

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE  
TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA (UPC)**

*Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions*

**SISTEMAS DIFUSOS DINÁMICOS  
PARA EL  
TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN  
TEMPORAL IMPRECISA**

Autor: Orestes Mas i Casals  
Director: Joan Maria Miró Sans

Barcelona, 1997

# **1. Introducción**

## 1.1 Presentación

La teoría de conjuntos difusos fue concebida teóricamente a mediados de la década de 1960 por el profesor Lotfi A. Zadeh, que a la sazón trabajaba en la Universidad de Berkeley, California. La primera publicación aparecida sobre este tema data precisamente de 1965, en la revista *Information and Control*. [Zadeh 1965]. La motivación principal que indujo al prof. Zadeh a proponer esta teoría fue la necesidad de disponer de una herramienta capaz de tratar analíticamente cierto tipo de incertidumbres que, por sus características, no pueden manejarse correctamente en el marco de la teoría de probabilidades. A esta categoría pertenecen por ejemplo todas aquellas situaciones en las que los distintos parámetros se describen utilizando expresiones lingüísticas. En estos casos, todo el arsenal de técnicas matemáticas tradicionales poco puede hacer para razonar en base a estas expresiones, cosa que contrasta fuertemente con la facilidad con que los seres humanos las utilizamos para evaluaciones y toma de decisiones complejas, en ambientes a menudo hostiles. En resumen, la teoría de conjuntos difusos, tal como fue concebida y posteriormente desarrollada, pretende ser el entorno adecuado para realizar razonamientos exitosos en unas condiciones de incertidumbre parecidas a las que afrontan los seres humanos.

En sus orígenes, el éxito de esta nueva teoría entre la comunidad científica fue muy escaso. De hecho, desde su publicación tuvo que afrontar multitud de críticas concernientes básicamente a la utilidad de su formulación y a la falta de métodos sistemáticos de análisis y diseño. A ello contribuyó la falta de aplicaciones prácticas de esta teoría en los primeros años de su desarrollo. Sin embargo, esta situación empezó a cambiar a partir de 1974. En esa fecha, Ebrahim Mamdani, del Queen's Mary College Londinense, introdujo por primera vez la lógica difusa para resolver con éxito un problema de ingeniería, concretamente el control de la presión en la caldera de una turbina de vapor, proceso altamente no lineal. Por comparación, una solución utilizando técnicas de control convencionales daba como resultado un controlador que debía ser reajustado para conseguir las mejores prestaciones cada vez que cambiaba el punto de operación [Mamdani 1974]. Casi paralelamente, en 1975, Brémont presentaba en Francia su tesis doctoral, que usaba de una forma rudimentaria la teoría de conjuntos difusos en una aplicación de reconocimiento de voz [Brémont 1975], aunque esta contribución ha

permanecido prácticamente en el olvido hasta la fecha. A partir de entonces, las aplicaciones de esta nueva disciplina se han ido sucediendo, produciéndose una auténtica explosión de ellas desde los inicios de la década de 1990. Hoy en día se cuentan por centenares, si no por miles, los sistemas que se sirven de una forma u otra de la lógica difusa para realizar sus tareas en los ámbitos más diversos, como la medicina, automoción, electrodomésticos, economía, automatización industrial, electrónica, informática, geología, y un largo etcétera. Al respecto, están apareciendo ya buenos textos de recopilación, en los que se describen con detalle las aplicaciones más relevantes de la lógica difusa y se analizan las causas de su éxito frente a las soluciones tradicionales, caso de que existan [Terano 1994], [von Altrock 1995].

De entre todas estas disciplinas, las diversas ramas de la ingeniería han sido las que han constituido el terreno más fructífero en lo que a número de aplicaciones se refiere, llegándose a alcanzar desarrollos espectaculares. Aparte de las mencionadas de Mamdani y Brémont, de indudable interés científico-histórico pero que no pasaron de meros prototipos de laboratorio, el primer sistema difuso de uso comercial fue un sistema de control difuso que el que Jensen y Ostergaard instalaron en 1979 en un horno de cemento [Larsen 1981]. Posteriormente, Yasunobu y Miyamoto, de la Hitachi Corp., instalaron un sistema de control difuso en el ferrocarril metropolitano de Sendai, cerca de Tokio, en 1987 [Yasunobu 1985]. El sistema controlaba todos los parámetros de arranque y frenado de los trenes, mejorando aspectos clave como el confort de la conducción, el consumo de energía y la precisión en la parada respecto a los controladores convencionales PID. Más recientemente, Sugeno, del Instituto de Tecnología de Tokio, ha desarrollado un sistema de pilotaje automático controlado por voz para un helicóptero [Sugeno 1991]. El sistema obedece órdenes verbales como “subir”, “bajar”, “izquierda”, “derecha” y “sustentarse” (*hover*), y controla con ellas un modelo a escala cuyo rotor mide 1m de diámetro. También en el campo del control, pero en un plano más electrónico, Bonissone y su equipo de la General Electric han puesto a punto, entre otros, un sistema difuso de regulación para fuentes de alimentación conmutadas destinadas a satélites espaciales. El controlador difuso resultante es económico y presenta mejores características que sus antecesores [Bonissone 1995]. Ya en el terreno de productos de gran consumo, cada vez más empresas incorporan la lógica difusa en sus desarrollos, siendo emblemáticos en este sentido el sistema de estabilización

de imagen en videocámaras desarrollado por Panasonic, pero existen también sistemas difusos en las lavadoras de AEG, hornos microondas y cocedoras de arroz de Panasonic, o los sistemas ABS de Nissan, Mitsubishi y Nippondenso [von Altrock 1995].

Paralelamente ha habido también un fuerte impulso en el desarrollo de circuitos integrados que incorporan en mayor o menor medida facilidades para ejecutar operaciones propias de la lógica difusa, lo que ha permitido la miniaturización de las soluciones basadas en ella y su consiguiente penetración en el mercado de gran consumo. Los pioneros en la construcción de los citados circuitos integrados han sido Yamakawa, usando tecnología CMOS analógica [Yamakawa 1986], y Togai usando tecnología digital VLSI CMOS [Togai 1986]. Les han seguido otras empresas como Adaptive Logic, OKI, OMRON-NEC-Motorola, Siemens, Samsung-NeuraLogix, Micro Devices, etcétera. Puede encontrarse información referente a estas realizaciones en las referencias siguientes: [OMRON 1991], [Scholten 1994], [Terano 1994] y [Adaptive 1995]. En España, las primeras implementaciones *hardware* de procesadores difusos han sido realizadas principalmente en el Centro Nacional de Microelectrónica de Sevilla, tanto en tecnología digital [Sanchez-Solano 1994], como analógica [Barutone 1994], [Vidal 1994], [Vidal 1995], aunque rápidamente ya se han añadido a esta tendencia grupos de trabajo de otras universidades y centros de investigación.

En la actualidad, la inmensa mayoría de los sistemas difusos que se usan en ingeniería operan siguiendo el método de fuzzificación-inferencia-defuzzificación originalmente propuesto por Zadeh [Zadeh 1973] y mejorado posteriormente por otros investigadores. Como resultado de este proceso, cada una de las salidas de un sistema de inferencia difusa puede expresarse como una función no lineal *algebraica* de las entradas, es decir, dependiendo sólo del valor de éstas en el instante actual. Los sistemas de inferencia difusa son pues intrínsecamente *estáticos*, hecho que contrasta fuertemente con el entorno en que dichos sistemas suelen emplearse. En efecto, las aplicaciones anteriormente mencionadas muestran que multitud de soluciones difusas se construyen y utilizan en entornos *dinámicos*, los cuales son capaces de presentar comportamientos mucho más complejos que los sistemas estáticos. Cabe entonces preguntarse si el uso de sistemas difusos que podríamos llamar dinámicos -es decir, aquellos en que sus salidas dependan no sólo de los valores presentes de las entradas sino también de los pasados-, aportaría mejoras respecto a las soluciones difusas actuales. El ejemplo paradigmático de

lo que acaba de exponerse lo constituyen los sistemas de control automático clásico: en un sistema típico, el elemento de control más simple es un sistema algebraico lineal -una ganancia  $k$ - o no lineal -una función  $f(x)$ - que confiere al conjunto ciertas características entrada-salida, las cuales pueden ser inadecuadas para los fines que se persiguen. En estas circunstancias puede ser necesario recurrir a un controlador dinámico del tipo PID o similar, que sea capaz de superar las limitaciones de control de los sistemas algebraicos.

De hecho, la idea que acaba de exponerse no es reciente. Ya algunos años antes de que surgieran las primeras aplicaciones prácticas de la lógica difusa se describieron un tipo determinado de sistemas difusos dinámicos con el objetivo inicial de construir con ellos una teoría de control difuso. Sin embargo tales sistemas no se han utilizado nunca en la práctica. Las razones de ello, así como una breve panorámica de los trabajos aparecidos en este campo se tratan en la sección siguiente.

## **1.2 Panorámica histórica del estudio de sistemas difusos dinámicos**

Los sistemas difusos dinámicos fueron propuestos originariamente por Chang y Zadeh en 1972, con el objetivo inicial de construir con ellos una teoría de control difuso. La formulación utilizada se basaba en la fuzzificación de las ecuaciones de estado de los sistemas dinámicos tradicionales discretos, permitiendo que los valores de la entrada, el estado y la salida pudiesen ser difusos [Chang 1972]. Al igual que en un sistema dinámico tradicional el nuevo estado se expresa como una función del antiguo, en este caso el sistema se describía mediante una relación difusa<sup>1</sup>  $R$  entre el vector de estado en el instante  $n+1$  y los valores del estado y las entradas en el instante  $n$ :

$$R \in X \times U \times X$$

En estas expresiones,  $X$  es el vector de estado difuso, y  $U$  es el vector difuso de entrada. Dadas una situación de entrada y estado concretas, el nuevo estado se obtenía mediante

---

<sup>1</sup> Véase sección 2.5.4.

la composición<sup>2</sup> max-min entre la mencionada relación y el conjunto actual de estado/entrada formado por<sup>3</sup>  $X_n U_n$ , definido este último como el producto cartesiano difuso<sup>4</sup> entre los conjuntos  $X_n$  y  $U_n$ . Así, las ecuaciones de estado se expresan mediante

$$X_{n+1} = X_n U_n \circ R$$

Esta formulación daba lugar a sistemas dinámicos no lineales, cuyo análisis y diseño planteaban numerosos problemas. La principal cuestión a resolver era el desarrollo de métodos no heurísticos que fuesen capaces de predecir la dinámica del sistema controlado o bien aspectos importantes de la misma, como la estabilidad, controlabilidad o la posible aparición de ciclos límite.

Basándose en el modelo de Chang y Zadeh, Tong estudia posteriormente el comportamiento asintótico de los sistemas de control difusos y el problema del control, es decir, si mediante el uso de un sistema difuso adecuado se puede obtener la relación entrada-salida deseable para el sistema de control [Tong 1980]. Su análisis muestra que bajo ciertas condiciones se puede resolver la versión difusa del clásico problema de la retroacción de las variables de estado. La solución pasa por resolver una ecuación relacional difusa, problema cuya utilidad ya había sido destacada anteriormente por Elie Sánchez. Cumani muestra más tarde refinamientos al método de Tong reformulando la noción de sistema difuso desde un punto de vista posibilístico [Cumani 1982].

El problema de la estabilidad de los sistemas difusos dinámicos es tratado por varios autores, usando puntos de vista distintos. Así, Kickert y Mamdani [Kickert 1978] hacen uso de la función descriptiva para evaluar la estabilidad. Braae y Rutherford proponen el uso de las trayectorias en un plano de fase lingüístico para analizar y mejorar la estabilidad intercambiando las reglas de control [Braae 1979]. De Glas estudia el mismo problema aplicando una generalización del teorema de Lyapunov [De Glas 1984]. Kiszka y sus colaboradores, partiendo de la idea intuitiva de que un sistema dinámico es

---

<sup>2</sup> Véase sección 2.5.7.

<sup>3</sup> La notación es la utilizada por Tong en [Tong 1980].

estable si su energía total almacenada decrece de forma monótona hasta un cierto equilibrio, definen los conceptos de *energía de un conjunto difuso* y *energía de una relación difusa*, construyendo a partir de ellos su método para determinar la estabilidad [Kiszka 1985].

A todos estos métodos, Chen i Tsao ([Chen 1989]) objetan que el uso de la composición max-min, que es no lineal, no permite obtener el comportamiento del sistema a largo plazo. Según ellos, cuando un sistema dinámico se describe de forma recursiva, como sucede en la representación de estado, la acumulación de composiciones max-min hace virtualmente imposible la observación de la dinámica del sistema porque deforma excesivamente la distribución inicial de funciones de pertenencia. En su trabajo proponen un método totalmente distinto para describir el comportamiento dinámico de los sistemas difusos. El método utilizado se basa en el *mapeado celda a celda* propuesto anteriormente por Hsu ([Hsu 1980]), y consiste básicamente en discretizar el espacio de fase dividiéndolo reticularmente en celdas contiguas, y asignar a cada punto de una celda la dinámica correspondiente al punto central. Así se dividen las celdas en tres categorías: celdas pertenecientes a movimientos periódicos, celdas pertenecientes al dominio de atracción de un movimiento periódico y celdas inestables. De esta forma queda caracterizada de forma somera la evolución de la dinámica partiendo de un estado determinado.

En otro orden de cosas, Patrick Grim muestra que sistemas difusos retroalimentados pueden presentar fenómenos propios de la dinámica no lineal, como el caos [Grim 1993]. Para ello, calcula el grado de verdad de expresiones paradójicas desde un punto de vista clásico, como:

“Esta afirmación es falsa”

Si bien Grim no trabaja explícitamente con sistemas difusos dinámicos en el sentido de Chang y Zadeh [Chang 1972], la dinámica aparece de forma implícita debido al proceso de discretización y retroacción.

---

<sup>4</sup> Véase ecuación (2.71).



Sin embargo, a pesar del indudable valor teórico de todas estas aportaciones, ninguna de ellas ha propiciado la aparición de aplicaciones fundamentadas en este tipo de sistemas difusos dinámicos. En nuestra opinión, ello se debe a los siguientes motivos:

- a) La relación entrada-salida de estos sistemas se describe en base a una relación difusa, y no en base a un conjunto de reglas *if-then*. Si bien en la sección 3.2.3 se muestra que estas dos formulaciones son equivalentes, lo cierto es que puede ser difícil, sino imposible, establecer el conjunto de reglas que permitan encontrar el nuevo estado a partir del antiguo, dado que en la mayoría de ocasiones la información que se tiene sobre el proceso es incompleta. A lo sumo se llega a expresar de forma lingüística la relación entre entrada y salida, y no se dispone de elementos para determinar parámetros esenciales del sistema, como por ejemplo el número de estados que debe poseer.
- b) Aunque se llegaran a determinar completamente las ecuaciones de estado difuso que describen al sistema, cada nuevo estado debe determinarse recursivamente en función de los anteriores, dado que no ha sido posible determinar una solución analítica del mismo en forma de expresión cerrada. Ello conlleva que las únicas implementaciones posibles del método son forzosamente discretas.

Debido a ello, los únicos sistemas difusos que se han utilizado en la práctica han sido y esta línea de investigación está cayendo actualmente en desuso.

### **1.3 'Dinamización' de los sistemas difusos tradicionales.**

Sin embargo, existe en teoría otra vía para conseguir sistemas difusos dinámicos: la que, partiendo de un sistema difuso algebraico tradicional, le agrega dinámica permitiendo razonamientos no sólo en base a los valores actuales de las entradas, sino también en base a valores anteriores, **con la importante condición de que los conceptos temporales "actual" y "anterior" puedan ser también difusos**. Esta nueva metodología ha sido propuesta originariamente por Qian hace sólo 5 años [Qian 1992], junto con un método heurístico para realizar la inferencia difusa en presencia de los

citados conceptos temporales. Lo más sorprendente en este caso es que tal línea de investigación no ha tenido continuidad hasta la fecha. A nuestro entender, tres son los motivos principales de este reducido interés por el tema: En primer lugar no existe unanimidad entre los estudiosos de la lógica difusa acerca de cómo deben definirse y manipularse los conceptos temporales difusos. En segundo lugar, tampoco está claro cómo deben integrarse estos nuevos conceptos con los ya existentes en las reglas difusas sin variar demasiado el método de inferencia utilizado hasta ahora. Finalmente es evidente que en este caso se obtienen también sistemas dinámicos no lineales, cuya utilización se ve frenada por comparación con la mala acogida que tuvieron los anteriores. Sin embargo, este tipo de sistemas son estructuralmente distintos a los anteriores y, como se mostrará posteriormente en esta tesis, existe una poderosa interpretación de los mismos que facilita enormemente las tareas de diseño.

Aunque nadie excepto Qian ha intentado incorporar el tiempo en los sistemas de inferencia difusa tradicionales, varios autores han constatado la necesidad de proponer formulaciones para poder manejar información temporal imprecisa. En efecto, el tratamiento que ha recibido tradicionalmente el concepto de *tiempo* en las diversas disciplinas científicas -como una variable que toma valores en el conjunto de los números reales- ha sido suficiente para llegar al estado de desarrollo actual de la ciencia y de la técnica, y lo seguirá siendo por mucho tiempo en el futuro. Sin embargo a lo largo de este período se han suscitado no pocos problemas en donde la representación y manejo tradicionales del tiempo no son las más adecuadas. Esto sucede principalmente en aquellas situaciones en las que los conceptos temporales involucrados no pueden determinarse con precisión debido a la inherente incertidumbre presente en el problema.

A modo de ejemplo, pueden citarse las siguientes situaciones:

- ◆ En una consulta de una cierta base de datos se quieren recuperar una serie de registros en base a sus fechas, pero no se desea precisar con exactitud los límites del período a consultar. Puede preferirse, por ejemplo, buscar en el ordenador de una hemeroteca los artículos sobre el naufragio del *Titanic* como "*aquellos artículos aparecidos en los días posteriores al 15 de abril de 1912*", sin cortar en una

fecha concreta, pero considerando con importancia decreciente los artículos a medida que se alejen de la mencionada fecha.

- ◆ En un sistema automático de ayuda al diagnóstico médico, una misma patología puede provocar en distintos pacientes síntomas variables en cuanto duración e intensidad. Resulta por ello necesario considerar estas imprecisiones en los algoritmos de identificación de tal o cuál enfermedad, algo que un médico realiza de forma cotidiana.
- ◆ En el desarrollo de un sistema de control difuso, el experto encargado de generar las reglas lingüísticas de control puede tener la necesidad de incorporar en ellas conceptos temporales difusos, como “antes” y “ahora”, en lugar de usar el método habitual de razonar en base a las derivadas e integrales de las señales de entrada.

Como puede apreciarse, la mayoría de los casos descritos pertenecen a los campos de la inteligencia artificial, sistemas expertos, consulta de bases de datos, etc., en los que la teoría de conjuntos difusos ha tenido bastante implantación. Resulta, pues, de interés desarrollar métodos que permitan describir y manejar información temporal imprecisa en el mismo entorno general de la teoría de conjuntos difusos. Dado que éste constituye uno de los puntos de partida de esta tesis, las aportaciones más relevantes en este ámbito se tratan en un capítulo posterior.

Tomando como base una adecuada modelación de los conceptos temporales difusos pueden definirse sistemas difusos dinámicos con sólo incorporar estos conceptos en las reglas difusas tradicionales. Como ejemplo considérese la regla difusa siguiente:

Si  $x$  era grande **hace unos minutos**, entonces hacer la salida pequeña

En ella se especifica no sólo que la variable  $x$  debe de tomar valores elevados, sino que además se acota el intervalo temporal en que debe tomarlos. Sin embargo, al igual que sucede con la amplitud, este intervalo se define de forma lingüística, por lo que el proceso de determinar si  $x$  fue grande en ese tiempo no será una tarea trivial.

Resulta evidente que los sistemas difusos cuyas reglas tengan una estructura como la anterior son dinámicos, pues su salida dependerá no sólo de las entradas actuales, sino también de las anteriores, combinadas adecuadamente en función de cómo sean los conceptos temporales involucrados. Si además la salida del sistema se lleva a una de las entradas, se obtendrá un sistema dinámico retroactivo.

La presente tesis profundiza en el estudio de este tipo de sistemas difusos dinámicos al efectuar:

- a) La propuesta de una forma sencilla y sistemática de representar los conceptos temporales difusos que se manejarán en entornos de ingeniería, y una metodología para incorporar estos conceptos en las reglas difusas clásicas.
- b) La derivación de un algoritmo para realizar la inferencia difusa en presencia de conceptos temporales difusos en las reglas. Dicho algoritmo se presenta en dos versiones, adaptadas a casuísticas diferentes: en la primera de ellas el núcleo central es una *convolución* clásica, con lo que puede realizarse utilizando circuitos lineales. La segunda la hemos bautizado con el nombre de *convolución difusa*, y se puede obtener de la anterior sustituyendo las sumas y productos por máximos y mínimos. En este caso las realizaciones requieren el uso de circuitos no lineales. La principal ventaja del citado algoritmo es que preserva en esencia la anterior estructura del sistema de inferencia difusa, requiriendo sólo la adición de un circuito a la salida del fuzzificador.
- c) La interpretación del algoritmo en términos de lo que se ha dado en llamar *patrones de concordancia espacio-temporal*, que constituyen una potente herramienta para el diseño de este tipo de sistemas.
- d) El estudio de las realizaciones físicas de los circuitos que permiten realizar adecuadamente las citadas convoluciones.

- e) El desarrollo de una aplicación en el que la propuesta de esta tesis resulta de utilidad para conseguir una solución sencilla a un problema real y concreto.

#### **1.4 Organización de la Tesis**

En los más de 30 años de historia de la teoría de conjuntos difusos han aparecido multitud de artículos, libros y otras publicaciones que trataban los distintos aspectos de la misma, desde los más teóricos a los más aplicados. Sin embargo, sólo una pequeña parte de todos ellos se utiliza cotidianamente en las aplicaciones de ingeniería. En el capítulo 2 la discusión se centra precisamente en estos últimos, y muy en particular los que se utilizarán en el diseño e implementación de los sistemas temporales difusos, objetivo de esta tesis.

Dado que la finalidad de esta tesis es estudiar cómo debe realizarse la inferencia difusa en presencia de conceptos temporales, en el capítulo 3 se muestran las bases de este proceso para el caso clásico, tratándose aquellos puntos relacionados con la regla composicional de inferencia, como las funciones de implicación y la lógica difusa en general. Se presta especial énfasis a las implementaciones prácticas de los sistemas de inferencia difusa en el entorno de ingeniería, puesto que éste es el ámbito en el que se inscriben los desarrollos efectuados en la presente tesis.

En el capítulo 4 se presenta una nueva técnica, propuesta por el autor [Mas 1995], [Mas 1996], para sintetizar sistemas difusos dinámicos. Dicha técnica se basa en la introducción de conceptos temporales difusos en las reglas difusas tradicionales, por lo que previamente se analizan las distintas metodologías existentes para la representación difusa del tiempo y en base a ellas se efectúa una propuesta propia que tiene en cuenta las particularidades del entorno de ingeniería. La particularidad de este entorno es que los sistemas a utilizar reciben a sus entradas un flujo constante de datos (ya sea discreto o continuo) que se pueden modelar mediante funciones nítidas del tiempo. Son nítidas porque dichos datos proceden generalmente de *sensores* que nos proporcionan una salida eléctrica o numérica precisa. Ocurre algo parecido con los *actuadores* que debemos excitar con las salidas de nuestros sistemas. Por esos motivos, los sistemas difusos utilizados deberán contar obligatoriamente con una etapa fuzzificadora y otra

defuzzificadora que deberemos tomar en consideración en los algoritmos de inferencia que se propongan. Asimismo los sistemas utilizados en ingeniería son siempre *causales*, con lo que los algoritmos propuestos deberán preservar esa característica. Estas consideraciones se discuten en la sección 4.3.

Posteriormente se muestra cómo estos conceptos temporales se incluyen dentro de las reglas difusas tradicionales y se deducen unos algoritmos para realizar el proceso de inferencia en esta nueva situación. Las expresiones resultantes resultan tener forma de convolución, tanto en su forma lineal clásica como en una nueva versión no lineal de la misma que hemos llamado *convolución difusa*.

Sin detenernos simplemente en el plano teórico, una vez obtenidas las expresiones matemáticas para manejar conceptos temporales imprecisos, es preciso describir cómo llevar a cabo la mecanización de los algoritmos, tanto en diagrama de bloques como llegando a la realización física de los circuitos involucrados. Esto se lleva a cabo en la sección 4.5, en la que se proponen unas estructuras circuitales para realizar las citadas convoluciones. Tales estructuras presentan la ventaja fundamental de preservar en gran medida la configuración de los sistemas de inferencia difusa tradicionales, siendo el único requerimiento adicional la inserción de un circuito dinámico a la salida de cada fuzzificador. Este circuito es un simple filtro lineal en el caso de la convolución clásica y un circuito no lineal en el caso de la convolución difusa. Termina el capítulo con la puesta en evidencia de una interesante interpretación del sistema resultante, que permite una forma sencilla de diseñarlo.

En el método desarrollado, los distintos conceptos temporales difusos deben de realizarse como respuestas al impulso de circuitos dinámicos. Ello plantea el problema de disponer de circuitos cuya respuesta impulsional coincida con la deseada. En el caso general no será posible conseguir tales circuitos, por lo que deberá recurrirse a encontrar aquellos que mejor aproximen las citadas respuestas. Para ello en el capítulo 5 se exponen dos técnicas básicas para lograrlo. La primera se basa en la teoría de aproximantes de Padé, y la segunda utiliza métodos de optimización para refinar la solución obtenida en aquellos casos en que sea necesario.

En el capítulo 6 se demuestra la utilidad práctica de los resultados de esta tesis mediante la resolución de un problema real: el reconocimiento de palabras aisladas. Dadas las características del problema, la solución puede obtenerse fácilmente

Finalmente, en los capítulos 7 y 8 se detallan las conclusiones de la tesis, las líneas futuras de investigación que con ella se han generado y la bibliografía utilizada. En este último punto se han incluido no sólo aquellas obras a las que se hace referencia en el texto, sino también algunas que, por su especial interés, se han consultado a lo largo de la realización de esta tesis.