

**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

Resumen

Desde su aparición a mediados de los años 60, la Teoría de Conjuntos Difusos se ha venido aplicando con éxito a la resolución de problemas en ámbitos muy diversos, que resultan difíciles de tratar con los métodos clásicos, principalmente por la presencia de *incertidumbres no aleatorias* en su descripción. En estos casos, el problema no tiene una solución cerrada en forma de expresión matemática, pero sí suele tenerla en forma de un conjunto de *reglas* expresadas en lenguaje natural y, por consiguiente, impreciso. Un ejemplo típico es el problema de conducir un automóvil.

En el ámbito de la ingeniería, el núcleo de cualquier solución difusa actual es un *sistema lógico difuso*, encargado de obtener las salidas a partir de las entradas en un proceso de tres etapas: fuzzificación, inferencia y desfuzzificación. Hasta la fecha, la totalidad de sistemas difusos efectúan sus razonamientos basándose solamente en los valores actuales de las entradas. Ello ha dado como resultado que los sistemas de inferencia difusa sean, desde el punto de vista matemático, sistemas *no lineales algebraicos*. Este hecho contrasta fuertemente con el entorno en que dichos sistemas suelen emplearse. En efecto, la mayoría de aplicaciones 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 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.

En esta tesis se ha desarrollado una metodología para incorporar conceptos temporales difusos a los sistemas de inferencia difusa tradicionales. Para ello se ha propuesto una forma simple y eficaz de representar los citados conceptos en un entorno de ingeniería. Posteriormente se ha mostrado cómo introducirlos en las reglas difusas tradicionales, y se ha desarrollado un algoritmo para efectuar la inferencia en esta nueva situación. Se obtienen finalmente dos algoritmos distintos para dos casos diferenciados, pero ambas expresiones presentan la interesante propiedad de poder interpretarse como una convolución, tradicional en uno de los casos y una nueva forma que hemos

denominado *convolución difusa* para el otro caso. Estas expresiones se pueden realizar por tanto de una forma muy elegante mediante circuitos analógicos o digitales.

La metodología desarrollada requiere que los conceptos temporales difusos que se manejan deban realizarse mediante la respuesta impulsional de un circuito lineal. Ello remite al problema del diseño de filtros desde el punto de vista temporal, mucho menos estudiado que desde el punto de vista frecuencial. A resultas de ello se dedica una parte de la presente tesis a establecer las pautas a seguir en el proceso de diseño de dichos filtros, valiéndose de técnicas de aproximación y de optimización.

Finalmente se presentan un ejemplo de aplicación, de interés tanto teórico como práctico. En él se presenta un sistema de reconocimiento simple de comandos verbales, basado en las técnicas propuestas en la presente tesis. Los resultados obtenidos han mostrado que con una estructura muy simple es posible obtener una discriminación más que suficiente entre las órdenes programadas, con la ventaja que presenta el realizar el sistema de forma totalmente analógica.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PRESENTACIÓN	2
1.2 PANORÁMICA HISTÓRICA DEL ESTUDIO DE SISTEMAS DIFUSOS DINÁMICOS.....	5
1.3 'DINAMIZACIÓN' DE LOS SISTEMAS DIFUSOS TRADICIONALES.....	8
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	12
2. ASPECTOS DE TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS	15
2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 TERMINOLOGÍA.....	17
2.3 CONJUNTOS	19
2.3.1 Conjuntos clásicos: Definiciones básicas.....	19
2.3.2 Conjuntos difusos: Definiciones básicas.	22
2.4 OPERACIONES SOBRE CONJUNTOS.....	35
2.4.1 Operaciones sobre conjuntos nítidos.....	35
2.4.2 Operaciones sobre conjuntos difusos.	37
2.5 RELACIONES	47
2.5.1 Producto Cartesiano de conjuntos nítidos.....	47
2.5.2 Relaciones nítidas.....	48
2.5.3 Composición de relaciones nítidas.....	49
2.5.4 Relaciones difusas.	52
2.5.5 Proyección de una relación.	54
2.5.6 Extensión cilíndrica de una relación.....	55
2.5.7 Composición de relaciones difusas.	56
2.6 FUNCIONES.	62
2.6.1 Función clásica. Generalización del concepto.....	62
2.6.2 Función de un conjunto difuso. Principio de extensión.	65
2.7 TEORÍA DE LA POSIBILIDAD	70
2.7.1 Introducción.	70
2.7.2 Medida y distribución de posibilidad.....	71
2.7.3 Relación entre posibilidad y probabilidad.	75
3. LÓGICA DIFUSA	79
3.1 INTRODUCCIÓN.....	81
3.2 LA IMPLICACIÓN.....	85

3.2.1 Implicación nítida.....	85
3.2.2 Implicación difusa.....	86
3.2.3 Implicación difusa como relación difusa.....	87
3.3 MODOS DE RAZONAMIENTO EN LÓGICA CLÁSICA.....	89
3.3.1 Modus Ponens.....	90
3.3.2 Modus Tollens.....	90
3.3.3 Silogismo Hipotético.....	91
3.4 RAZONAMIENTO APROXIMADO. REGLA COMPOSICIONAL DE INFERENCIA.....	92
3.5 RAZONAMIENTO APROXIMADO EN INGENIERÍA. LAS IMPLICACIONES DE MAMDANI Y LARSEN.....	96
3.6 SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA.....	98
4. RAZONAMIENTO DIFUSO TEMPORAL.....	107
4.1 INTRODUCCIÓN.....	109
4.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN LA REPRESENTACIÓN DE CONCEPTOS TEMPORALES IMPRECISOS.....	111
4.2.1 Lógica Temporal de Allen [Allen 1984].....	111
4.2.2 Lógica Temporal Difusa de Dutta [Dutta 1988].....	112
4.2.3 Modelo de tratamiento de información temporal difusa de Dubois y Prade [Dubois 1989].....	113
4.2.4 Modelo y lenguaje para el tratamiento difuso del tiempo, de Barro, Marín, Mira y Patón [Barro 1994].....	116
4.2.5 Sistemas difusos dinámicos de Qian [Qian 1992].....	117
4.3 CONCEPTOS TEMPORALES DIFUSOS EN INGENIERÍA.....	120
4.3.1 Hipótesis básicas en un entorno de ingeniería.....	120
4.3.2 Métodos de descripción del tiempo.....	129
4.3.3 Conceptos temporales difusos exclusivos.....	129
4.3.4 Conceptos temporales difusos inclusivos.....	131
4.3.5 Distancias o longitudes temporales.....	132
4.3.6 Relaciones entre conceptos temporales.....	133
4.3.7 Reglas temporales difusas.....	136
4.4 INFERENCIA EN PRESENCIA DE CONCEPTOS TEMPORALES DIFUSOS.....	138
4.4.1 Preliminares.....	138
4.4.2 Grado de compatibilidad como grado de solapamiento.....	147
4.4.3 Grado de compatibilidad como grado de inclusión.....	148
4.5 IMPLEMENTACIONES DE LOS ALGORITMOS.....	151
4.5.1 Preliminares.....	151
4.5.2 Determinación del grado de inclusión.....	152
4.5.3 Determinación del grado de solapamiento.....	161

4.6 VALORACIÓN E INTERPRETACIONES DE LOS MÉTODOS DESARROLLADOS	165
5. DISEÑO DE CIRCUITOS PARA LA REALIZACIÓN DE CONCEPTOS	
TEMPORALES DIFUSOS	173
5.1 INTRODUCCIÓN	175
5.2 EL MÉTODO DE PADÉ	176
5.2.1 Descripción del método	176
5.2.2 Aproximación de Padé de funciones lineales a tramos	176
5.2.3 Determinación del aproximante de Padé	179
5.2.4 Resultados obtenidos con la aproximación de Padé	182
5.3 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	186
5.3.1 Conceptos generales	186
5.3.2 Formulación del problema de optimización	187
5.3.3 Breve panorámica de los métodos de optimización	188
5.3.4 La optimización en el ajuste de la respuesta impulsional	190
5.3.5 Determinación de la función error	191
5.3.6 Cálculo de los gradientes	193
5.3.7 Escalado de valores	195
5.3.8 Ejemplo de aplicación	196
5.4 DISEÑO DEL CIRCUITO A PARTIR DE LA RESPUESTA IMPULSIONAL	198
6. APLICACIÓN AL RECONOCIMIENTO DE VOZ	201
6.1 INTRODUCCIÓN	203
6.1.1 El problema del reconocimiento del habla	203
6.1.2 Conjuntos difusos en el reconocimiento de voz. Perspectiva histórica	206
6.1.3 Ventajas de un enfoque temporal difuso	210
6.2 ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA	213
6.3 ADQUISICIÓN Y PREPROCESADO DE LA SEÑAL VOCAL	214
6.4 PARAMETRIZACIÓN	218
6.5 CLASIFICACIÓN DE FONEMAS	220
6.6 DISCRIMINADOR BASADO EN CONCEPTOS TEMPORALES DIFUSOS	225
6.7 RESULTADOS	231
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	237
7.1 CONCLUSIONES	239
7.2 LÍNEAS FUTURAS:	241
8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	242