al acelerador y eje vertical el valor de pertenencia para "menos".

Un sistema difuso debe poseer un comportamiento flexible (adaptable) para reconocer y afrontar las circunstancias variables, y también, debe ser robusto para mantener el estado de la salida deseada guiado únicamente por la información obtenida a través de los sensores. La utilización de un sistema difuso permite afrontar situaciones en las que se presentan: a) sistemas complejos (no lineales; no existe o es complejo el modelo matemático del proceso), b) sistemas parcialmente definidos o definidos en forma imprecisa, c) sistemas con variables difíciles de medir e incluso determinar y d) sistemas sujetos a grandes perturbaciones del entorno. Existen diferentes tipos de sistemas difusos, a continuación se presentan los tipos de sistemas difusos.

Sistemas Difusos

Tipos de sistemas difusos

Existen cuatro (4) tipos de sistemas difusos (Wang 1997) que son: a) Sistema Difuso Puro, b) Sistema Difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK), c) Sistema Difuso con Fusificación y Defusificación tipo Mamdani y d) Sistema Sifuso con Fusificación y Defusificación tipo Sugeno. La configuración básica de un **Sistema Difuso Puro** se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Configuración Básica de un Sistema Difuso Puro.

La base de conocimiento representa el conjunto de reglas difusas SI-ENTONCES. El bloque de inferencia difusa combina las reglas difusas SI-ENTONCES realizando una transferencia desde un conjunto difuso de entrada en el espacio $X \subset R^n$ a un conjunto difuso de salida en el espacio $Y \subset R$ basado en los principios de la lógica difusa. El problema principal con un Sistema Difuso Puro, es que sus entradas y salidas son valores o términos lingüísticos representados por conjuntos difusos, mientras que, en el campo de la ingeniería las variables de entrada y salida de un sistema son valores numéricos.

Para resolver el problema de tener conjuntos difusos en la entrada y en la salida del sistema difuso puro, Takagi-Sugeno (Takagi et al. 1985) y Sugeno-Kang (Sugeno et al. 1988) propusieron un sistema difuso cuyas entradas y salidas son variables con valores numéricos. La configuración básica del **Sistema Difuso Takagi-Sugeno-Kang** se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Configuración Básica de un Sistema Difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

La base de conocimiento del Sistema Takagi-Sugeno-Kang (TSK) usa reglas en la forma siguiente: SI *la velocidad x de un automóvil es alta*

ENTONCES *la fuerza al acelerador es $y=cx$* , donde la palabra "alta" es una función de pertenencia como la representada en la Figura 2 y c es una constante. La consecuencia de la regla cambia una variable lingüística por una simple fórmula matemática. Este cambio hace más fácil la combinación de las reglas. De hecho, el valor final de la combinación de todas las reglas en las cuales se cumple la consecuencia es un peso ponderado. Por ser la consecuencia de la regla una fórmula matemática no representa la parte natural del conocimiento humano, además no hay mucha libertad para aplicar diferentes principios de la lógica difusa, de manera que, la versatilidad de los sistemas difusos no se representa en esta estructura.

En el **Sistema Difuso con Fusificación y Defusificación tipo Mamdani**, se agrega a la entrada el bloque de fusificación que consiste en llevar el valor numérico de la variable de entrada a un valor difuso, a través de un conjunto difuso. Igualmente a la salida se coloca el bloque de defusificación que transforma un conjunto difuso resultante en un valor numérico real. Esta configuración permite emplear un sistema difuso en el campo de la ingeniería y se muestra en la Figura 6.

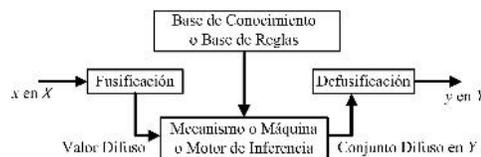


Figura 6. Configuración de un Sistema Difuso con Fusificación y Defusificación Tipo Mamdani.

Este sistema difuso es normalmente el más utilizado, fue el primer método aplicado a los sistemas de control y se propuso en 1975 por Ebrahim Mamdani (Mamdani et al. 1975) para controlar una caldera de vapor en el cual se sintetizaron un conjunto de reglas lingüísticas que fueron obtenidas de la experiencia de operadores humanos. Mamdani se basó en los trabajos

realizados por Zadeh y algunas características son: a) intuitivo, b) se obtienen buenos resultados y c) buena adaptación al comportamiento humano.

Los **Sistema Difuso con Fusificación y Defusificación tipo Sugeno** usan la función de pertenencia "Singleton" o también conocida como función de pertenencia "single Spike" (Figura 7) como función de pertenencia de la salida. Esta función se considera como un conjunto difuso pre-defusificado. Esto aumenta, en algunos casos, la eficiencia del proceso de defusificación porque simplifica el cómputo para encontrar la salida en una forma bidimensional.

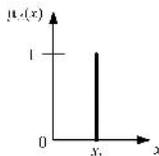


Figura 7. Función de Pertenencia "Singleton".

El sistema difuso tipo Sugeno fue propuesto por primera vez en 1985 por M. Sugeno (Sugeno 1985). La configuración es igual al tipo Mamdani, Figura 6. Los sistemas difusos tipo Sugeno se dividen según el orden. Un sistema difuso tipo Sugeno de orden cero posee reglas difusas de la forma: SI x_1 es A y x_2 es B ENTONCES $y=c$, donde x_1 y x_2 son las variables lingüísticas, y es la salida, A y B son conjuntos difusos, mientras que c es una constante definida en la consecuencia. Un sistema difuso tipo Sugeno de primer orden posee reglas difusas de la forma: SI x_1 es A y x_2 es B ENTONCES $y=a*x_1+b*x_2+c$, donde x_1 y x_2 son las variables lingüísticas, y es la salida, A y B son conjuntos difusos, mientras que a , b y c son todas constantes. La manera más fácil de visualizar el sistema de primer orden es: que la salida singleton tendrá un valor en el espacio de salida, dependiendo de lo que sea la entrada. Esto tiende a hacer la notación del sistema más compacta y eficiente. Ordenes más altas en el modelo difuso Sugeno son posibles, pero introducen una cierta complejidad. Algunas características son: a) computacionalmente eficiente, b) trabaja bien con técnicas lineales (ejemplo, controladores PID, etc.), c) trabaja bien con optimización y técnicas adaptativas y d) buena adaptación al análisis matemático.

¿Por qué los Sistemas Difusos?

Fundamentalmente, se puede justificar el porque de los sistemas difusos por dos razones: I) el

mundo real es demasiado complejo para obtener descripciones precisas, por consiguiente, debe haber una aproximación para obtener un modelo apropiado y II) en la era de la información, el conocimiento humano aumenta considerablemente. Se necesita un sistema para formular el conocimiento humano de una manera sistemática y colocarlo en los sistemas de la ingeniería.

La primera no caracteriza la única naturaleza de los sistemas difusos. De hecho, casi todos los sistemas en ingeniería caracterizan al mundo real de una manera aproximada. Por ejemplo, la mayoría de los sistemas reales son no lineales, pero se pone mucho esfuerzo en el estudio de sistemas lineales. Un sistema en la ingeniería debe ser preciso en la magnitud que caracteriza los rasgos importantes del mundo real y, al mismo tiempo, permitir el análisis matemático. En este aspecto, los sistemas difusos no difieren de otros sistemas en la ingeniería.

La segunda justificación caracteriza a los sistemas difusos y justifica la existencia de los sistemas difusos como una rama en la teoría difusa. Para muchos sistemas prácticos, la información importante viene de dos fuentes: una fuente son los expertos humanos que describen con su conocimiento un sistema con un lenguaje natural y los modelos matemáticos que se derivan según las leyes físicas. Por consiguiente, una tarea importante es combinar estos dos tipos de información en el diseño de un sistema. Para lograr esta combinación, la clave está en preguntar cómo formular el conocimiento humano para ser integrado con los modelos matemáticos. En otras palabras, la pregunta importante es, cómo transformar una base de conocimiento humana en una fórmula matemática. Esencialmente, lo que un sistema difuso hace es realizar esta transformación.

¿Dónde se han utilizado los Sistemas Difusos?

Los sistemas difusos han sido aplicados a una gran variedad de campos desde el control, procesamiento de señal, comunicaciones, en la fabricación de circuitos integrados, en sistemas expertos para negocios, medicina, entre otros. Sin

embargo, la aplicación más significativa se concentró en problemas de control industrial y equipos electrodomésticos. Por consiguiente, en lugar de mencionar las aplicaciones de los sistemas difusos en los diferentes campos, en este trabajo se citan varios problemas del control donde los sistemas difusos juegan un importante papel.

Control Difuso de un Horno de Cemento

El cemento está fabricado por pulverización fina de residuos de Cal. Los residuos se producen en un horno de cemento calentando una mezcla de piedra, arcilla y arena. Debido a que el horno de cemento exhibe un comportamiento que varía de forma no lineal en el tiempo y relativamente se dispone de pocas mediciones, resulta difícil controlar con la teoría de control convencional. Al final de la década de los 70, Holmblad y Ostergaard en Dinamarca desarrollaron un sistema difuso para controlar un horno de cemento. El sistema difuso (control difuso) tenía cuatro entradas y dos salidas. Las cuatro entradas del horno eran: (i) el porcentaje de oxígeno en los gases de escape, (ii) la temperatura de los gases de escape, (iii) el torque del pulverizador del horno, y (iv) el peso en litros del residuo. Las dos salidas eran: (i) la variación (rata o razón) de alimentación de carbón y (ii) el flujo de aire. Una colección de reglas difusas SI-ENTONCES se construyeron para describir cómo las salidas deben relacionarse con las entradas. Por ejemplo, dos reglas empleadas fueron: 1) SI el porcentaje del oxígeno es alto y la temperatura es baja ENTONCES aumentar el flujo de aire. 2) SI el porcentaje del oxígeno es alto y la temperatura es alta ENTONCES reducir la tasa de alimentación del carbón ligeramente.

El control difuso fue construido combinando este tipo de reglas en el sistema difuso. En junio de 1978, se instaló, en un período de prueba en el horno de cemento de F.L. Smidth & Company Dinamarca y el control difuso mostró una mejora el ahorro de combustible por encima de los resultados del operador humano.

Control Difuso de un Tren Subterráneo

Una aplicación significativa fue el sistema de control difuso del metro de Sendai en Japón

inaugurado en 1987 con una ruta norte-sur de 13,6 kilómetros y 16 estaciones. El sistema de control difuso consideraba simultáneamente cuatro criterios de actuación: la seguridad, el confort, la velocidad y exactitud en la parada (posición). El sistema de control difuso consistió en dos partes: el controlador de velocidad constante (éste arranca el tren y mantiene la velocidad dentro del límite de seguridad) y el controlador de parada automático (regula la velocidad del tren para detenerlo en la posición deseada).

Sistemas Difusos en Automóviles

Un automóvil es un conjunto de muchos sistemas: motor, transmisión, freno, suspensión, dirección y más, donde se pueden aplicar, a casi todos, un sistema difuso. Por ejemplo, Nissan patentó una transmisión automática difusa que ahorra combustible de un 12% a 17%. Esto está basado en la observación siguiente: un cambio normal en la transmisión ocurre cuando el automóvil pasa de una cierta velocidad a otra, por tanto, a muchos cambios de velocidad la transmisión tendrá muchos cambios y se consume mucha gasolina. Los conductores que realizan pocos cambios de la transmisión consideran el factor de la velocidad. Por ejemplo, según la aceleración en una colina, se puede retardar el cambio en la transmisión. El dispositivo de la transmisión automática difusa de Nissan resumió la heurística del problema en una colección de reglas difusas SI-ENTONCES construyendo un sistema difuso para guiar los cambios de los engranajes.

Nissan también desarrolló un sistema de frenos antilock (ABS) difuso. El desafío aquí, es aplicar una gran cantidad de presión al freno sin causar que deslice. El sistema de Nissan considera varias reglas, por ejemplo una regla sería: SI el automóvil reduce la velocidad muy rápidamente ENTONCES el sistema supone que el freno se bloqueó y suaviza la presión. En abril de 1992, Mitsubishi anunció un sistema difuso para un ómnibus que controla la transmisión automática, suspensión, tracción, la dirección de las cuatro ruedas, el accionamiento de las cuatro ruedas y el aire acondicionado. La transmisión difusa realiza los

cambios en las curvas y también controla el automóvil cuando un conductor realiza inapropiados cambios de aceleración en vías con fuertes curvas. La suspensión difusa tiene sensores en el frente del automóvil que registran la vibración del vehículo y detectan la altura con que cambia el camino para ajusta la suspensión y tener una conducción más suave. La tracción difusa previene velocidades en exceso en curvas y mejora el agarre en caminos peligrosos tomando decisión en caminos nivelados o inclinados. Finalmente, la dirección difusa ajusta el ángulo de respuesta de las ruedas según las condiciones del camino y la velocidad del automóvil; el aire acondicionado difuso supervisa la luz del sol, temperatura y humedad para ajustar el ambiente dentro del automóvil.

Estabilizador Digital de Imagen

Cualquiera que haya usado una cámara de video alguna vez, sabe lo difícil que es mantener la cámara estable para proporcionar una imagen fija y así realizar una buena filmación sin movimiento. Atenuar, la vibración es el primordial objetivo. Matsushita introdujo un estabilizador de imagen, basado en un sistema difuso que estabiliza el cuadro de la imagen cuando la mano se está agitando. El estabilizador digital de imagen es un sistema difuso que se construye basado en reglas como: 1) SI todos los puntos del cuadro se están moviendo en la misma dirección ENTONCES la mano se está agitando. 2) SI sólo algunos puntos del cuadro se están moviendo ENTONCES la mano no se está agitando.

El estabilizador compara cada cuadro actual con las imágenes anteriores en memoria. Si todo aparece cambiado, entonces la mano se está agitando y el sistema difuso ajusta el cuadro para compensar. En caso contrario, no hace nada. Así, si un objeto cruza el campo de visión, sólo una porción de la imagen cambiará y la cámara no intentará compensar. De esta manera el cuadro permanece fijo, aunque la mano se está agitando.

Lavadoras Difusas

Las lavadoras difusas fueron los primeros equipos electrodomésticos con un sistema difuso. Fueron producidos por Matsushita Electric Industrial

Company en Japón alrededor de 1990. Se utiliza un sistema difuso para automatizar que tipo de ciclo apropiado se debe colocar de acuerdo al tipo y cantidad de suciedad y al tamaño de la carga. Más específicamente, el sistema difuso tiene tres entradas y una salida, donde las tres entradas son: la medida de la suciedad, el tipo de suciedad y el tamaño de la carga y salida es el ciclo correcto. Los diferentes sensores proporcionan al sistema difuso las entradas. Desde un extremo se envía un haz de luz a través del agua y un sensor óptico mide la cantidad de luz que recibe. Si el agua está sucia poca luz se recibirá. El sensor óptico también puede indicar si la suciedad es barrosa o grasosa. La suciedad barrosa se disuelve más rápidamente. Pues, si la luz medida alcanza rápidamente el mínimo, la suciedad es barrosa y si es muy lenta, es grasosa o aceitosa. Si se obtiene una curva intermedia la suciedad es mixta. También se tiene un sensor de carga que registra el volumen de la ropa. Claramente, si hay un gran volumen de ropa, el tiempo de lavado será mayor. La base de reglas consistió en un número reducido de reglas difusas SI-ENTONCES que permitió construir el sistema difuso.

Conclusiones

La teoría difusa es relativamente joven, su evolución ha sido muy rápida en varias disciplinas y en la actualidad se considera una nueva tendencia en muchos campos de aplicación. Una de las características principales del origen de la teoría difusa, como se puede ver en sus antecedentes, es que surge por la búsqueda de emular al pensamiento humano. Un sistema difuso permite afrontar situaciones con sistemas complejos que están definidos en forma imprecisa en ocasiones con variables difíciles de medir e incluso determinar. El objetivo de usar sistemas difusos, es poner el conocimiento humano en los sistemas de ingeniería en una forma sistemática, eficaz y analizable. La diversidad de aplicaciones de los sistemas difusos ha comprobado el buen desempeño en resultados prácticos.

Agradecimientos

El primer autor desea expresar su gratitud al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela por el apoyo

financiero dado en los proyectos de investigación PI-08-8132-2011/1 y PI-08-8132-2011/2. Así mismo, los autores también desean agradecer a los árbitros por su valiosa evaluación y comentarios.

REFERENCIAS

- Bellman, R. E. y Zadeh, L. A. (1970). Decision Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*. 17(4), B-141-B-164.
- Beltran, L. S. (2002). Probabilidad y Borrosidad. III Seminario Matemáticas, Borrosidad e Interdisciplinariedad. Caracas: UCV, Comisión de Estudios Interdisciplinarios. 4(13), 21-29.
- Bisc, (2006). History; BISC During 90s. California: Berkeley, University of California, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences (EECS).
- Black, M. (1937). Vagueness. *An Exercise in Logical Analysis. Philosophy of Science*, 4(4), 427-455.
- Braae, M. y Rutherford, D. A. (1978). Fuzzy Relations in a Control Setting. *Kybernetes*. 7(3), 185-188.
- Braae, M. y Rutherford, D. (1979). Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller. *Fuzzy Sets and Systems*. 2(3), 185-199.
- Brule, J. F. (1985). Fuzzy Systems - A Tutorial. <http://www.austinlinks.com/Fuzzy/tutorial.html>.
- Cárdenas, E. (1963). 20000 Biografías Breves. Pennsylvania, USA: Libros de América, Inc.
- Corzo, Y. (2004). La Lógica Difusa. monografias.com.
- Fariás, L. (2002). La Medición en Ciencias Sociales a la Luz de la Matemática Borrosa. III Seminario Matemáticas, Borrosidad e Interdisciplinariedad. Caracas: UCV, Comisión de Estudios Interdisciplinarios. 4(13), 59-75.
- Feigenbaum, E., Friedland, P. E., y Shrobe, H. 1993. Knowledge-Based Systems in Japan. University Maryland, Division of Loyola, World Technology Evaluation Center (WTEC), Study Reports by Loyola/WTEC, Fuzzy Logic Research and Life.
- Fingermann, G. (1981). Lógica y Teoría del Conocimiento. Buenos Aires: 31a edition. Editorial El Ateneo.
- Fukami, S., Mizumoto, M., y Tanaka, K. (1980). Some Considerations on Fuzzy Conditional Inference. *Fuzzy Sets and Systems*. 4(3), 243-273.
- Haber, R. H. (1994). Aplicaciones de Inteligencia Artificial en Control: Lógica Difusa. II Jornadas Panamericanas de Automatización y Control. Caracas (Venezuela).
- Hirota, K. y Pedrycz, W. (1983). Analysis and Synthesis of Fuzzy Systems by the Use of Probabilistic Sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 10(1-3), 1-13.
- Hirota, K., Arai, Y., y Hachisu, S. 1989. Fuzzy Controlled Robot Arm Playing two-Dimensional Ping-Pong Game. *Fuzzy Sets and Systems*. 32(2), 149-159.
- Jang, R. J. S. y Gulley, N. (1995). Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB. Massachusetts: 1nd edition. The Math Works Inc.
- Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. Englewood Cliffs, N. J., 1 edition: Prentice-Hall.
- Kosko, B. (1995). *Pensamiento Borroso: La Nueva Ciencia de la Lógica Borrosa*. Barcelona: Crítica.
- Lee, C. (1990a). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part I. Systems, Man and Cybernetics, *IEEE Transactions on*. 20(2), 404-418.
- Lee, C. (1990b). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part II. Systems, Man and Cybernetics, *IEEE Transactions on*. 20(2), 419-435.
- Lozano T., J. A. 1998. Aplicaciones de la Lógica Borrosa. cienciaysalud.laverdad.es.
- Lukasiewicz, J. (1920). O logice trójwartosciowej. *Ruch filozoficzny*. 169-171.
- Mamdani, E. (1974). Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*. 121(12), 1585-1588.
- Mamdani, E. y Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 7(1), 1-13.
- Mora, J. F. (1975). *Diccionario de Filosofía*. Buenos Aires: Editorial Sudamericana. 2() 97-98.
- Nafips, (2004). North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS). New York: North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS).
- Núñez, J. A. (2002). Razonamiento Aproximado usando una Lógica Borrosa. III Seminario Matemáticas, Borrosidad e Interdisciplinariedad. Comisión de Estudios Interdisciplinarios. UCV, 4(13), 119-147.

- O'Connor, J. J. y Robertson, E. F. (2001). Max Black. Scotland: School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews.
- O'Connor, R. (1976). La Química. México D.F.: Editorial Harla.
- Orellana Ch., R. J. (1999). Sociedad e Investigación: Borrosidad. Comisión de Estudios Interdisciplinarios. UCV, 2(4).
- Salvat (1976a). Enciclopedia Salvat. Salvat Editores, S.A. 7() 1740.
- Salvat (1976b). Enciclopedia Salvat. Salvat Editores, S.A. 7() 1915.
- Salvat (1976c). Enciclopedia Salvat. Salvat Editores, S.A. 8() 2052.
- Salvat (1976d). Enciclopedia Salvat. Salvat Editores, S.A. 12() 3132.
- Soft, (2003). Introducing Our Society. Japan Society for Fuzzy Theory & Intelligent Informatics.
- Sugeno, M. 1985. Industrial Applications of Fuzzy Control. U.S.A.: New York, Amsterdam, North-Holland, Elsevier Science Pub. Co.
- Sugeno, M. y Murakami, K. (1984). Fuzzy Parking Control of Model Car. In Decision and Control. The 23rd IEEE Conference on. 23(), 902-903.
- Sugeno, M. y Kang, G. (1988). Structure Identification of Fuzzy Model. Fuzzy Sets and Systems. 28(1), 15-33.
- Suppes, P. (1975). Introducción a la Lógica Simbólica. México: 7a edition. Compañía Editorial Continental S.A., CECOSA.
- Takagi, T. y Sugeno, M. (1983). Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Actions. In Proceedings of the IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis. 55-60, Marseille, France. International Federation of Automatic Control (IFAC).
- Takagi, T. y Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on. 15(1), 116-132.
- Togai, M. y Watanabe, H. (1986). Expert System on a Chip: An Engine for Real-Time Approximate Reasoning. IEEE Expert. 1(3), 55-62.
- Tong, R., Beck, M., y Latten, A. (1980). Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process. Automatica. 16(6), 695-701.
- Tremante, P. (2006). Introducción al Control Difuso. Caracas: UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Trabajo Ascenso Agregado.
- Wang, L. X. (1997). A Course in Fuzzy Systems and Control. N. J., Prentice Hall, Inc.
- Wee, W. y Fu, K. (1969). A Formulation of Fuzzy Automata and Its Application as a Model of Learning Systems. Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on. 5(3), 215-223.
- Yamakawa, T. (1988). High-Speed Fuzzy Controller Hardware System: The Mega-FIPS Machine. Information Sciences. 45(2), 113-128.
- Yamakawa, T. (1989). Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System. Fuzzy Sets and Systems, 32(2), 161-180.
- Yasunobu, S., Miyamoto, S., y Ihara, H. (1983). Fuzzy Control for Automatic Train Operation System. In Proceedings of the 4th IFAC Int. Congress on Control in Transportation Systems. 33-39, Germany. International Federation of Automatic Control.
- Zadeh, L. A. (1962). From Circuit Theory to System Theory. Proc of the IRE. 50(5), 856-865.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. Information and Control. 8(3), 338-353.
- Zadeh, L. A. (1968a). Fuzzy Algorithms. Information and Control. 12(2), 94-102.
- Zadeh, L. A. (1968b). Probability Measures of Fuzzy Events. Journal of Mathematical Analysis and Applications. 10(), 421-427.
- Zadeh, L. A. (1971a). Quantitative Fuzzy Semantics. Information Sciences. 3(2), 159-176.
- Zadeh, L. A. (1971b). Similarity Relations and Fuzzy Ordering. Information Sciences. 3(2), 177-200.
- Zadeh, L. A. (1972). A Rationale for Fuzzy Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 94(1), 3-4.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on. 3(1), 28-44.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Systems. 1(1), 3-28.

Autores

Panayotis Tremante. Ingeniero Electricista en 1993 y Magister Scientiarum en Ingeniería Eléctrica en 2001. Profesor Agregado a Dedicación Exclusiva del Departamento de Electrónica y Control de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela desde 1994. A partir del 2011, realiza estudios del Doctorado Individualizado en la UCV.

email: ptremante@gmail.com o tremante.panayotis@ucv.ve

Ebert Brea. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Control, de la Universidad Central de Venezuela (UCV). PhD de la Escuela de Matemáticas de la Universidad de Southampton, Inglaterra; MSc. en Investigación de Operaciones e Ingeniero Electricista de la UCV. Áreas de investigación: desarrollo de algoritmos de optimización y optimización por simulación.

email: ebertbrea@gmail.com o ebert.brea@ucv.ve

Recibido: 23/09/2013

Aceptado: 28/04/2014