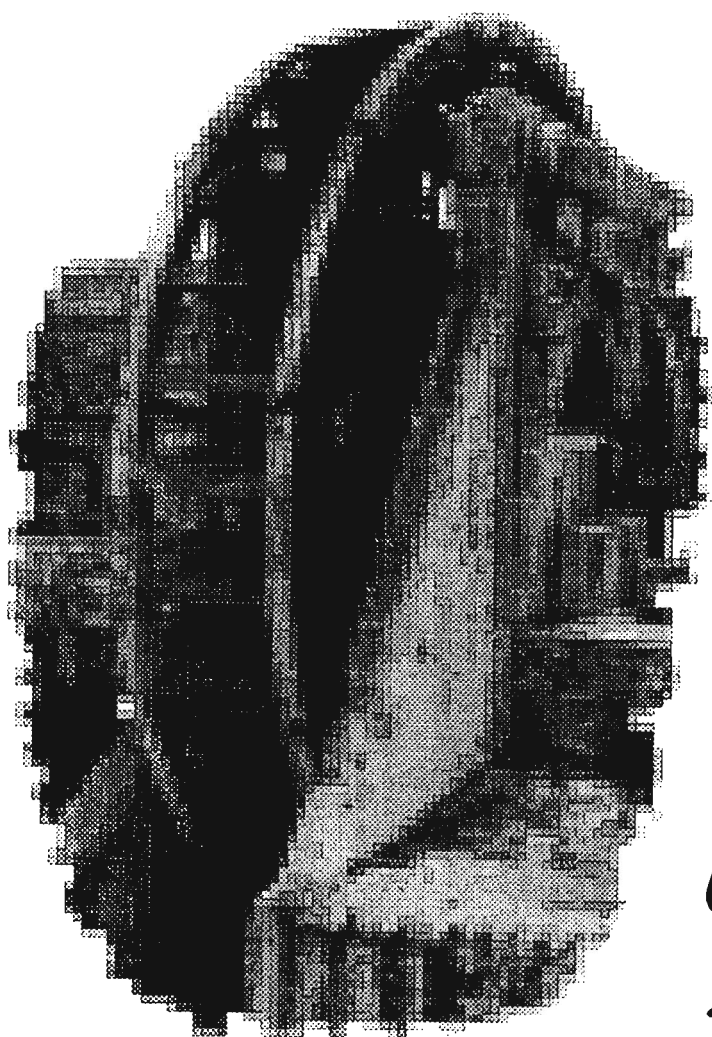


TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA FUZZY



estylf
95

I Jornadas sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy

Universidad de Murcia

TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA FUZZY

I Jornadas sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy

**En el Marco del V Congreso
Español sobre Tecnologías y
Lógica Fuzzy**

estylf
95

Organiza :



Dpto. Informática y Sistemas
Facultad de Informática
Universidad de Murcia

Fundación Universidad Empresa de Murcia

Transferencia de Tecnología Fuzzy

Editores:

Fernando Martín Rubio
Fernando Jiménez Barrionuevo
Luis D. Hernández Molinero
Ramón Ruiz Merino

I Jornadas sobre
Transferencia de
Tecnología Fuzzy

19, 20 y 21 de Septiembre de 1995
Dpto. Informática y Sistemas.
Facultad de Informática
Universidad de Murcia
Espinardo - Murcia

Entidades Patrocinadoras

Instituto de Fomento de la R. de Murcia
Universidad de Murcia
DGICYT
General Electric Plastics, S.A.
Repsol Petróleo, S.A.
CajaMurcia
INTI, S.A.

Entidades Colaboradoras

Logic Murcia, S.L.
Excmo. Ayuntamiento de Murcia
Consejería de Turismo de la R. de Murcia
Cámara de Comercio de Murcia
Euronova Convenciones
Pedro Domecq, S.A.

Auspiciado por:

Asociación Española de Tecnologías y Lógica Fuzzy
International Fuzzy Systems Association

©Editores: Fernando Martín Rubio
Fernando Jiménez Barrionuevo
Luis D. Hernández Molinero
Ramón Ruiz Merino
Universidad de Murcia
ISBN : 84-7684-627-4
D.L. MU-1242-1995

Indice

Prefacio	iii
Comité Organizador	v
Conferencias Invitadas	
Fuzzy Logic Controllers <i>Mamdani, E.H.</i>	3
Fuzzy controllers and fuzzy expert systems: Industrial applications of fuzzy technology <i>Bonissone, P.</i>	11
Sesión sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy	
Investigación y transferencia de tecnología en el IIIA <i>Esteve, F.</i>	23
Seven years of fuzzy logic technology and industrial applications at IAI-CSIC <i>García-Alegre, M.C.</i>	25
Las tecnologías fuzzy en la Universidad de Granada <i>Vila, A.</i>	35
I+D en lógica y tecnología fuzzy en la Universidad de Murcia <i>Ruiz, R.; Gómez, A.F.</i>	45
Sesión Invitada sobre Aplicaciones del Control Fuzzy	
Diseño de controladores borrosos robustos a partir de datos experimentales y el conocimiento heurístico del proceso <i>García-Cerezo, A.; Ollero, A.</i>	63
Controlador Inteligente para procesos industriales complejos. Aplicación a un horno de cemento. <i>Martínez, M.; Albertos, P.; Navarro, J.L.</i>	77
Conextivos Mixtos de la lógica borrosa para la coordinación en control fuzzy <i>Aguilar, J.; Hernández, J.C.</i>	89
Demostraciones de Software	
Fuzzy Demonstrations Zentrum Dortmund <i>Albersmann, R.; Felix, R.</i>	95
GENIAVIS: Modelo de algoritmo genético para el análisis de inventario con programación visual <i>López, E.; Mendaña, C.; Rodríguez, M.A.</i>	101
SCD: Una herramienta gráfica para el estudio de controladores difusos <i>Cárdenas, E.; Castillo, J.C.; Cordón, O.; Herrera, F.; Peregrín, A.</i>	103
Un sistema basado en redes de restricciones borrosas para la selección de productos fitosanitarios <i>Túnez, S.; Del Aguila, I.; Bosch, A.; Bienvenido F.; Marín, R.</i>	107
Indice de Autores	105

Prefacio

Este volumen recopila los textos de las conferencias y ponencias invitadas presentadas durante la celebración de las I Jornadas sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy, así como información adicional sobre las demostraciones de software y hardware realizadas.

Las Jornadas se insertan en el marco del V Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, cuyas sucesivas ediciones han reflejado el continuo progreso de la investigación fuzzy en nuestro país. Ambos eventos están auspiciados por la Asociación Española de Tecnologías y Lógica Fuzzy, teniendo además el reconocimiento oficial de la International Fuzzy Systems Association (IFSA).

Las I Jornadas sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy están abiertas hacia empresas e industrias interesadas en el tema, y tienen un carácter esencialmente informativo y exploratorio. El objetivo básico es contribuir a una labor de diseminación de la tecnología fuzzy hacia la sociedad previamente iniciada por la Asociación Española de Tecnologías y Lógica Fuzzy, y recogida dentro de sus estatutos. Objetivos concretos son: realizar una labor divulgativa acerca de las posibilidades de aplicación de la tecnología fuzzy en el entorno empresarial e industrial; dar a conocer el estado actual de la I+D fuzzy en nuestro país; explorar la potencial demanda de transferencia de tecnología fuzzy hacia nuestro entorno, y promover la interacción entre universidades y empresas facilitando una inmejorable ocasión de realizar contactos. Como actividades para alcanzar estos objetivos se han diseñado: conferencias, demostraciones de hardware y software, sesiones invitadas y una mesa redonda. Se busca con ello un equilibrio entre actividades de carácter informativo, actividades de análisis y discusión, y actividades con un enfoque práctico.

En 1995 se cumplen exactamente 30 años de la publicación del histórico trabajo del Prof. Zadeh alumbrando la teoría de los Fuzzy Sets. Desde entonces, el progreso en fundamentos teóricos y en metodología ha sido notable, con una muy digna contribución desde nuestro país. Notable ha sido también el profundo impacto de la tecnología y las aplicaciones fuzzy sobre el sector comercial, empresarial e industrial en países como Japón o Estados Unidos, y en ciertos países europeos. El número de patentes comercializadas ha crecido extraordinariamente en los últimos años, representando un volumen de negocio cercano a los 15.000 millones de dólares. El potencial existente en nuestro país debe tener también su reflejo en los correspondientes sectores productivos españoles. Esperamos que el Congreso y las Jornadas contribuyan a acelerar este proceso y a preparar el terreno para iniciativas más ambiciosas.

Los editores queremos manifestar nuestro agradecimiento a todos aquellos que, con su contribución generosa y desinteresada han hecho posible la realización de las Jornadas. Reciban nuestra más especial gratitud los conferenciantes y ponentes invitados, por su valiosa aportación, los miembros del Comité Organizador por su abnegada labor. Nuestro agradecimiento se extiende a la junta directiva de la Asociación Española de Tecnologías y Lógica Fuzzy, a la International Fuzzy Systems Association, y a los Vicerrectorados de Investigación, de Extensión Universitaria, y de Economía y Finanzas de la Universidad de Murcia.

Es necesario agradecer también a las siguientes entidades y empresas su colaboración en el congreso y las jornadas: Departamento de Informática y Sistemas, Facultad de Informática de la Universidad de Murcia, DGICYT, Excelentísimo Ayuntamiento de Murcia, Logic Murcia, S.L.,

Consejería de Turismo de la Región de Murcia, Cámara de Comercio de Murcia, Pedro Domecq, S.A., INTI y Convenciones Euronova. Por último, agradecemos la colaboración de la Fundación Universidad-Empresa de Murcia en la organización de las Jornadas, y la generosa aportación de los patrocinadores de las Jornadas: Instituto de Fomento de la Región de Murcia, General Electric Plastics, S.A., Repsol Petróleo, S.A. y CajaMurcia.

Fernando Martín
Fernando Jiménez
Luis Daniel Hernández
Ramón Ruiz

Comité Organizador

D. Roque Marín (Coordinador)

D. Fernando Martín

D. Ramón Ruiz

D. José Manuel Cadenas

D. Antonio Gómez

D. Fernando Jiménez

D. Luis Daniel Hernández

D. Alberto Ruiz

Conferencias Invitadas

Fuzzy Logic Controllers

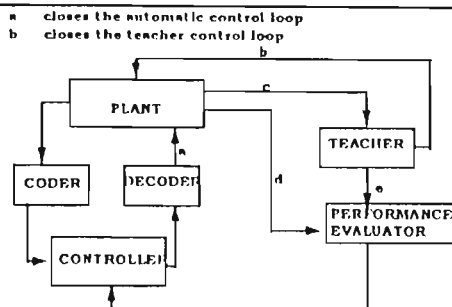
E.H. Mamdani

CONTENT

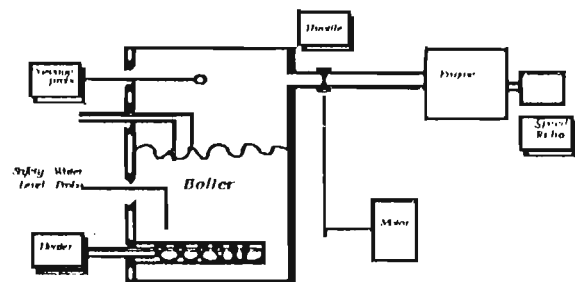
1. Background to the development of FLC
2. The early steps towards commercialisation
3. Commercial developments in Japan
4. Various applications of FLC to-day
5. Key ideas of FLC
6. Future possibilities

- ◆ In early 1970s (1971 to 1974) we were not concerned with applying Fuzzy set theory
- ◆ The main motivation of our research was to study learning control of complex plants
- ◆ Strong academic links between QMC(W) and DTH supported by the British Council
- ◆ Rapid commercialisation of the ideas in Denmark

Teacher controls the plant while training and controller loop is not closed



The Steam Engine Plant



Results with a Bayesian Controller

The controller attempted to learn the probabilities of action given the state of the plant, based on the teacher's actions.

- ◆ With human supervised training very poor results are obtained
 - ◆ The convergence of the controller is poor and the rate of convergence is unacceptably slow.
- The reasons are:
- ◆ The human when controlling the transient response has a very unpredictable behaviour
 - ◆ He therefore teaches conflicting actions to the controller
 - ◆ The human can analyse the control situation and provide useful instructions on how to control a plant

The human can analyse the control situation and provide useful instructions on how to control a plant

He only finds it difficult to demonstrate his competence faultlessly

we conclude that

the real obstacle is not having the means for a linguistic communication between man and machine

Zadeh's papers provided us with the answers we were looking for

The fuzzy logic controller only took 2 days to implement and its good performance "surprised" us.

With the fuzzy controller we had built a simple expert system before that terminology was invented.

Within a very short period after our research a young graduate in Denmark joining his first company (Cement Kiln Company) had commercially exploited the technique.

7

An example of linguistic instruction

1. When the burning zone temperature is drastically low:
 - (a) reduce kiln speed;
 - (b) reduce fuel.
2. When the burning zone temperature is slightly low:
 - (a) increase I.D. fan speed
 - (b) increase fuel rate"

The steam engine control rule example:

"If the pressure error is positive big and the change in pressure error is not negative medium

Then make the heat change negative big"

8

Key Dates

1965	First paper by Zadeh on Fuzzy sets	1987	Announcement of the Fuzzy chip by Omron
1974	First paper on Fuzzy Control	1988	Fuzzy control on Senda Railway
1976	Sugeno at Queen Mary College for 8 months working on a DIT (Warren Springs Lab. grant)	1989	LIFE robotRobo-4 under MITI support with Prof. Terano as Director
1977	FHM at Tokyo Institute of Technology for four months in Professor Terano & Prof. Sugeno's Lab. - Tokyo	1990	Many consumer products in Japan using fuzzy control
1978	Fuzzy Control of Cement Kilns by T.L.Siddhik & Co. of Denmark	1991	Several other industrial applications of Fuzzy control in Japan
1981-1987	Japanese research workers at Queen Mary College	1991	Large scale developments in Germany and USA
		1992	The Sugeno Helicopter project

9

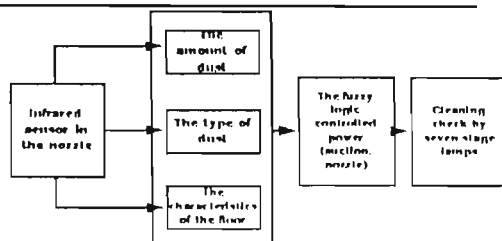
Fuzzy Home electronics in Japan (1990)

	Matsushita (Panasonic)	Hitachi	Toshiba	Sanyo	Nitronbild	Sharp	Sony
Washing Machine	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Cloth dryer	✓		✓	✓			
Vacuum cleaner	✓	✓	✓	✓			
Microwave	✓	✓	✓	✓	✓		
microwave oven refrigerator	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
air conditioners	✓	✓	✓	✓			
Automatic heater	✓	✓		✓			
video camera	✓			✓			
TV				✓			✓

Camera	Canon,	Olympus
automobile	Nissan,	Isuzu

10

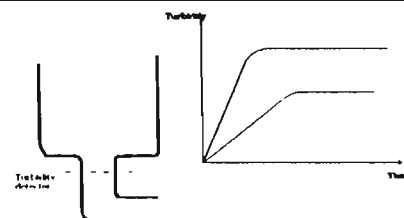
Fuzzy logic in a vacuum cleaner



- The amount of dust - Infrared signal strength
- The Type of dust - cotton, sand etc from width of signal pulses
- The characteristic of floor - carpet (fuzzy or not), Nonfling mat etc. from the changing pattern of of the amount of dust.

11

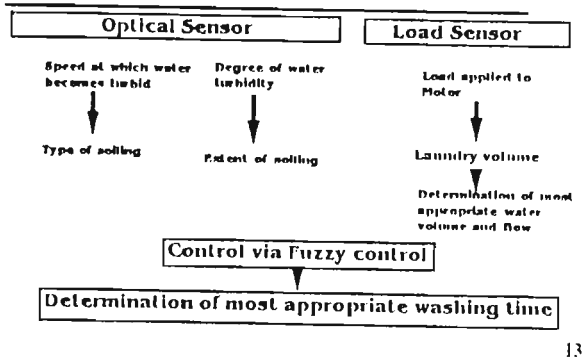
How Fuzzy Logic technology works in washing



- Maximum turbidity increases with more soiling
- Mud causes faster increases in turbidity than oil

12

How Fuzzy Logic technology works in washing



Applications of FLC

- Based on the cement kiln study our main case for FLC was:
 - That it was useful in large complex systems that were not easy to model mathematically

However,

- The Japanese used it in consumer products (Cameras, etc.) because:
 - controllers were easy to design
 - the control was robust
 - it could be implemented on VLSI chips
 - The technique was useful for newer forms of automation
- 14

Consumer Product Applications

Image Processing Equipment

- Cameras:
 - Autofocus; Auto Exposure; auto-Zoom (speed of zoom)
- Camcorders
 - Autofocus; auto-exposure and automatic white balancing
 - Image Stabilisation
- Photocopying machines
 - Control of charge; toner control
- Television sets
 - control of image quality

Industrial Applications of Fuzzy Control and Intelligent systems ed. John Yen and Reza Langari, Von Nostrand Reinhold, to appear 1993

15

Consumer Product Applications

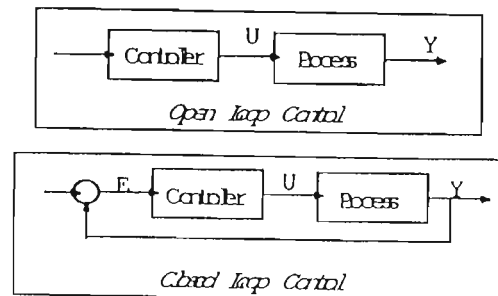
Minolta Camera System

- Autofocus
 - four AF sensors, lens information, camera position are used by seven rules. 15% improvement than before
 - Auto-exposure
 - determine best shutter speed & aperture for the type of scenery
 - 3 fuzzy modules: brightness from 14 zones, position of the main subject from AF system
 - Amount of backlighting from difference in brightness
 - depth of focus
 - Output of 1 & 2 above to get final exposure value
 - Auto-zooming
 - decide the speed of zooming the lens, as a function of ratio of current lens magnification to that one time unit ago; the rate of change of this ratio & how the object moves.
- 16

Automobile

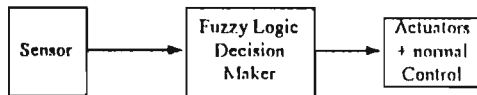
- Automatic Transmission
 - Takahashi, Ikeura and Yamamori "5 speed automatic transmission..." Proc. Int. Fuzzy Engineering Symposium '91
 - 4 wheel steering - Mitsubishi
 - 4 wheel drive
 - Air conditioning
 - Active suspension - Mercedes
 - Engine Management - Volkswagen
- 17

Simpler control techniques



Fuzzy Control - Examples

An Application of Intelligent sensors



- ♦ Washing Machine
- ♦ Automatic Doors in public places
- ♦ Air conditioning systems
- ♦ Cameras

19

Industrial Applications in Japan

- ♦ Sendai Railway - smooth operation - Hitachi
 - first application in Japan
- ♦ Pumps and gates control systems in sewage plant (66 inputs, 18 outputs, 571 rules) - FUJI
- ♦ Chlorine generator control system in an automatic drink vending machine - FUJI
 - conductivity, water temperature water supply valve frequency (4 inputs and 24 rules)

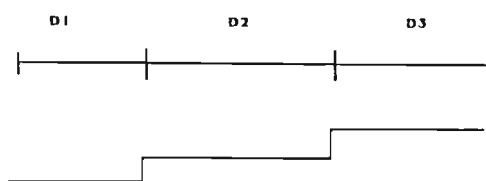
Industrial Applications of Fuzzy control by M. Sugeno, North Holland 1988

Industrial applications of fuzzy control & intelligent systems ed. John Yen Reza Langari Von Nostrand Reinhold 1993

20

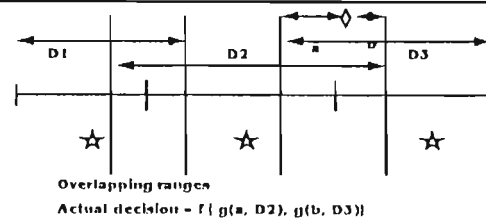
Fuzzy Control - Analysis

A variable with continuous values divided into three ranges with decisions associated with each range



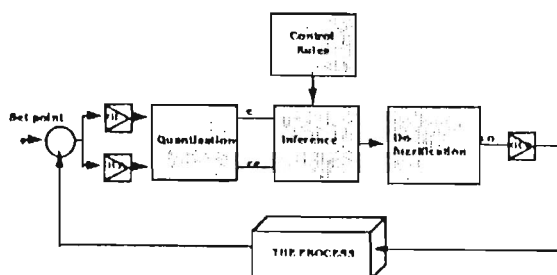
21

Fuzzy Control - Analysis



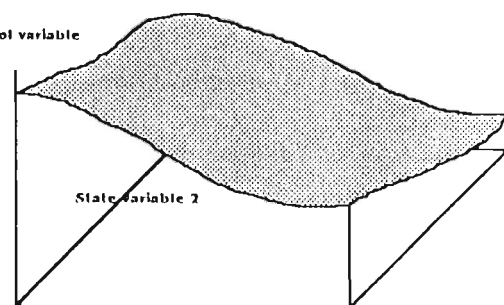
22

Manipulation of the control surface



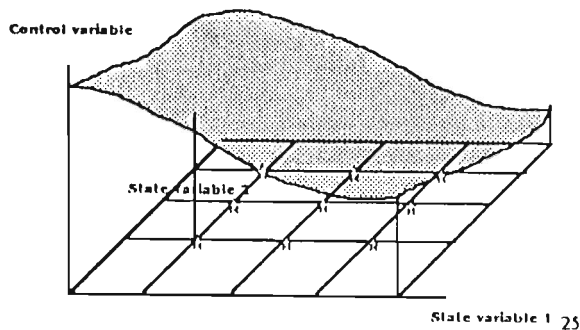
23

Control variable



State variable 1

Manipulation of the control surface



Typical Control Policy

CE	4	3	2	1	0	1	2	3	4
PE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

26

Benefits of FLC

- ◆ FLC provides a direct manipulation of the control surface at a finite set of points
- ◆ The use of fuzzy logic guarantees a smooth control surface
- ◆ The resulting controller is more versatile than a PID controller
 - It can cope with more complex (non-linear) systems
 - It provides a more robust control
- ◆ The controller is likely to be more stable

27

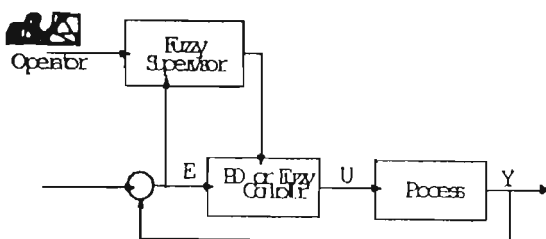
Active suspension system



- ◆ Passive system a compromise between ride and comfort
- ◆ Active system cannot be mathematically modelled because of its complexity
 - needs to include each suspension system behaviour
 - the chassis behaviour under varying load conditions
 - Varying road characteristics
 - Varying driver behaviour
- ◆ Prototype simulation as the only approach

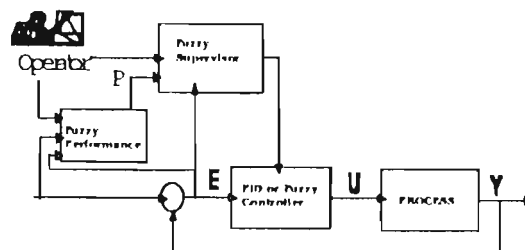
28

Fuzzy Supervisory Control



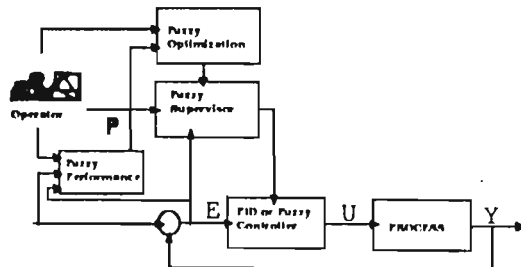
29

Fuzzy Supervisory Control with Fuzzy Performance



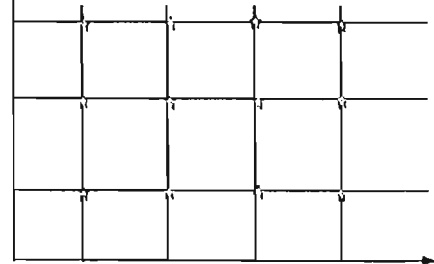
30

Fuzzy Optimal Control



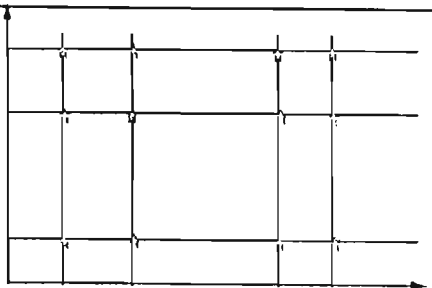
31

Manipulation of the control surface



32

Manipulation of the control surface



33

Self-Organizing Control algorithm

- step 1 Determine the extent to which the present output is deficient and needs to be changed; (by reference to the performance table)
 - step 2 Determine which past action or actions was responsible for the present output
 - step 3 Determine the rule or rules (if they exist) responsible for those actions.
 - step 4 modify the consequent of those rules (ie shift them) according to the required reinforcements
- OR Create a new rule at the appropriate quantized point of the state space by fuzzifying the space.

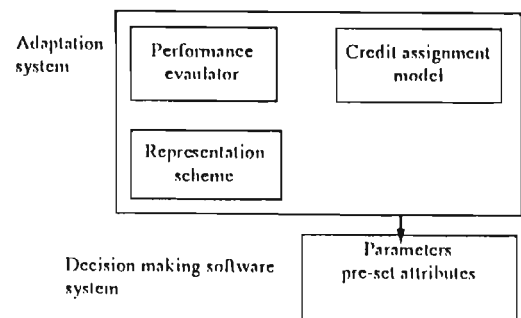
This method has proved successful with higher order systems and systems with large time lags

The self organising performance reinforcements

PE	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
6	0	-6	-4	-4	-4	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
5	0	-6	-4	-4	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
4	0	-6	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
3	0	-6	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-6	-6
2	4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
1	4	4	4	3	1	1	-1	-4	-4	-4	-4	-4	-4
0	4	4	4	3	1	1	0	-1	-1	-2	-4	-4	-4
0	-4	-4	-4	-3	-1	-1	0	1	1	2	4	4	4
-1	-4	-4	-4	-3	-2	-2	4	4	4	4	4	4	4
-2	-4	-4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
-3	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
-4	0	6	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6
-5	0	6	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6
-6	0	6	4	4	4	4	7	7	7	7	7	7	7

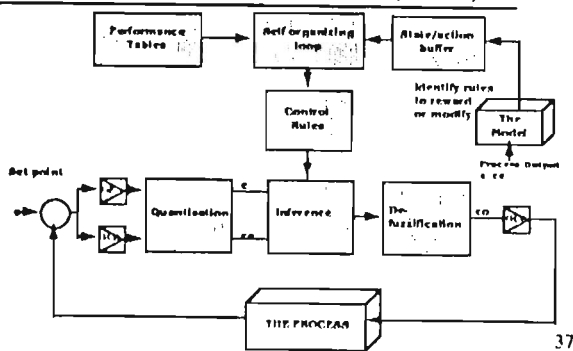
35

Self-organisation, adaptation, learning



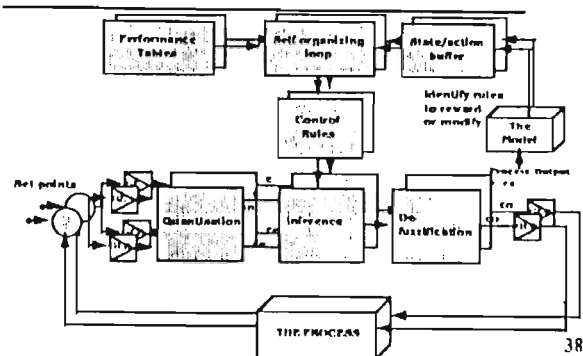
36

Self-Organizing Control (SOC)



37

Multi-variable SOC



38

Fuzzy control of Unmanned Helicopter

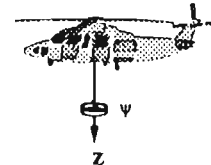
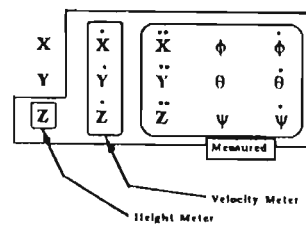
Characteristics of a Helicopter

- ♦ Unstable and non-linear system
- ♦ Multivariable and coupled system with multiple control inputs
- ♦ Easily affected by disturbances (wind, ground effects)
- ♦ Easily affected by environmental conditions (height, temperature, humidity)
- ♦ Flies under undesirable environmental conditions

39

Fuzzy control of Unmanned Helicopter

State Variables:



40

Fuzzy control of Unmanned Helicopter

Sensors

- ♦ Vibratory Rate Gyro:
 $\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}$
- ♦ Magnetic Azimuth sensor:
 ψ
- ♦ Servo accelerometer:
 X, Y, Z
- ♦ Radio wave speed meter:
 X, Y, Z
- ♦ Ultra sonic height meter:
 Z

41

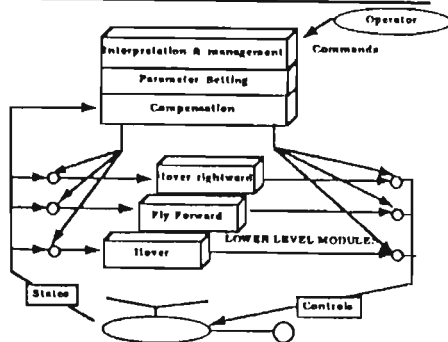
Fuzzy control of Unmanned Helicopter

Control of Motions

Motion	Control
rotation of rotors	← throttle
climb/descent	← collective pitch (throttle)
pitching	← cyclic pitch (elevator)
rolling	← cyclic pitch (Aileron)
yawing	← antitorque pedal (rudder)

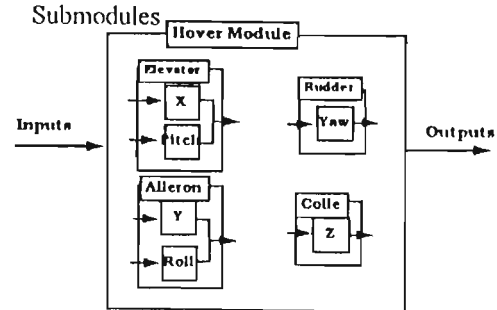
42

Fuzzy control of Unmanned Helicopter Hierarchical Modular Control System



43

Fuzzy control of Unmanned Helicopter



44

Note on FLC Literature

- ◆ Early work on FLC appeared exclusively in Fuzzy literature
 - It needed a fuzzy theoretic content
 - Mainly Control content was not analysed deeply
- ◆ This is beginning to change
 - The change is still very slow
 - There is still no good established literature emphasising strictly control issues
- ◆ Good references are thus not easy to provide

45

Some key papers

- Mamdani, E.H., "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", *Proc. IEE* Vol. 121, No. 12, December 1974
- W.J.A.I. Kirkert & E.H. Mamdani (1978) "Analysis of a fuzzy logic controller", *Fuzzy Sets and Systems*, 1 (1): 29-44.
- Tong, R.M. (1984) "A retrospective view of fuzzy control systems", *Fuzzy Sets and Systems* 14:199-210
- L.P. Halmblad and J.J. Østergaard (1982), "Control of a cement kiln by fuzzy logic", In Gupta & Sanchez (Eds) *Fuzzy Information and Decision Processes*, North-Holland, Amsterdam, pp 389-399.
- Sugeno, M. (1985), "An introductory survey of Fuzzy Control," *Information Sciences*, 36:59-83
- D.G. Schwartz and G. Khr, "Fuzzy logic flowers in Japan", *IEEE Spectrum*, July 1992.

46

Papers on SOC and learning

- D. Dubois, H. Prade and R.R. Yager (eds) *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*. Morgan Kaufman 1993
- Procyk, T.J. and Mamdani E.H., "A linguistic self-organising process controller", *Automatica*, 15, (1), pp 15-30, 1979
- Berenji, H.R. (1992) "A Reinforcement Learning Based Architecture for Fuzzy Logic Control", *Int. J. Approx. Reasoning*, 267-292.
- Cox, E. "Adaptive Fuzzy Systems", *IEEE Spectrum*, February 1993

47

Fuzzy Controllers and Fuzzy Expert Systems: Industrial Applications of Fuzzy Technology

Piero P. Bonissone

Information Systems Laboratory
General Electric Corporate R&D
Schenectady, New York 12301, USA
Bonissone@crl.ge.com

Abstract— We will provide a brief description of the field of approximate reasoning systems, with a particular emphasis on the development of Fuzzy Logic Control (FLC). FLC technology has drastically reduced the development time and deployment cost for the synthesis of nonlinear controllers for dynamic systems. As a result we have experienced an increased number of FLC applications. In a recently published paper [7] we have illustrated some of our efforts in FLC technology transfer, covering projects in turboshaft aircraft engine control, steam turbine startup, steam turbine cycling optimization, resonant converter power supply control, and data-induced modeling of the nonlinear relationship between process variables in a rolling mill stand. These applications will be illustrated in the oral presentation.

In this paper, we will compare these applications in a cost/complexity framework, and examine the driving factors that led to the use of FLCs in each application. We will emphasize the role of fuzzy logic in developing supervisory controllers and in maintaining explicit the tradeoff criteria used to manage multiple control strategies. Finally, we will describe some of our FLC technology research efforts in automatic rule base tuning and generation, leading to a suite of programs for reinforcement learning, supervised learning, genetic algorithms, steepest descent algorithms, and rule clustering.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy controllers, fuzzy experts systems, applications.

1 INTRODUCTION

Over the past few years, quantitative uncertainty management has received a vast amount of attention from the researchers in the field, [44, 28, 16, 22] leading to the establishment of two well-defined approaches that differ in the semantics of their numerical representation. One is the *probabilistic* reasoning approach, based on probabil-

ity theory. The other one is the *possibilistic* reasoning approach, based on the semantics of fuzzy sets and many-valued logics.

1.1 Probability and Fuzziness

1.1.1 Distinctions

The distinction between randomness and fuzziness is based on the different types of uncertainty captured by each concept. In *randomness*, the uncertainty is derived by the nondeterministic membership of a point (in the sample space) to a well-defined region in that space. The sample space describes the set of possible values for the random variable. The well-defined region represents an event. The region's characteristic function creates a dichotomy in the universe of discourse of the possible values for the random variable: when the point falls within the boundary of that region, it fully belongs to such region. Otherwise the point's membership in the region is zero. A probability value describes the tendency or frequency with which such random variable takes values inside that region. On the other hand, in *fuzziness* the uncertainty is derived from the partial membership of a point (in the universe of discourse) to an imprecisely defined region in that space. The region represents a fuzzy set. The characteristic function of the fuzzy set does not create a dichotomy in the universe of discourse; it maps the universe of discourse into the real-valued interval $[0,1]$ instead of the set $\{0,1\}$. A partial membership value does not represent any frequency. Rather, it describes the degree to which that particular element of the universe of discourse satisfies the property that characterizes the fuzzy set.

1.1.2 Interpretations

Not all probabilities have frequentistic interpretations. For example, subjective probabilities [23] can be defined in terms of the willingness of a rational agent to accept a bet, in which the ratio of its associated cost and prize reflects the probability of the event. Similarly, a fuzzy membership function may have more than one interpretations, ranging from *possibility* values (a fuzzy restriction

that acts as an elastic constraint on the value that may be assigned to a variable [57]), to *similarity* value, (the complement of the distance among possible worlds) [40, 41], to *desirability or preference* values, (the partial order induced by the membership function on the universe of discourse).

1.1.3 Probabilistic Reasoning Systems

Some of the earliest techniques found among the approaches derived from probability are based on single-valued representations. These techniques started from approximate methods, such as the modified Bayesian rule [26] and confirmation theory [47], and evolved into formal methods for propagating probability values over Bayesian Belief Networks [38, 39]. Another trend among the probabilistic approaches is represented by interval-valued representations such as Dempster-Shafer theory [24, 45, 34, 49].

In all these approaches, the basic inferential mechanism is the conditioning operation.

1.1.4 Fuzzy Logic Based Reasoning Systems

Among the fuzzy logic based approaches, the most notable ones are based on a fuzzy-valued representation of uncertainty. These include the Possibility Theory and Linguistic Variable Approach [57, 54], and the Triangular-norm based approach [10, 9, 20].

The basic inferential mechanism used in possibilistic reasoning is the *generalized modus-ponens* [54], which makes use of inferential chains (syllogisms).

1.2 Complementarity

The distinction between probability and fuzziness has been presented and analyzed in many different publications, such as [4, 25, 32] to mention a few. Most researches in probabilistic reasoning and fuzzy logic have reached the same conclusion about the complementarity of the two theories [18]. This complementarity was first noted by Zadeh [55], who in 1968 introduced the concept of the probability measure of a fuzzy event, and by Smets, who extended belief functions to fuzzy sets [48].

Given the duality of purpose and characteristics between probabilistic and possibilistic methods, we conclude that these technologies ought to be regarded as being complementary rather than competitive. Because of time and space limitations, we will limit the scope of our discussion to cover the most notable trends and efforts in fuzzy logic based reasoning systems.

1.3 Structure of the Discussion

In the next section we will briefly describe the development process common to both fuzzy-logic rule based systems and fuzzy controllers. In section three and four we will describe the technology development for a fuzzy expert system and a fuzzy controller, respectively. In section five we will discuss a few applications of fuzzy controllers. Finally, in section six we will discuss some future trends of this promising technology.

2 KNOWLEDGE BASED SYSTEMS DEVELOPMENT

Fuzzy Expert Systems (FES) and Fuzzy Logic Controllers (FLC) are examples of Knowledge Based Systems (KBS). As such they share many common tasks at the reasoning and at the application levels. We will briefly describe these tasks and then we will proceed to illustrate the development of KBS and FLC.

2.1 The Reasoning Tasks

Three main reasoning tasks are common to KBS and FLC: the knowledge representation, the inference mechanism applicable to the chosen representation and the control of the inference. In the next two sections we will briefly cover these tasks for KBS and FLC respectively. For a more detailed description of KBS reasoning tasks the reader is referred to reference [14], while the FLC reasoning tasks are extensively covered in reference [19].

2.2 The Application Tasks

Following the rapid prototyping paradigm, the author has identified five application tasks for a KBS (see reference [11]): (1) requirements and specifications: the knowledge acquisition stage; (2) design choices: the KB development stage; (3) testing and modification: the KB functional validation stage; (4) optimizing storage and response time requirements: the KB compilation; (5) running the application: the deployment stage.

The same task decomposition applies to the development of a FLC application. The first three stages correspond to the development of the FLC application (performance characteristics, order estimation, state variable identification, rule base generation, validation and robustness analysis); the fourth stage corresponds to the transition from development to deployment (fuzzy rule set compilation); the fifth stage corresponds to the application deployment (porting and embedding the FLC on the host computer).

3 FUZZY EXPERT SYSTEM (FES)

For clarity's purpose, our discussion on FES will be anchored on RUM/PRIMO, a Fuzzy Expert System which was developed by the author in 1987 [20] and further refined in the early nineties [6].

3.1 FES Reasoning tasks

As mentioned in the previous section, the reasoning tasks required by FES can be divided into three layers: the *knowledge representation*, to determine issues such as the appropriate data structure for the uncertainty information and meta-information, the input and termset granularity selection; the *inference mechanism*, to determine the uncertainty calculi to perform the intersection, detachment, union, and pooling of the information; and the *control* of the inference, to determine the calculi selection, the conflict measurement and resolution, the ignorance measurement, and the resource allocation.

3.1.1 Knowledge Representation

Uncertainty in RUM/PRIMO is represented in both facts and rules. Facts represent the assignment of values to a set of propositional variables. Rules are acyclic quantitative Horn clauses in which a conjunct of antecedents implies (to a certain degree of belief) the rule consequent.

Facts are qualified by an uncertainty interval. The interval's lower bound represents the minimal degree of confirmation for the value assignment. The upper bound represents the degree to which the evidence failed to refute the value assignment. The interval's width represents the amount of ignorance attached to the value assignment. The uncertainty intervals are propagated and aggregated by T-norm based calculi.

Rules are discounted by a degree of sufficiency, indicating the strength with which the antecedent implies the consequent and a degree of necessity, indicating the degree to which a failed antecedent implies a negated consequent.

3.1.2 Inference Mechanism

Inference in RUM/PRIMO is based on the concept of Triangular norms or T-norms. Triangular norms (T-norms) and their dual T-conorms are two-place functions from $[0,1] \times [0,1]$ to $[0,1]$ that are monotonic, commutative and associative [42, 43, 9, 10]. They are the most general families of binary functions that satisfy the requirements of the conjunction and disjunction operators, respectively. Their corresponding boundary conditions satisfy the truth tables of the Boolean AND and OR operators.

Any triangular norm $T(A, B)$ falls in the interval $T_w(A, B) \leq T(A, B) \leq \text{Min}(A, B)$, where

$$T_w(A, B) = \begin{cases} \min(A, B) & \text{if } \max(A, B) = 1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

The corresponding DeMorgan dual T-conorm, denoted by $S(A, B)$, is defined as

$$S(A, B) = 1 - T(1 - A, 1 - B) \quad (2)$$

In fuzzy logic the conjunction and disjunction operators are the minimum and maximum, respectively (upper and lower bounds of the T-norm and T-conorm ranges, respectively). These operators play a key role in the definition of the generalized modus ponens, which is the basis of possibilistic reasoning. As noted in the viewgraphs, RUM uses five different T-norm based calculi.

For each calculus, four operations have been defined in RUM: *premise evaluation*, *conclusion detachment*, *conclusion aggregation*, and *source consensus*. Each operation is completely defined in terms of a Triangular norm and a negation operator.

3.1.3 Inference Control

Selecting Uncertainty Calculi The selection of the most appropriate uncertainty calculus depends on how

well the calculus characteristics fit the local assumptions described by the context information. To accomplish this, it is essential to first analyze the properties of the calculi used in the inference layer.

Since T-conorms and detachment operators can be expressed as functions of the negation operator and the T-norms, to understand the meaning of each calculus it is enough to analyze its underlying T-norm operator. A first interpretation suggests that T_1 is appropriate to perform the intersection of lower probability bounds. T_3 is appropriate to represent the intersection of upper probability bounds. T_2 is the classical probabilistic operator that assumes *independence* of the arguments; its dual T-conorm, (S_2), is the usual additive measure for the union.

The remaining two T-norms can be used when the information is known to be *mildly* negative or positive correlated, without requiring the drastic extremes of mutually exclusiveness (T_1) or subsumption (T_3). The two additional calculi provide intermediate degrees of pessimism and optimism in the range of worst case/best case analysis.

3.2 FES Application Tasks

Because of space constraints, we will focus on the compilation stage, which is the necessary link to provide for the transition from development to deployment. Compilation of FES is required to achieve real-time performance. For clarity's purpose we will briefly discuss RUMrunner [15], RUM's run-time system. RUMrunner is a software tool that transforms the customized knowledge base generated during the development phase into a fast and efficient real-time application. This goal is achieved by a combination of efforts: the translation of RUM's complex data structure into simpler, more efficient ones (to reduce overhead); the compilation of the rule set into a network (to avoid run-time search); the load-time estimation of each rule's execution cost (to determine, at run-time, the execution cost of any given deductive path); and the planning mechanism for path selection (to determine the largest relevant rule subset which could be executed within a given time-budget).

4 FUZZY CONTROLLERS

4.1 The Knowledge Representation

The main representational issues for the FLC are: the quantification of the input; the termset definition for each state variable and for each control action; the definition of the type of fuzzy production rule to be used in the KB.

The input quantization consists of describing the input as a fuzzy subset of the input space. This process is necessary to make each input element dimensionally compatible with each state variable. When the universe of discourse of the state is discretized, the FLC designer needs to determine a mapping from intervals of the universe of discourse to its point representation. When the universe of

discourse is continuous, this mapping is not needed. For a formal description of this process the reader is referred to [12].

The definition of the termset is perhaps the most important of the representational issues. For each state variable and control action, we need to define the granularity of their values [13]. Thus, we must determine the cardinality of termsets used to represent each state variable and action, the semantics of the above termsets, and the scaling factors for each state variable and action. These design choices are crucial to issues such as steady-state performance and stability. In particular we have observed that the FLC steady-state behavior improves considerably when the termset provides finer granularity around the equilibrium point [21].

The most common definition of a fuzzy rule set R is the disjunctive interpretation found in the majority of FLC applications [35], i.e.,

$$R = \bigcup_{i=1}^m r_i = \bigcup_{i=1}^m (\bar{X}_i \rightarrow Y_i) \quad (3)$$

R is composed of m rules. Each rule r_i defines a mapping between a fuzzy state vector $\bar{X}_i$ and a corresponding fuzzy action Y_i . r_i is typically represented by the Cartesian product operator. There are, however, many other representations for a fuzzy rule, which are based on the material implication operator and the conjunctive interpretation of the rule base. For a definition of different rule types, the reader is referred to references [37] and [33].

4.2 Inference Engine

The inference engine of a FLC can be defined as a parallel forward chainer operating on fuzzy production rules. An input vector $\bar{I}$ is matched with each n -dimensional state vector $\bar{X}_i$, i.e., the Left Hand Side (LHS) of rule $r_i = \bar{X}_i \rightarrow Y_i$. The degree of matching indicates the degree to which the rule output can be applied to the overall FLC output. The main inference issues for the FLC are: the definition of the fuzzy predicate evaluation, which is usually a possibility measure [57]; the LHS evaluation, which is typically a triangular norm [43, 10]; the conclusion detachment, which is normally a triangular norm or a material implication operator; and the rule output aggregation, which is usually a triangular conorm for the disjunctive interpretation of the rule base, or a triangular norm for the conjunctive case.

Under the most commonly used assumptions [12] we can describe the output of the FLC as

$$\mu_Y(y) = \bigvee_i^m (\min[\lambda_i, \mu_{Y_i}(y)]) \quad (4)$$

where λ_i is the the degree of applicability of rule r_i

$$\lambda_i = \bigwedge_j^n \Pi(X_{i,j} | I_j) \quad (5)$$

and $\Pi(X_{i,j} | I_j)$ is the possibility measure representing the matching between the reference state variable and the input element¹

$$\Pi(X_{i,j} | I_j) = \bigvee_{x_j} (\min[\mu_{X_{i,j}}(x_j), \mu_{I_j}(x_j)]) \quad (7)$$

Equations (4), (5), and (7) describe the generalized modus ponens [54], which is the basis for the interpreter of a fuzzy-rule set.

4.3 Inference Control

Among the many inference control issues, the most typical are the defuzzification of the FLC output, the KB selection for hierarchical or supervisory control mode, the KB self-organizing structure, etc.

The most basic design choice is the selection of the defuzzification mode. The output of the rule aggregation stage is a composite membership distribution defined on the space of control actions. This distribution must be summarized into a scalar value before it is passed to an actuator for execution. This summarization can be performed by a variety of defuzzifiers: the Mean of Maxima (MOM), the Center of Gravity (COG), the Height Method (HM). The selection of the defuzzifier is a tradeoff between storage requirements (MOM lends itself to easy compilation), performance (COG typically exhibits the smoothest performance), and computational time (HM is faster to compute than COG) [36].

4.3.1 Mean Of Maxima (MOM)

The MOM method defines the crisp output y^* as the value of y in which the membership distribution $\mu_Y(y)$ achieves its maximum. If the maximum is obtained in multiple points, y^* is the average of such set of points. Therefore we can define the interval of points $\bar{y}^*$ where such maximum is achieved as

$$\bar{y}^* = \{\hat{y} \in Y \mid \mu_Y(\hat{y}) = \bigvee_y \mu_Y(y)\} \quad (8)$$

and then we define y^* as the average of $\bar{y}^*$.

4.3.2 Center Of Gravity (COG)

The COG method derives the crisp output y^* as

$$y^* = \frac{\int y \mu_Y(y) dy}{\int \mu_Y(y) dy} \quad (9)$$

¹When the input is crisp, the degree of matching is the evaluation of the reference membership distribution at the point representing the value of the input:

$$\Pi(X_{i,j} | I_j) = \min[\mu_{X_{i,j}}(x_0), \mu_{I_j}(x_0)] = \mu_{X_{i,j}}(x_0) \quad (6)$$

4.3.3 Height Method (HM)

The HM method derives the crisp output y^* as

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \times c_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (10)$$

where c_i is the center of gravity of $\mu_{V_i}(y)$.

4.4 The FLC Application Tasks

As noted in Section 2.2, the development of a KBS consists of five application tasks: (1) requirements and specifications: the knowledge acquisition; (2) design choices: the KB development stage; (3) testing and modification: the KB functional validation stage; (4) optimizing storage and response time requirements: the KB compilation; (5) running the application: the deployment stage.

Again, because of space constraints, we will focus on the compilation stage, which links the development stage with the deployment one.

4.4.1 The Fuzzy KB Compilation Process

The compilation of fuzzy rule bases into fast access lookup tables is analogous to the compilation process used in programming languages and KBS.

Traditionally, the compilation process in programming languages refers to the translation of statements from a high-level source language into a low-level target language, such as assembly language or machine language, to allow for an efficient execution.

The compilation process in Knowledge Based Systems usually refers to the process of translating variables, predicates, and rules into a dependency graph. Such a graph is used to keep a pointer for all rules containing the same variable, and for all variables affected by the same rule, thus eliminating the need of run-time search. The graph typically maintains the current evaluation of each rule, allowing for incremental rule evaluation when new information is entered [27, 17]. Therefore, an interpreter can be used during the KBS development phase, where changing requirements and functionalities may require changes in the source code or in the knowledge base. After a successful validation stage, the KB is considered stable and can then be compiled to minimize storage requirements, avoid exhaustive evaluation, and improve run-time performance.

In a similar fashion, a FLC application can be compiled after the validation stage. During the development phase we use the FLC interpreter to generate, fine-tune, and validate the fuzzy rule set (KB). Once the validation is complete, we employ a FLC compiler to generate lookup tables from the fuzzy rule sets.

Let's analyze the FLC's two modes of operation, i.e., *interpreted* and *compiled*, by observing the way we synthesize the FLC's end-product, i.e. the non-linear control

surface. In interpreted mode, at every iterations we fire all the rules to reconstruct the control surface and then we evaluate it for the current input's values. In compiled mode, we first map the current input values to a coordinate set. This set defines the projection on the state space of the *patch* of the control surface that is relevant to the input. Therefore, at every iteration we construct the relevant patch (by firing a much smaller rule subset) and then we evaluate the patch for the current input's values.

Figure 1 shows the architecture of a compiled FLC. Table M1 contains the termsets of the input and output variables. Table M2 lists the rules, with pointers to the termsets that make up the LHS of those rules, as well as pointers to the conclusions of those rules.

The main effort of the compiler is expended in the construction of tables M3 and M4. The state space is partitioned into a number of cells whose boundaries are defined by the termsets of the input variables. If the termsets are overlapping only with adjacent terms, and the number of terms for each of the n state variables is t , then the state space is composed of $(2t - 1)^n$ distinct cells. In general, the expression for the number of pointers to $r = 2^i$ rules is

$$\binom{n}{i} (t - 1)^i t^{(n-i)}$$

where $i = 0 \dots n$. Each of these cells contains a pointer to a corresponding slot in table M4, which in turn contains a list of pointers to the rules that are applicable in that cell. The maximum length of this list of pointers is 2^n .

In the case of the fuzzy PI, where $n = 2$, M1 contains the termsets for e , $\dot{e}$, and du , while the entire rule set is listed in M2, with the appropriate pointers to the relevant termsets in M1. M3 details a partitioning of the e - $\dot{e}$ plane into a two-dimensional array of size $(2t - 1)^2$, with each cell in the array pointing to a slot in M4. Of the $(2t - 1)^2$ slots in M4, t^2 contain a pointer to a single rule, $2(t - 1)t$ contain pointers to two rules, and $(t - 1)^2$ contain pointers to four rules.

At run-time, the values of the input variables and the termsets associated with those variables in M1 are used to determine into which region of state space the input falls. Once that region is determined, M3 is consulted, and a list of pointers to the relevant rules in M2 is obtained from M4. The rest of the inferencing process is similar to that of an interpreted FLC. However, the run-time process has been made more efficient by avoiding the evaluation of those rules whose contribution is zero. Thus, expression (10) becomes

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m (\lambda_i \times c_i)}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} = \frac{\sum_{i|\lambda_i \neq 0} (\lambda_i \times c_i)}{\sum_{i|\lambda_i \neq 0} \lambda_i} \quad (11)$$

where m , the maximum number of rules evaluated in interpreted mode, is a function of the number of state variables n , and the cardinality t of each state variable's termset,

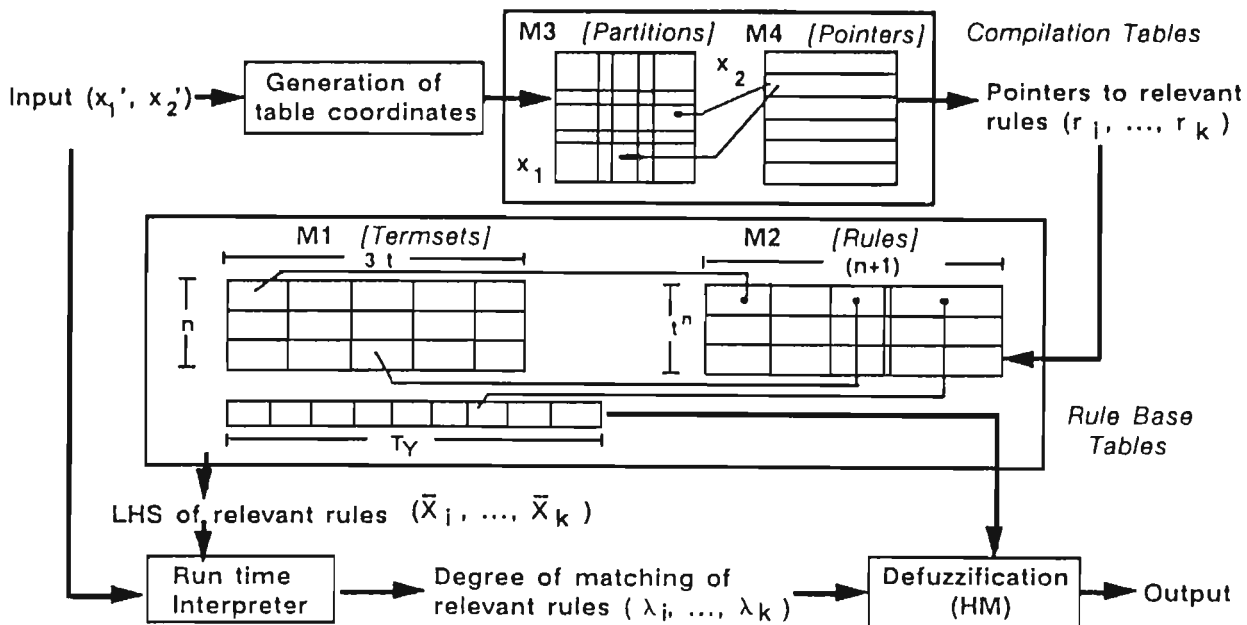


Figure 1: Architecture of a compiled FLC, functionally equivalent to that of an interpreted FLC.

namely $m \leq t^n$. After compilation, the *worst-case* maximum number of rule evaluations is $|\lambda_i \neq 0| \leq 2^n$, but the compiled FLC is still functionally equivalent to the interpreted FLC. However, the run-time interpreter must still calculate the degrees of matching for the firing rules, perform conclusion detachment, and defuzzify the resulting output.

Alternatively, to increase the throughput of the controller at the expense of accuracy, run-time rule evaluation can be completely avoided by performing that evaluation during compilation. For each region in the state space partition, a representative point is chosen, and each of the firing rules is evaluated at that point. The resulting output value is stored in M3, instead of storing pointers to lists of rules. At run-time, the input values are used to determine the region of state space in which the input falls, and the output value stored there is returned.

Further details on the compilation process are available in [12], where we show that compilation can reduce run-time rule evaluations by two orders of magnitude in the *average* case. In the same reference we analyze the memory requirements to show that the compilation can be implemented using the small microprocessors (e.g. 4-8 bit) and limited memory (e.g. 4K-8K bytes) typical of cost-sensitive applications such as appliances and consumer electronics.

5 FUZZY CONTROL APPLICATIONS

5.1 Introduction

Over the last decade, the number of applications of Fuzzy Logic Controllers (FLCs) has dramatically increased. Ini-

tially outlined by Zadeh [56] and explored by Mamdani [35, 31] in the early seventies, FLC applications exhibited their first industrial and commercial growth in Japan almost a decade later [50, 53, 52]. Since then, many Japanese companies have offered consumer-oriented products enhanced by FLC technology, such as Canon's camera autofocus control [46], Honda's and Nissan automatic transmission [51], Mitsubishi's room air conditioner control, Panasonic's clotheswasher control, and Toshiba's elevator control, to mention a few.

With a better understanding of FLC synthesis and analysis methodologies and the availability of commercial FLC development tools, FLC applications have also become more popular in the US and Europe [7].

The key advantage of FLCs is their cost-effectiveness in quickly synthesizing nonlinear controllers for dynamic systems. We have reduced design cycle time during the development phase by using an interactive computing environment based on a high level language with its local semantics, interpreter, and compiler. We have achieved efficiency and portability by cross-compiling, the resulting knowledge bases or nonlinear control surfaces prior to deployment.

6 COST-COMPLEXITY FRAMEWORK FOR FLC APPLICATIONS

In reference [5], we have proposed a cost-complexity framework to show the gamut of FLC applications categorized by their cost and performance requirements. This is illustrated in Figure 2. Beside this tradeoff, a third criterion, throughput, is considered a constraint in our comparative analysis. From this analysis, we have observed that

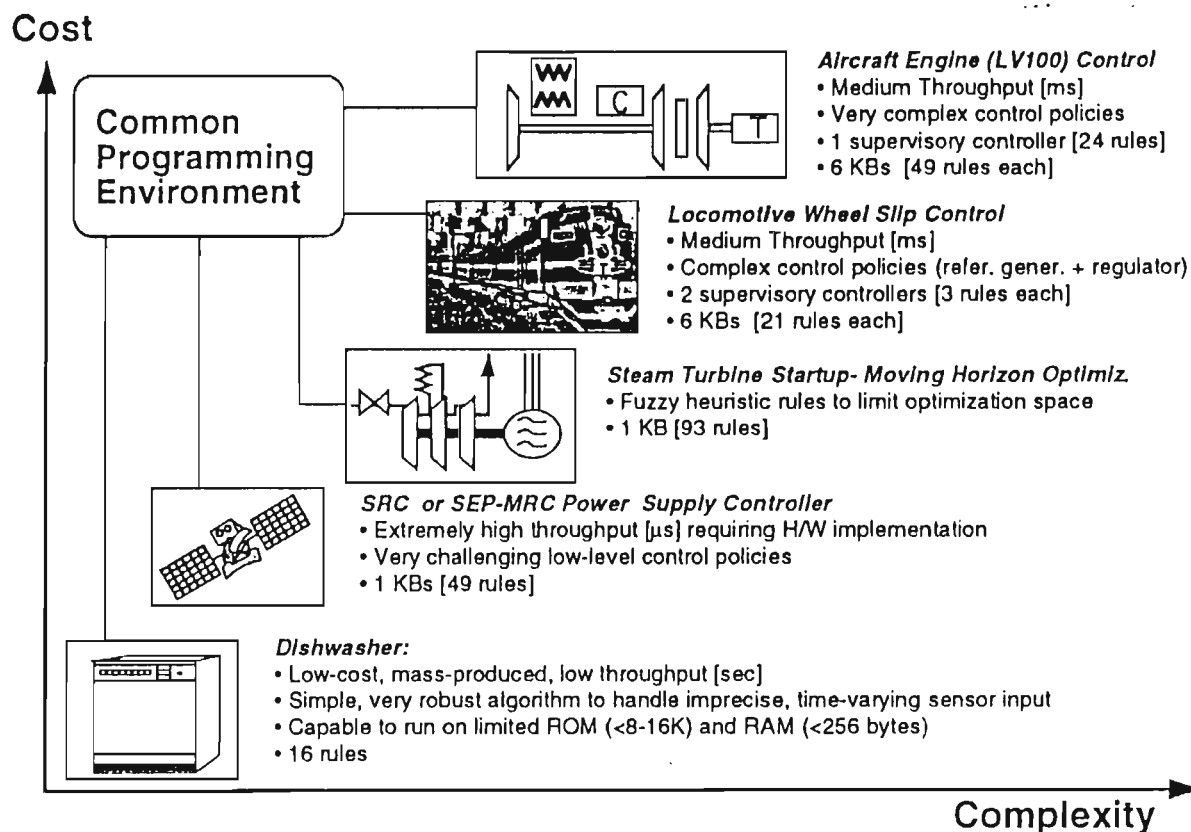


Figure 2: Cost-Complexity Framework for FLC Applications

as the complexity requirements increase, the structure of the FLC becomes hierarchical, following a typical divide-and-conquer strategy. The higher level controller contains the explicit tradeoff knowledge and defines the degree of compromise among the usually competing control goals of the lower level controllers, such as performance versus safety, and fuel efficiency versus emissions.

6.1 Low-Cost/Low-Complexity

The first type of FLC applications, exemplified by dishwasher control, is characterized by low cost and complexity. This type of application usually does not push the performance limits but is constrained by cost. The control of appliances usually consists of simple heuristic decision rules. The typical payoff is smart behavior with low development, deployment, and maintenance costs. Most of these application requirements are addressed by compilation techniques that simplify the path from development to deployment.

6.2 High-Cost/High-Complexity

The second type of FLC applications, exemplified by aircraft engine control, is characterized by high cost and high complexity. Performance, safety, operational costs, efficiency, and product lifetime are the goals and constraints defining the operational space of the controller. The typical payoff consists of improving performance and efficiency

without violating any constraints, including emissions, safety, and components life. Usual approaches addressing these requirements are based on a supervisory control to explicitly account for the various context-dependent tradeoffs. The low-level controllers are implemented by fuzzy or conventional controllers.

6.3 High Throughput

The third type of FLC applications, exemplified by power electronics control, is characterized by extremely stringent throughput requirements. While cost and functional performance are still significant factors, run-time performance, measured in microseconds, is the critical issue for a successful application. Typical approaches addressing these requirements are based on compilation techniques that approximate the behavior of the controller while avoiding run-time computations. These solutions are then implemented using standard microcontrollers. Alternatively, special purpose hardware realize the fuzzy controller.

7 INDUSTRIAL APPLICATIONS AT GE

In reference [7], we have illustrated our experience in developing and applying fuzzy logic technology to a variety of control problems, including applications in fuzzy hierarchical control, hybrid control, and high throughput

control. Among these applications, the most pervasive architecture has been the *Hierarchical Control Architecture*.

A hierarchical control scheme permits the decomposition of complex problems into a series of smaller and simpler ones. As these simpler problems are solved, typically by using low level controllers, they can be recombined to address the larger problem. This recombination is governed by a fuzzy logic supervisory controller that performs soft switching between different modes of operation. The soft switching allows more than one mode of operation (with its corresponding controller) to be active at any one time. By assigning a linear combination of low level controllers to a given mode, the engineer can trade off safety and efficiency against performance.

Another important feature of fuzzy hierarchical control is its inherently simpler software maintenance. By explicitly representing in the supervisory rule set our policy for managing potentially conflicting goals (lower level controllers), we are defining our willingness to tradeoff performance under one criterion, such as speed, for better compliance under a different criterion, such as safety. These tradeoff policies are context dependent, as they are conditioned by the left-hand side of the supervisory rules. Therefore, different supervisory modes entailing different tradeoff policies, for instance the compromise between tank speed/acceleration and engine lifespan in training mode or in battle mode, can be achieved simply by selecting different rule bases for the same supervisory controller. We will illustrate our ideas by describing two fuzzy supervisory control applications to engine control and steam turbine startup.

8 CONCLUSIONS

In this paper we have discussed the implementation of Fuzzy Logic Controllers using a high level language with its local semantics, interpreter, and compiler. We have described the synthesis of nonlinear controllers for a variety of dynamic systems, spanning a large space of cost, performance and throughput requirements.

We have emphasized the role of FLC at the supervisory level to provide smooth mode melding (instead of mode selection) by choosing among low-level conventional controllers [1, 8]. We have shown the synergy resulting from combining FLC with conventional control techniques, such as optimal control or with data-driven learning techniques, such as back-propagation. Finally, we have described the use of FLCs in high throughput applications, such as power electronics, and we have illustrated the role of a FLC compiler to realize the controller using off-the-shelf hardware.

By using an interactive computing environment based on a FLC interpreter, we have considerably shortened the design cycle of the above applications, while achieving comparable or better performance than purely conventional control. After validating the synthesized nonlin-

ear control surface, we have improved portability and decreased deployment cost by compiling the resulting fuzzy KB and by using efficient run-time engines.

We have also understood that the required design cycle time could be reduced even further if we could avoid most or all of the manual tuning procedures currently used in the last part of the FLC development.

Currently, there are many research efforts aimed at extending adaptation techniques developed in other fields to provide automatic structural and parametric tuning of FLCs. These techniques typically take the existing rule network defined in the FLC knowledge base and provide on-line adaptation for the rule parameters. A subset of these techniques are reinforcement learning, [2], gradient-directed optimization or supervised learning [29], rule clustering or unsupervised learning [3, 30], and genetic algorithms.

Finally, we have demonstrated that FLC technology is a powerful control synthesis technique that complements other analytical or data-driven techniques. We have discussed FLCs' applicability to a vast gamut of applications, spanning a large range of cost, performance, and throughput requirements. In the future, we expect that the combination of FLCs with other emerging technologies, such as neural network and genetic algorithms, will further improve its cost/benefit ratio when applied to a large spectrum of complex control problems.

REFERENCES

- [1] V. Badami, K.H. Chiang, , P. Houpt, and P.P. Bonissone. Fuzzy logic supervisory control for steam turbine prewarming automation. In *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, page submitted. IEEE, June 1994.
- [2] H.R. Berenji and P. Khedkar. Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3(5), 1992.
- [3] H.R. Berenji and P. Khedkar. Clustering in product space for fuzzy inference. In *Second IEEE International conference on Fuzzy Systems*, San Francisco, CA, March 1993.
- [4] J.C. Bezdek. Editorial: Fuzziness vs Probability - Again (! ?). *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2(1):1-3, Feb 1994.
- [5] P. Bonissone. Fuzzy logic controllers: An industrial reality. In *Computational Intelligence: Imitating Life*. IEEE Press, 1994.
- [6] P. Bonissone, J. Aragones, and J. Stillman. PRIMO: A Tool for Reasoning with Incomplete and Uncertain Information. In *Proceedings of the Third IPMU*, pages 325-327, Paris, France, July 1990.

- [7] P. Bonissone, V. Badami, K. Chiang, P. Khedkar, K. Marcelle, and M. Schutten. Industrial Applications of Fuzzy Logic at General Electric. *Proceedings of the IEEE*, pages 450–465, March 1995.
- [8] P. Bonissone and K. Chiang. Fuzzy logic hierarchical controller for a recuperative turboshaft engine: from mode selection to mode melding. In J. Yen, R. Langari, and L. Zadeh, editors, *Industrial Applications of Fuzzy Control and Intelligent Systems*. Van Nostrand Reinhold, 1995.
- [9] P. Bonissone and K. Decker. Selecting Uncertainty Calculi and Granularity: An Experiment in Trading-off Precision and Complexity. In L. N. Kanal and J.F. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 217–247. North Holland, 1986.
- [10] P. P. Bonissone. Summarizing and propagating uncertain information with triangular norms. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1(1):71–101, January 1987.
- [11] P. P. Bonissone. Now that i have a good theory of uncertainty, what else do i need? In M. Henrion, R. D. Shachter, L. Kanal, and J. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence 5*, pages 237–253. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [12] P. P. Bonissone. A compiler for fuzzy logic controllers. In *Proceedings of the International Fuzzy Engineering Symposium '91 (IFES'91)*, pages 706–717, November 1991.
- [13] P. P. Bonissone and K. S. Decker. Selecting uncertainty calculi and granularity: An experiment in trading-off precision and complexity. In L. Kanal and J. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 217–247. North-Holland, Amsterdam, 1986.
- [14] P. P. Bonissone, S. Gans, and K. S. Decker. RUM: A layered architecture for reasoning with uncertainty. In *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 891–898. AAAI, August 1987.
- [15] P. P. Bonissone and P. C. Halverson. Time-constrained reasoning under uncertainty. *The Journal of Real Time Systems*, 2(1/2):22–45, 1990.
- [16] P. P. Bonissone, M. Henrion, L. N. Kanal, and J. F. Lemmer, editors. *Uncertainty in Artificial Intelligence 6*. North-Holland, Amsterdam, 1991.
- [17] Piero P. Bonissone and Pete C. Halverson. Time-Constrained Reasoning Under Uncertainty. *Journal of Real Time Systems*, 2:22–45, May 1990.
- [18] P.P. Bonissone. Approximate Reasoning Systems: A Personal Perspective. In *Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence 1991 (AAAI-91)*, pages 923–929, Anaheim, CA., 1991.
- [19] P.P. Bonissone and K.H. Chiang. Fuzzy logic controllers: From development to deployment. In *Proceedings of 1993 IEEE Conference on Neural Networks*, pages 610–619. IEEE, March 1993.
- [20] P.P. Bonissone, S.S. Gans, and K.S. Decker. Rum: A layered architecture for reasoning with uncertainty. In *Proceedings 10th Intern. Joint Conf. Artificial Intelligence*, pages 891–898. AAAI, 1987.
- [21] D. Burkhardt and P. Bonissone. Automated Fuzzy Knowledge Base Generation and Tuning. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems 1992*, pages 179–188. IEEE, March 1992.
- [22] B. D'Ambrosio, P. Smets, and P. Bonissone, editors. *Proceedings of the Seventh Conference on Uncertainty in AI*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991.
- [23] B. DeFinetti. La prévision: ses lois logiques, ses sources subjectives. *Annales de l'Institut H. Poincaré*, 7:1–68, 1937.
- [24] A.P. Dempster. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 38:325–339, 1967.
- [25] D. Dubois and H. Prade. Fuzzy Sets and Probability: Misunderstandings, Bridges and Gaps. In *Proceedings of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1059–1068, San Francisco, CA., 1993.
- [26] R.O. Duda, P.E. Hart, and N.J. Nilsson. Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems. In *Proc. AFIPS 45*, pages 1075–1082, New York, 1976. AFIPS Press.
- [27] Charles L. Forgy. Rete: A fast Algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. *Journal of Artificial Intelligence*, 19(1):17–37, September 1982.
- [28] M. Henrion, R. D. Shachter, L. N. Kanal, and J. F. Lemmer, editors. *Uncertainty in Artificial Intelligence 5*. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [29] J.S.R. Jang. ANFIS: Adaptive-network-based-fuzzy-inference-system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3):665–685, May/June 1993.

- [30] P. Khedkar. *Learning as Adaptive Interpolation in Neural Fuzzy Systems*. Ph.D. Thesis, Electrical Engineering and Computer Sciences Department, Univ. of California, Berkeley, Berkeley, California, 1993.
- [31] W.J.M. Kickert and E. H. Mamdani. Analysis of a fuzzy logic controller. *Fuzzy Set and Systems*, 12:29-44, 1978.
- [32] G. Klir and T.A. Folger. *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [33] C.C. Lee. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I, II. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2):404-435, 1990.
- [34] J.D. Lowrance, T.D. Garvey, and T.M. Strat. A Framework for Evidential-Reasoning Systems. In *Proc. 5th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 896-903, Menlo Park, CA., 1986. AAAI.
- [35] E.H. Mamdani and S. Assilian. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man Machine Studies*, 7(1):1-13, 1975.
- [36] M. Mizumoto. Improvements Methods of Fuzzy Controls. In *Proceedings of the Third International Fuzzy Systems Association*, pages 60-62. IFSA, August 1989.
- [37] M. Mizumoto and H. Zimmerman. Comparison of Various Fuzzy Reasoning Methods. *Fuzzy Sets and Systems*, 8:253-283, 1982.
- [38] J. Pearl. Reverend Bayes on Inference Engines: a Distributed Hierarchical Approach. In *Proceedings Second National Conference on Artificial Intelligence*, pages 133-136. AAAI, August 1982.
- [39] J. Pearl. Evidential reasoning under uncertainty. In Howard E. Shrobe, editor, *Exploring Artificial Intelligence*, pages 381-418. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988.
- [40] E.H. Ruspini. On the semantics of fuzzy logic. Technical Note 475, Artificial Intelligence Center, SRI International, Menlo Park, California, 1989.
- [41] E.H. Ruspini. Possibility as similarity: The semantics of fuzzy logic. In *Proc. of the Sixth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 281-289, Cambridge, MA, 1990.
- [42] B. Schweizer and A. Sklar. Associative functions and abstract semi-groups. *Publicationes Mathematicae Debrecen*, 10:69-81, 1963.
- [43] B. Schweizer and A. Sklar. *Probabilistic Metric Spaces*. North Holland, New York, 1983.
- [44] R. D. Shachter, T. S. Levitt, L. N. Kanal, and J. F. Lemmer, editors. *Uncertainty in Artificial Intelligence 4*. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [45] G. Shafer. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, NJ., 1976.
- [46] T. Shingu and E. Nishimori. Fuzzy based automatic focusing system for compact camera. In *Proceedings of the Third International Fuzzy Systems Association*, pages 436-439. IFSA, August 1989.
- [47] E.H. Shortliffe and B. Buchanan. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 23:351-379, 1975.
- [48] P. Smets. Belief functions. In P. Smets, A. Mamdani, D. Dubois, and H. Prade, editors, *Non-Standard Logics for Automated Reasoning*. Academic Press, New York, 1988.
- [49] P. Smets. The transferable belief model and other interpretations of dempster-shafer's model. In P. Bonissone, M. Henrion, L. N. Kanal, and J. F. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence 6*, pages 375-383. North-Holland, Amsterdam, 1991.
- [50] M. Sugeno, editor. *Industrial Applications of Fuzzy Control*. North Holland, Amsterdam, 1985.
- [51] H. Takahashi, K. Ikeura, and T. Yamamori. 5-speed automatic transmission installed fuzzy reasoning. In *Proceedings of the International Fuzzy Engineering Symposium '91 (IFES'91)*, pages 1136-1137, November 1991.
- [52] T. Terano, K. Asai, and M. Sugeno. *Applied Fuzzy Systems*. Academic Press, Cambridge, MA., 1994.
- [53] S. Yasunobu and S. Miyamoto. Automatic train operation by predictive fuzzy control. In M. Sugeno, editor, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, pages 1-8. North Holland, Amsterdam, 1985.
- [54] L. A. Zadeh. A theory of approximate reasoning. In P. Hayes, D. Michie, and L. I. Mikulich, editors, *Machine Intelligence*, pages 149-194. Halstead Press, New York, 1979.
- [55] L.A. Zadeh. Probability Measures of Fuzzy Events. *J. Math. Analysis and Appl.*, 10:421-427, 1968.
- [56] L.A. Zadeh. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3:28-44, 1973.
- [57] L.A. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1:3-28, 1978.

Sesión sobre Transferencia de Tecnología Fuzzy

Investigación y transferencia de Tecnología en el IIIA

Francesc Esteva

Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial (IIIA)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
e-mails: esteva@iia.csic.es

1 Introducción

El tema de la transferencia de Tecnología es un tema que se ha debatido ampliamente en casi todos los países. No voy a entrar en los modelos que los diferentes países han intentado llevar a la práctica para conseguir que los resultados obtenidos en sus Centros de Investigación sean explotados por las empresas de sus respectivos países. No soy experto en ello y hay en el congreso y en esta misma sesión personas mucho más capacitadas para hablar de ello. Pero antes de entrar a explicar el trabajo que realizamos en el Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA) del CSIC, si que quisiera señalar algunos puntos que considero importantes a la hora de analizar los problemas de la transferencia de tecnología en general y de la misma en el caso particular de la Informática y más específicamente en el de la Inteligencia Artificial.

En primer lugar quisiera señalar que para poder realizar una transferencia de tecnología es muy importante que los representantes de los Centros de Investigación y de las empresas tengan un lenguaje común con el que dialogar. En países desarrollados, como Estados Unidos, ello se da naturalmente debido a que el trasvase de personal técnico-científico entre las Universidades y Centros de Investigación y las empresas es una constante. En nuestro país este trasvase no existe antes al contrario los investigadores y los técnicos de empresas forman conjuntos disjuntos con raras y loables excepciones. Lograr cambiar este hábito tanto por parte de las empresas como por parte de los investigadores creo facilitaría las posibilidades de transferencia de Tecnología.

En segundo lugar quiero señalar que para que se pueda dar una transferencia de Tecnología en un campo determinado debe haber un sector empresarial importante en el mismo. En este sentido debemos señalar que en el campo del software, no existe un entramado empresarial innovador en España. Exceptuando casos muy respetables, España tiene fundamentalmente delegaciones de empresas multinacionales cuyas sedes centrales se hallan en otros países en los que tienen grupos de I+D donde se realizan las innovaciones y con los que el diálogo para transferir tecnología resulta más fácil. Anticipo que nuestras únicas experiencias de transferencia de tecnología se han realizado con empresas multinacionales, especialmente en el ámbito europeo.

Precisamente por esta falta de empresas con espíritu innovador en el sector, me parece que los grupos de investigación deberían ser muy cuidadosos para no abortar los intentos de ciertos grupos para crear empresas en este sector. Creo que una buena medida sería que los grupos de investigación no trataran con el usuario final dejando que sean estas pocas empresas que empiezan a existir quienes lo hagan. Ello favorecería la creación de empresas de este tipo que son indispensables para la Transferencia de Tecnología.

Pasemos ahora a presentar a grandes rasgos el trabajo de investigación que se realiza en el IIIA con especial referencia a aquellos temas en los que la lógica fuzzy tiene especial importancia. Finalizaremos dando casos concretos de tecnología que ha sido transferida a empresas del sector.

2 Líneas de Investigación del IIIA

La Inteligencia Artificial es un área de Investigación que concierne a un amplio espectro de temas que van desde la comunicación hombre-máquina a la lógica matemática, pasando por la robótica y la ingeniería del software. Además es muy interdisciplinar ya que interacciona con numerosas disciplinas tales como la automática, la lingüística, la psicología, etc. hasta tal límite que en ocasiones resulta difícil trazar sus límites de forma definida. Dentro de este marco el IIIA trabaja fundamentalmente en dos grandes temas que son el APRENDIZAJE AUTOMÁTICO y la MODELIZACIÓN y AUTOMATIZACIÓN DEL RAZONAMIENTO COMPLEJO. En ambos temas se cubre desde los fundamentos teóricos (lógicas multi-valuadas y fuzzy, lógica dinámica, especificaciones formales, satisfacción de restricciones, modelización de conocimientos, ...) hasta las aplicaciones (a la medicina, a la industria agroalimentaria o a la ecología) pasando por el diseño de nuevos lenguajes y arquitecturas de programación (lenguajes y arquitecturas modulares, sistemas de aprendizaje basado en casos, lenguaje y arquitecturas integrando aprendizaje y resolución de problemas, lenguajes visuales de especificación).

Concretando más podríamos agrupar los temas de investigación en las siguientes líneas:

a) Lógicas no-estándar (multi-valuadas, difusas, dinámicas, temporales) que constituyen el lenguaje formal para modelizar información inexacta (incierto,

incompleta y/o imprecisa) y dependiente del tiempo y que permiten automatizar el razonamiento con dicha información. Los resultados de esta actividad se están implementando en nuevos lenguajes y arquitecturas (por ejemplo en el entorno de construcción de sistemas expertos de segunda generación MILORD-II).

b) Teoría de la similitud para formalizar el razonamiento aproximado, por interpolación, las técnicas de aprendizaje y el razonamiento basado en casos (tipo particular de razonamiento y aprendizaje por analogía). Los resultados se están implementando en arquitecturas y lenguajes integrando aprendizaje y resolución de problemas (lenguaje NOOS actualmente en desarrollo). También se trabaja, dentro de este marco, en el Fuzzy Case Base Reasoning.

c) Especificaciones Formales para la programación lógica y más generalmente para la programación declarativa. La programación declarativa es una metodología fundamental en Inteligencia Artificial, su formulación es necesaria para poder desarrollar con corrección y eficiencia programas complejos. Los resultados de estos trabajos se están implementando en un lenguaje visual de especificación de manera que genere automáticamente código ejecutable en un lenguaje de programación lógica.

d) Aplicaciones. En concreto a la Medicina (Aplicación de MILORD a crear sistemas de ayuda al diagnóstico en Medicina), a la industria Agro-alimentaria (Aplicación al control de una granja porcina) y a la Ecología Marina (Aplicación a un sistema experto de ayuda a la clasificación de esponjas).

Debemos reseñar que, a estos temas, el claustro del IIIA decidió que le gustaría poder añadir en el futuro los del Tratamiento del Lenguaje Natural (con aplicación a la traducción automática mediante técnicas basadas en conocimientos y técnicas basadas en ejemplos) y los Robots Autónomos (con capacidad de aprendizaje para aplicaciones a la exploración de entornos desconocidos. Ya se está realizando un proyecto de construcción de mapas de entornos desconocidos a partir de la información proporcionada por un conjunto de robots-insecto).

En estos temas, que evidentemente están imbricados unos con otros, el papel de los conjuntos y la lógica fuzzy es fundamental en el aspecto teórico. Así la base de los sistemas expertos construidos en el Instituto es el Shell MILORD cuyo motor de inferencia está basado en la lógica fuzzy, la teoría de la similitud, basada en las relaciones fuzzy, nos ha permitido definir una lógica de la similitud con la que hemos dado una interpretación del razonamiento por interpolación y con la que estamos trabajando para obtener una teoría útil para el razonamiento basado en casos. Por último también debemos decir que son técnicas fuzzy las que utilizamos

para la fusión de los mapas parciales percibidos por un conjunto de robots insectos.

3 Transferencia de Tecnología

A parte de la transferencia realizada mediante actividades de consultoría y cursos a empresas, en el IIIA se han hecho las siguientes transferencias de software de Inteligencia Artificial:

- Incorporación de un algoritmo de aprendizaje inductivo (mejora del ID3 utilizando lógica fuzzy) desarrollado en el IIIA en el software de ayuda en la adquisición de conocimientos por Sistemas Expertos "AC2" comercializado por la empresa francesa: ISOFT con sede en París.

- Incorporación de un método de tratamiento de la incertidumbre (utilizando lógica fuzzy) desarrollado en el IIIA en el software de desarrollo de sistemas expertos "Fuzzy KEE" comercializado por la empresa alemana Fuzzy-Logik Systeme GmbH con sede en Dortmund.

- Utilización "In House" por la empresa DIGITAL EUROPA, con sede en el Parque Tecnológico de Niza, del software de construcción de sistemas expertos MILORD desarrollado en el IIIA.

- Mejora del software PRINCESS desarrollado en el Centro de Investigación de SIEMENS con sede en Munich, incorporando técnicas de tratamiento de la incertidumbre (utilizando lógica fuzzy) y de metacontrol desarrolladas en el IIIA.

- Transferencia del lenguaje de construcción de sistemas expertos MILORD para el diagnóstico médico (pneumonías y reumatologías) en los siguientes hospitales: La Alianza Mataronina, Hospital General de Castellón.

Como puede verse todas las transferencias exceptuando la última lo han sido a multinacionales europeas o con sedes europeas importantes. En el caso de la última de hecho ha sido una utilización por parte de usuarios finales sin intermediarios pero se trata de una experiencia limitada. Se trata tan sólo de que los médicos que han construido los sistemas expertos de ayuda al diagnóstico han utilizado estos en sus respectivos centros hospitalarios.

Digamos finalmente que aunque el presente artículo no contiene referencias por razones obvias, el IIIA tiene un report de sus actividades y de los proyectos realizados desde su fundación que se puede conseguir solicitándolo a la dirección indicada.

SEVEN YEARS OF FUZZY LOGIC TECHNOLOGY AND INDUSTRIAL APPLICATIONS AT IAI-CSIC

Maria C.Garcia-Alegre
Instituto de Automatica Industrial
Consejo Superior de Investigaciones Cientificas
La Poveda. Arganda. 28500 MADRID. SPAIN
e-mail: maria@iai.es

Abstract

This paper focuses on the subject of Fuzzy Control Systems, but some references to works on Fuzzy Modelling and Fuzzy Representation Shells are also included. Fuzzy Logic Rule-based Systems for Control provide an alternative paradigm to analytic models in the description and control of complex and ill-defined systems. They successfully model the uncertainty inherent to real worlds and to human control actions based on Artificial Intelligence decision making approaches. Applications in the Robotics and Advanced Manufacturing field are presented as the result of the work performed during the period 1989-1995.

Uncertainty and Complexity in Real World: The role of Fuzzy Logic

Traditionally the comprehension of a phenomenon was measured by the ability to analyse it in quantitative terms. However, as far as the complexity of a system increases the possibility of making precise and meaningful statements about its behaviour decreases.

Fuzzy Sets Theory, first developed by Zadeh in 1965 [1] as a model to deal with natural language, spread out a bridge from quantitative to qualitative models based upon the premise that clues in human reasoning and decision making processes are

not supported by crisp elements, but rather by fuzzy concepts wherein the transition from membership to exclusion is not abrupt but gradual.

These schemes of human reasoning suggest fuzzy inference mechanisms as far as the origin of the informational units "Concepts" and the establishment of relations "Rules" among them is concerned. Such mechanisms could explain the human skill to summarise the information needed for the reliable completion of a task, starting off from imprecise elements.

Human brain seems to take advantage of this tolerance in imprecision to codify relevant information in labels "Fuzzy Concepts" involving an approximate relationship to the initial data. Thus the huge amount of data received visually, auditory, tactile, is reduced to the level of precision required to accomplish a specific task. This ability to resume information and to manage the abstracted labels constitutes one of the most important asserts of human beings, that all artificial systems would like to mimic.

From this, what lessons must be learnt? The need of more flexible frameworks, tolerant with imprecision and partial truths to analyse uncertain and complex systems as a complement to the mathematical models employed up to now in most control applications [2].

Fuzzy Logic and Control Systems

It was not until 1973 that Zadeh presented a basic theory on which Fuzzy Logic based Control Systems could be built [3]. In 1974 Mamdani and collaborators, following Prof. Zadeh work, investigated new applications of Fuzzy Logic based Control Systems [4], [5].

They introduced Fuzzy Logic and Rule-based techniques as a way of both dealing with uncertainty and capturing human experience. These concepts were immediately applied to industrial processes which were either scarcely defined or too complex to admit conventional analytical modelling. However they were usually controlled by expert operators who obtained good results, in spite of making decisions based upon imprecise or incomplete information (deteriorated sensors, non linearities in the system's dynamic).

This is why the restrictions imposed by the use of bi-valued truth values or an exact verification in a rule's condition, do not completely match in the context of human reasoning processes and leads to highlight the relevance of approximate reasoning techniques and fuzzy logic approaches on the inference process.

The objective aimed at in a Fuzzy Control System consists in the automation of the discrete control actions of human operators in order to reach and maintain the desired system state, by monitoring some variables and selecting the proper control actions. Previous to the development of any Fuzzy Control System a linguistic interpretation of the Theory of Fuzzy Sets, where key element is the linguistic control rule, is strongly recommended [6], [7].

Fuzzy Knowledge Bases for Systems Control

Expert Systems and Knowledge based Systems are branches of the Artificial Intelligence area of great interest for fields such as Control, Failure Diagnosis and Planning. Fuzzy Rule based Control Systems

differ from conventional approximations in using qualitative information instead of precise analytical relationships to control a specific process.

This way there is a simulation of the information's categorisation by expert operators when controlling a process by means of linguistic labels. Fuzzy Control systems exploit the tolerance for imprecision in order to generate more robust and less susceptible to deviations control systems.

The approach being essentially heuristic can be integrated with analytical models in a more general framework.

Fuzzy Control is well suited to deal with:

- 1) Complex, partially or imprecisely defined systems,
- 2) Systems with variables difficult to measure and even to determine, and
- 3) Systems exposed either to great external variations or to disturbances in the quality of the employed materials.

In all former cases, Fuzzy Rule-based Control Systems must have both a flexible behaviour to recognise and deal with unexpected events, and a robust behaviour to maintain the desired state being only guided by a wide range of possible values of the state variables, without having a global understanding of the underlying process.

Four stages can be considered in the design of a Fuzzy Knowledge Base for System Control [8], [9]:

- 1) Knowledge acquisition
- 2) Knowledge Base organisation
- 3) Knowledge representation
- 4) Control action computation through a weighed average, centre of masses or functional algorithms.

Once the goal is defined and the current state variables of the process are measured, the inference engine runs through all the rules of the base and calculates the net control action.

Fuzzy Logic research and development at the IAI-CSIC

Most of the modern automation and robotics systems require special intelligent capabilities in order to perform their assigned tasks. To this aim fuzzy logic technology should help to span the whole spectrum of possibilities of automated systems by increasing intelligent completion of tasks with the precision required.

1-A Fuzzy Control Environment: Fuzzyshell

To avoid the implementation of both the membership function definition and the inference process for each new application, a programming environment has been designed and implemented on PC and Sun4 Workstations [10], [11].

An interactive environment has been developed to work off-line, Sunview based for UNIX and Menu based for MS-DOS. It allows inexperienced users to define and debug the fuzzy variables, values and rules that conform the knowledge base. It has a main menu wherein several options can be activated: Insert, Modify, and Delete variable, and Insert, Delete, Reorder Rules,

see Figure. Fuzzy sets are defined by means of four parameters, as normalised trapezoidal functions.

A fuzzy inference engine has also been implemented to perform the fusion of the actions derived from each of the rules defined in the Knowledge Base.

Fuzzyshell is copyright registered, N° 16045/1991 (Computer program). Owner: CSIC. Authors: M.C.García-Alegre, R.García Rosa, J.Gasós, P.D.Fernández Zuliani. It has been used in the Projects:

ESPRIT II-2043MARIE *Mobile autonomous robots in industrial environments*

ESPRIT III - 5369 HEPHAESTOS *Intelligent Robotic Welding System for Unique Fabrications*

TELEVES S.A.- *Fuzzy Logic Expert System for automatic tuning of electronic equipment*

and has been transferred for research and non-commercial purposes to the Universities:

Granada, Santiago de Compostela, Spain, 1991.

Amsterdam, Netherlands, 1992.

Drexel, Philadelphia, USA, 1993.

The screenshot displays the Fuzzyshell application window. It is divided into several sections:

- Top Left:** A status bar shows "Number of variables = 4".
- Variable Definitions:**
 - Fuzzy variable: distance** with membership function "ffn". It lists two linguistic labels: "small" (parameters: 0.00, 0.00, 0.80, 2.00) and "big" (parameters: 0.40, 1.40, 3.00, 3.00).
 - Fuzzy variable: velocity** with membership function "ffn". It lists two linguistic labels: "low" (parameters: 0.00, 0.00, 0.30, 0.80) and "high" (parameters: 0.20, 0.50, 2.50, 2.50).
 - Fuzzy variable: steer_angle** with membership function "ffn". It lists one linguistic label: "big" (parameters: 0.00, 20.00, 28.00, 28.00).
- Bottom Left:** A section titled "FUZZY CONTROL RULES" containing three rules:
 - RULE: 0**: IF distance (big) AND velocity (low) THEN inc_speed (positive)
 - RULE: 1**: IF distance (small) AND velocity (high) THEN inc_speed (negative)
 - RULE: 2**: IF steer_angle (big) AND velocity (high) THEN inc_speed (negative)
- Top Right:** A message box states "Extension '.FZZ' will be added automatically to the file name." Below it, the directory "Dir: /home/marie/sock/dynamics/Fuzzy" and file "File: speed" are shown. There are buttons for "LOAD", "SAVE", and "QUIT".
- Bottom Right:** A vertical column of buttons for rule management: "INSERT, MODIFY A VARIABLE", "DELETE A VARIABLE", "INSERT A RULE", "DELETE A RULE", and "REORDER RULES".

2-Fuzzy Navigation Strategies for Mobile Robots

In recent years a lot of work has been devoted to robot navigation in completely known environments [12], [13]. In such an approach a precise model of the scene is "a priori" known, and path-planning algorithms are proposed to solve the optimum path search, without any sensors. Other research has been focused just on the opposite, sensor-based navigation in totally unexplored worlds [14], [15].

Nevertheless, when either the complexity of a system increases (high number of input/output variables involved), or the knowledge on the system decreases (sensors noise and degradation, unexpected inputs, uncompleted knowledge, errors in control) analytic models have to be replaced by approaches that account for a level of uncertainty.

It is in these situations where Fuzzy Logic Control plays a relevant role in the emulation of human perception and control strategies.

Departing from Sugeno previous works [9], [16], a Fuzzy Control System for robots navigation in unknown environments has been developed, based on U.S. sensors and odometer readings [17-21]. The local navigation control system is composed of four modules :

- 1) Navigation in collision-free path,
- 2) Navigation avoiding obstacles,
- 3) Stop&Backwards
- 4) Speed

The first three strategies control the steering wheel angle and the last one the speed. Danger condition are always checked and lead to the Stop & Backwards manoeuvres [22]. Membership functions parameters have been fitted by means of Genetic Algorithms [23].

At the Global Navigation level, path planning has been implemented following two, totally different approaches

- 1) The Top-Down, that from an initial map and a current and final position [24],

calculates the optimum tentative path based upon an A* search algorithm, and 2) The Bottom-Up, that offers a set of fuzzy behaviour primitives for local navigation based on external / internal references. They are given to the system as Path Segments sequences expressed by linguistic terms [25].

A three levels architecture has been designed to integrate both deliberative and reactive modules. While the global path planner level guarantees an optimisation in distance and consequently in energy requirements, the fuzzy behaviours level gives the flexibility and robustness required for navigation in uncertain and unpredictable worlds. The integrated system allows a mobile, furnished with a map, to plan the optimum tentative path from any initial to final position, to track it by continuously activating one fuzzy behaviour, and finally controlling its execution in real time.

A general behaviour agents approach is being investigated at present moment wherein all behaviour directly connected with physical sensors will be defined as Fuzzy Rule-based processes, in a parallel distributed architecture. External and internal system-environment conditions will be in charge of firing the more suitable behaviour [26-27].

Experimental work has been and is being performed on three mobile robots: 1) A four wheels robot, Robuter from Robosoft Co. (1.3 x 0.7 m.) endowed with 12 U.S. sensors, odometer and two CCD cameras on a 2 dof pan-tilt head, 2) A caterpillar type robot, Boss-IAI (0.7 x 0.45 m.) designed at the IAI, which has a rotating U.S. sensor and a CCD camera on a 2 dof support, and 3) A four driving wheels, cylindrical robot B21 from RWI ($r = 0.25$ m.) endowed with U.S., I.R., Tactile and Compass sensors.

Most perception performed in the fuzzy navigation was based upon ultrasonic and odometer readings [28]. However ultrasonic sensors detect obstacles and measure their distances, but they do not provide information regarding the type of object and

its properties. Since this knowledge may be extremely relevant for many mobile robots applications, research is being done now on the issue of object recognition / scene interpretation of images taken from the mobile robot.

In complex environments, the most significant factor determining the size of the search space is the selection of a small set of objects likely to match each group of image features. In this approach the world model is built from imprecise linguistic description of the environment represented by fuzzy sets. This "a priori" knowledge is used to guide the scene interpretation system towards recognition of those objects that according to the environment model may be included in the image [29-32]. Interpretation is posed as a planning problem in order to focus attention, first on the objects that are more important and likely to be in the image, to restrict the areas where objects are searched for, and to provide information on their size and extent.

As a summary of conclusions, Fuzzy Rule-based control systems are tolerant to sensors failures and quite insensitive to high frequency noise. They generate a smooth control action due to the actions integration algorithm, and are flexible enough to successfully face very different environment and unexpected events.

3-A Fuzzy Control System for Automatic Tuning of Electronic Amplifiers

UHF mono-channel amplifiers are used in domestic aerial to clean and enhance signals on a channel as well as getting good separation among channels. Equipment is made as large bandwidth amplifiers with two filters, which have to be tuned to get on the mono-channel amplifier. This tuning is accomplished by experts in 30-40min., adjusting two filters by turning the coupled screws. That is, by accommodating the signal displayed in a wave analyser to a pre-defined pattern.

This long term manual tuning largely increases the resulting cost of the equipment

This problem gets in full within the paradigm of Fuzzy Logic control systems that try to automatically mimic the control actions performed by the human expert. To accomplish this task an industrial prototype has been built, consisting on: 1) A manipulator with two hands, each one with four fingers to turn the screws, and a low level controller, 2) An auxiliary bench to access the amplifiers, 3) A programmable wave analyser that feeds the amplifier to be tuned and displays the output signal at the screen, and 4) A computer with the fuzzy controller resident.

The expertise is encoded under a Fuzzy Knowledge Base format, being the inputs: Frequency, Ripple, Gain, Wide, and Symmetry [33-35]. Control outputs are the turning angle for each of the eight screws. Seventeen heuristic -IF (conditions) THEN (actions) rules- perform the control in a two steps sequence, by first tuning the input filter and then the output filter.

Conclusions can be summarised in just one sentence: This intelligent robotics systems tune the filters in less than 1 min.

4-A Distributed Universal Fuzzy Controller

A distributed universal fuzzy controller able to adapt itself to deal with any specific process, has been implemented. Distributed in nature it can run sequentially, in a processor, or in parallel in a net of processors if time requirements are critic. For its implementation a system with the following components has been developed.

- 1) A language to describe the control problem in terms of fuzzy inputs, outputs and rules, defined by a Pb-grammar,
- 2) A language to represent internally the control problem in terms of elementary fuzzy processes, defined by a Ps-grammar,
- 3) An elementary fuzzy processes library, and
- 4) A set of software tools as an extractor, a loader, an ender and other procedures.

The extractor identifies the elementary and independent processes in which the fuzzy controller can be divided, receiving the Pb-description of the control problem and providing the Ps-description. The loader gets it and assigns elementary processes to physical processors, starting execution. Once the user decided to finish the control task, the ender turns off the processes set. [36-38].

The more relevant issues of these work are:

- 1) The proposal of a methodology for automatic building of Distributed Fuzzy Controllers, and
- 2) The design of the elementary blocks that provides a straightforward bridge to a Fuzzy hardware implementation.

5-Fuzzy Control and Modelling in Machining

First work was focused on the implementation of a Fuzzy Controller for speed and position control of DC motors in machine-tool applications. Comparative results with a classical PID controller, are displayed and commented [40- 44]. Further on a Fuzzy hierarchical control system was proposed for machine-tool [45-46]. In this approach the low level is a Fuzzy Controller for motor speed. At the intermediate level there is a cutting force Fuzzy Controller which has as inputs the error and the error derivative, and as outputs the cutting speed and feed rate. Highest level is in charge of defining the machining criteria (Maximum productivity, minimum cost, quality degree) [47-48]. Two different strategies have been used:

The first one was based on the control engineering knowledge combined with the expert operator criteria.

Second one only used the last criteria.

Experimental results indicate that the integrated approach greatly improves the performance of the milling process [49].

Model-based reasoning has been a very active area in the A.I field, aiming at the generation of new paradigms in physical

systems modelling as a previous stage for monitoring or control tasks [50-51]. An explicit model of a system consists on a set of inputs/outputs relationships able to predict accurate system behaviour. Analytic models have been applied for decades driven by SISO linear equations, but can not account for almost the thirty variables that affect metal cutting processes efficiency [52].

Multiple relations among variables, highly non linearity, great disturbances and variations in the cutting conditions, noisy sensors readings, conform a difficult frame for human interpretation.

A Fuzzy Knowledge-based model for the milling process is then proposed. It constitutes the higher level of the hierarchy, and account for current values of: cutting speed, depth of cut, tool diameter, and workpiece hardness [53-55]. Experimental work has been performed at a vertical, medium size five axis machining centre in milling operation, working with different types of aluminium and steel alloys. A dynamometer provides to the C.N.C. the real time components F_x, F_y, F_z of the tool-piece force, as a complement to the conventional position and speed monitoring for control:

The identification of the relational structure has to:

- 1) Select the set of input variables that affect the output,
- 2) Find the input/output relationships (number of rules and the fuzzy partition of the input space).

The method consists in constructing successive models, starting with only one input variable and successively increasing the number of variables. Five models were developed with reduced sets of input/output variables for the cutting process.

Some conclusions in Fuzzy Modelling are:

Absolute and relative model errors increase when more than two material are considered, pointing to the development of a library of models.

Increasing levels of accuracy can be reached by modifying the number of rules, and

Absolute and relative errors [56], [57] are also good indicators of the suitability of this approach for real time work.

General Comments

Full in agreement with Prof. Mamdani [2], process control must be considered from now on as a multi-paradigm discipline from dynamic System Theory to A.I. decision making approaches. We must keep in mind that one way to gain insight on this paradigm is to learn from successful applications. All dismissal in industrial applications has come much more from the scientists doubts than from any other source.

Companies do trust in success to perform a task and are not too much involved in formal models to reach a defined goal. Its delayed exploitation outside Japan could be effected by:

- The Western Culture deep roots in scientific rationalism, firmly opposing the introduction of the gradual concepts proposed as "key elements" in an approximate reasoning framework.

- The attachment to complex analytic models within control engineering research and the devotion to exhaustive, many times obscure, symbolism in some academic and scientific forum.

The future for Fuzzy Technologies would strongly depend on our ability to overcome initial fears to be considered as magicians and to properly marketing and spreading out all successful applications. This last effort could well be supported by Local and National Agencies (Oficinas de Transferencias Tecnológicas, CETEMA, CDTI, CICYT,...) devoted to the promotion of new paradigms.

Acknowledgements

A special mention to Ricardo Garcia Rosa to introduce first applications of Fuzzy Logic at the IAI, and to J.R.Alique for promoting Fuzzy Control in Manufacturing.

Many thanks to Jorge Gasós and Elena Agüero for sharing expectations in qualitative reasoning approaches in a hardly analytic research area. Deepest thanks to Domingo Guinea, Pablo Bustos and Alberto Ruiz for continuous support and enthusiasm in theoretical and practical questions related to artificial perception.

Most research and development reported herein have been supported by the following EU and National funded Projects:

- *Sistema de control adaptativo de máquina-herramienta con estimación en tiempo real de los parámetros característicos del proceso (Machine tool adaptive control for real time estimation of the process parameters).*

CICYT (1988-1990)

Project leader: Dr. Jose Ramón Alique.

- *Mobile autonomous robots in industrial environments (MARIE)*

CEE - ESPRIT II:2043 (1989-1992)

Project leader: Dr. Ricardo Garcia Rosa

- *Arquitecturas paralelas para el control inteligente de robots (Parallel architectures for intelligent control of robots)*

CICYT (1990-1992)

Project leader: Dr. M^a Teresa de Pedro

- *Sistema experto de ajuste automático de equipos electrónicos basado en lógica borrosa (Fuzzy Logic Expert System for automatic tuning of electronic equipment)*

TELEVES S.A., CDTI, (1990-1992)

Project leader: Dr. Ricardo Garcia Rosa.

- *Integración de técnicas de aprendizaje basado en ejemplos sobre arquitecturas distribuidas para la fusión de información sensorial en entornos industriales (Examples based learning integration in data fusion on distributed architectures)*

CICYT-TAP92-0574(1992-1995)

Project leader: Dr. Domingo Guinea

- *Arquitectura jerárquica multi-agente para la generación de comportamiento complejo en un robot autónomo (Hierarchical multiagent architecture for complex behaviour generation in autonomous robots)*

CICYT-TAP94-0171(1994-1997)

Project leader: Dr Maria C. Garcia-Alegre

References

- [1] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol.8, pp.338-357, 1965.
- [2] Mamdani, E.H., "Twenty years of fuzzy control: Experiences gained and lessons learnt", *Proc. IEEE Fuzzy & N.N. Conf*, pp.339-344, San Francisco, 1993.
- [3] L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Trans.Syst..Man,Cybern.*, Vol.SMC-3,1, pp.28-44, 1973.
- [4] Mamdani, E.H., Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *Int.J.Man-Machine Studies*, Vol.7, pp.1-13, 1975.
- [5] Mamdani, E.H., Ostergaard, J.J., Lembessis, E., "Use of fuzzy logic for implementing rule-based control of industrial processes", in *Advances in fuzzy sets, possibility theory and applications*, (Ed.Wang), Plenum Press, 1983.
- [6] Klir, G.J., Folger, T.A., "Fuzzy sets, uncertainty and information", Prentice Hall, 1988.
- [7] E. Trillas, "Una introducción breve a la lógica borrosa", Fac.Informática UPM, 1988.
- [8] M.C Garcia-Alegre. "Técnicas de inteligencia artificial en el control de procesos: controladores borrosos (A.I. techniques in processes' control:Fuzzy Control)", *Mundo Electrónico*, Nº 214, pp. 42-49, 1991
- [9] M. Sugeno, "An introductory survey of fuzzy control", *Info. Sciences*, Vol.36, pp.59-86, 1985.
- [10] J. Gasós, P. Fernández, R. García Rosa, M. C. García-Alegre. "Entorno para el desarrollo de controladores basados en logica borrosa (An environment for developing fuzzy control systems)" in *Proc. Workshop on Approx. Reasoning Methodologies. WARM'89* ETSIT Madrid 1989
- [11] J. Gasós, P.D. Fernández, M.C. García-Alegre, R. García Rosa. "Environment for the development of fuzzy controllers", in *Proc. of the IASTED Intern.Conf. on Artificial Intelligence Applications & Neural Networks. AINN 90*, pp.121-124. Zurich. June 1990.
- [12] T. Lozano-Perez, M. Wesley, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", *Comm.of ACM*, Vol.22, Nº 10, pp.560-570, 1979
- [13] R. Brooks, "Solving the find-path problem by good representation of free space", *IEEE Trans.on Syst.. M. Cybern.*, Vol.13, 3, 1983.
- [14] J. Gasós, M.C. García-Alegre, R. García Rosa. "Fuzzy local navigation of a simulated real mobile robot in unknown environments", *Proc. of the IEEE Intern. Workshop on Intelligent Motion Control*, pp.445-449, Istanbul, 1990.
- [15] M. Mataric, "A distributed model for mobile robot environment-learning and navigation", *Tech.Report AI-TR-1228*, MIT A.I. Lab. 1990.
- [16] M. Sugeno, T. Murofushi, T. Mori, T. Tatematsu, J. Tanaka, "Fuzzy algorithmic control of a model car by oral instructions", in *IFSA '87 Special Issue on Fuzzy Control*, (Eds. Hirota, Yamakawa), 1987
- [17] M. C. García-Alegre, R. García Rosa, J. Gasós. "Control borroso en móviles autónomos: funciones de pertenencia y ruido de sensores (Fuzzy control of autonomous mobiles: membership functions shape and sensors noise) " in *Proc. Workshop on Approximate Reasoning Methodologies WARM'89*, ETSIT, Madrid, 1989
- [18] R. García Rosa, D. Kumpel, M.C. García-Alegre. "A local navigation system based on fuzzy control", *Proc. of the 5th CIM - EUROPE Conf.*, pp. 379-388, Athens. 1989.
- [19] R. García Rosa, M.C. García-Alegre. "Fuzzy logic strategies to control an autonomous mobile", *Cybernetics & Systems*, Vol. 21, pp. 261-270, 1990.
- [20] J. Gasós, M.C. García-Alegre, R. García. "Fuzzy strategies for the navigation of autonomous mobile robots", *Proc. Intern. Fuzzy Engineering Symposium. IFES'91*, pp. 1024- 1034 Japón. Nov. 1991
- [21] J. Gasós, M.C. García-Alegre, R. García, " Fuzzy strategies for the navigation of

- autonomous mobile robots", In: *FUZZY ENGINEERING TOWARD HUMAN FRIENDLY SYSTEMS* (Eds. T. Terano, M. Sugeno, Mukaidono, Shigemasu), pp.1024-1034, IOS Press, Amsterdam and OHMSHA Ltd., Tokyo, 1992.
- [22] M.C. García-Alegre, J. Gasós, R. García Rosa., "Fuzzy control of autonomous mobile robots", in *Proc. Primer Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, pp.71-78, Granada, Junio 1991
- [23] M.D. del Castillo, J. Gasós, M. García-Alegre. "Genetic processing of the sensorial information", *Sensors and Actuators A*. Vol. 37-38, pp. 255-259, 1993.
- [24] M.C. García-Alegre, A. Ribeiro, J. Gasós, J. Salido, " Optimization of fuzzy behavior-based robots navigation in partially known industrial environments", in *IEEE Inter.Conf.on Industrial Fuzzy Control & Intell.Syst.*, Houston, TX, 1993.
- [25] A. Martín, M.C. García-Alegre, " Control Architecture for autonomous mobile robots: Linguistic description of navigation and specific maneuvering tasks", in *Proc.Intern. Symp.on Advanced Transportation Applications*, Aachen, pp. 273-280, Nov.1994.
- [26] M.C. García-Alegre, P. Bustos, D. Guinea, "The behavioural agents approach in a hierarchical architecture for robotics", in *Proc Intern. Workshop on Advanced Automation ECLA94*, Madrid, Dec.1994.
- [27] M.C. García-Alegre, P. Bustos, D. Guinea, "Complex behaviour generation on autonomous robots", in *Proc IEEE Intern.Conf.Syst.Man & Cybern.*, Vancouver, Oct. 1995.
- [28] E. Teixeira, J. Gasós, T. de Pedro, "World model acquisition using ultrasonic sensors", in *Proc. Intern. Workshop on Advanced Automation ECLA94*, Madrid, 1994
- [29] J. Gasós, A. Ralescu, "Region allocation in an image based on a linguistic description of the real world", in *Proc. 10th Fuzzy System Symposium*, pp.371-374, Osaka, Japan, 1994
- [30] J. Gasós, A. Ralescu, "Towards a linguistic instructions based navigation support system using environment information for guiding scene interpretation", in *Proc Fuzzy-IEEE IFES'95 Conf.*, Yokohama, March 1995.
- [31] J. Gasós, A. Ralescu, "Constraints on the projection of the object in an image based on imprecise environment information", in *Proc.Intern.Fuzzy Systems Assoc. World Congress IFSA '95*, Sao Paulo, Brazil, 1995.
- [32] J. Gasós, A. Ralescu, "Using imprecise environment information for guiding scene interpretation", *Fuzzy Sets and Systems*, (subm.)
- [33] R. García Rosa, P. D. Fz.-Zuliani, "Fabricación automatizada de amplificadores electrónicos en Televés utilizando lógica borrosa", In: *Estudios de Lógica borrosa y sus aplicaciones*, (Eds. A. Sobrino, S. Barro), Cursos de Verano-Universidad Santiago de Compostela Nº 78, pp.95-104, 1993.
- [34] R. García Rosa, P. D. Fernández Zuliani, T. de Pedro, "Automatic tuning of electronic amplifiers for TV signals with fuzzy technologies", in *Proc.European Workshop on Industrial Fuzzy Control and Applications*, (Eds. J. Quevedo, J. Aguilar Martín), Terrassa, 1993.
- [35] R. García Rosa, P. D. Fernández Zuliani, M. T. de Pedro, "Unscharfe regelung eines mehrfinger-automaten zur einstellung der verstärkung von TV-signalen", *Helf*, 2, pp. 30-34, 1995.
- [36] R. García, M. T. de Pedro, M. T. C. Andrade, "Knowledge base for fuzzy controllers", in *Proc. 2nd Intern.Intern. Conf.on Fuzzy Logic and N.N.*, pp.257-260, Iizuka, Japan, 1992.
- [37] M. T. de Pedro Lucio, R. García Rosa, "Aplicaciones industriales de controladores borrosos realizadas en el Instituto de Automática Industrial del CSIC", *Arbor CXLVI*, 573-574, pp. 203 - 220, 1993.
- [38] M. T. C. Andrade, M. T. de Pedro Lucio, R. García Rosa, "Software tools to obtain a distributed universal fuzzy controller", *Proc.IEEE Intern.Symp.on Industrial Electronics*, pp.408-413, Santiago, Chile, 1994.
- [39] M. T. C. Andrade, "Controlador borroso universal distribuido: base de conocimientos, modelo computacional, y herramientas de software", *Tesis Doctoral*, Fac.Física, Univ Complutense, Madrid, 1995.
- [40] L. Cunha Rosa, E. Agüero, J. R. Alique, "Controlador borroso basado en reglas aplicado a un robot portico", *Workshop on*

- Approximate reasoning methodologies WARM89*, ETSIT UPM, Madrid, 1989.
- [41] L. Cunha Rosa, E. Agüero, J.R. Alique, "Microcomputer-based servomotor controller applying direct and self-organizing fuzzy algorithms", *Intern. Symp. on Mini and Microcomputers & their applications*, Lugano, Suiza, 1990.
- [42] E. Agüero, L. Cunha Rosa, J.R. Alique, "Direct digital and self-organizing controller for a servo-system using fuzzy algorithms", *Intern. Conf. A.I. Appl. & N.N.*, Zurich, Suiza, 1990.
- [43] L. Cunha Rosa, E. Agüero, J.R. Alique, "Is a fuzzy controller applicable to machine-tool positioning ?", *IEEE Intern. Workshop on Intell. Control*, Istanbul, Turkey, 1990.
- [44] E. Agüero, L. Cunha Rosa, J.R. Alique, "Estudio de la aplicabilidad de técnicas de control borroso en la optimización del control de una maquina-herramienta", *8th Conf. de Invest., Diseño, y Utilización de Maquinas - Herramienta*, San Sebastian, 1990.
- [45] E. Agüero, J.R. Alique, E. Souza, "Sistema de control jerarquico para maquina-herramienta basado en algoritmos difusos", *1st Nat. Conf. en Tecnologias y Logica Fuzzy*, Granada, 1990.
- [46] E. Agüero, J.R. Alique, J. Sanchez, L. Cunha Rosa, "A hierarchical computer control system for a machine-tool based on fuzzy algorithms", *4th World Congress Intern. Fuzzy Syst. Assoc.*, Brussels, Belgium, 1991.
- [47] R. Haber, C.R. Peres, J.R. Alique, S. Ros, "Fuzzy Supervisory Control of End Milling Process", *Proc. of the 3rd. Int. Conf. on Joint Int. Conf. on Inf. Sciences and Fuzzy Theory and Tech.*, Pinehurst, NC, USA, Nov. 1994.
- [48] R. Haber, Peres, C.R., Alique, J.R., Ros, S. "Un lazo de Control de Esfuerzos de Corte en una Fresadora Vertical: Algoritmos clasicos y Borrosos", *X Congreso de Investigación, Diseño y Utilización de Máquina Herramienta*, San Sebastian, Spain, 1994.
- [49] R.H. Haber, C.R. Peres, J.R. Alique, S.T. Ros, "Two approaches for a fuzzy supervisory control system", in *Proc. Intern. Fuzzy Syst. Assoc. IFSA95*, Sao Paulo, Brasil, July 1995.
- [50] M. Sugeno, T. Takagi, "Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modelling and Control", *IEEE Trans. on Sys., Man & Cybern.*, Vol.5, pp.116-132, 1985.
- [51] M. Sugeno, T. Yasukawa, "A Fuzzy Logic based Approach to Qualitative Modelling", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.1, Num.1, 1993.
- [52] D. Guinea, E. Agüero, "Complexity in intelligent manufacturing: Heuristic and empirical approaches", *Intern. Workshop on Advanced Automation*, Madrid, Spain, 1994.
- [53] E. Agüero, J.R. Alique, E. Souza Lucas, "Fuzzy model of cutting process on a milling machine", *1st. Cong. Franco-Japonais de Mecatronique*, Besancon, Francia, 1992.
- [54] J.R. Alique, E. Agüero, "A new approach towards the modeling of milling machining", in *Fuzzy Control Systems* (Eds. A. Kandel, G. Langholz), CRC Press, FL, USA, 1993.
- [55] E. Agüero, J.R. Alique, "Fuzzy model of cutting process on a milling machine", *Intell. Syst. Engn.* 1995.
- [56] Agüero, E., Haber, R., Alique, J.R., Rodriguez, C., "Fuzzy Modelling of Machine-Tool Cutting Process", *Proc. 3rd Int. Conf. Industrial Fuzzy Control & Intelligent Systems*, pp.191-196, Houston, Texas, 1993.
- [57] C. Rodriguez, R. Haber, S. Ros, J.R. Alique, E. Agüero, "Modeling of machine-tool cutting process applying fuzzy logic and clustering analysis", *2nd Europ. Cong. Intell. Techn. & Soft Computing EUFIT'94*, pp.1071-1075, Aachen, Germany, Oct. 1994.

Las Tecnologías Fuzzy en la Universidad de Granada

Maria-Amparo Vila

Grupo de trabajo sobre Razonamiento Aproximado e I.A.

Departamento de Ciencias de La Computación e I.A.

E.T.S.I de Informatica, Universidad de Granada

Avda. Andalucía 38, 18071 Granada

e-mail: vila@robinson.ugr.es

I. INTRODUCCIÓN: UN BREVE RESUMEN HISTÓRICO Y ALGUNAS CIFRAS

El desarrollo de la investigación en Teoría de Subconjuntos Difusos, Lógica Difusa etc., en la Universidad de Granada tiene una larga historia ya que fué este centro, junto con la Universidad Politécnica de Cataluña, uno de los pioneros en iniciar el estudio de estos temas en España, a final de la década de los 70.

La práctica totalidad de los investigadores de nuestra Universidad que trabajan en este campo se concentra en el *Grupo de Trabajo sobre Razonamiento Aproximado e Inteligencia Artificial*, cuya línea general de trabajo es el tratamiento de los problemas de imprecisión e incertidumbre en Inteligencia Artificial, empleando como modelos básicos de representación de estos fenómenos los proporcionados por la Lógica Difusa y la Teoría de Subconjuntos Difusos. Podemos pues identificar, la historia, la situación y los problemas de dicho grupo con los del desarrollo de las Tecnologías Fuzzy en la Universidad de Granada.

Como hemos mencionado antes, el interés por estos temas arranca en nuestra Universidad al final de la década de los 70. Ya en 1977 se presentan comunicaciones en congresos nacionales e internacionales, y en 1980 se lee la primera tesis doctoral en este campo. Las primeras publicaciones sobre Lógica y Tecnología Fuzzy que aparecen en revistas internacionales, datan del año 1982. A partir de entonces se inicia una fase de consolidación y desarrollo que culmina en la constitución oficial del grupo como *Grupo de Trabajo del Plan Andaluz de Investigación* en 1988. Los resultados globales de esta etapa son los siguientes:

La lectura de seis tesis doctorales La organización de dos reuniones internacionales y otras dos nacionales Mas de 20 publicaciones internacionales.

En ese momento el grupo contaba con 13 personas, 9 de los cuales eran doctores. En la actualidad forman parte del grupo 22 personas que pueden clasi-

ficarse de la siguiente manera:

- Seis investigadores "senior" (responsables de proyectos de investigación y/o directores de tesis).
- Seis investigadores autónomos (doctores capaces de desarrollar trabajo de forma independiente)
- 10 personas en formación (no doctores)

La situación laboral de los miembros del grupo se resume en 8 profesores numerarios, 14 asociados y 3 becarios de investigación, todos ellos integrados en el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada.

Los resultados del grupo en los últimos años lo han situado entre los primeros dentro de su área en la clasificación del Plan Andaluz de Investigación, a título de ejemplo los del año 1993 se resumen en:

La lectura de dos tesis doctorales, 20 publicaciones en revistas internacionales, 11 presentaciones en congresos nacionales e internacionales, 6 patentes, 6 proyectos de investigación en desarrollo.

Al mismo tiempo que el grupo ha ido evolucionando también lo han hecho sus líneas de trabajo. El análisis de esta evolución resulta interesante, ya que, en muchos aspectos, ha sido la misma que la de las investigaciones en Lógica y Tecnología Fuzzy a nivel mundial. En general, este campo se ha desarrollado partiendo del estudio de los fundamentos de la Lógica Difusa, de la Teoría de Subconjuntos Difusos, y de su aplicación a problemas bastante teóricos hasta llegar a desarrollos con un objetivo más práctico. Como es bien conocido, muchos de estos desarrollos ya se encuentran en una fase tecnológica dando lugar a productos comerciales. Este mismo camino puede encontrarse en la evolución de las líneas de investigación de nuestro grupo, si bien no en una etapa tan avanzada.

Inicialmente (años 77 a 84) el interés de los miembros del grupo estaba centrado en dos grandes áreas:

- A) Fundamentos de la Teoría de Subconjuntos Difusos. En este punto se estudiaron temas referentes a: el concepto de función difusa, teoría de las Medidas Difusas y la relación entre Posibilidad y Probabilidad etc..
- B) Decisión y Optimización en ambiente difuso. Como temas más concretos, dentro del campo de la Optimización, se desarrollaron estudios sobre Programación Lineal Difusa. En el área de la Decisión se estudiaron problemas de Clasificación y Diagnóstico y también problemas de Decisión Estadística donde los últimos temas teóricos, antes mencionados, encontraban su aplicación natural.

Posteriormente (años 84 a 90) los temas se diversifican y amplían, en una etapa en que aún no existen líneas de investigación claramente aplicadas (o aplicables) pero donde ya se apuntan las tendencias que conducirán a la situación actual. Los problemas teóricos que se abordan están fuertemente ligados a la necesidad de proporcionar una base sólida a ciertos problemas de Optimización y Decisión, concretamente se centran en los problemas de comparación de cantidades imprecisas y en el tratamiento de etiquetas lingüísticas. Además el campo de la Decisión y Optimización se amplía con temas referentes a: Decisión con información evidencial, Optimización sobre grafos difusos, Decisión Multicriterio y Juegos con información imprecisa.

Por último, junto con la continuación y ampliación de los temas existentes, aparecen temas nuevos que han de servir de impulso para la evolución en años posteriores de la investigación del grupo. Estas líneas son en concreto:

- Lógica y Control Difuso
- Redes Neuronales y Sistemas Difusos
- Representación y Manipulación de Información Imprecisa en Bases de Datos

Muy poco tiempo después (1992) se unió a estas tres líneas una nueva dedicada a Aprendizaje en Ambiente Impreciso y en estas cuatro líneas, junto con la inicial de Decisión y Optimización, se encuadran actualmente los trabajos del grupo.

En lo sucesivo analizaremos con más detalle el trabajo desarrollado por cada una de estas líneas, comentando al mismo tiempo los proyectos de investigación del grupo asociados a las mismas. Posteriormente se verán las interrelaciones existentes entre

ellas, por último comentaremos los intentos de transferencia de resultados que se han hecho junto con la valoración de los mismos.

II. ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Antes de abordar las distintas líneas es importante tener en cuenta que frecuentemente la aparición de distintos temas se ha originado por la necesidad de encontrar nuevos puntos de vista para resolver un determinado problema. Es por ello que no existe en muchos casos una separación real entre los trabajos de una línea y otra. Por otra parte este es un fenómeno natural ya que estamos hablando de un grupo de trabajo integrado y coordinado.

A. Optimización y Decisión en ambiente Difuso

Como ya hemos mencionado antes esta es una de las líneas más antiguas y ya en la introducción hemos comentado algunos de sus resultados más interesantes. En general, todos los temas antes mencionados se han continuado en más o menos grado:

En el campo de la Programación Lineal Difusa se han establecido y resuelto los modelos referentes a Programación Lineal Difusa con valores enteros, se han estudiado también modelos especiales como el del transporte difuso. En el campo de la Optimización sobre grafos difusos, se ha establecido toda una teoría similar a la clásica referente a los problemas de flujo óptimo. Por último, en el campo de la decisión unipersonal se ha avanzado en el estudio del manejo de la información cuando esta viene dada en términos de cuantificadores lingüísticos.

Además en este área no sólo se ha continuado con los temas existente, sino que se han añadido nuevos temas con excelentes resultados. Así el campo de la Decisión se ha ampliado con el estudio de los problemas de toma de Decisiones en Grupo con Información Lingüística. La idea básica a desarrollar es la siguiente:

Un proceso de decisión en grupo se lleva a cabo en situaciones de decisión que se caracterizan: (i) por la presencia de dos o más individuos, cada uno determinado por sus aptitudes, motivaciones y personalidad; (ii) por la existencia de un problema común y de un conjunto de posibles soluciones; (iii) y por la intención de alcanzar una decisión colectiva sobre la solución que resuelve el problema.

En la teoría de decisión en grupo es usual expresar las valoraciones u opiniones personales mediante relaciones de preferencia sobre el conjunto de alternativas X , $\mu_{P_k}(x_i, x_j) \in [0, 1]$ nota el grado de preferencia de la alternativa x_i sobre la x_j de acuerdo al experto k . Sin embargo, no siempre el experto

puede dar con exactitud el grado de preferencia de las alternativas x_i sobre x_j . Bajo estas circunstancias parece adecuado el uso de valoraciones lingüísticas en lugar de numéricas. Así el experto podría expresar su preferencia utilizando una etiqueta lingüística extraída de un conjunto de términos lingüísticos que representan una escala de expresiones de certeza lingüísticamente valoradas.

Suponiendo un conjunto de alternativas o decisiones posibles, la cuestión básica es cómo relacionar los diferentes esquemas de decisión. Existen dos posibilidades: (i) establecer un consenso algebraico o proceso de selección; (ii) establecer un consenso topológico o proceso de consenso. El primero calcula un esquema de decisión de valor significativo dentro de un conjunto de decisiones, mientras el segundo calcula una medida de distancia entre los diferentes esquemas de decisión. Nuestro trabajo se centra en el estudio de los problemas de decisión en grupo con relaciones de preferencia lingüísticas. A continuación se indican algunos breves epígrafes del mismo:

- Estudio y desarrollo de operadores de agregación de preferencias lingüísticas.
- Diseño de medidas de preferencia de alternativas sobre relaciones de preferencia lingüísticas.
- Desarrollo de procesos de selección (consenso algebraico) para problemas de decisión en grupo.
- Desarrollo de medidas lingüísticas de consenso.
- Desarrollo de procesos de consenso (consenso topológico).

El otro nuevo campo de trabajo se motivó debido a la necesidad de disponer de potentes herramientas de cálculo para resolver los problemas asociados a grafos y a programación entera; pero pronto se reputó como un área de trabajo con entidad propia. Nos referimos al estudio de los algoritmos genéticos, su aplicación en distintos problemas de tecnología "fuzzy" y el uso de herramientas procedentes de la lógica difusa para su desarrollo.

Los algoritmos genéticos (AG) son procedimientos adaptativos para la búsqueda de soluciones en espacios complejos. Están basados en los procesos genéticos de los organismos biológicos y en los principios de la evolución natural de las poblaciones. Un problema importante que puede aparecer durante la ejecución de un AG es la *convergencia prematura* hacia óptimos locales. Las causas de este problema son la falta de *diversidad* en la población de soluciones (cromosomas) y una desproporcionada relación entre la *exploración* (visitar nuevas zonas no contenidas en la población) y la *explotación* (utilizar la información disponible acerca del espacio de búsqueda) mantenida por el AG. Para resolverlo se han considerado varias soluciones, entre ellas, la

modificación de los operadores genéticos y el estudio de los valores óptimos para los parámetros de control del AG. Herramientas basadas en la Lógica Difusa pueden ser utilizadas para abordar este problema y mejorar la convergencia de los algoritmos. Nuestro trabajo está orientado hacia el uso de herramientas fuzzy para aportar soluciones a estos problemas. Los siguientes epígrafes describen brevemente nuestro trabajo en esta área:

- Diseño de operadores genéticos mediante conectivos difusos para introducir distintos niveles de diversidad en población y un adecuado balance entre la explotación y la exploración.
- Diseño de controladores difusos para el control de los parámetros de un AG y así controlar el grado de diversidad en la población.

Los trabajos referentes al uso de algoritmos genéticos en control difuso los comentaremos en el apartado correspondiente a las relaciones entre líneas.

Los proyectos de investigación desarrollados por el grupo en el seno de esta línea son los siguientes:

- Proyectos terminados:
 - Aplicaciones de la Lógica Difusa a Problemas de Optimización DGICYT PS 88-90
- Proyectos en realización
 - Aplicaciones de la Lógica Difusa a Algoritmos Genéticos DGICYT PS392-0933

B. Razonamiento Aproximado, Lógica y Control de Sistemas Difusos

Dentro de esta línea se encuadran todos los trabajos realizados por miembros del grupo referentes a temas de razonamiento aproximado por medio de Lógica Difusa, tanto desde el punto de vista de su utilización en sistemas basados en el conocimiento como desde el de su empleo en el control de sistemas difusos.

Así pues aquí se encuadran los trabajos de nuestro grupo acerca de problemas de control cuando estos se enfocan desde el punto de vista del razonamiento aproximado. En este ámbito se han desarrollado estudios comparativos acerca de las distintas funciones de implicación que pueden utilizarse en el "modus ponens" generalizado. También se ha propuesto una versión lingüística de la regla composicional de inferencia que permite trabajar sin la representación semántica de las etiquetas.

Dentro de la línea de Lógica, Razonamiento aproximado y Sistemas basados en el conocimiento, los principales temas sobre los que hemos estado trabajando son:

- Estudio teórico de distintos modelos de Lógica para la Inteligencia Artificial: lógica difusa, lógica multivaluada y lógica no monótona, obteniendo como resultados:

La equivalencia entre lógicas multivaluadas y familias indexadas de lógicas bivaluadas Clasificación de los operadores de consecuencias de los distintos sistemas de inferencia del razonamiento aproximado Construcción de un sistema sintáctico basado en reglas y en el modus ponens de las lógicas bivaluadas y multivaluadas. Demostrando la adecuación y completitud de tales sistemas sintácticos.

- Construcción de herramientas para implementar distintos modelos lógicos: hemos diseñado un Sistema de Mantenimiento de la Verdad (TMS) genérico que puede ser particularizado para distintas lógicas: Un TMS (sistema de mantenimiento de la verdad) para lógicas multivaluadas con un número de valores de verdad finito. Un TMS para lógicas $[0,1]$ -valuadas. Un TMS para lógicas difusas,
- Estudio del problema de la validación de bases de conocimiento, tanto para conocimiento con incertidumbre como sin incertidumbre: Estudio de la inconsistencia, y diseño de algoritmos para buscar entradas que producirían inconsistencia. Estudio de la completitud, y diseño de algoritmos para calcular entradas que no producirían respuesta. Estudio de la redundancia y diseño de algoritmo para eliminar reglas redundantes. • Estudio de la efectividad y explicación lógica de distintas herramientas de Inteligencia Artificial: Efectividad del control difuso Efectividad de los sistemas difusos Interpretación lógica de las Redes Neuronales

En cuanto a la aplicación de estos resultados como herramienta tecnológica, son dos los puntos de incidencia: por un lado en la aplicación del control difuso y por otro en la validación de sistemas basados en el conocimiento.

los proyectos de investigación desarrollados por nuestro grupo dentro de esta línea han sido:

- Proyectos terminados
 - ORBE "Ordenador borroso de propósito general". Ministerio de Industria
 - DRUMS "Defeasible Reasoning and Uncertaining Management Systems". CEE Programa Esprit.
- Proyectos en realización
 - Los resultados obtenidos dentro de esta línea están siendo aplicados en los proyectos TIC 92-0665 y TIC 94-1347 que se describen más adelante.

C. Redes Neuronales y sistemas difusos

Esta línea surge de la idea básica de conectar la tecnología de redes neuronales con la lógica y la tecnología "fuzzy". Partiendo de este punto los temas fundamentales que se han tratado son, de una parte el tratamiento de sistemas difusos mediante redes neuronales y de otra el diseño de sistemas de decisión en ambiente impreciso con ayuda de redes neuronales.

En el primer tema se han conseguido los siguientes resultados:

- Inferencia Difusa mediante redes neuronales

Uno de los métodos más utilizados en la inferencia difusa, ha sido, la regla composicional de inferencia, que depende la T-norma y T-conorma escogida, y no satisface exactamente el modus ponens, es decir, si x es A , entonces y es B . Si x es A , y no es exactamente B . Se ha propuesto un método de inferencia en un sistema difuso, mediante Redes Neuronales, que consigue un resultado más exacto, que los métodos tradicionales, sin tener que elegir ninguna T-norma, ni T-conorma específica.

- Tratamiento de reglas mediante pesos.

Uno de los problemas más importantes en el control difuso, es el de identificar los sistemas mediante reglas, pero a veces los datos existentes no proporcionan reglas totalmente precisas, por lo que una solución, es asignar a cada regla, un peso asociado, perteneciente al intervalo $[0,1]$ Se ha utilizado una red neuronal, para identificar los pesos de todas las posibles reglas, que pueden identificar un sistema, a partir de datos crisp. A partir de la importancia que pueden tener los sistemas basados en reglas con pesos, y de los métodos de inferencia en cualquier sistema, Se ha propuesto un método de inferencia para los sistemas con pesos en las reglas, mediante redes neuronales.

- Identificación de ecuaciones relacionales mediante redes neuronales difusas.

La modelización de cualquier sistema difuso, mediante un sistema de ecuaciones relacionales, obliga a resolver ecuaciones de la forma $X * R = Y$, siendo X e Y entradas y salidas respectivamente y donde la operación $*$ en su forma más general es T-conorma/T-norma. Se ha realizado un estudio sobre la identificación de sistemas descritos por ecuaciones relacionales difusas max-min, mediante Redes Neuronales difusas max-min.

En el segundo se han obtenido interesantes resultados en campo de la comparación y ordenación de números difusos, según el criterio del decisor.

Para ordenar y/o comparar números difusos - existen en la literatura especializada más de 20 métodos diferentes, algunos de ellos contradictorios con otros, y generalmente difíciles de interpretar por un decisor en problemas reales. Además es muy

difícil que alguno de estos métodos pueda representar adecuadamente la forma de decidir de un decisor humano. Por otro lado, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son capaces de aprender y reproducir sistemas de comportamiento desconocido (como puede serlo el comportamiento de un decisor humano), con la precisión deseada (RNA son aproximadores universales), a partir de un conjunto ejemplos. Esto será válido para decisores reales, si tienen un comportamiento coherente, lo que asumimos de entrada.

De acuerdo con estas ideas, hemos construido una RNA de propagación hacia adelante, que ha sido entrenada con un conjunto de ejemplos adecuadamente seleccionados, y que es capaz de reproducir el criterio de comparación de números difusos (trapezoidales) de un decisor humano. Las experiencias realizadas con 3 personas de características muy diferentes han mostrado que la RNA es capaz de reproducir al 100ejemplos aprendidos, y por encima del 95% los ejemplos de un conjunto de tests. Con la RNA entrenada para una persona concreta, tenemos un Método Personal de Comparación de Números Difusos, que permite de forma automática, ordenar cualquier cantidad de números difusos que el decisor pueda manejar. Adicionalmente, hemos desarrollado un método para construir un índice sobre R, de los números difusos ordenados, para poder medir "distancias" entre estos números, de acuerdo con el criterio del decisor. Podemos entonces aplicar el propio criterio del decisor a problemas de optimización con información difusa.

Nuestro interés es ahora utilizar esta metodología de aprender y aplicar el criterio de decisión de un experto a situaciones reales, como en finanzas (concesión de créditos, etc..). Para ello, será necesario conocer bien los parámetros (difusos o no) que manejan los expertos en sus decisiones, y construir las funciones de pertenencia que resumen la toma de decisión concreta. En definitiva, lo que pretendemos es construir una Máquina de Decisión Global Difusa.

Los proyectos de investigación desarrollados por en grupo en torno a esta línea son los siguientes:

- Proyectos terminados:
 - Redes neuronales y Lógica Difusa DGICYT PB89-0464
- Proyectos en realización:
 - Modelos difusos de redes neuronales y sus aplicaciones. DGICYT PB392-0945

D. Representación de datos y conocimiento impreciso

El objetivo de esta línea es el estudio e implementación de bases de datos donde la información que se incluya pueda ser imprecisa, (con valores no bien definidos), y/o incierta, (que no estemos seguros de su certeza más que en un cierto grado).

Los elementos básicos que la Lógica Difusa nos proporciona para trabajar con este tipo de información en bases de datos son:

De una parte, el concepto de etiqueta lingüística, su interpretación como subconjunto difuso y todos los elementos asociados, tales como relaciones de semejanza, cuantificadores etc.. Todo ello nos permite una buena representación de los valores imprecisos de un atributo. De otra parte, las teorías de la Posibilidad, Probabilidad y Evidencia nos permiten un adecuado tratamiento de la incertidumbre y también relacionar esta con la imprecisión, caso de que sea necesario.

El tratamiento de esta clase de información se está abordando tanto desde un punto de vista teórico, lo que supone la generalización de los modelos de datos existentes, como a nivel de implementación. Los modelos de datos que se han abordado desde esta perspectiva han sido, el modelo relacional, el de base de datos lógica o deductiva y el modelo semántico o conceptual. En cada uno de ellos se han alcanzado distintos resultados y en estado de la investigación se encuentra a un nivel diferente.

El ámbito donde más se ha avanzado es en el del modelo relacional. Desde el punto de vista teórico, se ha conseguido una definición de base de datos relacional difusa (GEFRED) que permite el tratamiento conjunto de imprecisión e incertidumbre y que generaliza resultados ya existentes. Para este modelo se ha establecido un sistema de consulta basado en el Álgebra Relacional que permite el uso de funciones de agregación formulados como cuantificadores lingüísticos. También se ha analizado el problema de la dependencia funcional difusa y sus implicaciones con el diseño de estos modelos, en este punto se han podido demostrar resultados equivalentes a los del caso clásico. Desde el punto de vista de las implementaciones, se ha desarrollado y actualmente se está mejorando un prototipo de Sistema de Gestión de Base de Datos Relacional Difusa (FIRST) que utiliza una variante del SQL como lenguaje de consulta y ORACLE como sistema soporte.

Las dificultades encontradas en aplicaciones de tipo médico para describir ciertas estructuras de información han conducido a nuestro grupo a interesarse por el estudio de la imprecisión e incertidumbre en los modelos de base de datos deductiva

y semántica:

En el primer caso se ha desarrollado un modelo teórico de base de datos lógica difusa que generaliza y reproduce todos los resultados del caso clásico. Además amplía este con la posibilidad de representar, junto con datos imprecisos, ignorancia de distintos tipos. El modelo soporta también un procedimiento de deducción donde las reglas asociadas a la base de datos también pueden ser de tipo impreciso permitiéndose que los grados de certeza vengan expresados tanto en términos de probabilidad como de posibilidad. También se han hecho avances en la implementación de este modelo. De hecho, ya se tiene una primera versión del prototipo FREDDA: un interfase que permite el tratamiento de una base de datos difusa con reglas imprecisas por medio de PROLOG. En el futuro existe el proyecto de obtener un sistema integrado con FIRST.

En el caso de los modelos conceptuales, el estudio se encuentra todavía en una fase inicial. Lo que se ha conseguido en la actualidad es la generalización de los distintos modelos de datos orientadas a objetos difusos existentes mediante la utilización de un modelo de datos conceptual genérico. Ello permite describir los distintos tipo de incertidumbre e imprecisión que pueden presentarse a nivel de valores de atributos y relaciones entre objetos. El modelo se está generalizando para que admita imprecisión a niveles más abstractos como son el de la existencia o no de un objeto y su pertenencia o no a una clase. Existe también el proyecto de implementar el modelo en un sistema orientado a objetos convencional.

Las aplicaciones que se han desarrollado en este campo han sido siempre en el ámbito de la información médica y se corresponden con los resultados experimentales de los proyectos de investigación asociados a esta línea y que son los siguientes:

- Proyectos terminados:
 - Una base de datos imprecisa para procesar información médica CYCIT TIC 690/90
 - Diseño e implementación de una base de datos imprecisa para procesar información hospitalaria CYCIT TIC-92-0844
- Proyectos en realización
 - Diseño e implementación de un modelo de base de datos deductiva. Aplicaciones al tratamiento de la información médica". CYCIT TIC 94-1347.
 - Cooperation network ERCIM group in Databases and Information Systems. Programa de Capital Humano y Movilidad CEE

E. Aprendizaje en ambiente impreciso

La idea básica de esta línea consiste en desarrollar mecanismos automáticos que "capturen" la información imprecisa de los fenómenos reales. Dentro de este ámbito muy general los trabajos de nuestro grupo se han centrado en el aprendizaje inductivo de sistemas difusos.

Los modelos de aprendizaje inductivo tratan de obtener información a partir de una serie de ejemplos de un determinado sistema. Esta información puede utilizarse para comprender y utilizar dicho sistema.

Actualmente hay dos vías diferentes de investigación y desarrollo dentro de la línea que trabaja sobre estos modelos.

En primer lugar, se ha investigado en procesos de generación automática de reglas y su aplicación a problemas de diagnóstico médico. Dentro de este proyecto se ha investigado sobre la aplicación de algoritmos genéticos para la obtención de reglas que puedan ser fácilmente comprendidas por los expertos humanos, y que permitan por ejemplo diagnosticar una enfermedad o su evolución esperada utilizando para ello registros de pacientes con un diagnóstico o evolución conocida. En el proyecto se ha desarrollado un software, llamado SLAVE (Structural Learning Algorithm in Vague Environment), que implementa estas técnicas y permite sobre un entorno amigable, poder aprender e inferir utilizando como representación básica del conocimiento reglas difusas. Uno de los objetivos planteados en todo el proceso ha sido la identificación de las variables fundamentales para describir cada una de las posibles clases del problema, es decir, los algoritmos deben ser capaces de eliminar variables (información) no relevante para la clasificación.

El trabajo desarrollado en esta vía permite resolver problemas de clasificación sobre una gran cantidad de ámbitos distintos, las aplicaciones realizadas sobre problemas médicos están siendo muy satisfactorias, tanto por los altos porcentajes de aprendizaje obtenidos, como por la interpretación que los propios expertos pueden hacer del conocimiento obtenido.

La segunda vía de trabajo se centra en la aplicación de técnicas de aprendizaje al control de procesos industriales. Fundamentalmente el objetivo es construir un modelo que permita, partiendo de programas de control previamente desarrollados y especificaciones sobre nuevas necesidades, generar automáticamente nuevos programas para nuevos procesos de control. Es decir, a partir de un conjunto de especificaciones de alto nivel relativas, por un lado a la descripción estática de la instalación industrial que se va a controlar, y por otro a la descripción dinámica de la política de control que se desea aplicar, el mo-

parecen ser muy aptos para extraer el conjunto de reglas que describe la función. Estas ideas conducen a la posibilidad de explotación de bases de datos relacionales mediante el uso de reglas difusas, así como el uso una nueva vía de aprendizaje de reglas mediante ejemplos.

El uso de redes neuronales en problemas de Optimización Como ya se ha comentado en el apartado correspondiente, uno de los temas que se han tratado en la línea de redes neuronales consiste en la utilización de estas para la toma de decisiones introduciendo la subjetividad del decisor. Uno de los resultados más interesantes ha sido la posibilidad de disponer de una red neuronal "personal" que compare números difusos de la misma forma que lo haría un decisor concreto. La sustitución del procedimiento de comparación de números difusos que aparece en todo algoritmo de Optimización Difusa por dicha red neuronal permite obtener algoritmos "a la medida" del decisor.

Otro tema de trabajo interesante se encuentra en la utilización de redes neuronales para la resolución directa de problemas de optimización sobre grafos. Dado que nuestros modelos de Optimización sobre Grafos Difusos siempre conducen a problemas paramétricos clásicos, la aplicación a los mismos de la técnica antes mencionada está dando resultados mejores en tiempo y complejidad de implementación que el uso de algoritmos más clásicos.

III. ALGUNOS INTENTOS DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA. PROBLEMAS ENCONTRADOS

Antes de comentar los intentos de transferencia tecnológica realizados por parte del grupo es importante tener en cuenta los siguientes hechos:

A) La mayoría de los proyectos de investigación en los que el grupo ha intervenido e interviene tienen carácter de I+D, y en todos ellos se han obtenido resultados de desarrollo software casi directamente aplicables a problemas prácticos.

B) Nuestra Universidad está situada en una de las provincias con menos desarrollo industrial del estado, lo que no facilita la posibilidad de realizar contratos directos con empresas locales.

Por estas dos razones, el grupo ha intentado promover proyectos de transferencia tecnológica a un nivel más amplio y contando con subvenciones públicas. Concretamente, los intentos se han hecho a través del programa PASO y han sido los siguientes:

A. El proyecto AMIGO de consulta flexible

Antecedentes La idea de este proyecto surgió del intento de transferir realmente al ámbito hospitalario

los resultados obtenidos en los proyectos de I+D dentro de la línea de representación de datos imprecisos.

Los resultados más importantes desde el punto de vista de su aplicabilidad eran:

1.- La elaboración de un modelo de representación de información y conocimiento imprecisos utilizando únicamente la estructura de base de datos relacional para su implementación. Dicho modelo, denominado "Base de Metaconocimiento Difuso" (BMD), es la pieza clave para el posterior desarrollo de las implementaciones ya que también permite que toda base de datos relacional difusa pueda representarse formalmente como una base de datos clásica.

2.- El desarrollo del núcleo software necesario para que toda pregunta imprecisa a una base de datos relacional (difusa o no) pueda "traducirse" en una serie de consultas "clásicas" a la base de datos "principal" y a la BMD asociada.

Hay que hacer notar que, si bien los resultados antes mencionados eran válidos desde el punto de vista científico, no lo son tanto desde un punto de vista de software comercial ya que definitivamente no existía una interfaz de usuario que permitiera hacer consultas imprecisas, ni añadir conocimiento acerca de terminología imprecisa de forma amigable.

Por otra parte, hace varios años que el servicio de Informática de hospital Clínico de Granada ha venido desarrollando un sistema de automatización del hospital que ha culminado en el proyecto "CARMENES" donde la gestión hospitalaria se aborda de forma integral mediante un conjunto de bases de datos relacionales gestionadas de forma unificada. Este proyecto de investigación está financiado por la empresa DATA GENERAL, quien comercializa el producto final: un sistema integrado de gestión hospitalaria. En dicho sistema se contemplan módulos de consulta orientada al usuario; pero todos ellos enfocados desde un punto de vista "relacional puro". Es decir, sin posibilidad de flexibilizar los perfiles de consulta.

Objetivos y Metodología El objetivo final del proyecto AMIGO era la producción de un módulo de consulta, adicional al proyecto CARMENES, que permitiría acceder a las bases de datos que lo componen mediante consultas imprecisas. La consecución de este objetivo implica una serie de tareas a realizar que sin entrar en los detalles de los problemas de temporización y desglose pueden resumirse en:

A) Selección de los elementos susceptibles de consulta imprecisa, dentro de las bases de datos que CARMENES maneja. Determinación de los ámbitos (gerencial, especialidades médicas etc..) donde esta consulta sería deseable o útil.

B) Creación de una o, en su caso, varias BMDs con datos contrastados de forma que recogan la terminología "media" dentro del ámbito de consulta.

C) Desarrollo de interfaces de usuario adecuadas a los ámbitos de consulta de forma que el proceso de consulta flexible sea lo más amigable posible.

D) Desarrollo, en su caso, de un módulo interactivo de creación de BMD para cada ámbito de forma que sea posible consultar con la terminología personal de cada usuario.

Desarrollo del proyecto El proyecto fué inicialmente presentado por DATA GENERAL al programa PASO, con nuestro grupo de trabajo y el Hospital Universitario como miembros del consorcio. Su valoración fué positiva en todos los ámbitos, salvo por la necesidad de incluir en el consorcio una empresa de tipo pequeño o mediano. Tras algunas negociaciones se incluyó en el mismo a la empresa ICR; pero cuando se intentó formular la propuesta definitiva la complejidad de la información que dicha empresa tenía que presentar así como ciertas experiencias previas negativas en contratos de investigación estatales la hicieron desistir del proyecto. En este punto, no hubo tiempo material para buscar otra nueva pequeña empresa que, de hecho, no era necesaria para el desarrollo del proyecto, antes de la finalización del programa antes mencionado.

Actualmente se está intentando relanzar el proyecto por medio de un contrato de investigación directo con la empresa DATA GENERAL. La consulta amigable a bases de datos apareció como una de líneas prioritarias del programa ESPRIT un mes después de que se desistiera de llevar a cabo este proyecto.

B. Proyecto de construcción de una Máquina de Decisión Global con Información Difusa. MDGD

Resumen Global del Proyecto En el mundo real (y en concreto en economía y finanzas) se maneja habitualmente información imprecisa o vaga, con la que se toman muchas decisiones, generalmente basadas en opiniones o criterios de expertos para "resumir" esta información difusa. La posibilidad de automatizar este proceso es sin duda interesante, y más si se trata de agregar los criterios de varios expertos.

El modelo que se proponía era una herramienta (similar a un sistema experto) que permite construir 2 módulos para cada problema concreto al que se quiera aplicar, y con los criterios de los expertos que se consideren, dichos módulos tienen como tareas respectivamente:

- Representar los parámetros (imprecisos) del problema que los expertos manejan para tomar la decisión, en forma de números difusos adecuados.

- Aprender el criterio de decisión del/los experto/s (con esta información difusa), usando Redes Neuronales Artificiales.

Se automatiza el proceso de decisión, ensamblando ambos módulos.

En principio el modelo se aplicará a problemas de economía y finanzas, como concesiones de créditos, o análisis de inversiones.

Objetivos del Proyecto El Objetivo Global del Proyecto se podía resumir en:

Obtener una máquina automática de -
ayuda a la decisión con información difusa

Para ello, se pretendían conseguir los siguientes Objetivos Parciales:

1.- Conocer y representar los parámetros que usan los expertos. Se pretendía conocer la información que varios expertos de las empresas del consorcio (Empresas financieras) manejan, y representarlos como datos difusos. Pretendíamos implementar diferentes formas de hacerlo, para usar en cada problema concreto real, aquella que mejor se adapte.

2.- Resumir los parámetros en utilidades difusas para el experto. Se pretendía resumir (de forma mimética a como lo hace el experto), los datos difusos representados en una utilidad (generalmente un número difuso).

3.- Aprender (Capturar) el criterio de decisión del experto. Se pretendía aprender, usando Redes Neuronales Artificiales, los criterios de los expertos consultados, a la hora de comparar números difusos, que serán representaciones de situaciones habituales de decisión para el experto.

4.- Ordenar automáticamente las utilidades difusas (2.-) con el criterio aprendido (3.-) y seleccionar la mejor opción.

Las siguientes características en la implementación eran esenciales:

(i) Flexibilidad: Aplicación a distintos problemas concretos de decisión. (ii) Adaptabilidad: Según el criterio individual o agregado de distintos usuarios (iii) Automatizado: El proceso de decisión se haría automáticamente

Identificación de resultados Se pretendían construir los siguientes módulos:

- Módulo de identificación y representación de parámetros en casos reales, con implementación de

varias formas seleccionadas, se incluyen los siguientes elementos:

- (i) Submódulo de identificación (no automático)
- (ii) Submódulo de representación en la forma más adecuada de las disponibles. (debe permitir la posibilidad de incorporar nuevas formas de representación).
- (iii) Submódulo de agregación o resumen de la información en una utilidad (se creará para cada caso real concreto).

- Módulo de Aprendizaje de criterios personales.

(i) Submódulo de obtención de los ejemplos de entrenamiento de la RNA. (ii) Submódulo de entrenamiento de la Red Neuronal Artificial. (iii) Módulo Principal de la M D G D, para uno o varios expertos concretos.

- Interface amigable comercial de todo el entorno.

Desarrollo del proyecto El proyecto fué presentado al programa PASO por la CAJA GENERAL DE AHORROS de Granada, formaban parte del consorcio además, la CAJA RURAL, la Universidad de Granada, a través de nuestro grupo de investigación y una pequeña empresa de desarrollo software llamada TREVENQUE. La propuesta fué evaluada positivamente; pero cuando se llegó a formular la propuesta definitiva con el gran volumen de información que ella implicaba, los fondos destinados al programa ya habían sido distribuidos. Se sugirió por parte de los responsable del programa que se desviase la propuesta a un programa alternativo denominado PATI; pero la complejidad de la información a cumplimentar hizo desistir del proyecto a los socios empresariales.

En la actualidad se está intentando relanzar el proyecto en forma colaboración privada de las Universidades de Granada, León y Asturias con CAJA-ASTURIAS.

C. El proyecto EDUCA

Planteamiento del proyecto EDUCA tenía por objetivo la construcción de un sistema TUTOR que ayudara a los controladores aéreos neófitos en el aprendizaje de funciones de organización, planificación y control del espacio aéreo. EDUCA entrenaría a los controladores aéreos con poca o nula experiencia para que adquirieran el conocimiento necesario para desarrollar sus cometidos fundamentales, específicamente, controlar eficientemente el tráfico del espacio aéreo dentro de un cierto entorno de aproximación a los aeropuertos. Sus características de mayor interés eran:

1.- Usar e integrar tecnologías que ya han madurado en ESPRIT y otros programas europeos, propiciando el entrenamiento intensivo en las siguientes áreas:

a) interfaces inteligentes, b) diseño orientado a objetos, c) ingeniería del software y uso de herramientas CASE. d) ingeniería del conocimiento y uso de herramientas de desarrollo de sistemas expertos, e) verificación y validación del software;

2.- Aumentar el nivel tecnológico de las empresas colaboradoras, y fomentar la cooperación entre usuarios, empresas de software, y centros de investigación;

3.- Explotar y difundir rápidamente los productos generados para la enseñanza del control del tráfico aéreo en la aviación civil, de forma que su impacto económico y social sea notable.

Desarrollo del proyecto EDUCA fué presentado al programa PASO por parte de un consorcio formado por:

- CEFELSA-INISEL que se encargaría de desarrollar el núcleo principal del tutor y era el contratista principal en este caso.

- INFOSERVICIOS que realizaría todo lo concerniente a los interfaces de usuario.

- La Universidad de Granada representada por nuestro grupo de investigación, quien sería responsable de la verificación, validación y consistencia del software, integrando además módulos de ayuda para con el núcleo del tutor para comprobar su eficacia.

Para la viabilidad del proyecto se impuso la participación de una empresa destinataria del producto, a lo que en un principio se comprometió la escuela de controladores aéreos, pero que posteriormente, no firmó la propuesta y el proyecto no se llegó a desarrollar.

IV. REFERENCIAS

Incluimos aquí una lista de referencias seleccionadas entre publicaciones del grupo más importantes y actuales. Obviamente, no podemos incluir una bibliografía completa, no obstante en las referencias que se mencionan puede encontrarse a su vez información adicional acerca de cada tema concreto:

1. Blanco A., Delgado M., Requena I. (1995) *A learning procedure to identify weighted rules by neural networks* Fuzzy Sets and Systems 69 pp. 29-36
2. Blanco A., Delgado M., Requena I. (1995) *Identification of fuzzy relational equations by fuzzy neural networks* Fuzzy Sets and Systems 71 pp. 215-226
3. Cubero J. C., Vila M. A. (1994) *A new definition of fuzzy functional dependency in fuzzy relational databases* International Journal on Intelligent Systems 9 (5) pp. 441-448

4. Castro J.L., Delgado M. and Trillas E. (1994) *Inducing implication relations* International Journal on Approximate Reasoning, 10 (3), pp. 203-286, 1994.
5. Castro J.L. and Zurita J.M. (1993) *An Heuristic in Rules Based Systems* Information Sciences, 74, pp. 97-110, 1993.
6. Castro J.L. (1995) *Fuzzy Logic Controllers are Universal Approximators* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 25 (04).
7. Castro J.L. and Delgado M. (1996) *Fuzzy Systems with defuzzification are universal approximators* por aparecer en IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 26 (02)
8. Delgado, M., González, A., (1993) *An inductive learning procedure to identify fuzzy systems*, Inter. Journal for Fuzzy Sets and Systems 55 121-132 .
9. Delgado, M., González, A. (1994) *A frequency model in a fuzzy environment*, International Journal of Approximate Reasoning 11, pp. 159-174,
10. González, A., Pérez, R., Verdegay, J.L., (1994) *Learning the structure of a fuzzy rule: a genetic approach*, Fuzzy System and A.I., vol III, n.1, pp. 57-70
11. González, A., (1994) *A learning methodology in uncertain and imprecise environments*, International Journal of Intelligent Systems, vol. 10, pp. 357-371.
12. Herrera F., Herrera-Viedma E., Verdegay J.L., (1995) *A Sequential Selection Process in Group Decision Making with a Linguistic Assessment Approach*. Information Science 80 1-17.
13. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L., (1995) *Tuning Fuzzy Logic Controllers by Genetic Algorithms*. International Journal of Approximate Reasoning 12 299-315.
14. Herrera F., Herrera-Viedma E., Verdegay J.L., (1995) *A Model of Consensus in Group Decision Making under Linguistic Assessments*. Por aparecer en Fuzzy Sets and Systems.
15. Herrera F., M. Lozano, Verdegay J.L., (1995) *Generating Rules from Examples using Genetic Algorithms*. En "Fuzzy Logic and Soft Computing". B Bouchon, R. Yager, L. Zadeh (Eds.), Word Scientific Por aparecer.
16. Medina J.M., Pons O. , Vila M.A., (1994) *GE-FRED. A Generalized Model of Fuzzy Relational Database* Information Science V 72 pp. 87-109
17. Medina J.M., Cubero J.C., Pons O., Vila M.A. (1996) *Toward the implementation of a generalized fuzzy relational database model* Por aparecer en Fuzzy Sets and Systems.
18. Requena I., Blanco A., Delgado M., Verdegay J.L. (1994) *Boltzmann Machines for Fuzzy Optimization* The Journal of Fuzzy Mathematics. 2(3) pp 1-12
19. Requena I., Delgado M., Verdegay J.L. (1994) *Automatic Ranking of Fuzzy Numbers with the criterion of a decision-maker learnt by an artificial neural network* Fuzzy Sets and Systems 64 pp.1-9
20. Vila M.A., Cubero J.C., Medina J.M., Pons O. (1994) *A logic approach to fuzzy relational databases* International Journal on Intelligent Systems 9(5) pp.449-469

I+D en Lógica y Tecnología Fuzzy en la Universidad de Murcia

Ramón Ruiz Merino y Antonio F. Gómez Skarmeta

Dpto. Informática y Sistemas

Facultad de Informática

Universidad de Murcia

e-mail: ramon@sandra.plc.um.es skarmeta@dif.um.es

1. Introducción

La investigación en el campo de la Lógica y la Tecnología Fuzzy en la Universidad de Murcia se concentra en tres grupos de investigación pertenecientes al Departamento de Informática y Sistemas. Sin embargo no puede decirse que las diferentes líneas en este campo respondan a una planificación global, ni siquiera que las procedencias de los distintos investigadores sea uniforme. Más bien al contrario, esta coexistencia responde a una casualidad, enriquecedora sin duda, que ha propiciado que investigadores de diferentes edades y procedencias tengan la oportunidad de compartir un ámbito común, aportando visiones complementarias de este campo. La profundización progresiva en el conocimiento de las líneas entre los diferentes grupos, augura fructíferas colaboraciones futuras entre grupos de este Departamento, que ya se han plasmado en proyectos de investigación que recogen e integran esfuerzos de muy diversa índole en este campo de la Tecnología Fuzzy.

De hecho desde hace un tiempo a esta parte, la interrelación y cooperación entre investigadores de nuestro Departamento tiene su reflejo más destacado en el grupo de trabajo denominado *Soft Computing*, en el cual participan investigadores pertenecientes a diferentes grupos de investigación de la Universidad de Murcia como el de Inteligencia Artificial e Ingeniería del Conocimiento y el de Percepción Artificial. Esta colaboración ha permitido integrar aspectos tales como la optimización, el razonamiento y el aprendizaje, permitiendo ello la realización de varios proyectos, la codirección de proyectos de tesis doctorales por parte miembros de los diferentes grupos, y el diseño de una serie de proyectos y desarrollos concretos de gran proyección futura.

La disparidad de procedencias, por otra parte, ha propiciado el que existan colaboraciones estrechas

también con grupos de otras Universidades. No podemos ni debemos olvidar que, en un Departamento joven como el nuestro la mayor parte del bagaje actual en este y otros campos de investigación, ha sido un equipaje con el que un conjunto de profesores hemos recalado en esta Universidad desde puntos distantes, habiendo quedado abierta una colaboración con las personas que han mantenido las líneas en los lugares de origen. En este sentido, Departamentos Universitarios como el de Electrónica y Computación, de la Universidad de Santiago, el de Informática y Computación de la Universidad de Almería, el de Ingeniería del Software y del Conocimiento de la Universidad de Las Palmas de Gran Canarias, o el de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, albergan grupos de investigación con los que la coordinación de líneas queda patente en proyectos y publicaciones comunes.

Parece plausible, por tanto, que esta presentación la hagamos a modo de "mosaico", enumerando por separado grupos y líneas de trabajo; revisaremos el trabajo de cada grupo a partir de un epígrafe general, matizando cada una de las líneas con una breve descripción, exponiendo los resultados, y presentando, donde sea posible, las posibles vías de transferencia tecnológica. No obstante, en aquellos apartados donde se estén aunando esfuerzos ya en este momento, incidiremos en los aspectos de colaboración, resaltando lo que son objetivos y resultados comunes.

2. Sistemas Basados en Conocimiento y Razonamiento Temporal

Bajo este epígrafe vamos a presentar los trabajos que se llevan a cabo dentro de algunas de las líneas del grupo de "Inteligencia Artificial e Ingeniería del Conocimiento", las cuales se dirigen en términos generales, a la aplicación de modelos de razonamiento

temporal a la monitorización inteligente de pacientes. Es el resultado de la confluencia, hace ya aproximadamente dos años, de dos líneas previamente iniciadas en la Universidad de Santiago. Una de ellas, el desarrollo de sistemas expertos basados en técnicas de razonamiento temporal, es la que describiremos en esta sección.

Nuestro trabajo en este tema, que comienza hacia 1983, ha estado casi siempre circunscrito a las aplicaciones en dominios médicos. La incertidumbre y la imprecisión inherentes al conocimiento médico hacen que éste sea un campo especialmente apropiado para poner a prueba la utilidad de las técnicas de razonamiento aproximado. Entre estas, la lógica fuzzy es, sin duda, la herramienta de elección, por su capacidad para manejar expresiones próximas al lenguaje natural. Ello simplifica notablemente la transferencia de conocimiento médico a un entorno computacional, permitiendo mantener una representación cercana a las expresiones propias del lenguaje médico. Por otra parte, el trabajo en el dominio médico impone la necesidad de razonar sobre datos clínicos que cambian en el tiempo. La cronología de los síntomas es crucial para entender los procesos fisiológicos que subyacen a la observación de un estado patológico, para establecer las decisiones diagnósticas y terapéuticas correctas, y para abordar el seguimiento posterior de la evolución del paciente. La propia naturaleza imperfecta del conocimiento médico impide fijar los umbrales temporales precisos que permiten distinguir entre hechos clínicamente relacionados y hechos sin conexión causal. Nuevamente, la lógica fuzzy proporciona una herramienta idónea para representar y gestionar la vaguedad temporal inherente al conocimiento médico, así como la asociada a las descripciones de síntomas subjetivos que están imprecisamente localizados en el tiempo. A continuación describimos algunos de los resultados conseguidos en relación a estas cuestiones.

- **Sistema experto para el seguimiento del estado materno-fetal durante el embarazo.**

El sistema abordaba la valoración del estado sensorial del feto, monitorizando las señales fisiológicas de frecuencia cardíaca y actividad física (movimientos fetales). Se aplicaban dos tests clínicos no invasivos: análisis de la evolución espontánea del estado de comportamiento fetal y valoración de la reactividad a estímulos neurofisiológicos. Los resultados de estas pruebas tenían un valor diagnóstico y predictivo sobre la

evolución de embarazos de alto riesgo. Para ello, se introdujo un modelo de representación de conocimiento temporal sobre marcos y reglas de producción, que posibilitaba la interpretación de los resultados de las secuencias de tests en correlación con otros datos de historia clínica. Este primer modelo de razonamiento temporal permitía hacer referencia a eventos pasados etiquetados mediante las fechas absolutas asociadas a la secuencia de consultas. El seguimiento temporal a lo largo del embarazo es un problema clínico bien protocolizado y pudo ser abordado con éxito mediante un modelo como el planteado. Se instaló un prototipo en la sección de embarazos de alto riesgo del Hospital Xeral de Galicia, que estuvo operativo durante varios años.

En esta etapa, tanto la representación de conocimiento, como las técnicas de razonamiento temporal empleadas, no descansan en modelos fuzzy, exceptuando un módulo concreto: el encargado del análisis de la evolución espontánea del comportamiento fetal. Se propuso una técnica de clasificación fuzzy de eventos de señal basada en conocimiento. En ella, los criterios usados por los expertos médicos eran explícitamente representados como sentencias condicionales fuzzy "if-then". El conocimiento se articulaba en torno a descriptores lingüísticos representando variables clínicas imprecisas. Las reglas proporcionaban prototipos de referencia para una clasificación fuzzy de tipo KNN.

- **Sistemas consejeros de terapia en oncología**

Un paso posterior en esta línea fue la propuesta de un modelo fuzzy de razonamiento hipotético-deductivo para tareas de diagnóstico: sobre la base de los datos clínicos iniciales, el sistema propone un cierto número de hipótesis abductivas; a partir de ello se establece la deseabilidad de obtener nuevos parámetros clínicos con el objetivo de refinar el conjunto de hipótesis diagnósticas en ciclos sucesivos. La metodología propuesta aplica una representación del conocimiento mediante marcos asociados a prototipos diagnósticos. Por una parte, éstos contienen conocimiento substantivo del dominio, como hallazgos característicos, conexiones asociativas, relaciones diferenciales, ... Además, los prototipos contienen conocimiento metadiagnóstico relativo a la forma de obtener y gestionar los datos substantivos, y a la forma de controlar el proceso de razonamiento diagnóstico. En el modelo, el conocimiento substantivo del dominio se representa mediante predicados sobre variables clínicas fuzzy, cuya comparación con los datos reales sirve de base para el

proceso de evaluación de hipótesis diagnósticas. El modelo se aplicó al desarrollo de un prototipo para diagnóstico y clasificación de leucemias en oncología pediátrica.

Siguiendo en el dominio de la oncología, un problema bien distinto es el seguimiento terapéutico del paciente, una vez diagnosticado e incluido en un protocolo de tratamiento apropiado. El protocolo establece unas líneas guía generales, que deben ser refinadas para el paciente concreto, en términos de la evolución del tumor y de los efectos tóxicos de los medicamentos citostáticos usados. Esto introduce la necesidad de aplicar técnicas de razonamiento temporal, y nos condujo a la introducción de nuevos modelos. En los desarrollos de esta etapa no hicimos uso de técnicas de razonamiento aproximado, por lo que no entramos en detalle, y nos limitamos a enumerar algunos resultados obtenidos: a) Desarrollo de un sistema consejero de terapia en cáncer de pulmón; b) Propuesta e implementación de un modelo de interfaz de usuario inteligente sobre una arquitectura de sistema basado en el conocimiento; c) Implementación de una herramienta de desarrollo de sistemas expertos, que incluye un modelo convencional de razonamiento temporal, una base de datos relacional estándar y el modelo precedente de interacción inteligente, todo ello en un entorno integrado; d) Desarrollo de un sistema experto para terapia en oncología ginecológica, basado en la herramienta anterior. Estos trabajos se realizaron en cooperación con: el Hospital Xeral de Galicia, el Hospital La Paz de Madrid, el Hospital La Peyronie de Montpellier, y el Royal Free Hospital de Londres. El primero de los resultados enumerados se transfirió a la empresa francesa Framentec. En particular, ese trabajo se financió mediante un proyecto ESPRIT dirigido por el Prof. J. Mira, mientras que la financiación de los restantes desarrollos provino ya de proyectos dirigidos por miembros del grupo.

• Modelo de restricciones temporales fuzzy

Existen múltiples problemas en los que la distribución de los datos en el tiempo se define estableciendo relaciones temporales entre ellos. La planificación de tareas es un ejemplo claro: el problema se formula definiendo restricciones sobre el tiempo de ocurrencia de los eventos (v.g. "tarea A antes de tarea B", "tarea B simultánea a C", ...) Otro ejemplo, del dominio médico en este caso, es la descripción de antecedentes y síntomas subjetivos, en los que la posición temporal se delimita en forma relativa (v.g. "disnea desde 4 ó 5 meses después del comienzo de las

palpitaciones"). Tanto en un caso como en el otro, la especificación sufre frecuentemente de imprecisión temporal. De hecho, la mayoría de los modelos convencionales de restricciones temporales proveen alguna forma de tratar la imprecisión, sea mediante restricciones cualitativas (v.g. "antes" es una restricción máximamente imprecisa), sea mediante restricciones métricas expresadas mediante intervalos de error (v.g. "entre 7 y 15 unidades de tiempo antes"). La lógica fuzzy permite formalizar el tratamiento de la imprecisión temporal, con las ventajas que de ello se derivan: cercanía a las expresiones lingüísticas usadas en las aplicaciones reales, generalización de distintos modelos convencionales en modelos fuzzy unificados, modelado de la granularidad temporal asociada a distintas unidades de tiempo, ...

Una de las aportaciones de nuestro grupo a este campo ha sido la introducción de un modelo de restricciones temporales cuantitativas imprecisas (FTCN o Fuzzy Temporal Constraint Networks). El modelo permite: a) la representación de instantes e intervalos definidos mediante etiquetas temporales absolutas o mediante expresiones relativas; b) el análisis de la consistencia de la información temporal; c) la inferencia de nuevas relaciones temporales a partir de las ya conocidas; y d) la resolución de consultas sobre relaciones temporales. En la etapa actual trabajamos en la aplicación del modelo a tareas de monitorización de procesos dinámicos, y en particular sobre el dominio asociado a la gestión del infarto agudo de miocardio en Unidades de Cuidados Intensivos Coronarios. Es una línea en la que confluyen el trabajo previo sobre los temas de razonamiento temporal y monitorización inteligente.

• Aplicaciones en agricultura

Aunque nuestro trabajo se ha centrado siempre prioritariamente sobre dominios médicos, en los últimos años hemos llevado a cabo algunas colaboraciones con el grupo de aplicaciones en agricultura del Departamento de Informática y Computación de la Universidad de Almería, primero desde la Universidad de Santiago y ahora desde la Universidad de Murcia. Dentro de esta línea, los dos temas básicos son: la implementación de una herramienta para diseño asistido por ordenador de invernaderos dotados de control bioclimático y la construcción de un sistema experto para control de plagas en invernaderos. Sólo comentamos el segundo, que es en el que aplicamos tecnología fuzzy.

Las funciones básicas del sistema experto son: establecer una estrategia de tratamiento del cultivo, seleccionar un producto fitosanitario adecuado y determinar el método de aplicación más apropiado. El problema de la selección de producto se resuelve mediante un modelo de decisión multicriterio a partir de redes de restricciones fuzzy, y está basado en una generalización del modelo FTCN anteriormente citado. Nuestra solución permite especificar las variables del problema (atributos de los productos, criterios de selección y grados de importancia de los criterios) mediante expresiones relativas imprecisas. La introducción de modelos de restricciones en este tipo de problemas facilita la adquisición de conocimiento, así como la eliminación de las redundancias y la detección de las inconsistencias introducidas por el usuario.

• Razonamiento basado en casos

Dentro del grupo se trabaja también en otras líneas relacionadas, centradas en torno a los campos del aprendizaje y el razonamiento basado en casos, que aunque no están específicamente ligadas a la tecnología fuzzy, completan esta visión general de la actividad desarrollada en el Departamento de Informática y Sistemas de la Universidad de Murcia. Los Sistemas de Razonamiento Basado en Casos (cbr) son sistemas basados en el conocimiento que alcanzan soluciones tomando como modelo episodios resueltos que mantienen en una base de casos. Durante el proceso de resolución, y a partir de los datos suministrados por el usuario, el sistema recupera de memoria la situación que mas se asemeja a la situación actual. Una vez validada esta recuperación se procede a la adaptación de la información del caso recuperado con los datos actuales. Posteriormente el sistema deberá decidir si esta experiencia será aprovechable para futuras consultas.

Estos sistemas nacieron en la década de los ochenta intentando modelizar el razonamiento analógico, a la vez que aceleraban el proceso de ingeniería de sistemas expertos facilitando las tareas de adquisición del conocimiento, y eliminando transformaciones complejas del conocimiento experto en reglas, frames, o cualquier otro paradigma conocido. Sin embargo, los primeros resultados no fueron del todo satisfactorios, y las tendencias actuales conducen al desarrollo de arquitecturas híbridas que combinan las ventajas de varios formalismos.

En colaboración con el grupo de Ingeniería del Software y del Conocimiento de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, nuestro trabajo se ha centrado,

de una parte en la definición y en el desarrollo de una de estas arquitecturas híbridas de forma que se alcancen niveles eficaces de rendimiento con modelos de conocimiento incompletos, y de otro, a la generación de soluciones en base a la combinación de las soluciones de varios episodios de memoria, y al estudio de medidas para la evaluación de la calidad y completitud del conocimiento codificado en el sistema.

La aplicabilidad de este sistema está demostrada para tareas de clasificación, como son los sistemas de interpretación y de diagnóstico. Por ejemplo hemos desarrollado un prototipo para la diagnosis de enfermedades del estómago y del intestino delgado en los canes, así como un sistema de interpretación que decide la concesión o no de un préstamo personal a un determinado cliente de un banco. Asimismo, esperamos en un futuro próximo extender estas posibilidades hacia tareas mas complejas como son las de diseño y planificación.

• Monitorización inteligente en entornos dinámicos

La unión de las líneas de razonamiento temporal y monitorización inteligente centra el trabajo actual del grupo, en el marco de un proyecto coordinado con la Universidad de Santiago. El objetivo general del proyecto es el diseño e implementación de un sistema de monitorización inteligente de pacientes para un dominio específico: el seguimiento de pacientes con cardiopatía isquémica aguda ingresados en una Unidad de Cuidados Intensivos Coronarios (UCIC) y sometidos a monitorización continua de la señal eléctrica y mecánica del corazón.

En líneas generales, se trata de proporcionar al clínico una herramienta con fines asistenciales y de investigación que, junto a las prestaciones actuales de los equipos de monitorización de última generación, proporcione funciones de información y de ayuda a la decisión basadas en la interpretación de la correlación temporal entre señales y otros datos clínicos. El sistema anticipará información de forma autónoma, más elaborada, y con mayor grado de interpretación que en los sistemas de monitorización disponibles en el mercado. Aplicará permanentemente un proceso de condensación, abstracción e interpretación del alto volumen de datos del paciente generados en la UCIC, y mantendrá una presentación automatizada en pantalla en la que se identificarán explícitamente las relaciones temporales y fisiopatológicas más significativas entre los

eventos detectados. En definitiva, se pretende potenciar la rapidez de respuesta clínica.

Desde el punto de vista asistencial, las funciones básicas del sistema serán:

- Facilitar una *interpretación* fisiopatológica integrada de eventos monitorizados en tiempo real, tales como arritmias, variables dinámicas del ECG y de actividad mecánica del corazón. La estrategia de monitorización podrá ser dinámica en función de lo que aconseje el estado del paciente.
- Proporcionar una *valoración* de la evolución del paciente en relación con los objetivos terapéuticos fijados por el médico, y aportar *consejo terapéutico* opcionalmente. El consejo terapéutico se orientará, tanto a lo relativo a los cambios en los fármacos, como al ajuste de dosis y horario según criterios farmacocinéticos y farmacodinámicos.
- Proporcionar un criterio *pronóstico* y, consecuentemente, una estratificación en grupos de riesgo con las implicaciones terapéuticas que ello conlleva. Para ello es necesario integrar la información procedente de las señales con la información de la historia clínica, la respuesta terapéutica, los controles bioquímicos y las técnicas de diagnóstico basado en imágenes.

El sistema cumplirá también algunas funciones en investigación básica fisiopatológica, como complemento a sus funciones asistenciales:

- Aplicación de las técnicas de procesado en tiempo real de las señales biológicas cardíacas latido a latido al estudio de la modulación neurovegetativa de la función cardíaca.
- Validación de la utilidad clínica de este tipo de análisis de las señales cardiocirculatorias mediante el estudio de su asociación en el tiempo con eventos y patrones de comportamiento de significado clínico bien establecido. El médico podrá definir patrones temporales complejos susceptibles de un posible significado clínico. Los patrones detectados serán almacenados en una base de datos multipaciente y podrán ser usados para estudios clínicos a posteriori.

En relación al campo de la monitorización inteligente, los aspectos singulares del sistema son: la aplicación de técnicas de razonamiento temporal

impreciso, la representación y gestión de conocimiento borroso, la introducción de estrategias de razonamiento abductivo basado en información temporal, el desarrollo de algoritmos para el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la utilización de mecanismos de interacción inteligente y la incorporación de técnicas de adquisición y procesado de imágenes médicas. Ciertamente, no se parte de cero, estando una buena parte de las funciones de bajo nivel ya resueltas en el sistema previo (SUTIL), con un prototipo ya instalado en el Hospital General de Elche, y otro en fase de instalación. Existe además cierto número de trabajos previos sobre la viabilidad de la aplicación de técnicas de razonamiento temporal en este marco; algunos de ellos se citan en las referencias.

• Proyectos

Concluimos esta sección citando los proyectos que, durante los últimos años, han financiado nuestra línea general de trabajo sobre sistemas basados en conocimiento y razonamiento temporal:

- Razonamiento temporal y planificación en un entorno clínico: aplicación en oncología ginecológica (Proyectos CICYT ref. TIC90-0496 y TIC92-1244E)
- Sistema de gestión de información temporal aplicado a un dominio médico (Proyecto de la Consejería de Educación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia ref. PCT94/48)
- Sistema de monitorización inteligente de pacientes basado en razonamiento temporal (Proyecto CICYT ref. TIC95-0604)

Existe además una colaboración al desarrollo de un proyecto del grupo de la Universidad de Almería:

- Diseño asistido mediante ordenador para la construcción de invernaderos automatizados (Proyecto PACE-PASO del CDTI ref. PR191/93)

3. Monitorización Inteligente

En esta sección presentaremos los trabajos, en el ámbito de la Tecnología Borrosa, del grupo de investigación del mismo nombre de esta Universidad. No obstante, la fuerte vinculación a través de estas líneas con investigadores de la Universidad de Santiago,

ha propiciado que se mantenga una estrecha colaboración en el desarrollo de los trabajos en este apartado, habiendo sido los resultados consecuencia de un trabajo estrechamente coordinado, como puede apreciarse en los proyectos, tesis y publicaciones resultantes.

Los comienzos de las líneas hay que buscarlos en la Universidad de Granada a finales de la década de los 70, y su consolidación en la Universidad de Santiago de Compostela a lo largo de la década de los 80. Lo que inicialmente fueron esfuerzos para conseguir instrumentación electrónica de bajo coste de interés en biología experimental o clínica médica, pronto dio lugar a dos líneas de trabajo muy fructíferas, que desembocaron en su desarrollo en el campo de la lógica borrosa. Por un lado, la investigación sobre instrumentación para prediagnóstico en consultas ginecológicas de alto riesgo encaminó a una parte del grupo hacia el área de la Inteligencia Artificial y los Sistemas Expertos, con unas líneas y resultados apuntados en la sección previa. Por la otra parte surgió una línea de trabajo tendente al desarrollo de un sistema fiable para la monitorización y diagnóstico evolutivo de pacientes en recuperación de Infarto Agudo de Miocardio (*IAM*) ingresados en Unidades de Cuidados Intensivos Coronarios (*UCIC*), línea que ganó en perspectivas incluyendo dentro de sus objetivos la realización de un conjunto de programas para prediagnóstico de urgencia y consejo terapéutico en situaciones propias de este tipo de Unidades.

El desarrollo de software de procesamiento numérico de las primeras etapas pronto dejó patente que se hacía necesario el desarrollo de módulos basados en conocimiento si se pretendía hacer frente a la complejidad de la tarea en su conjunto. A pesar del interés general en "cuantificar" las variables que intervienen en un problema, a través de procesos de medida y cálculo, la manipulación y transferencia de información es a menudo simbólica, en la medida en que el hombre opera mejor y razona mejor con símbolos (aunque resulten vagos) que con valores numéricos exactos. El conocimiento manipulado por el experto está repleto de términos descriptivos de difícil traslación al dominio computacional; sirva como ejemplo, dentro del entorno de la electrocardiografía, el hecho de que ciertos segmentos asociados a eventos relevantes se hayan identificado como de forma de "seno", "hoz", "gancho", "ala", etc. Resulta bastante claro, por tanto, que las valoraciones en el campo médico se realizan mediante propiedades descriptivas en lugar de medibles, y que los diagnósticos se basan normalmente en impresiones

visuales, en lugar de en valores numéricos detallados. De forma añadida, la incertidumbre, inevitablemente asociada a este tipo de tareas (pérdida o distorsión de los datos, información ambigua, imprecisión en la caracterización de múltiples situaciones, etc.), impone el uso de mecanismos para su tratamiento.

Ha de recurrirse, en suma, a un esquema de análisis "inteligente" de los datos que entran de forma continua, estructurado en múltiples niveles de "abstracción", en donde se realiza una extracción de información relevante de cada estrato al siguiente; es en los niveles superiores donde se representa y manipula información simbólica, lo que implica el traducir el conocimiento verbalmente expresado por el experto médico en hechos y reglas de producción con cláusulas lingüísticas imprecisas. Es de aquí de donde surgen las líneas de investigación en el campo de la lógica borrosa que comentamos a continuación.

• Supervisión Inteligente de Pacientes

La descripción de eventos significativos sobre una señal es realizada por los expertos de un modo predominantemente cualitativo, y en ella abundan términos lingüísticos imprecisos; el experto suele basarse en apreciaciones visuales de la señal, en lugar de en valores numéricos precisos. La incertidumbre en los criterios de valoración es otro factor a considerar; de hecho, en múltiples ocasiones se puede decir que la línea divisoria entre normalidad y anormalidad no está bien definida, dado que los patrones resultantes de desarreglos estructurales o funcionales son similares unos a otros, lo que hace muy difícil la implementación computacional de ciertos análisis. La aplicación de criterios determinísticos en estos casos es poco apropiada y no suele producir resultados satisfactorios.

Creemos que no se puede hablar de una solución de carácter general para abordar este tipo de problemas. No obstante, el tipo de datos y señales objeto de análisis y la propia naturaleza del conocimiento involucrado permiten aproximarse al problema mediante formulaciones en términos de reglas condicionales con cláusulas lingüísticas, lo que supone acogerse al marco formal establecido a partir de la teoría de conjuntos borrosos. En nuestro caso particular, hemos aplicado este tipo de esquema de análisis en la clasificación de patrones electrocardiográficos representativos de la actividad ventricular y el diagnóstico de arritmias, así como en la detección de episodios de isquemia a partir de medidas extraídas de la señal electrocardiográfica, habiéndose obtenido resultados muy prometedores en

ambos casos. El esquema de análisis de las señales que hemos utilizado para la consecución de ambos objetivos puede considerarse formalmente idéntico en ambos casos, en el sentido de haberse definido una serie de niveles de abstracción de los que surgen finalmente las entidades conceptuales necesarias para alimentar los esquemas de razonamiento aproximado en cada una de las aplicaciones.

Los resultados de esta línea de investigación han sido fructíferos, lo que ha permitido contar con aportaciones de financiación continuadas. Cuatro tesis doctorales y una buena cantidad de publicaciones nacionales e internacionales avalan los resultados académicos conseguidos. En cuanto a las fuentes de financiación, podemos citar las siguientes:

- Proyecto de Investigación de la Xunta de Galicia: "Sistema multiprocesador de monitorización en UCC orientado a la determinación de factores pronósticos que permitan predecir la muerte súbita y otras complicaciones cardíacas. (Ref. XU-GA8040/89).
- Proyecto de Investigación del FISs: "SUTIL (Sistema cUasi-inTegral de monitorización inteLigente" (Ref. PM89-0153).
- Acción de Mantenimiento de grupos de investigación del Programa Nacional TIC (CICYT): "Sistema de monitorización inteligente del electrocardiograma y variables hemodinámicas orientado a las necesidades actuales en el campo de la cardiopatía isquémica" (Ref. 356.90).
- Proyecto de Investigación del Programa Nacional de TIC (CICYT): "Entorno interactivo para el seguimiento de pacientes con cardiopatías isquémicas" (Ref. TIC91-0997-C02-02).

Los proyectos actualmente en ejecución en esta línea de trabajo se imbrican con los presentados en la sección previa (Sistemas basados en conocimiento y razonamiento temporal), lo que puede tomarse como un ejemplo claro de enriquecimiento mutuo de líneas de trabajo aparentemente no relacionadas. Una coordinación cuidadosa ha permitido formular objetivos de investigación conjuntos cuyo interés ya ha sido reconocido a través de una importante financiación pública.

Dentro de esta línea no sólo existen resultados académicos avalados por las publicaciones aludidas previamente, sino también sistemas en funcionamiento que incorporan las técnicas de análisis de señales y supervisión de pacientes que hemos comentado en

párrafos anteriores. Concretamente, hemos desarrollado y puesto a punto un sistema que, construido sobre dos módulos hardware comunicados vía red local, integra las técnicas de supervisión y detección de episodios isquémicos (proyecto SUTIL); este sistema actualmente se encuentra en fase de instalación en la UCI del Hospital General de Elche. Un prototipo previo de dicho sistema, sobre una configuración hardware reducida, lleva ya años funcionando el dicho Hospital, y su aceptación ha sido muy alta desde el primer momento. Con anterioridad a este sistema, se desarrolló una versión más dirigida a objetivos asistenciales, integrando módulos de diagnóstico de arritmias y un consejero de terapia para pacientes en estas Unidades.

En resumen, y dado el carácter aplicado de la investigación en esta línea, los resultados presentan unas perspectivas de transferibilidad evidentes, más aún si se tiene en cuenta que los módulos electrónicos sobre los que descansan las aplicaciones son de carácter estándar, de la misma forma que las herramientas hard/soft utilizadas en su desarrollo. Su utilidad en la supervisión de pacientes ingresados en Unidades de Cuidados Intensivos Coronarios, y su carácter singular en relación con los sistemas comerciales existentes (utilidad como herramienta de investigación clínica, flexibilidad y potencia de procesamiento), pensamos que podrían estimular el interés en cuanto a su transferencia.

• Eficiencia computacional en lógica borrosa

En los sistemas de monitorización, a los que se imponen condiciones de respuesta en tiempo limitado, un hándicap importante consiste en la falta de adecuación de las arquitecturas convencionales de computación para el tratamiento eficiente de las estructuras de información a que dan lugar las variables de tipo lingüístico o simbólico. Así, antes de aprovechar las potenciales ventajas que aportan las aproximaciones basadas en conocimiento a la automatización de las tareas de monitorización y/o control, en cualquier dominio de aplicación, es necesario disponer de herramientas de formalización y manipulación del conocimiento declarado en términos lingüísticos, para adaptarlo a las operaciones aritméticas y lógicas implementadas en las unidades de procesamiento de los computadores digitales. La cantidad y complejidad de las estructuras de variables y operadores a que dan lugar estas traducciones imponen, además, en una gran cantidad de casos, el uso de aceleradores o coprocesadores específicos, para hacer compatibles los requerimientos de tiempo de computación de estas

estructuras con los tiempos de respuesta exigidos en los sistemas en tiempo real.

Con estos requerimientos, si bien al principio nuestras incursiones en el campo de la lógica borrosa se circunscribieron al ámbito de la supervisión de pacientes, a medida que nuestra experiencia y conocimiento en dicho campo fue creciendo comenzamos a preocuparnos por temas más teóricos, relacionados sobre todo con aspectos de representación y manipulación computacional del conocimiento borroso. Debido a las necesidades propias de los sistemas en tiempo real, entre los que se encuentran nuestras aplicaciones, un aspecto clave en nuestras consideraciones fue el relacionado con la eficiencia computacional de los sistemas borrosos, y el diseño de arquitecturas de propósito especial para incrementarla.

Nuestras aportaciones en este campo han intentado ser generales y flexibles, de forma que se han desarrollado formulaciones genéricas respecto a los operadores involucrados. En el caso de las arquitecturas para control borroso hemos realizado un tratamiento unificado de las dos estrategias de ejecución con mayor presencia en la literatura (Regla a Regla y mediante Matrices de Implicación Global). Para cada una de ellas hemos propuesto una arquitectura sistólica que aborda el problema de ejecución de bases de conocimiento borrosas sin encadenamiento, usuales en control borroso. La viabilidad y buenas prestaciones de la arquitectura basada en Matrices Globales de Implicación se ha puesto de manifiesto tras la síntesis y simulación microelectrónica de la arquitectura propuesta.

En lo que se refiere a bases de conocimiento borrosas con encadenamiento, se ha desarrollado un método de ejecución basado en la propagación de grados de verdad lingüísticos asociados a las proposiciones que componen dicha base de conocimiento. El método permite la compactación de la misma, y la consiguiente realización en tiempo diferido de un importante número de operaciones, aliviando la carga computacional asociada. En esta línea se ha propuesto un modelo de representación de la base de conocimiento basado en redes de Petri que facilita la descripción e implementación de mecanismos de gestión e inferencia, lo que resulta especialmente adecuado para su implementación hardware.

A pesar de ser una línea menos consolidada que la anterior, su interés y vigencia la hacen perfilarse como una de las posibilidades más fundadas y coherentes en la continuación de nuestro trabajo a medio plazo, y los

resultados académicos pueden ya considerarse como de un buen nivel. Una tesis doctoral y varias publicaciones internacionales consideramos que abren unas perspectivas prometedoras en este campo. La financiación dentro de esta línea se reduce por el momento a la siguiente:

- Proyecto de la Xunta de Galicia "Soluciones para la implementación computacionalmente eficiente de sistemas basados en lógica borrosa. Ref. XUGA20601B92.

De nuevo en este caso los resultados se concretan en "productos" palpables, por mucho que dependan fuertemente de una parte de investigación básica previa. Las arquitecturas planteadas dan lugar a diseños microelectrónicos de prototipos terminados y simulados, preparados para su fabricación y posterior test. El mercado que mueven las aplicaciones electrónicas basadas en la lógica borrosa justifican, más si cabe que en el caso anterior, los esfuerzos en la línea de transferir estos prototipos para su fabricación en serie y comercialización como chips microelectrónicos aislados o insertados en sistemas de control.

4. *Soft Computing*: Aprendizaje, Optimización e Inferencia en ambientes Inciertos e Imprecisos

Comentaremos en esta sección las líneas de trabajo englobadas bajo el epígrafe de *Soft Computing*, en la cual confluyen diferentes líneas de investigación procedentes de los grupos de "Percepción Artificial" y de "Inteligencia Artificial e Ingeniería del Conocimiento". A diferencia de la computación tradicional, el paradigma del *Soft Computing* busca un espacio en la gestión de la imprecisión en el mundo real. La guía básica del *soft computing* es: explotar la posible tolerancia de los sistemas frente a la imprecisión, incertidumbre y la verdad parcial para alcanzar soluciones tratables, robustas y de bajo costo para problemas complejos.

Básicamente, el *Soft Computing* es una colección de metodologías de computación que se adhieren a los principios básicos de ésta. En esta reunión los principales constituyentes son: la Lógica Fuzzy, la Computación Neuronal y el Razonamiento Probabilístico, con la posterior incorporación de los algoritmos genéticos, redes de creencia, sistemas caóticos y partes de la teoría del aprendizaje. En esta

unión la lógica fuzzy concierne preferentemente con la gestión de la imprecisión y el razonamiento aproximado, la computación neuronal con el aprendizaje y el ajuste, y el razonamiento probabilístico con la incertidumbre y la propagación de la creencia. A pesar de esto, estas técnicas, junto con las otras citadas, son complementarias, consiguiendo a través de su integración el desarrollo de sistemas y productos con resultados cada vez más importantes. En este sentido el uso del *soft computing* conlleva el desarrollo de numerosos productos de consumo, sistemas industriales, sistemas multimedia, herramientas de desarrollo y sistemas expertos que exhiben un alto nivel de resultados.

La imprecisión (o ambigüedad) núcleo central de todos los estudios que se realizan dentro de esta línea de investigación puede provenir de forma natural por diversas razones. Por ejemplo, errores instrumentales debido al ruido en los experimentos pueden conllevar el que obtengamos información parcial o incompleta. En otros casos el extraer la información exacta puede ser excesivamente costoso o puede ser difícil de obtener. Por otro lado en algunos casos puede ser interesante o conveniente el utilizar información adicional proveniente de un experto la cual normalmente esta dada mediante variables lingüísticas del tipo grado, pequeño, más o menos, etc. Finalmente la incertidumbre surge en la propia naturaleza de los objetos, dado que al intentar agrupar los objetos puede suceder que los límites o bordes entre ellos no esten claros, existiendo una solapamiento en sus pertenencias.

Esta línea de investigación surge en un intento de complementar los trabajos realizados por diferentes investigadores del Departamento de Informática y Sistemas de la Universidad de Murcia para tratar y manejar, a través de enfoques diversos pero complementarios, diferentes aspectos de la imprecisión, tanto en lo relativo a la información como a su utilización en el razonamiento, reconocimiento o gestión. Las diferentes perspectivas desde las que se ha abordado el paradigma del *Soft Computing* para tratar problemas complejos en ambientes inciertos e imprecisos abarcarían:

- Problemas de Optimización y Decisión en ambientes Inciertos e Imprecisos
- Tratamiento, Representación y Manipulación de la Incertidumbre y la Información Imprecisa
- Redes Neuronales y Modelado de Sistemas

Estos temas se abordan desde diferentes técnicas y metodologías, cuya integración y complementación permite la obtención de soluciones eficaces y flexibles. A continuación resumimos las principales.

• Decisión y Optimización en ambiente difuso

Como temas concretos, dentro del campo de la Optimización, se desarrollan estudios sobre Programación Lineal Difusa y Aplicaciones, al tiempo que en el área de la Decisión se estudian problemas de clasificación que se realizan en combinación con otros campos del *soft computing* dentro de esta línea de investigación como el Modelado Difuso y los Sistemas de Reconocimiento.

En el campo de la Programación Lineal Difusa (PLD), se ha propuesto un modelo general y varias técnicas de resolución. Se ahonda en las técnicas de solución de diversos problemas particulares de PLD, centrándose sobre todo, por ser quizás el menos estudiado, en el caso de costos imprecisos, es decir, en el que la función objetivo está definida con números difusos como coeficientes.

Se ha diseñado y construido un sistema interactivo para ayudar al decisor en la resolución de problemas de PLD (abreviadamente denominado PROBO). Se exige la interacción para incorporar cuantos métodos teóricos se conocen en la literatura, de manera que el decisor no esté restringido por una única forma de abordar la resolución de determinado tipo de problemas, como son los de naturaleza difusa, en los que lo que más destaca es la flexibilidad de su planteamiento y, consiguientemente, la diversidad de soluciones que puede considerar.

Además, en esta línea de trabajo se están realizando las siguientes tareas:

- Métodos de resolución para problemas más complejos (multiobjetivo, etc.).
- Aplicación de la metodología seguida para el diseño de PROBO al caso de problemas de optimización discreta, que abrirían la vía hacia el estudio de ciertos sistemas basados en el conocimiento tratables bajo esos esquemas.
- Aplicaciones en dominios concretos (transporte, etc.).

Resultados en este apartado han sido una tesis doctoral, participación en proyectos de investigación subvencionados y colaboraciones con otras

Universidades, en particular con el Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada a través del proyecto "Aplicaciones de la Lógica Difusa a Algoritmos Genéticos" (DGICYT PS392-0933).

• Modelado Difuso de Sistemas y Clustering

El análisis cluster es un método tradicional estadístico consistente en la búsqueda de agrupaciones de datos que comportan ciertas características comunes entre sí, técnica que ha tenido un gran desarrollo dentro del ámbito de las estrategias de manejo de incertidumbre, tales como la teoría de la probabilidad o la teoría de subconjuntos difusos. Como consecuencia de dichos desarrollos se han alcanzado importantes resultados tanto dentro del desarrollo de clasificadores o reconocedores de patrones, como en el modelado de sistemas. En concreto, el modelado difuso de sistemas y su combinación con el uso de técnicas de análisis cluster difuso permite abordar problemas donde, debido a la complejidad inherente y la imprecisión en la información, se hace difícilmente abordable el problema desde modelos matemáticos clásicos bien por lo complejo de los sistemas obtenibles o bien por lo costoso de su obtención. Así el uso del modelado difuso abre una posibilidad de tratar los problemas desde sistemas menos exactos pero capaces de gestionar y manejar dicha falta de precisión, posibilitando además la obtención de modelos cualitativos del sistema en estudio consiguiéndose no sólo aproximarlos sino también describirlos.

Nuestro trabajo dentro de este campo es el profundizar en el uso del análisis cluster desde diferentes perspectivas en el modelado de sistemas con tratamiento de incertidumbre, estudiando diferentes enfoques y estableciendo por tanto un marco general en el cual se obtienen enfoques que nos permiten plantear modelos cualitativos y cuantitativos de los sistemas en estudio. De forma complementaria se han estudiado aquellos puntos en los que es deseable la integración de técnicas diferentes de las del clustering para la generación de reglas, que permitan abordar subproblemas donde su eficacia sea superior o donde no sea deseable el uso de enfoques basados en análisis clusters, utilizando herramientas de otros campos de esta línea de investigación como son:

- redes neuronales
- gradiente descendente
- algoritmos genéticos, etc.

Dentro de este campo se han conseguido diferentes resultados:

- Dentro de las técnicas de análisis cluster:
 - Estudio de los problemas de validación y detección de las agrupamientos más adecuados para colecciones de datos sobre los que no se tienen información previa
 - Análisis de las interrelaciones entre diferentes técnicas de clustering difuso y su integración con técnicas de clustering jerárquico
- Dentro del modelado difuso de sistemas:
 - Análisis y evaluación del uso de las técnicas de clustering difuso para la generación de reglas difusas en el modelado difuso de sistemas.
 - Desarrollo de diferentes técnicas y métodos para la generación de reglas difusas tanto en un enfoque descriptivo del sistema en estudio como en un enfoque aproximativo del mismo.

Estos resultados los avalan una tesis doctoral recientemente defendida, y la participación en proyectos de investigación relacionados con la línea, que comentaremos posteriormente.

• Sistemas de Reconocimiento con Información Heterogénea

Un sistema de reconocimiento es un sistema que tiene que ver con la búsqueda de regularidades significativas en entornos y complejos y ruidos. De una forma más escueta diríamos que se trata de la búsqueda de estructuras en los datos. En el caso de los enfoques convencionales para construcción de clasificadores determinísticos o probabilísticos los vectores de entradas que caracterizaban los rasgos o features de los datos eran cuantitativos (numéricos) por naturaleza. Estos sistemas producen una salida crisp (dos estados) y por tanto son más adecuados para problemas en los que no exista ninguna fuente de incertidumbre. En estos sistemas la información incompleta o imprecisa es descartada o ignorada tanto para el proceso de diseño como para el de test.

En el campo del tratamiento de imágenes el uso de la teoría de subconjuntos difusos surge del hecho de que muchos de los conceptos básicos en el análisis de imágenes como son los bordes o las relaciones entre regiones son imprecisas en sí mismas. En los enfoques convencionales como el análisis y reconocimiento de imágenes, se trata de segmentar la imagen en regiones significativas, extrayendo sus bordes o delimitaciones,

calculando sus rasgos y propiedades, así como las primitivas (líneas, curvas, etc) entre regiones, para finalmente desarrollar una reglas de decisión para describir, interpretar y/o clasificar las imágenes y sus regiones. En estos sistemas convencionales cada una de estas operaciones implican decisiones "*crisp*" (es decir si o no) para obtener las regiones, rasgos, primitivas, etc. Sin embargo dado que las regiones en una imagen no son siempre definibles de esta forma, la incertidumbre puede surgir en cada una de las fases señaladas anteriormente. De esta forma el desarrollo de un sistema de decisión debe tener suficiente capacidad para poder manejar y manipular en sus diferentes niveles la posible incertidumbre de forma que el sistema retenga toda la información contenida en los datos como sea posible, y así la respuesta última del sistema podrá contener la mínima incertidumbre a diferencia de los sistemas convencionales los cuales son altamente afectables por impresiones en los datos.

• Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos probabilísticos de búsqueda heurística que se inspiran en los mecanismos de la selección natural y en la genética. Estos algoritmos, incluyendo también a los Programas Evolutivos, pueden resultar apropiados en problemas con espacios de solución complejos para los cuales los algoritmos existentes no trabajan bien, y en particular, en problemas de Programación No Lineal en donde los métodos de solución clásicos suelen "caer" en óptimos locales.

A modo de resumen de los trabajos en curso, podemos citar:

- Se han obtenido muy buenos resultados para el Problema del Transporte Sólido Multiobjetivo Fuzzy No Lineal, en estrecha colaboración con grupos de la Universidad de Granada.
- Actualmente esta en fase de estudio y diseño el uso de AG para el proceso de ajuste y optimización de las bases de reglas generadas mediante otras técnicas
- Construcción de un Sistema Genético para la resolución de problemas generales de Programación Multiobjetivo No Lineal, tanto en ambiente fuzzy como crisp, y desde perspectivas diferentes a los sistemas genéticos ya creados.

• Razonamiento Probabilístico

Dentro del marco probabilístico, para modelado y mantenimiento del razonamiento aproximado, se ha trabajado con redes causales (también conocidas como redes de creencias). Más concretamente el problema de la inferencia en este tipo de representación. En este sentido se han desarrollado un conjunto de métodos híbridos que fusionan las ventajas de los dos grandes grupos de métodos conocidos para el tratamiento del problema: los exactos y los aproximados.

Todos los resultados obtenidos en esta línea se han desarrollado en estrecha cooperación con el grupo de Tratamiento de la Incertidumbre en I.A. del Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada. Entre dichos resultados cabe destacar la lectura de una tesis doctoral y la integración de estos métodos en el shell ENTORNO, desarrollado por el grupo aludido.

• Proyectos y desarrollos

La integración de las diferentes técnicas que se han detallado en esta apartado convergen en la consecución de una serie de diferentes proyectos en los que se integran de forma coherente los resultados parciales obtenidos en las diferentes líneas. Resumidamente, son los siguientes:

- Integración de métodos de Aprendizaje e inferencia en entornos con Información Heterogénea e Incierta con Aplicación al Análisis de Imágenes (proyecto CICYT TIC95-1019)

El objetivo es el estudio de las diversas técnicas susceptibles de ser utilizadas en el desarrollo de un sistema de reconocimiento, en el cual se contemple su utilización en entornos con necesidad de manejo de incertidumbre, y su posterior aplicación a un problema de reconocimiento de imágenes. Además de realizar el estudio de las diversas técnicas, un objetivo primordial es analizar la integración de diferentes técnicas en función de su grado de adecuación a los subproblemas asociados al reconocimiento, de forma que se pueda disponer de un entorno software de gran flexibilidad que bien a través de decisiones propias a partir de una aprendizaje previo o bien mediante una ayuda a la toma de decisiones con el usuario, establezca en función del grado y tipo de incertidumbre asociado al problema en cuestión, sea capaz de disponer de diversas herramientas de decisión.

Una primera parte del proyecto contempla el estudio teórico de los diferentes tipos de datos y sistema de aprendizaje supervisados y no supervisados a

utilizar dentro de entornos con gestión de incertidumbre, así como de las posibilidad de integración de los mismos para la constitución de un sistema de aprendizaje. Dichos estudios partirían de la existencia de conjuntos de datos previamente extraídos de los objetos correspondientes al objetivo del reconocimiento, datos en los que se podrían mezclar informaciones provenientes tanto de expertos como extraídos del propio entorno mediante técnicas de extracción de características. En este sentido un subobjetivo a realizar en paralelo es la investigación en técnicas de análisis e interpretación de imágenes orientadas hacia los requerimientos del reconocimiento de imágenes concreto del problema.

Finalmente, tras haber caracterizado a los objetos a reconocer y haber estudiado las posibles integraciones de técnicas de aprendizaje en entornos inciertos a aplicar para el reconocimiento de dichos objetos, se procedería a diseñar un sistema de clasificación o detector que sea capaz de combinar diferentes fuentes de información sobre los mecanismos de discriminación necesarios para establecer el mecanismo de percepción visual del objeto u objetos del estudio.

En este sentido el disponer de un sistema capaz de manejar estas diferentes fuentes de imprecisión permitirá el disponer de una herramienta de gran potencia y uso general al poder amoldarse a diferentes objetivos, al poder crearse su sistema de inferencia y generación de reglas a partir de la integración de diferentes enfoques de aprendizaje tanto supervisado como no supervisado.

- Integración de Técnicas de Generación de Reglas: Sistema IGOR

Dentro del ámbito de las técnicas de aprendizaje en entornos inciertos, el uso y desarrollo de la teoría de subconjuntos difusos y el razonamiento aproximado ha dado importantes frutos. Muchas de estas ideas se han incorporado en el diseño de diferentes sistemas de toma de decisiones en entornos diversos. Diversos trabajos entre los cuales también se encuentran algunos procedentes de esta línea de investigación han permitido poner en relación diferentes técnicas de aprendizaje no supervisado en campos diversos como el procesamiento de imágenes, o en el desarrollo de clasificadores o el modelado de sistemas difusos.

Nuestro objetivo con este proyecto es el desarrollo de un Sistema Informático Integrado capaz de facilitar a un decisor la posibilidad de especificar de una forma cómoda y flexible el conjunto de técnicas

y métodos que desea utilizar en el proceso de aprendizaje. Dentro de dicho sistema IGOR el decisor tiene la posibilidad de especificar: el nivel de supervisión que desea tener, pudiendo especificar las etiquetas lingüísticas que los dominios de las variables a utilizar, o la incorporación de conocimiento propio de tipo experto que desea incorporar y combinar con el aprendido; la interrelación entre las diferentes técnicas difusas, probabilísticas o neuronales, señalando para cada fase aquellas que desea probar; hasta la especificación de las técnicas o enfoques a utilizar para el proceso de ajuste y optimización del modelo inicial alcanzado como resultado del proceso de aprendizaje, para conseguir mejorar la inferencia obtenible a partir de dichos sistemas.

- Otros proyectos:

1. Proyecto TRUCO.

Diseño de un Sistema de Adquisición relativo a conjuntos difusos y métodos de comparación de cantidades y conceptos difusos para colectivos de individuos, para su uso en la descripción de sistemas difusos mediante aproximación lingüística.

2. Proyecto CAJA.

Proyecto desarrollado con la Caja de ahorros de Murcia para la construcción de un Sistema Inteligente para Optimizar Saldos en Cajeros Automáticos.

5. Comentarios finales

Cuando se hacen trabajos de I+D desde las universidades, se tiende a seguir un cierto enfoque experimental: se comienza proponiendo un modelo formal para la resolución de algún problema concreto; se desciende entonces a un dominio operacional, que sirve de banco de pruebas para el desarrollo de un prototipo de aplicación; la evaluación "in-situ" de los resultados, y su análisis posterior, permiten identificar las limitaciones de los modelos utilizados, y proporcionan el punto de partida para la propuesta de nuevos modelos teóricos, abriendo un nuevo ciclo teoría-aplicación-teoría. Quizá lo más interesante de este proceso es que, a través del contacto con el terreno de la aplicación real, surgen nuevas cuestiones que suponen un desafío a la teoría, y sirven de estímulo para el trabajo posterior. Podemos hablar de un retorno asociado a la transferencia de tecnología, cuya trascendencia en el desarrollo de las líneas de

investigación no es desdeñable. Sin embargo, para que este proceso inverso se produzca, primero debe darse el proceso directo, es decir, la transferencia de resultados prácticos hacia los sectores productivos. Este proceso suele tropezar con más dificultades: el desinterés de una buena parte de la trama productiva en estas cuestiones; el problema de la búsqueda de socios, que debería recibir más apoyo por parte de las entidades encargadas de promover la transferencia de tecnología; la carga adicional de trabajo burocrático que supone la consecución y realización de este tipo de proyectos; el esfuerzo asociado a la puesta a punto de desarrollos susceptibles de explotación comercial, que es un trabajo muchas veces improductivo desde el punto de vista científico; la contradicción existente entre una política científica que refuerza la cooperación con empresas y un sistema, la universidad, que prima el curriculum investigador frente a los trabajos de desarrollo; etc ...

En nuestro caso, cabe añadir algunos argumentos adicionales. En nuestros entornos geográficos no abundan precisamente las empresas potencialmente abiertas a este tipo de colaboración. A menudo se desconfía de los grupos locales y se prefiere la colaboración con grupos de las grandes capitales, más cercanos a la central de la empresa, que es la que al final toma las decisiones. La situación es especialmente penosa en el caso de las industrias dedicadas a la ingeniería biomédica. No obstante, y en este caso particular, contamos con la ventaja de la rentabilidad social que supone el desarrollo de aplicaciones para el ámbito sanitario, y que proporciona un beneficio directo a la población, al menos en el entorno local. Como se ha indicado en la presentación de las líneas relacionadas con dominios médicos, en todos los casos se ha procurado llegar a un prototipo, que queda instalado en un hospital y que, una vez finalizada la fase de evaluación clínica, continúa en operación. Ello supone un trabajo de mantenimiento, a menudo trivial e improductivo, pero que entendemos forma parte del proceso.

Sin embargo a pesar de todo, cada vez son más las empresas que apuestan por la incorporación paulatina de nuevas tecnologías como puede ser la Tecnología Fuzzy y en general todas aquellas incluidas dentro de la denominación común de Soft Computing. La razón está en la posibilidad de resolver problemas complejos en muchos casos de una forma menos costosa y más flexible, lo cual revierte normalmente en una mejora económica en muchos casos. La incorporación de esta tecnología no tiene porque implicar grandes proyectos, sino que pequeños desarrollos como los del Proyecto

CAJA, o el sistema TRUCO son muchas veces la mejor tarjeta de visita de cara a aquellos que piensan que la mejora tecnológica en base fundamental de la mejora en la competitividad y el desarrollo regional.

6. Agradecimientos

Los miembros de nuestros grupos de investigación, pertenecientes al Departamento de Informática y Sistemas de la Universidad de Murcia, al Departamento de Electrónica y Computación de la Universidad de Santiago, y al Departamento de Lenguajes y Computación de la Universidad de Almería agradecen a las entidades citadas en este trabajo las subvenciones que han hecho posible el desarrollo continuado de las líneas descritas. Queremos además agradecer el apoyo y colaboración que siempre se nos ha brindado desde otros grupos de investigación como los del Departamento de Ciencias de la Computación e I.A. de la Universidad de Granada, el Instituto de Automática Industrial, y en general todos aquellos que de una forma u otra han permitido que en plazo relativamente breve de tiempo se hayan podido consolidar los diferentes grupos de investigación de la Universidad de Murcia.

Referencias

- [1] Barro S., Marín R., Mira J., Rodríguez-Patón A. (1994) *A model and a language for the fuzzy representation and handling of time* Fuzzy Sets and Systems, 61, 153-175.
- [2] Barro S., Bugarín A., Félix P., Ruiz R., Marín R., Palacios F. (1995) *Fuzzy logic applications in cardiology: study of some cases* En "Fuzzy Logic and Soft Computing", eds. Bouchon-Menier, R. Yager and L. Zadeh. World Scientific (En prensa).
- [3] Barro S., Marín R., Otero R.P., Ruiz R., Mira J. (1992) *On the handling of time in intelligent monitoring of ccu patients* Proc. of the 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 871-873.
- [4] Barro S, Ruiz R y Mira J, *Fuzzy beats labelling for intelligent arrhythmia monitoring*. Computers and Biomedical Research, vol. 23, (1990), pp. 240-258.
- [5] Barro S, Ruiz R, Presedo J y Mira J, *Grammatic representation of beat sequences for fuzzy arrhythmia diagnosis*. International J on Biomedical Computing, vol. 27, (1991), pp. 245-259.
- [6] Barreiro A., Otero R.P., Marín R., Mira J. (1993) *An homogeneous and modular knowledge base for*

- the follow-up of clinical protocols* Methods of Information in Medicine, 32, 373-381.
- [7] Barreiro A., Mira J., Marín R., Delgado A., Couselo J.M. (1990) *Fuzzy knowledge representation for leukemia diagnosis in children oncology* En "Progress in Fuzzy Sets and Systems", eds. W. H. Janko, M. Roubens and H. J. Zimmermann, 22-34. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- [8] Bolaños M.J., Verdagay-López J.F, Hernández L.D. *Interpretación geométrica de medidas difusas. Compatibilidad e indeterminación*. I Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica fuzzy. 193-198, 1991
- [9] Bolaños M.J., Hernandez L.D., Salmeron A. *Experimentación numérica y comparación de integrales difusas*. V Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy.
- [10] Bustos P., Ruiz A., Guinea, D. *Neural Networks for Pneumatic Tactile Perception*. IES International Workshop on Sensorial Integration for Industrial Robots: Architectures & Applications, nov. 1989, pp31-37, Zaragoza, España.
- [11] Bustos P., Ibáñez A., Ruiz A., Guinea A., Barrios, L.J. *Generación de Sistemas de Tiempo Real para Problemas de Percepción Artificial*. V Congreso Latinoamericano de Control Automático. Febrero 1992, La Habana, Cuba.
- [12] Cadenas J.M., Verdegay J.L., PROBO: *An Interactive Systems in Fuzzy Linear Programming*. Por aparecer en Fuzzy Sets and Systems.
- [13] Cadenas J.M., Jimenez F., *Interactive Decision in Multiobjective Fuzzy Programming*. Por aparecer en Mathware and Soft Computing.
- [14] Cadenas J.M., Verdegay J.L., *Using Fuzzy Numbers in Linear Programming*. En revisión en IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics.
- [15] Cadenas J.M., Jimenez F., *A Evolutionary Program for the Multiobjetcive solid transportation Problem with Fuzzy Goals*. Por aparecer en Journal Operations Research and Decisions.
- [16] Cadenas J.M., Jimenez F., *Genetic Search in Fuzzy Multiobjective Programming*. VI International Fuzzy Systems Association World Congress (IFSA'95).
- [17] Cadenas J.M., Jimenez F., *Dualidad en Programación Lineal Fuzzy*. V Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy.
- [18] Cadenas J.M., Jimenez F., *El problema del transporte sólido multiobjetivo no lineal con metas fuzzy: un método de solución basado en algoritmos genéticos*. IV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy. 209-214, 1994
- [19] Cano J.E, Hernandez L.D, Moral S. *Importance sampling algorithms for belief networks*. International Journal Approximate Reasoning (Sometido).
- [20] Delgado M., Vila A., Gómez-Skarmeta A.F. *Un Método para Validar Procesos de Clustering Difuso*, IV Congreso Español sobre Tecnología y Lógica Fuzzy, Sep. 1994, pp. 279-284, Blanes, España
- [21] Delgado M., Vila A., Gómez-Skarmeta A.F. *An Unsupervised Learning Procedure to Obtain a Classification from a Hierarchical Clustering*, Second European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies and Soft Computing, Sep. 1994. pp. 528-533, Aachen, Germany
- [22] Delgado M., Vila A., Gómez-Skarmeta A.F. *Hierarchical Clustering to Validate Fuzzy Clustering*, Fuzz-IEEE/IFES' 95, March. 1995, pp. 1807-1812, Yokohama, Japan
- [23] Delgado M., Gómez-Skarmeta A.F., Martín F. *Un Enfoque Aproximativo para la Generación de Reglas*, V Congreso Español sobre Tecnología y Lógica Fuzzy, Sep. 1995, Murcia, España
- [24] Delgado M., Gómez-Skarmeta A.F., Martín F. *Generating Fuzzy Rules using Clustering-Based Approaches*, Third European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies and Soft Computing, Aug. 1995. Aachen, Germany
- [25] Fritsch C., Anaya J.J., Ruiz A., Ullate, L.G. *A High-Resolution Object Recognition Ultrasonic System*. Eurosensors VI, Oct 92, Spain
- [26] Guinea D., Barrios L.J., Ruiz A., Belancourt F. *Multisensor Information Integration*. Sensor Review Vol.10, Nº3, pp.133-136, July 1990
- [27] Hernandez, L.D; Bolaños. M.J. *Aplicación de algoritmos evolutivos para el problema de la triangulación en redes causales*. Tecnología y logica fuzzy Ed Francesc Esteva y Pere Garcia, 127-132, 1994
- [28] Marín R. (1992). *Research at Santiago University artificial intelligence group* Fuzzy Sets and Systems (Bulletin Section), 49 (3), 393-395.
- [29] Marín R., Mira J., Iglesias M. (1987) *Automatic acoustic stimulation system for nonstress foetal state evaluation* Medical and Biological Engineering and Computing, 25, 147-154.
- [30] Marín R., Mira J. (1991) *On knowledge-based fuzzy classifiers: a medical case study* Fuzzy Sets and Systems (special issue on Fuzzy Expert Systems), 44, 3, 421-430.

- [31] Marín, R., Mira J. (1987) *A knowledge oriented fuzzy classifier for foetal behaviour analysis* Proc. of the Second IFSA Congress, 384-387.
- [32] Marín R., Mira J. (1987) *An expert system for antepartum diagnostic evaluation* Proc. of the VII International Congress of Cybernetics and Systems, 902-907.
- [33] Marín R., Taboada M., Otero R.P., Barreiro A., Mira J., Delgado A. (1992) *Rapid prototyping of medical graphic interfaces* En "Database and Expert Systems Applications", eds. A. M. Tjoa and I. Ramos, 161-166. Springer-Verlag, Wien.
- [34] Marín R., Taboada M., Mira J., Barreiro A., Otero R.P. (1993) *Design and integration of a graphic interface for an expert system in oncology* International Journal of Biomedical Computing, 33, 25-43.
- [35] Marín R., Barro S., Bosch A., Navarrete I., Cárdenas M., Bugarín A., Mira J. (1993) *Un modelo para la representación de información temporal borrosa* Actas del Tercer Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, 209-216.
- [36] Marín R., Ruiz R., Martín F., Barro S., Palacios F. (1995) *An approach to fuzzy temporal reasoning in medicine* Mathware (En prensa).
- [37] Mira J., Marín R., Yáñez A., Delgado A., Otero R.P., Jacquet M., Barro S., Barreiro A., Couselo J.M. (1987) *Sistemas expertos y consejeros de terapia en medicina; ejemplos en cardiología, oncología pediátrica y medicina perinatal* Actas del III Simposium Internacional de Ingeniería Biomédica, 355-358.
- [38] Mira J., Marín R., Otero R.P., Barro S., Delgado A., Barreiro A., Ruiz R. (1991) *The artificial intelligence perspective in prevention, diagnosis and rehabilitation: some cases study*. En "Actualidades en Medicina Física y Rehabilitación", ed. L. P. Rodríguez, 1-8. Sepresa.
- [39] Presedo J., Vila J., Barro S., Palacios F., Ruiz R., Taddei A y Emdin M, *Fuzzy modelling of experts' knowledge in ECG-based ischaemia detection*. Fuzzy Sets and Systems. Aceptado, pendiente de publicación, 1995.
- [40] Rodríguez A., Martín F., *Combining Structures for Case Reuse in a CBR System*, Database and Expert Systems Applications (DEXA'95), Sept. 1995, Londres.
- [41] Rodríguez A., Martín F., Palma J.T., *Determining Relevant Information in a CBR System*, CAST'95, Mayo 1995, Innsbrück.
- [42] Ruiz A. *Mixture Models for Pattern Completion with Incomplete and Uncertain Training and Test Data*, En revisión en IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- [43] Ruiz A. *A Nonparametric Bound for the Bayes Error*. Pattern Recognition, V28 N6 pp.921-930, 1995.
- [44] Ruiz A., Guinea D., Barrios L.J., Bustos P., Betancourt F. *Data Structures for Multi-Sensor Integration*. Sensors and Actuators A, 32 (1992) pp. 491-498
- [45] Ruiz A., Guinea, D., Barrios, L.J. *An Empirical Multi-Sensor Estimation of Tool Wear*. Mechanical Systems and Signal Processing (1993) 7(2) pp.105-119
- [46] Ruiz A., Flores M. *Gesture Recognition for Natural Language Synthesis*. V International Symposium on Biomedical Engineering, Sept. 26-28 1994, Santiago de Compostela, Spain.
- [47] Ruiz A. *Pattern Completion through EM Learning of Attribute Dependences*. VI Simposium Nacional de Reconocimiento de formas y Análisis de Imágenes, 3-6 Abril 1995, Córdoba, Spain.
- [48] Ruiz A., Betancourt F., Guinea D., Barrios L.J. *Extracción de Características Sensoriales para la Percepción Artificial*. IV Congreso Latinoamericano de Control Automático, noviembre 1990, Puebla, México.
- [49] Ruiz A., Arcas J.F. *Quasi-Optimum Combination of Multilayer Perceptrons for Adaptive Multiclass Pattern Recognition*. IWANN'95, International Workshop on Artificial Neural Networks, June 7-9 1995, Málaga, Spain.
- [50] Ruiz R, Barro S, Bugarín A, Martínez J y Pérez P, *Acelerador programable para sistemas de producción borrosos: una alternativa sistólica*. En "Homenaje a Safvan Al Khouri Ibrahim", pp. 305-324. Servicio de Publicaciones Universidad de Granada, 1993.
- [51] Ruiz R, Barro S, Presedo J, Palacios F y Vila J, *Abstraction of information in electrocardiographic monitorin for the detection of myocardial ischaemia*. En "Proceedings of the V International Symposium of Biomedical Engineering", eds. C. Hernández, R. Hermida y J. Arias, pp. 291-294. Publicaciones de la Universidad de Santiago, 1994.
- [52] Taboada M., Marín R., Mira J., Macías M. (1995) *Representation of human-computer interaction by means of behavior rules* Applied Artificial Intelligence (En prensa).

Sesión Invitada sobre Aplicaciones del Control Fuzzy

Diseño de controladores borrosos robustos a partir de datos experimentales y el conocimiento heurístico del proceso.¹

A. García-Cerezo*, A. Ollero** .

*Universidad de Málaga. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
Plaza El Ejido, 29013 Málaga (Spain).
Fax:+34-5-2131413. Email: gcerezo@tecma1.ctima.uma.es

** Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
Escuela Superior de Ingenieros. Avenida Reina Mercedes, 41012 Sevilla (Spain).
Fax:+34-5-4556849. Email: aollero@esi.us.es.

RESUMEN.

En este trabajo se aborda el problema del diseño de controladores borrosos con propiedades de estabilidad y robusted, en el supuesto del desconocimiento del modelo completo del proceso bajo control. La técnica utilizada se soporta en la teoría de estabilidad de entrada-salida. Para la síntesis del sistema de control borroso se utilizan medidas experimentales sobre el proceso, técnicas de modelado borroso, así como la inclusión de reglas de carácter heurístico.

1. Introducción

Desde finales de los 80 las técnicas de control basadas en lógica borrosa han alcanzado una elevada popularidad tanto a nivel de investigación como en su aplicación en entornos industriales. Uno de los principales alicientes es la capacidad de abordar problemas de control en casos en donde los modelos del proceso que se ha de controlar no se conocen, o cuya complejidad no hace viable un planteamiento de control basado en técnicas convencionales.

Entre otros argumentos que justifican la utilización de sistemas de control basados en lógica borrosa está la posibilidad de incluir reglas de carácter heurístico, su capacidad de interpolación, así como la flexibilidad en la definición de leyes de control no lineales.

¹ Este trabajo se ha cofinanciado mediante el proyecto TAP-93- 0608-c03-01 de la C.I.C.Y.T y por el FALCON working Group (ESPRIT Project) de la C.E.

Por otra parte, no deben olvidarse algunos argumentos en contra de la utilización de los citados controladores. La naturaleza no lineal del controlador, así como la del proceso que se debe controlar supone una fuerte restricción a la hora de analizar y prever el comportamiento dinámico del sistema en bucle cerrado. Asimismo, la naturaleza compleja de estas dinámicas dificulta en muchas ocasiones la definición de un conjunto de reglas adecuadas.

Por ello, en muchas ocasiones, se prefiere abordar el diseño de sistemas de supervisión borrosa, en principio conceptualmente más cómodo, que el abordar directamente un sistemas de control directo borroso. Muchas de las aplicaciones industriales en control de la lógica borrosa soportan dichas estrategias.

La falta de herramientas específicas para el diseño bajo especificaciones de sistemas de control borroso directo es clara. El requerimiento más básico en todo sistema de control es garantizar la estabilidad del sistema en bucle cerrado, así como la robusted del diseño. También el problema de garantizar las especificaciones en régimen transitorio y permanente del sistema de control está básicamente sin resolver, recurriéndose frecuentemente a técnicas de prueba y error para alcanzar unos resultados satisfactorios.

Aunque ya desde los 70 se lleva investigando con respecto a la estabilidad de sistemas que incluyen elementos de control borrosos en el bucle de control (Driankov *et al.*, 1994), la translación de dichas técnicas al diseño es poco frecuente. De hecho, parte de las dificultades surgen de los requerimientos de dichas técnicas, que normalmente necesitan de un conocimiento preciso de los modelos de los procesos a controlar. Asimismo, parte de estas técnicas son sólo aplicables a sistemas de baja dimensión.

En este trabajo se aborda el problema del diseño de sistemas de control borroso, que garantice la estabilidad y robusted de la solución propuesta, en sistemas en donde no se conoce el modelo completo del proceso. Para ello se emplean técnicas de análisis de estabilidad basadas en la teoría de estabilidad de entrada-salida, que permite abordar de una forma adecuada el problema multivariable. Para su translación al problema del diseño, se emplea una reformulación del criterio de conicidad, que permite trabajar en base a un conjunto de medidas experimentales realizables sobre el proceso.

2. Diseño basado en la teoría de estabilidad de entrada-salida.

Supongase una planta no lineal n -dimensional representada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + Bu \\ y &= x\end{aligned}\tag{1}$$

donde $f(x)$ es una función no lineal de las variables de estado x , e y es el vector de variables de salida. u es el vector de variables de control. Este vector se genera mediante un controlador borroso, representado por la superficie de control:

$$u = -\Phi(x) \quad (2)$$

Para el diseño de dicho controlador, se parte de la siguiente información conocida sobre el proceso:

-Vectores de muestras de entrada-salida obtenidos de forme experimental sobre el proceso con entrada cero.

-Modelo linealizado del sistema en torno al equilibrio ($x=0$):

$$\dot{x} = Ax - Bu$$

siendo A el Jacobiano de $f(x)$ en $x=0$.

Entonces, el sistema representado en (1) puede reescribirse como

$$\dot{x} = Ax - H(x) \quad (3)$$

donde:

$$H(x) = -(f(x) - Ax - b\Phi(x)) \quad (4)$$

representa una función de realimentación no lineal.

La dinámica del sistema linealizado en el origen puede representarse por la matriz de transferencia::

$$G(s) = (sI - A)^{-1} \quad (5)$$

Consideremos ahora una ley de control lineal aplicable al sistema linealizado:

$$u_L = -Cx \quad , \quad (6)$$

cuya relación con el controlador borroso viene dada mediante:

$$C = b\Phi_x(x) \quad (7)$$

$$\text{donde } \Phi_x(x) = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_{x=0}$$

Entonces, la ecuación dinámica en bucle cerrado del sistema linealizado en el origen viene dada por

$$\dot{x} = Ax - b\Phi_x x = Ax - Cx = A^*x \quad (8)$$

Sobre las ecuaciones anteriormente mostradas puede aplicarse el criterio de conicidad. Este criterio es una generalización multivariable del bien conocido criterio del círculo. La

formulación de dicho criterio exige un sistema lineal realimentado por un elemento no lineal.

Bajo estas condiciones, el criterio de conicidad puede ser reformulado del siguiente modo (García-Cerezo and Ollero, 1994):

1) Estabilidad del sistema linealizado:

El sistema en bucle cerrado mostrado en (8) debe ser estable. La matriz de transferencia en bucle cerrado viene descrita por:

$$F(s) = G(s) [I + CG(s)]^{-1} = [sI - A + b\Phi_v]^{-1} \quad (9)$$

Donde la matriz C define el centro de un cono.

Desde el punto de vista del diseño, la estrategia es entonces simple: seleccionar una ley de control lineal que haga estable nuestro sistema linealizado

2) Condición de conicidad lineal.

$$(\max_{\omega} \|F(j\omega)\|) r < 1 \quad (10)$$

denominándose r el radio del cono.

condición que puede describirse como:

$$r < r_G = \frac{1}{(\max_{\omega} \|F(j\omega)\|)} \quad (11)$$

Como puede observarse el radio de conicidad lineal depende exclusivamente de la respuesta frecuencial del sistema linealizado en bucle cerrado, $F(j\omega)$.

3) Condición de conicidad no lineal:

Esta condición establece un límite a la dispersión de la ley de control no lineal con respecto a la lineal establecida para el modelo linealizado en el origen. En su formulación original, esta ecuación depende de la salida, y . Pero teniendo en cuenta (1), se ha formulado ya en función del vector de estados, x :

$$\|H(x) - Cx\| < r\|x\| \quad (12)$$

Esta condición puede reformularse como:

$$\|V_L - V_{NL}\| < r\|x\| \quad (13)$$

siendo $V_L \equiv Ax - b\Phi_A x$ y $V_{NL} \equiv f(x) - b\Phi(x)$ los campos vectoriales asociados al sistema linealizado en torno al origen y al sistema no lineal respectivamente. Por lo tanto (13) determina el rango de variabilidad de la dinámica no lineal con respecto a la lineal. Debe hacerse notar que dichos campos vectoriales corresponden a las expresiones de las derivadas en las ecuaciones de estado respectivas.

Esta condición puede reescribirse mediante:

$$\frac{\| (Ax - b\Phi(x)) - (f(x) - b\Phi(x)) \|}{\|x\|} = r_H < r \quad (14)$$

o bien,

$$\frac{\| A^*x - f(x) + b\Phi(x) \|}{\|x\|} = r_H < r_G \quad (15)$$

Parte de los términos de la expresión (15) son conocidos. Otros, como $f(x)$, pueden obtenerse a partir de medidas experimentales sobre el proceso.

Dado un conjunto de muestras de x correspondientes a la respuesta del sistema libre ($u=0$), la función no lineal, $f(x)$, puede obtenerse del vector de medidas, x , a través del operador gradiente, del siguiente modo:

$$f(x) = \text{grad}(x) \quad (16)$$

Uno de los principales inconvenientes se presenta cuando las medidas están afectadas por ruido. Este problema debe ser resuelto si se desea obtener una buena estimación de $f(x)$ en (16). El filtrado de la señal es una buena solución. No obstante, la introducción de filtros convencionales puede afectar al introducir una dinámica adicional al proceso. Dado que no es necesario operar en tiempo real, es aconsejable el tratamiento de las medidas mediante filtros como el de Fourier. Asimismo, es aconsejable la eliminación de todos los pares $(x, f(x))$ cuya relación ruido/señal sea elevada..

Entonces, mediante (8) y el cálculo del gradiente, puede calcularse el término $A^*x - f(x)$ de la expresión (15).

El término correspondiente al sistema de control no lineal se deriva de (15), determinando, para cada valor de x , el valor de $\Phi(x)$ que minimice $\|A^*x - f(x) + b\Phi(x)\|$. Mediante este proceso se determina también el radio de conicidad no lineal r_H , que debería verificar la restricción $r_H < r_G$. Este proceso genera una versión mapeada del sistema de control no lineal, que se tratará después.

En caso de verificarse la restricción $r_H < r_G$, el sistema realimentado será estable. Dado que el criterio de conicidad es, además, una condición suficiente, pero no necesaria de estabilidad, el diseño es además inherentemente robusto, tanto más cuanto mayor sea la diferencia entre el radio de conicidad lineal y el no lineal.

En caso de no verificarse dicha desigualdad, se repetiría todo el proceso determinando un nuevo centro del cono, C , que proporcione valores más elevados de r_G .

3. Ejemplo.

Para ilustrar la técnica desarrollada en la sección anterior, considérese un sistema dinámico en tiempo continuo, no lineal con tres equilibrios: Dos estables, en $x = \pm\sqrt{3}$ y uno inestable en el origen, $x = 0$. En las figuras 1a y 2a pueden observarse la respuesta del sistema ante distintas condiciones iniciales en ausencia de ruido y con un ruido aditivo a la salida.

El modelo linealizado de este sistema en el origen viene dado por:

$$\dot{x} = x + u$$

$$y = x$$

Siguiendo los pasos mostrados en el apartado anterior, en primer lugar se obtiene una ley de control que estabilice el sistema linealizado:

$$u = -Cx = -b\Phi_y x \quad \text{siendo } C \in R^+; \quad C > 1$$

Los polos en bucle cerrado se sitúan entonces en $s = -(C-1)$.

Mediante la ecuación (10), la condición de conicidad lineal es:

$$r < r_G = (C-1)$$

A continuación se evalúa la función no lineal, $f(x)$, utilizando las muestras de la respuesta libre del sistema (Fig. 1a). A partir de estas respuestas se estima los diferentes vectores gradiente, $\dot{x}(t) = \text{grad}(x(t))$, tal y como aparece en la figura 1b. Finalmente se construye $\hat{f}(x)$. (ver Fig. 1c).

En la figura 2 se procede de forma similar. En este caso la presencia de ruido hace necesario la utilización de filtros sobre las medidas y el gradiente. En las Fig. 2b. y 2c. se representa el gradiente a partir de las medidas y el obtenido tras un proceso de filtrado.

Finalmente, mediante la ecuación (15) se obtiene, para cada valor conocido de x , una función $\Phi(x)$ mapeada que verifique la condición de conicidad no lineal:

$$\frac{\|x - Cx - \hat{f}(x) + \Phi(x)\|}{\|x\|} = r_H < r_G$$

que, para este caso concreto se minimiza utilizando:

$$\Phi(x) = (C-1)x + \hat{f}(x)$$

lo que permite obtener la siguiente condición ($r_H = 0$) $<$ ($r_G = C-1$);

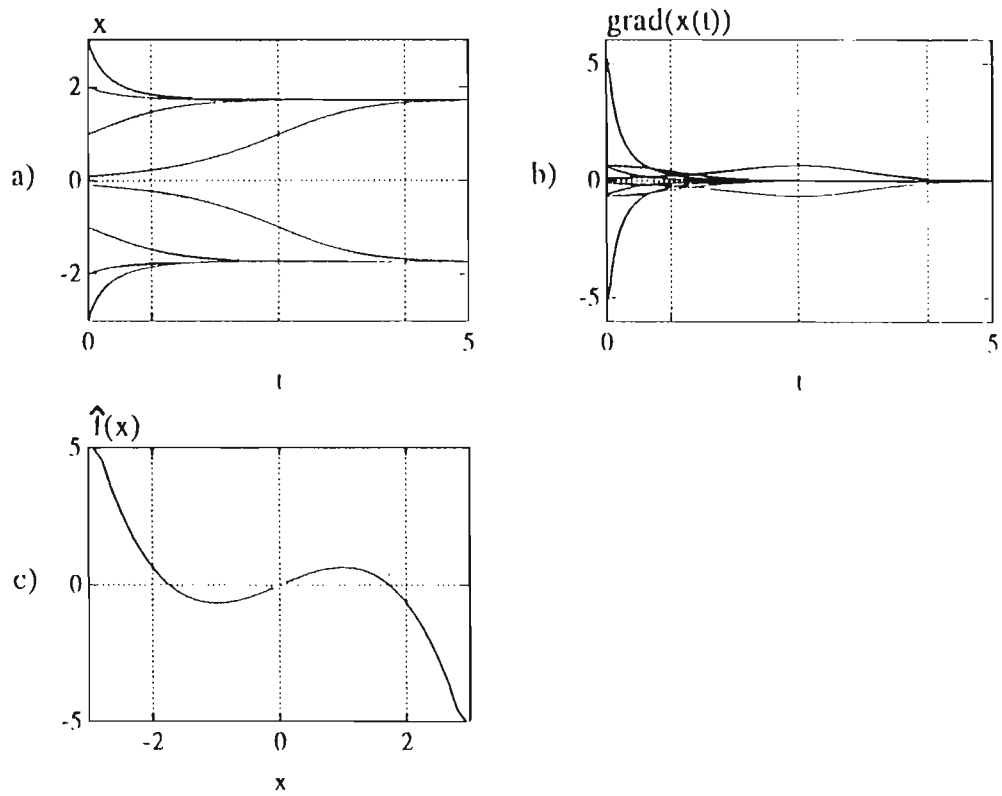


Fig. 1. a) Respuesta del sistema ante distintas condiciones iniciales, b) vector gradiente and c) estimación de $\hat{f}(x)$.

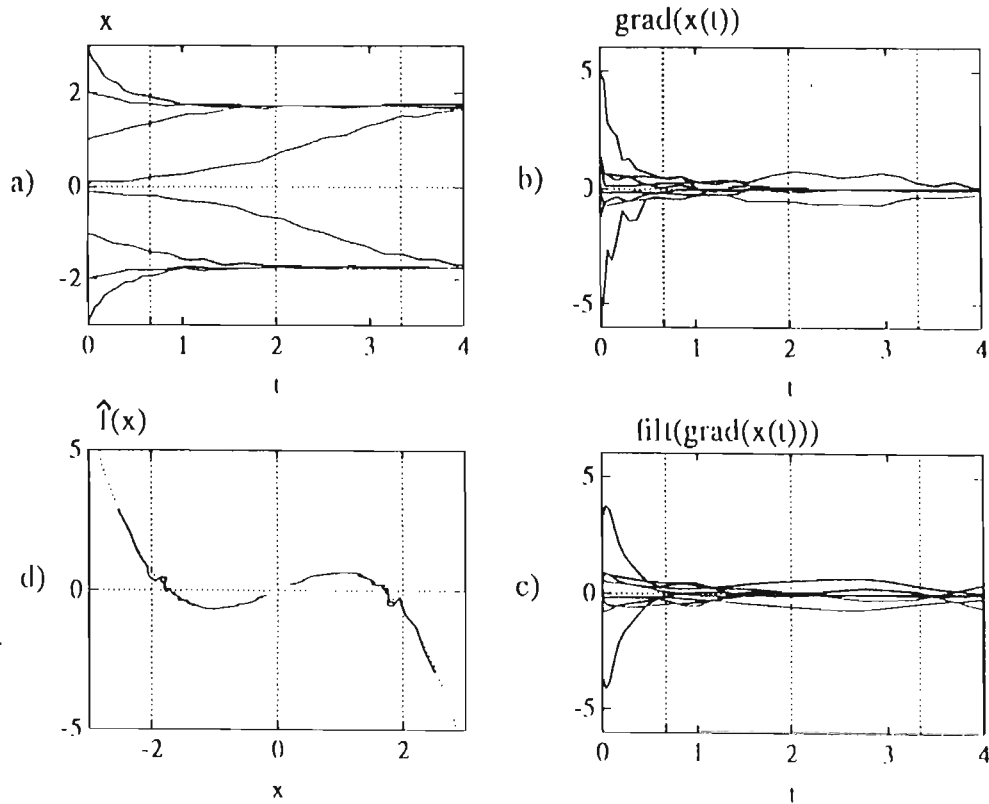


Fig. 2. a) Respuesta del sistema con ruido aditivo a la salida b) vector gradiente c) gradiente filtrado d) estimación de $\hat{f}(x)$.

El proceso finaliza mediante el modelado borroso a partir de la función mapeada $\Phi(x)$. En concreto, para la aplicación mostrada aquí se ha empleado una simplificación de la técnica de modelado de Sugeno (Takagi and Sugeno, 1985). En la Fig. 3 y en la Tabla 1, se representan los conjuntos borrosos asociados a la variable de entrada x , y el conjunto de reglas. A modo de comparación, en la figura 4 se representa la función no lineal original, $f(x)$. (ver Fig. 1c y 2d).

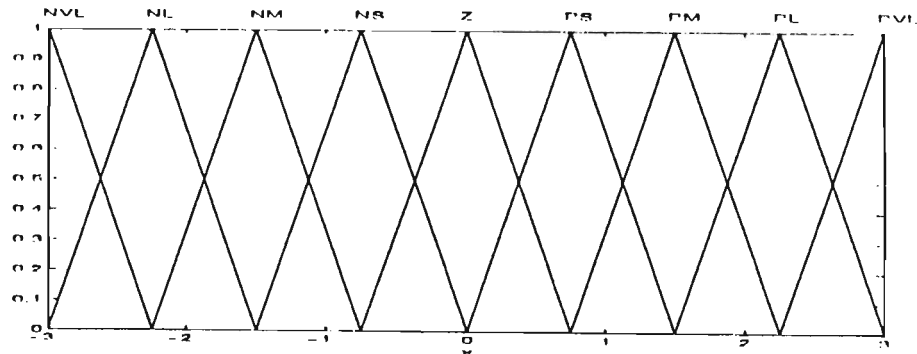


Fig.3. Conjuntos borrosos de la entrada x .

x	C_i
NVL	-0.2646
NL	-3.2028
NM	-3.5400
NS	-2.2082
Z	0
PS	2.1520
PM	3.4838
PL	3.1466
PVL	0.2084

Tabla 1. Conjunto de reglas

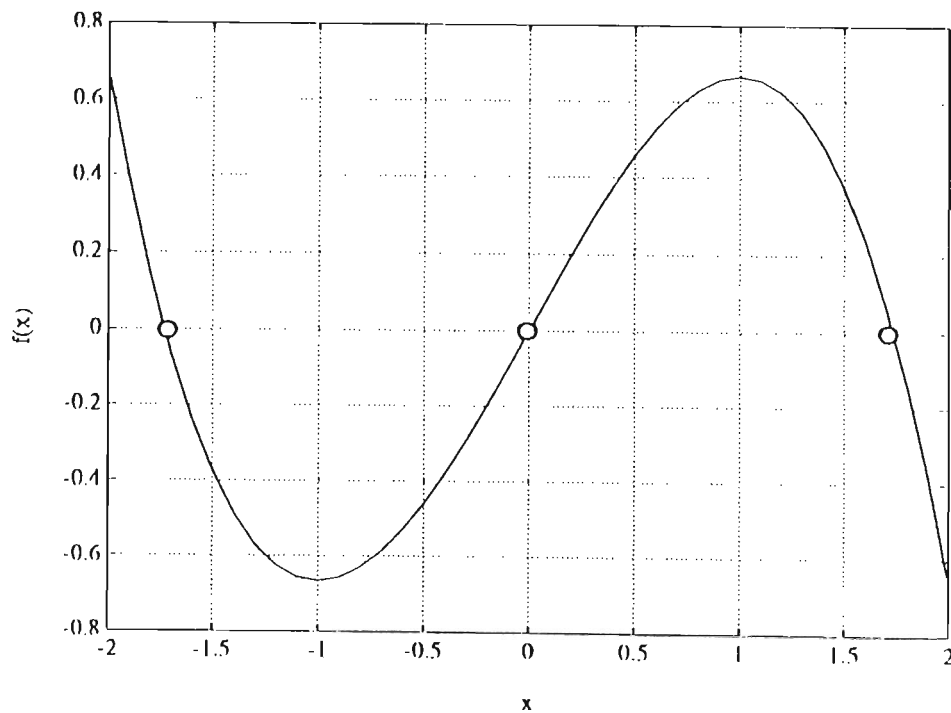


Fig. 4. Función $f(x)$ asociada al sistema dinámico
 $\dot{x} = f(x) + u$.

4. Aplicación.

La técnica anteriormente descrita se aplica al diseño del sistema de seguimiento de trayectorias del robot autónomo móvil RAM-1 (Ollero *et al.*, 1993), y cuya estructura se caracteriza por un sistema de tracción independiente en las ruedas izquierda y derecha, y un sistema de direccionamiento que coordina las ruedas delantera y trasera. Los tres motores utilizados son de c.c., alimentados por baterías.

Las variables que se definen para este sistema de control son: el desplazamiento lateral ξ al punto de destino en la trayectoria de referencia (que se fija siempre a cierta distancia por delante de la posición del vehículo), el ángulo θ del vehículo respecto al punto objetivo, y la curvatura γ del vehículo. La salida del vehículo u es la curvatura deseada.

Para el diseño del sistema de seguimiento borroso, se siguen los siguientes pasos (García-Cerezo *et al.*, 1995):

1) Se selecciona la dinámica del sistema linealizado en bucle cerrado, determinado por la matriz A^* (ver eq. 8). En este caso, se sitúan los tres autovalores en $\lambda = -4$:

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & -0.85 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 \\ -88.18 & -56.27 & -12 \end{bmatrix}$$

2) Se obtiene la condición de conicidad lineal r_G .

Mediante la eq. (11), evaluada para diferentes valores de realimentación C (Fig. 5), se obtiene $r_G = 0.424$, para $\Phi_y = [-13.06 \ 6.857 \ 0.2]$.

3) Utilizando datos experimentales y la ecuación (14), se determina un mapa de puntos Φ_y , de forma que se verifica $r_H = 0.173$.

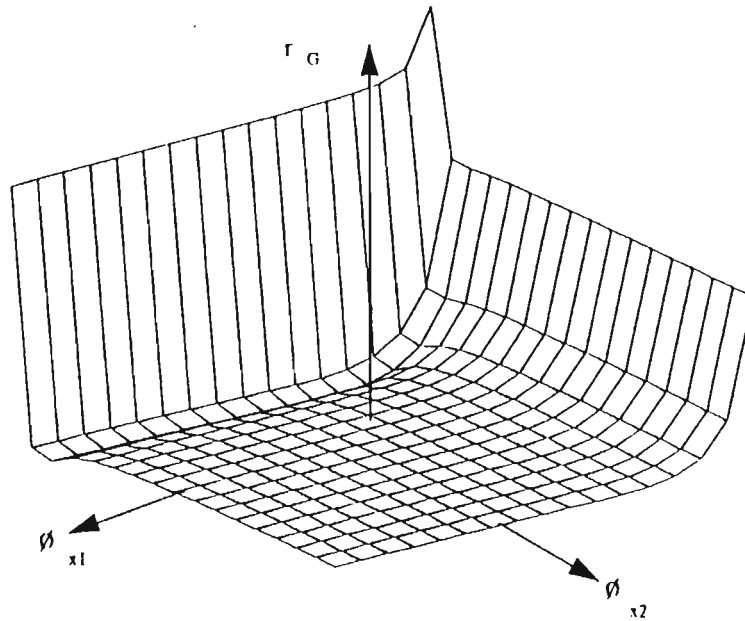


Fig. 5. r_G para distintos valores de C .

El mapa obtenido se modela, obteniendo 30 reglas cuya representación puede verse en la Fig. 6 y en la Tabla 2.

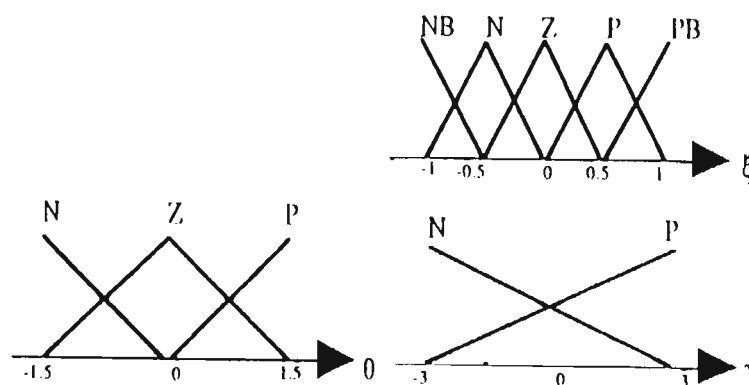


Fig. 6. Conjuntos borrosos para las variables de entrada.

ξ	θ	γ	c_i	ξ	θ	γ	c_i
<i>NB</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	0.82	<i>NB</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	2.02
<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	-4.3	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	3.1
<i>Z</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	-10.8	<i>Z</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	-9.67
<i>P</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	-17.37	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	-16.1
<i>PB</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	-22.5	<i>PB</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	-21.37
<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>	11.1	<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	12.3
<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>	5.9	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	7.1
<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>	-0.6	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	0.6
<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>	-7.1	<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	-5.9
<i>PB</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>	-12.3	<i>PB</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	-11.1
<i>NB</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	21.3	<i>NB</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	22.57
<i>N</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	16.17	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	17.38
<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	9.67	<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	10.8
<i>P</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	3.1	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	4.37
<i>PB</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	-2.01	<i>PB</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	-0.8

Tabla 2. Conjunto de reglas.

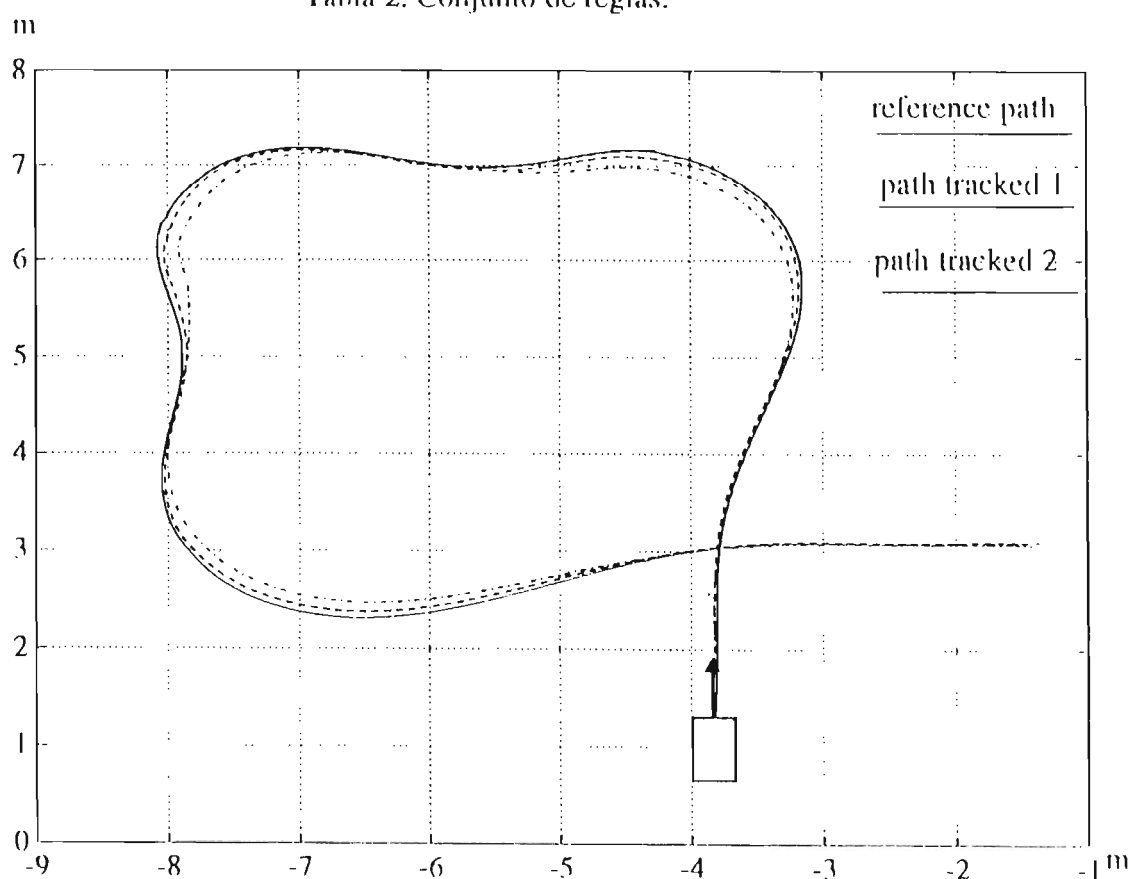


Fig. 7. Seguimiento de trayectorias (Controlador de la Tabla 2).

Los resultados, que aparecen representados en las Fig. 7 y 8 muestran un comportamiento adecuado y robusto para diferentes velocidades de operación.

La trayectoria 1 de la Fig. 7 representa el seguimiento a una velocidad de 0.8 m/s con una distancia al punto objetivo de 0.2 m. La trayectoria 2 muestra el seguimiento a la misma velocidad pero con una distancia al punto objetivo de 0.5. En la Fig. 8 se muestran las curvaturas obtenidas en el experimento. Finalmente, en la Fig. 9 se puede resaltar la robustez del método, al considerar seguimientos con un punto objetivo muy por encima del necesario.

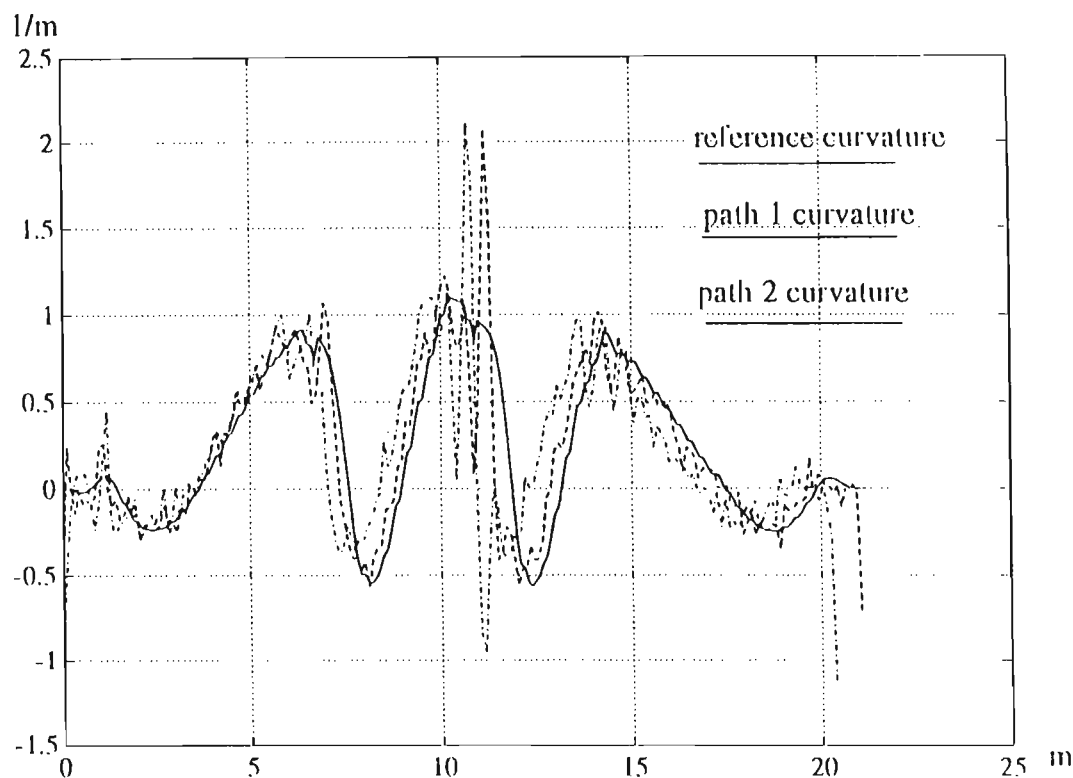


Fig. 8 Curvaturas correspondientes a las experiencias de la Fig 7.

5. Conclusiones.

La técnica experimental aquí presentada permite el desarrollo de sistemas de control borroso estable y robusto, aún cuando no sea conocido el modelo del proceso bajo control, procediéndose de manera sistemática en todo el proceso de diseño. Asimismo, la citada técnica permite integrar otras reglas que, siendo de carácter marcadamente heurístico, sean cuantificables de forma que verifiquen las condiciones de conicidad. Como desarrollos futuros está la consideración de la citada técnica como base para el diseño de sistemas de control de sistemas variantes en el tiempo, y bajo especificaciones más estrictas de diseño.

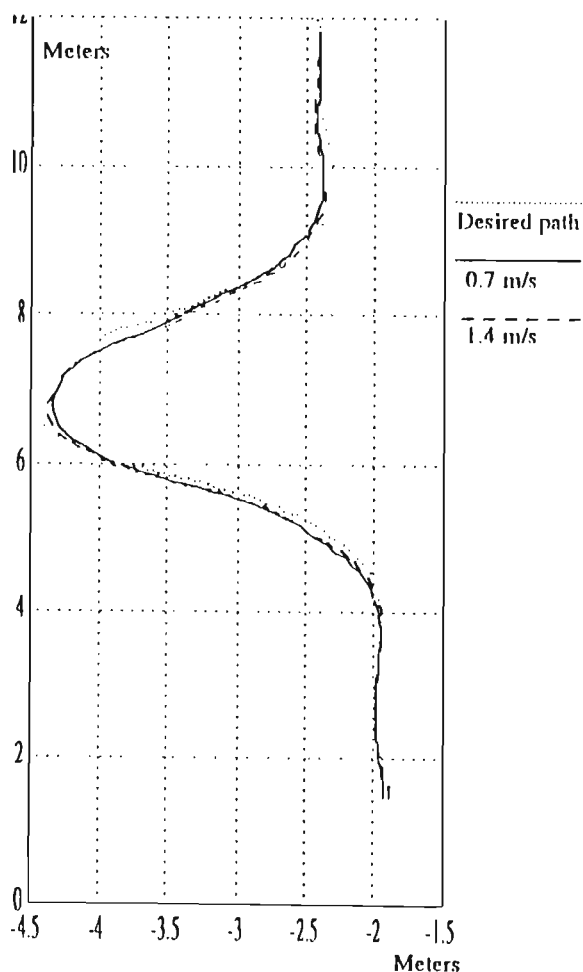


Fig. 9. Seguimiento de trayectorias con el punto objetivo alejado.

6. Referencias.

- Driankov D. (Ed.), Ollero A., García-Cerezo A., Aracil J. and Barreiro J. (1994). *Stability of Fuzzy Control Systems*. An Introduction to Fuzzy Control. Chapter 6. Springer-Verlag.
- García-Cerezo A. and A. Ollero (1994). *Design of Fuzzy Control Systems from Experimental Data*. Proc. of the EUFIT'94, Vol. 3 pp. 1175- 1182.
- García-Cerezo A., A. Ollero and J. L. Martínez (1995). *Design of a Robust High Performance Fuzzy Path Tracker for Autonomous Vehicles*. Proc. of the IAV'95. Helsinki (Finland).
- Ollero A., Simón A., F. García and V. Torres (1993). *Integrated Mechanical Design of a New Mobile Robot*. Proc. of the SICICA'92 IFAC Symposium. Pergamon Press.
- Takagi T. and Sugeno M. (1985). *Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modelling and Control*. IEEE Trans. on S. M.C., Vol. 15, No 1, pp. 116-131.

Controlador Inteligente para procesos industriales complejos. Aplicación a un Horno de Cemento.

Martínez M., Albertos, P., Navarro, J.L.

Departamento de Ingeniería de Sistemas Computadores y Automática
Universidad Politécnica de Valencia (España)

e-mail: mami@aii.upv.es

Resumen

El horno de cemento es representativo de los procesos industriales complejos, pues es un proceso multivariable, de parámetros variables con el tiempo y no-lineal, que lo hace difícil de modelar. Algunas investigaciones dan soluciones apropiadas al problema, unas asociadas a técnicas de control clásico, y otras a técnicas de Inteligencia Artificial. Cuando estas soluciones se aplican al proceso real, los resultados no son satisfactorios, debido a que los requerimientos de control deben ser ajustados de acuerdo con el comportamiento variable del proceso y de los requerimientos de producción. En esta comunicación se presenta un Controlador Borroso soportado por un Sistema Experto en Tiempo Real, que permite el control de procesos industriales complejos, habiéndose validado su funcionamiento con el control de un Horno de Cemento. En el entorno desarrollado, es posible modificar el programa de control, de forma sencilla, de manera que pueda ser manejado por operadores de planta sin experiencia específica en control o programación.

Palabras clave: Fabricación de Cemento, Control Borroso, Sistemas Expertos, Sistemas de Tiempo Real.

1 Introducción.

La rápida evolución de los computadores, así como el crecimiento de la capacidad de computación frente a su reducido costo, ha permitido la implementación de esquemas de control más y más complicados que permiten obtener resultados adecuados y añadir tareas a las clásicas de control, en particular las de Inteligencia Artificial, que aseguren el correcto funcionamiento de sistema global en procesos industriales complejos.

El proceso industrial que nos ocupa es una línea de producción de cemento, la cual tiene principalmente tres subprocesos: la molienda y mezclado de materia prima, el proceso de cocción y el de molienda de clínker. Se describe aquí el control diseñado para el horno de cemento.

El horno tiene dos subprocesos. El primero relacionado con el transporte de material, el cual no tiene un modelado analítico fácil. El segundo, relacionado con el proceso de combustión, en el que el control puede ser realizado mediante técnicas clásicas de control. Se presenta el esquema de diseño e implementación de ambos subprocesos. El programa se ha escrito en Smalltalk, y se ha implementado en un PC, en un entorno distribuido conectado a una red de área local.

El diseño del controlador implementado en dicho entorno, se realiza mediante la técnica de conjuntos borrosos y de razonamiento aproximado.

Serán presentados algunos resultados prácticos que demuestran el aceptable funcionamiento del controlador diseñado.

2 Conjuntos Borrosos y Razonamiento Aproximado.

2.1 La lógica de los conjuntos borrosos.

Definiciones y conceptos asociados a la lógica de conjuntos borrosos son bien conocidas y descripciones completas sobre esta área pueden encontrarse en numerosas referencias, por ejemplo en [4]. Se realiza aquí una breve descripción de las definiciones en las que se sustentan los mismos.

Dado un conjunto G al que se le asocia una función μ_A denominada función de pertenencia, donde a cada elemento x de G se le asocia un número $\mu_A(x)$ en el intervalo $[0,1]$, entonces esta función μ_A , determinará un subconjunto borroso A , en el conjunto G . El número $\mu_A(x)$ describe el grado de pertenencia del elemento x en A . Si $\mu_A(x) = 0$, entonces x no pertenece al subconjunto borroso A . Un mismo elemento x puede pertenecer a varios subconjuntos borrosos definidos en el conjunto G . Su grado de pertenencia a cada uno de ellos vendrá definido por las funciones de pertenencia asociadas a cada subconjunto A . Al conjunto G se le suele llamar universo del discurso [1].

Las operaciones entre subconjuntos borrosos se expresan mediante funciones de pertenencia. Se definen las operaciones de Inclusión, Intersección, Unión y Seudocomplementario entre subconjuntos borrosos en un intento de extender las operaciones de la lógica binaria clásica.

En este punto podría definirse lo que entenderíamos por variable borrosa. Si F_G es el conjunto de todos los subconjuntos borrosos definidos en G , una variable borrosa de G podrá tomar como valor cualquiera de los elementos de F_G . Los valores que puede tomar esta variable borrosa son etiquetados mediante términos lingüísticos, definidos a través de estos subconjuntos y sus respectivas funciones de pertenencia.

2.2 Reglas de inferencia borrosa.

Consideremos ahora un sistema de reglas de producción con una base de hechos y una base de reglas que contengan información imprecisa. Los hechos pueden ser representados de la forma " X es A ", donde A

es un subconjunto borroso de un universo G , y X es el nombre de la variable borrosa. Las reglas son de la forma "Si condición entonces acción", donde condición son hechos de la forma anteriormente descrita, incluso pueden representar múltiples hechos con las conectivas correspondientes a las operaciones mencionadas, y donde acción también es de la misma forma del hecho mencionado anteriormente. Así, es posible expresarlo como:

Si X es A entonces Y es B

Donde se suprimen las conectivas por simplicidad. A y B son subconjuntos borrosos sobre los universos G y H respectivamente con sus correspondientes funciones de pertenencia.

En lógica borrosa, el Modus Ponens se formula mediante la llamada Regla Composicional de Inferencia, que permite calcular la distribución de posibilidad de "Y en B" dadas las distribución condicional "Si X es A entonces Y es B" y la de "X es A". De hecho, la formulación más general de esta regla se simboliza mediante el esquema:

Si X es A entonces Y es B
 X es A'
 Y es B'

en la que A' es un modificado de A . Modificado de un subconjunto borroso, es otro subconjunto borroso que deriva de él. En definitiva es otro valor de la variable lingüística X y B' vendrá definido por:

$$B'(h) = \sup_e \text{Min}[A'(e), I(A(e), B(h))] \quad (1)$$

Esta función de inferencia, incluye una función que podríamos denominar de implicación $I(\cdot)$, y que sirve para representar funcionalmente la distribución condicional de dicha implicación, como una relación borrosa en el producto cartesiano $E \times H$. Estas funciones de implicación intentan generalizar la implicación clásica ($p \rightarrow q$) o bien la implicación intuicionista dando lugar a definiciones concretas. Sin embargo, la formalización de este razonamiento aproximado, plantea numerosos dificultades de manejo e implementación. Esto ha llevado a numerosos autores a plantear formalismos de razonamiento sencillos, que han sido validados por la experiencia resultante de su aplicación práctica [9].

Para una regla del tipo:

R = Si X es A entonces Y es B .

Se suele emplear la regla de traducción:

$$\mu_{R_i}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2)$$

Como generalmente se tienen R_i reglas, la relación borrosa resultante, se obtiene a partir de la unión de las R_i relaciones borrosas:

$$\mu_R(x, y) = \max_i[\mu_{R_i}(x, y)] \quad (3)$$

Si la variable X tomara un valor borroso distinto A' , entonces la variable Y tomaría el valor borroso

B' , y su valor se obtendría a través de la regla de composición:

$$B' = A' \circ R \quad (4)$$

Y por tanto:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)] \quad (5)$$

Sin embargo, cuando se aplican las reglas, los valores de los antecedentes no toman valores borrosos, sino valores observados, por lo que el resultado del valor borroso B' podría expresarse como:

$$\mu_{B'}(y_{x^0}) = \max_i \min[\mu_A(x^0), \mu_{B_i}(y)] \quad (6)$$

Donde el subíndice i hace referencia a la regla i -ésima.

Otros autores, transforman las ecuaciones anteriores en las denominadas reglas "máximo del producto", las cuales producen salidas más suaves que las anteriores:

$$\mu_{R_i}(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (7)$$

$$\mu_R(x, y) = \max_i[\mu_{R_i}(x, y)] \quad (8)$$

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x [\mu_{A'} * \mu_R(x, y)] \quad (9)$$

$$\mu_{B'}(y_{x^0}) = \max_i [\mu_A(x^0) * \mu_{B_i}(y)] \quad (10)$$

Una interpretación gráfica de las reglas de inferencia borrosa se presentan en las figuras 1 a 4:

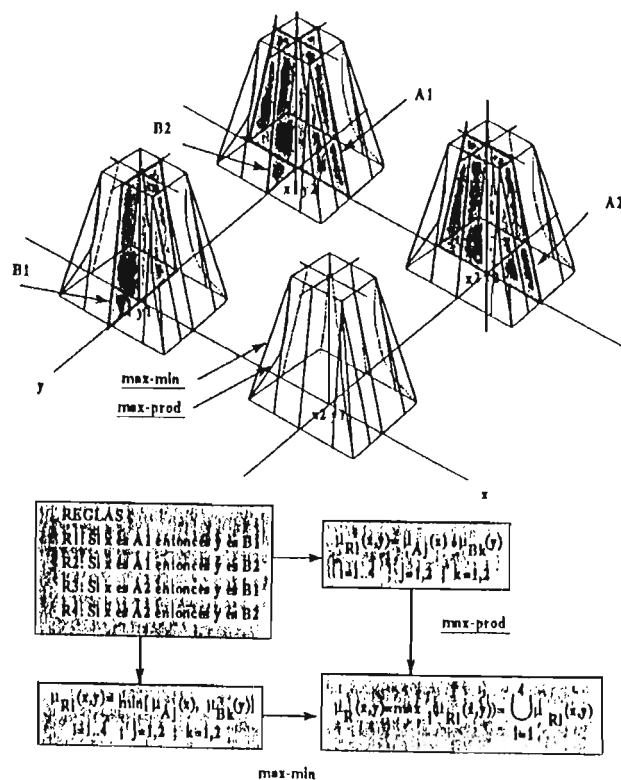


Figura 1: Interpretación geométrica de la función de pertenencia de una base de reglas.

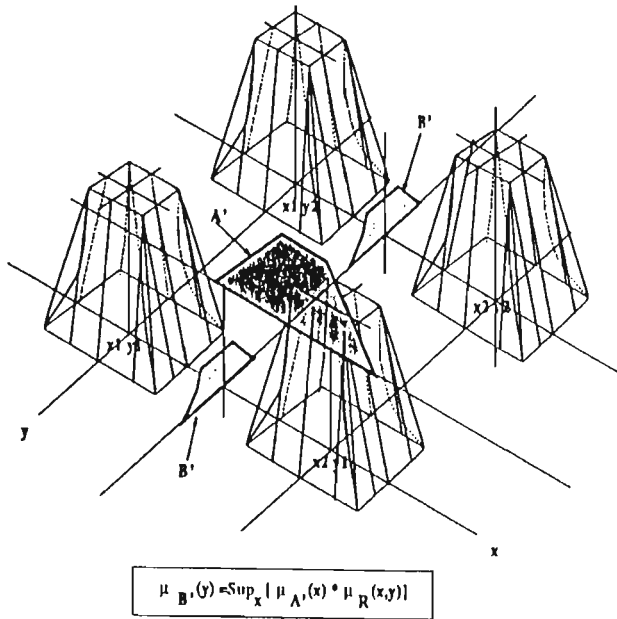


Figura 2: Interpretación geométrica de la función de pertenencia B' correspondiente a la modificada A' de los antecedentes.

2.3 Proceso de fusión de información.

Hemos visto que las conclusiones que se derivan por medio de las reglas de inferencia borrosa pueden llegar a producir uno o varios subconjuntos borrosos para un determinado universo de discurso, debiendo ser transformada a su equivalente numérico, si estamos trabajando en un contexto de control de procesos. A este proceso se le denomina "defuzzification", que podría traducirse como fusión de información. La fusión de información suele realizarse normalmente de dos formas diferentes, una considerando al universo de discurso continuo, y la otra considerándolo discreto. Cada una tiene ventajas e inconvenientes.

a) **Universo de discurso continuo:** En este caso, se suele utilizar el cálculo de centros de gravedad de las áreas correspondientes a las funciones de pertenencia resultado de la inferencia para un universo de discurso determinado:

$$u = \frac{\sum_i \mu_i u_i}{\sum_i \mu_i} \quad (11)$$

donde u_i deben ser los centros de gravedad de las áreas individuales y los μ_i las áreas individuales.

Este método tiene la ventaja de dar valores continuos a las variables reales, pero la desventaja puede ser el tiempo de cómputo necesario para el cálculo de centros y áreas individuales, los cuales deberían ser calculados de forma numérica. Una simplificación de este método que acorta el tiempo de cálculo, es considerar que las áreas son simétricas con respecto a su centro de gravedad y homotéticas, dando como resultado:

$$u = \frac{\sum_i h_i u_i}{\sum_i h_i} \quad (12)$$

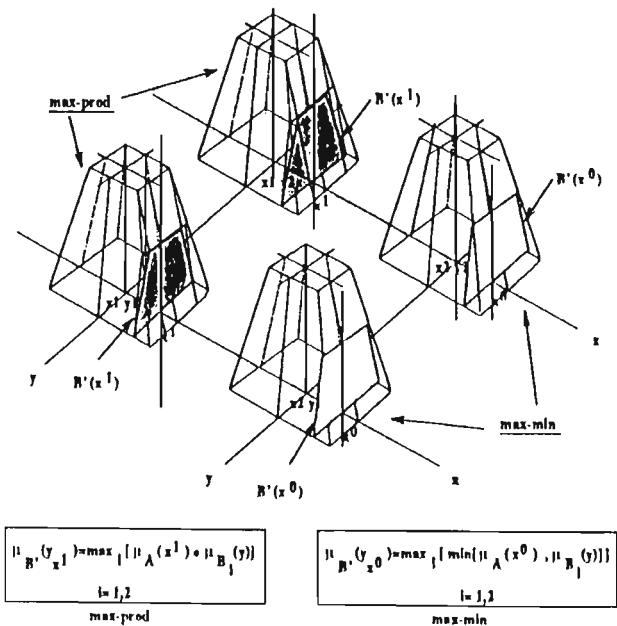


Figura 3: Interpretación geométrica de la función de pertenencia B' correspondiente a valores observados de los antecedentes (I).

donde u_i son los centros de gravedad de las áreas, y h_i las alturas de los centros de gravedad.

b) **Universo de discurso discreto:** Esta solución se basa en la discretización a priori del o de los universos de discurso de los antecedentes de las reglas, por lo que las funciones de pertenencia o posibilidad también son discretas. Esto lleva a la formación de la denominada matriz de inferencia, con tantas dimensiones como antecedentes tenga la regla, y cuyo contenido puede ser directamente el valor real adecuado al consecuente de la regla. La obtención del valor real del consecuente pasa por disponer de los valores reales de los antecedentes, elegir los valores discretos más próximos a esos valores y localizar el valor que le corresponda en la matriz.

2.4 Variables Borrosas, Numéricas y Lingüísticas.

En un entorno de Sistemas Expertos no deberíamos perder de vista que la información que puede proceder del mundo real puede ser clasificada en diferentes categorías y que por tanto en el proceso de razonamiento será necesario algún tipo de homogeneización. Así tenemos las Variables Borrosas, las cuales se obtienen a partir de las Numéricas y según los procedimientos explicados anteriormente, las Variables Numéricas que según su valor también podrían intervenir directamente en los procesos de razonamiento, y las Variables que denominaremos Lingüísticas las cuales no tienen ninguna componente numérica en su definición, por lo que se diferencian de las Variables Borrosas en cuanto a que estas últimas necesitan funciones de pertenencia que ligen su magnitud numérica con su interpretación lingüística, y se parecen a éstas en que ambas, en el proceso de razonamiento, tienen asociado un coeficiente de confianza a cada valor de dichas variables.

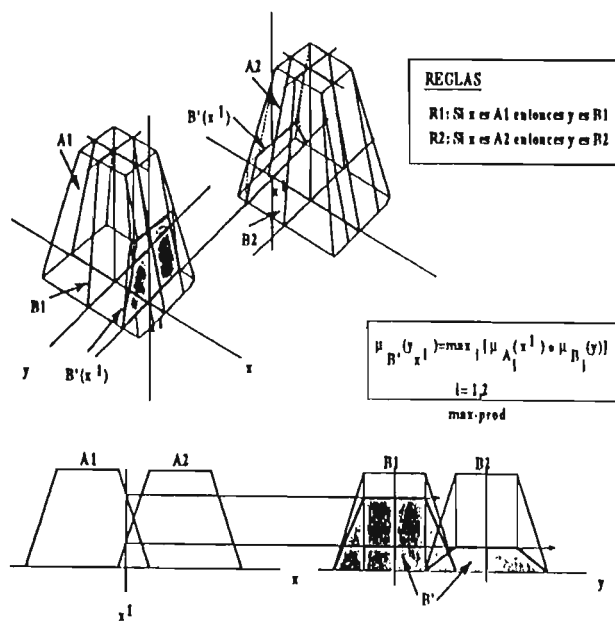


Figura 4: Interpretación geométrica de la función de pertenencia B' correspondiente a valores observados de los antecedentes (II).

Con esta concepción, y según se puede ver en la figura 5, un Sistema Experto no debe tener limitación para que las variables lingüísticas puedan ser empleadas también de forma directa como variable de entrada al sistema, ni que las mismas formen parte de grupos de antecedentes con variables borrosas, puesto que, a este nivel, el tratamiento que se hace de ambos tipos de variables es el mismo. Incluso, la información numérica procedente de la fusión de información puede llegar a ser reinyectada al sistema en un posterior proceso de *fuzzificación* de información.

Un problema que se plantea a la hora de implantar los conceptos anteriores en un sistema real es que las bases de reglas de una sola capa (un sólo nivel entre antecedentes y consecuentes) se muestra poco manejable si el número de variables que deben intervenir en el proceso de decisión es muy elevado. Una solución natural al problema, es recurrir al uso de distintas capas donde cada una de ellas elabora información de un número limitado de antecedentes produciendo un consecuente que, de una forma lingüística, representa un concepto cercano al lenguaje natural. Las variables Lingüísticas que así se pueden definir entre capas intermedias permiten dar una mayor claridad en la definición del sistema y al representar conceptos resultan de gran interés en el proceso de explicación del razonamiento que todo Sistema Experto debe incorporar.

3 El Proceso Industrial.

En el Horno de Cemento, el crudo de cemento procedente del molino, es cocido para producir el clinker. El modelado de este proceso es muy difícil, si bien el operador de planta tiene un conocimiento cualitativo de su comportamiento. Por ello, las técnicas de Inteligencia Artificial parecen más adecuadas que las clásicas para obtener una mejora en los objetivos de

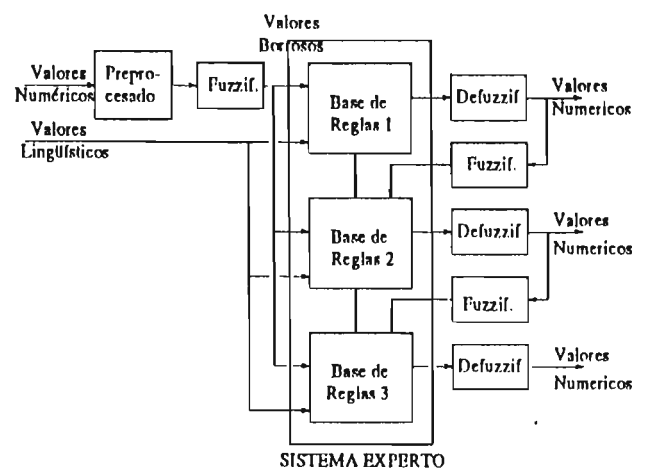


Figura 5: Variables Numéricas, Borrosas y Lingüísticas

control [10], [5].

3.1 Descripción.

El Horno de Cemento está compuesto por un cilindro de 80 m. de largo y una serie de componentes adicionales, como precalcinadores y enfriadores. Los dos subprocesos en los que puede subdividirse este proceso son:

1. **Transporte de material:** El crudo es introducido en el horno, previo paso por el precalcinador, donde se le calienta hasta cerca de su punto de fusión, produciéndose el clinker. El avance del crudo por el horno se realiza por gravedad. En la parte final del horno se encuentra un enfriador que reduce la temperatura del clinker mediante el intercambio con el aire frío de la combustión. La dinámica de este subproceso es extremadamente lenta, del orden de decenas minutos.
2. **Transporte de gases:** El aire de combustión alimenta al horno por el enfriador donde el calor residual del clinker se recupera. A lo largo del horno y del precalcinador, los gases calientan al crudo el cual fluye en contracorriente. La dinámica de este subproceso es mucho más rápida que la del subproceso anterior, del orden de segundos.

3.2 Modelado del proceso.

En la figura 6, los dos subprocesos mencionados se presentan como bloques diferenciados. CO y O_2 son las variables de salida del bucle rápido, mientras que la apertura del exhaustor de gases es la variable de control. La función de transferencia de este subproceso se puede obtener fácilmente mediante el análisis de las experiencias realizadas en la factoría. Estos resultados permiten establecer un modelo lineal de parámetros constantes para este proceso. Un modelo de primer orden es suficiente para los objetivos de control que se proponen.

En el bucle lento, el contenido de Cal Libre es la principal variable de control, que depende fundamentalmente de la temperatura en la zona de clinkerización, que por otra parte es muy difícil de medir

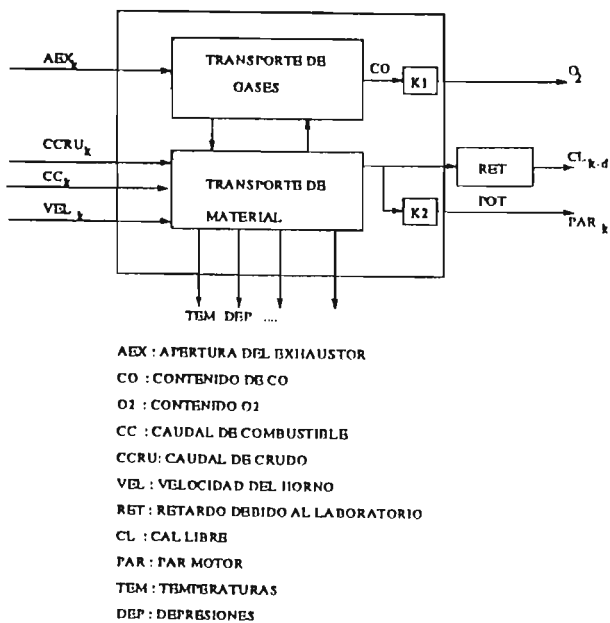


Figura 6: Modelo del Horno de Cemento.

Otro problema adicional surge del retardo en el conocimiento del contenido de Cal Libre, puesto que debe ser determinada analíticamente en el laboratorio. El retardo entre la formación del clinker y la salida del Horno es aproximadamente de 35 minutos, y el que existe entre la salida del horno y los resultados del laboratorio, es variable, dependiendo del nivel de automatización de la toma de muestras y del análisis propiamente dicho. Si, como se pretende, se ha de realizar un control en línea de este subproceso, deberemos acudir a magnitudes auxiliares que permitan estimar el contenido de Cal Libre en la zona de clinkerización. Con este propósito, se usan el Par Motor, las Temperaturas en la zona de precalcínación y los valores pasados del contenido de Cal Libre. Las variables de control de este proceso son la velocidad del horno, el caudal de crudo y el caudal de carbón.

Los subprocesos están acoplados, el caudal de carbón está intimamente relacionado con el contenido de CO y O₂ en la salida de gases, y el flujo de gases tiene influencia sobre la temperatura en el horno, por lo que habrá que considerar este nivel de acoplamiento.

El modelo desarrollado se usa bajo condiciones normales. Este proceso padece de multitud de perturbaciones, que requieren un tratamiento especial, para evitar en lo posible la degradación de los componentes físicos del horno. Estas perturbaciones se clasifican en base a la experiencia en el control del horno. El funcionamiento del horno deberá cambiar usando una serie de reglas de comportamiento suministrado por la dicha experiencia.

3.3 Diseño de Control.

Inicialmente, los objetivos de control que se proponen son: máxima calidad de clinker, máxima producción y mínimos costes de producción.

Basados en estos objetivos, se realizó un estudio del proceso, alcanzándose las siguientes conclusiones:

1. La calidad del clinker depende de la temperatura de formación del clinker. Así si la temperatura en la zona de clinkerización se mantiene a un nivel correcto, se alcanzará la calidad deseada.
2. La máxima producción se alcanza fijando la referencia de caudal de crudo al nivel máximo de producción de diseño.
3. El mínimo costo de producción se alcanza minimizando el exceso de aire de combustión y minimizando el tiempo entre paradas por avería y reparación.

Estos objetivos son válidos si el Horno está trabajando bajo condiciones normales. Si la operación es anormal, debido a alguna de las perturbaciones mencionadas, el objetivo de control será alcanzar precisamente las condiciones de funcionamiento normal. Con este fin, el controlador debe detectar, usando toda la información disponible procedente del Horno, que clase de anomalía está presente y debe ejecutar las acciones adecuadas que permitan alcanzar el estado normal de operación. Si no se detectan perturbaciones la estructura normal de control se presenta en la figura 7.

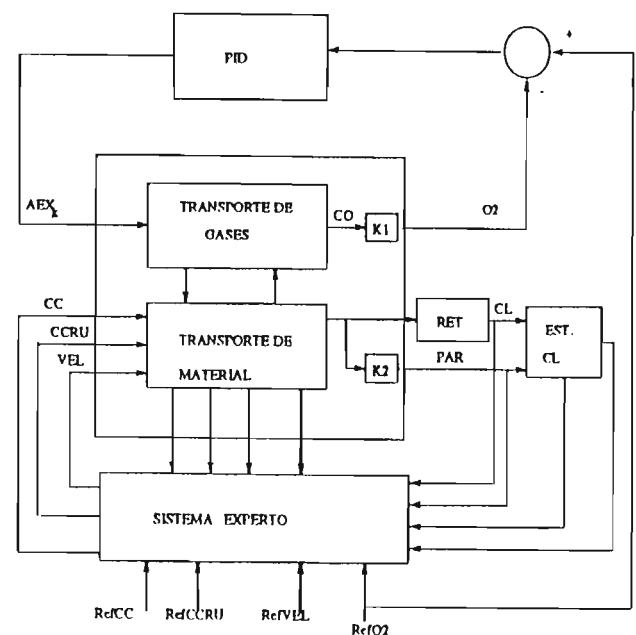


Figura 7: Esquema de Control de un Horno de Cemento.

El transporte de gases (control del contenido en O₂ y CO) puede ser regulado por técnicas de control clásico del tipo PID (la variable de control será el flujo de gases mediante un exhaustor).

El transporte de material (control de la calidad del clinker) puede ser regulado por un Sistema Experto mediante técnicas de conjuntos borrosos y razonamiento aproximado. La intensidad del motor necesaria para hacer mover el horno (relacionada con el par y la temperatura de clinkerización) y la Cal Libre del material suministrada por el laboratorio (entre otras),

se usan para proponer acciones de control en: Caudal de Crudo, Velocidad del Horno y Caudal de Carbón.

Uno de las mayores ventajas de la estructura de control propuesta, es que el Horno se controla como lo haría el operador, pero en este caso con una actuación más frecuente y más uniforme que la que éste llevaría. Si comparamos con la solución clásica, el Sistema Experto puede tratar diferentes situaciones, tales como: arranque, anomalías, paradas, etc., y no únicamente con la operación normal.

En un epígrafe posterior se describe un resumen de la Técnica de Diseño empleado, con sus respectivos refinamientos, para la obtención del Controlador Borroso asociado a la Variable de Control: Caudal de Carbón.

4 Entorno Informático.

El entorno que se presenta, surge del Convenio de Investigación entre una de las principales empresas cementeras del país, y este grupo de investigación. Este entorno o prototipo ha sufrido una evolución lógica desde sus comienzos hasta la actualidad. El entorno es un Sistema Experto con restricciones de Tiempo Real [6], [2], con una serie de propiedades que lo caracterizan, entre las que se pueden destacar:

- Representación Temporal de Datos.
- Evaluación y representación de Lógica Borrosa.
- Razonamiento Temporal.
- Estructura de Multiconocimiento.
- Facilidades de Comunicación.
- Facilidades gráficas de Monitorización.

El prototipo desarrollado puede considerarse como un Sistema Experto de los denominados *tipo concha*, el cual implementa una estructura que sirve de soporte a diferentes tipos de *Arquitecturas*.

Cada *Arquitectura* puede incorporar el conocimiento específico sobre un proceso a controlar o sobre diferentes alternativas de control de un mismo proceso [8], [3]. La *Arquitectura* incorpora la estructura de razonamiento (Bases de Reglas), junto con la definición de tipo de variables presentes (Objetos) y su extensión a la interpretación heurística (Lógica Borrosa) y la planificación del funcionamiento del sistema (Base de Requerimientos). Adicionalmente cada *arquitectura* incorpora la información necesaria para la configuración del Interfaz de Usuario.

La *Arquitectura* está formada por:

- **Modo de funcionamiento:** define el estado o tipo de control que se pretende aplicar. Pueden definirse varios, pero su ejecución es excluyente, habiendo sólo un modo activo en cada instante. Ejemplos de modo de funcionamiento podrían ser: Modo de Arranque, Modo de Parada, Modo Normal, Modo de Alarma, etc.
- **Regulador:** Conjunto de bases de reglas que concluyen sobre una misma acción de control, según el modo de funcionamiento.

- **Base de Reglas:** Las Bases de Reglas son conjuntos de reglas, que dependen de un regulador concreto, y que atienden a uno o varios modos de funcionamiento. Por ejemplo, si el Regulador Carbón tuviera dos Bases de Reglas, una Carbón Arranque y otra Carbón Normal, y cada una atendiera a su modo de funcionamiento, se puede obtener una acción sobre el carbón en función del modo, pero todo el conocimiento sobre el carbón estaría estructurado en el mismo regulador.

- **Regla:** Estructura formada por antecedentes unidos por conectivas y/o, consecuentes y acciones con un umbral de disparo. Los antecedentes incorporan la posibilidad de una representación temporal de los datos. Los consecuentes pueden ser caracterizados por una confianza del hecho, y las acciones pueden hacer que el sistema cambie de modo, lance un evento diferido en el tiempo o cambie el estado de una condición, todo ello con el fin de hacer evolucionar al sistema.

- **Objeto:** Es la estructura que representa la unidad de información. Las Reglas componen sus antecedentes y consecuentes con objetos. Los objetos pueden tener una caracterización temporal, de tal forma que se dispone de una información histórica de cada objeto (variable), lo que permite el tratamiento temporal en las reglas. Otra característica de los objetos es que a los mismos se les agrupa por clases con características diferenciadas, lo que permite a cada variable asignada a una clase heredar sus propiedades.

- **Requerimiento:** Es la unidad fundamental de ejecución del sistema. Existen dos tipos, los Esporádicos y los Periódicos, los primeros se ejecutan por un cambio de estado en un evento, los segundos se ejecutan de una forma periódica programada. Los requerimientos se agrupan bajo los modos de funcionamiento. Los requerimientos se pueden ejecutar de forma incondicional o condicionada por estados de eventos. A su vez cada requerimiento puede, como las acciones de las reglas, cambiar el estado de una condición, así como cambiar de modo y enviar mensajes a los Receptores, que son:

- **Horno.** Los mensajes a este Receptor permiten la comunicación con el exterior en ambas direcciones.
- **Arquitectura.** Los mensajes a este Receptor permiten el manejo de objetos.
- **Interfaz.** Los mensajes a este Receptor permiten la comunicación con el interfaz de Usuario.
- **Consola.** Los mensajes a este Receptor permiten la comunicación con una ventana denominada Consola que permite conocer la evolución interna del sistema con el tiempo.

La implementación ha sido desarrollada en el lenguaje Smalltalk, el cual está basado en el modelo de

comunicación de objetos. Los objetos soportan modularidad, encapsulamiento e información oculta. La implementación de cada objeto está oculta para el resto de objetos, y solo es posible su comunicación a través de una interfaz. De esta forma, los detalles internos no son visibles ni accesibles. Esta es la clave para el desarrollo de software reutilizable.

El principal mecanismo para la definición de los módulos es la clase. Una clase define el comportamiento común de una serie de objetos que pueden ser instanciados en la clase. Las subclases permiten evitar repeticiones de los mismos conceptos en diferentes lugares. Las subclases están soportadas por los conceptos de herencia.

5 Controlador Borroso.

La idea de un Controlador Borroso de una sola capa ha sido la más extendida hasta la fecha, sin embargo, esto implicaba la existencia de un número limitado de variables a manejar. En el problema que nos ocupa, no es posible hacer una restricción en el número de variables, por razones obvias, lo que hace imposible la aplicación de Controladores Borrosos de este tipo.

En una primera fase del desarrollo de este controlador, se optó por concentrar el conocimiento sobre el sistema en una base de conocimiento única que incorporaba la experiencia sobre el proceso, pero que evidentemente poseía diversas capas en su estructura que modelaban globalmente el problema. Inicialmente este diseño no presentaba especiales dificultades, puesto que el número de reglas era limitado, así como el número de variables. Cuando los refinamientos del diseño fueron avanzando, la estructura de única base se demostró compleja de manejar y de analizar, una vez realizado el razonamiento.

A la vista de los problemas planteados con el primer desarrollo, se estableció un segundo que aumentaba la flexibilidad en el diseño, y lo hacía más simple. La idea era tratar de diseñar una estructura de Controlador Borroso compuesto a su vez por múltiples Controladores Borrosos, básicamente monocapa y encadenados, donde los valores numéricos de las variables, se difunden y funden en cada controlador básico, transmitiéndolos al siguiente, apareciendo la información en tres niveles borrosos monocapa, y, como se ha definido antes, usando variables lingüísticas allí donde resulte interesante.

Los niveles son [7]:

- Estimación de la Cal Libre.
- Estado del Horno.
- Acción de control de Carbón.

Definidos los niveles borrosos o *Bases de Conocimiento*, el proceso de Diseño y Sintonía de cada una de ellas sigue un desarrollo similar, si bien cada uno con sus variables características. Se describen seguidamente los parámetros del Controlador Borroso de cada una de estas Bases, comentándose algunos problemas aparecidos durante las pruebas, que sugirieron refinamientos sobre las bases originales.

5.1 Estimación de la Cal Libre.

El problema de disponer de una Estimación de la Cal Libre en la zona de *clinkerización*, con el fin de tomar acciones de control adecuadas, es un problema típico en este tipo de sistemas. Es conocido que el *Par Motor* del horno tiene una relación directa con la Cal Libre en la zona de *clinkerización*, si bien esta medida es muy compleja de interpretar y con mucho ruido. Por otra parte el valor absoluto de esta magnitud tampoco tiene un especial significado, puesto que el horno puede estar en puntos de funcionamiento distintos. Por este motivo se recurre a la *Velocidad del Par Motor*, si bien esta medida es muy ruidosa optándose por filtros de primer orden que modelan las *Tendencias del Par Motor* como valores medios de dicha velocidad a distintos horizontes (10, 40, 60 minutos).

Con estas premisas, la estructura del Controlador Borroso conduce a la siguiente selección:

a.) **Parámetros estructurales:** Definen la estructura de la base, y están asociados a los aspectos heurísticos:

- *Numero de Variables de salida:* 1.
- *Numero de Variables de entrada:* 2.
- *Variables borrosas:*
 - Cal Libre (CL).
 - Tendencia Par Motor (TPM).
 - Incremento Cal (IC).
- *Estructura de la Base de Conocimientos:* Ver Tabla 1.

Se opta por una solución incremental para la Cal Libre (IC), y una Base de Conocimientos que sólo depende de la Tendencia del Par Motor (TPM).

b.) **Parámetros de sintonía:** Definen la interface con las magnitudes del proceso. Asociados a los aspectos numéricos:

- *Universo de Discurso:* Selecciona los rangos adecuados de las variables. Se opta por una solución no normalizada para no perder el sentido físico de las magnitudes.
- *Parametrización de la funciones de pertenencia (MF):* La selección de las MF entre funciones no-discriminantes o discriminantes, depende en gran medida del tipo de resultado que se quiere obtener. Así, se elige una función discriminante, si se quiere una gran sensibilidad ante cualquier cambio que se presente, eligiéndose total o parcialmente no-discriminantes en los casos donde haya zonas de confianza absoluta sobre el hecho que se presenta, o se quieran introducir zonas muertas para evitar oscilaciones indeseables. En cuanto a la uniformidad en la distribución de las MF, y en este sistema, no suele respetarse, debido fundamentalmente a la naturaleza no-lineal del mismo.

IC		CL		
		Baja	Normal	Alta
TPM	Bajando	Poner	Poner	Poner
	Estable	NoTocar	Notocar	NoTocar
	Subiendo	Quitar	Quitar	Quitar

Tabla 1: Estimación de la Cal Libre.

- **Ganancia estática:** Se asocia este concepto a la distribución de las MF de la salida, que determinarán un valor numérico mediante un proceso de Fusión. La aproximación realizada comenzó con bajas ganancias y aumentando luego (separando las MF).
- c.) **Refinamiento:** Las pruebas reales ponían de manifiesto un mal funcionamiento en las zonas extremas de la Tendencia del Par Motor, así como las deficiencias de la base, al haber considerado como única variable de dependencia el propio Par Motor, y una dependencia lineal del mismo, cuando la relación entre variables no debe considerarse lineal en todo el rango de sus Universos de Discurso. Ambos problemas se solucionaron aumentando el número de valores borrosos del Par Motor, y planteando una estructura no-lineal de Base de Conocimientos con la incorporación de la Cal Libre, en donde a bajas Cales Libres de laboratorio, la modificación por la Tendencia del Par Motor es menos acusada que para Cales Libres más elevadas (Tabla 2).

Una interpretación gráfica de esta base se presenta en la figura 8. Estas representaciones, de carácter cualitativo, constituyen un elemento idóneo para el diálogo con los expertos de la planta, en la etapa de ajuste de control.

5.2 Estado del Horno.

Esta Base de Conocimiento pretende identificar en qué Estado se encuentra el horno, pero desde el punto de vista del operador, por tanto recurriendo a las mismas expresiones que ellos emplean. Se define una variable lingüística denominada Estado Horno que vendrá determinada por el Error de la Cal Estimada (Cal Libre menos Cal Libre de Referencia) y por la Tendencia del Par Motor con un horizonte de 40 minutos.

a.) Parámetros estructurales:

- Numero de Variables de salida: 1.
- Numero de Variables de entrada: 2.
- Variables borrosas:
 - Error Cal Libre (ECL).
 - Tendencia Par Motor 40 (TPM40).
- Variable lingüística:
 - Estado Horno (EH), con valores de la variable:
 - * cc: caliente enfriándose.
 - * c: caliente.

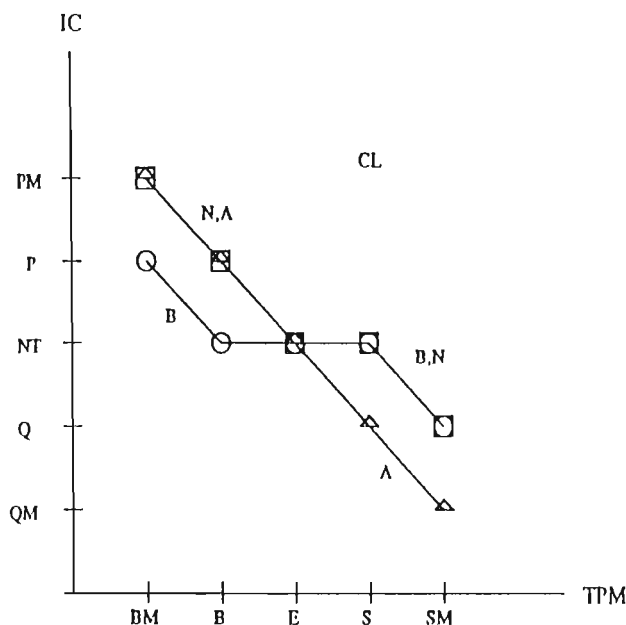


Figura 8: Estimación de la Cal Libre.

- * cc: caliente calentándose.
- * ne: normal enfriándose.
- * n: normal.
- * nc: normal calentándose.
- * fe: frío enfriándose.
- * f: frío.
- * fc: frío calentándose.

- **Estructura de la Base de Conocimientos** (Tabla 3).

Se opta por una base uniformemente distribuida, y se emplean Confianzas en cada Regla con el fin de diferenciar Estados semejantes.

b.) Parámetros de sintonía:

- **Parametrización de la funciones de pertenencia (MF):** En este caso se opta por funciones no-discriminantes en los antecedentes, la razón es establecer zonas muertas que eviten las oscilaciones en el Estado detectado. La variable EH es lingüística sin funciones de pertenencia (MF) asociadas.

- c.) **Refinamiento:** Las pruebas reales ponían de manifiesto un mal funcionamiento del sistema en

IC		CL		
		Baja	Norinal	Alta
TPM	BajandoMucho	Poner	PonerMucho	PonerMucho
	Bajando	NoTocar	Poner	Poner
	Estable	NoTocar	NoTocar	NoTocar
	Subiendo	NoTocar	NoTocar	Quitar
	SubiendoMucho	Quitar	Quitar	QuitarMucho

Tabla 2: Refinamiento para la Estimación de la Cal Libre.

EH		ECL		
		Negativo	Nulo	Positivo
TPM40	BajandoMucho	ce,1	ne,1	fe,1
	Bajando	ce,0.7	ne,0.7	fe,0.7
	Estable	c,1	n,1	f,1
	Subiendo	cc,0.7	nc,0.7	fc,0.7
	SubiendoMucho	cc,1	nc,1	fc,1

Tabla 3: Estado del Horno.

las zonas extremas de la Base de Conocimientos (ECL y TPM40), debido a la no consideración sobre el EH de los efectos no-lineales de la variación del Calor Específico con la temperatura, así como del Calor Latente por el cambio de Estado de los materiales.

La mejora consistió en adicionar un antecedente más a la base, la **Tendencia del Carbón (TCAR)**, que promedia el valor de la acción de control en un horizonte prolongado (3 horas). Este antecedente permite incorporar la información del posible efecto de sobrecalentamiento (o subenfriamiento) que el horno puede tener por el mantenimiento de una tendencia prolongada de la variable (asimilable a un efecto derivativo).

La base se modificó en la zona donde se define el **Error de Cal Libre** como **Negativo**, ampliándose la Base de Conocimientos, con la consideración de *Estados del Horno* diferenciados (Tabla 4). Una interpretación gráfica de esta base se presenta en la figura 9.

5.3 Acción de Control de Carbón.

Esta base determina el valor del *Caudal de Carbón Incremental* en función del *Estado del Horno* detectado, siendo la Base de Conocimientos resultante de una gran simplicidad.

a.) Parámetros estructurales:

- *Numero de Variables de salida:* 1.
- *Numero de Variables de entrada:* 1.
- *Variable lingüística:*
 - Estado Horno (EH).
- *Variable borrosa:*
 - Incremento de Carbón (ICAR). Con los valores:

* PM: Poner Mucho.

* P: Poner.

* NT: No Tocar.

* Q: Quitar.

* QM: Quitar Mucho.

- *Estructura de la Base de Conocimientos* (Tabla 5).

Una interpretación gráfica de esta base se presenta en la figura 10.

b.) Parámetros de sintonía:

- *Parametrización de las funciones de pertenencia (MF):* En este apartado se tuvo especial cuidado en el ajuste de la ganancia de la variable lingüística de salida.

c.) **Refinamiento:** Si en un principio ésta era la base con mayor sencillez, el proceso de experimentación demostró la necesidad de incrementar las variables que deciden sobre la misma. Las mejoras se plantean en tres direcciones:

1. Los estados dinámicos *ne* y *nc*, que son los más críticos, pueden matizarse con la información de la *Temperatura de Gases (TG)*. Esta información no presenta apenas retardo, debido a la dinámica rápida del subproceso de combustión, y ayuda a mejorar la decisión sobre el *Incremento del carbón (ICAR)*.
2. La *Acción de Carbón*, que en la Base de Conocimientos original eran *Poner* o *PonerMucho*, no era compatibles con los valores de ciertas variables adicionales presentes en el sistema, lo cual producía la degeneración del control y llevaba al sistema a un punto

	ECL	NEG	NEG	NEG	NULO	POS
	TCAR	Estable	Bajando	BajandoMucho		
TPM40	BM	ce,1	ne,1	f,1	ne,1	fe,1
	B	ce,0.7	ne,0.7	f,0.7	ne,0.7	fe,0.7
	E	c,1	ce,1	ne,1	n,1	f,1
	S	cc,0.7	c,0.7	ce,0.7	nc,0.7	fc,0.7
	SM	cc,1	c,1	ce,1	nc,1	fc,1

Tabla 4: Refinamiento Estimación Estado del Horno.

	EII								
	le	I	ne	lc	n	ce	nc	c	cc
ICAR	PM,1	P,1	P,0.5	NT,0.7	NT,1	NT,0.7	Q,0.5	Q,1	QM,1

Tabla 5: Estimación de la acción de control de carbón.

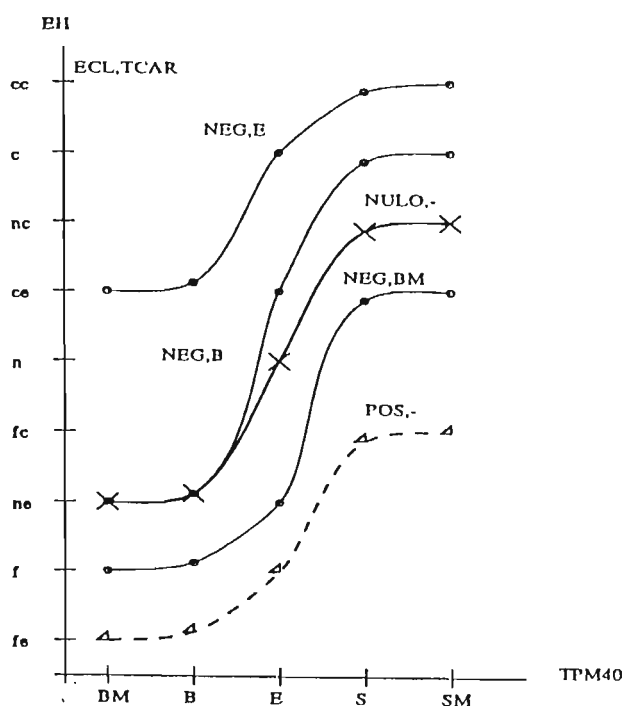


Figura 9: Estimación del Estado del Horno.

crítico. La solución fue incorporar a los antecedentes de las reglas de la Base de Conocimiento, aquellas magnitudes necesarias para discriminar su actuación según los casos. Esto produjo un aumento importante del número de reglas. Las magnitudes a tener en cuenta son:

- Error en el CO.
- Error en Depresión Satélites.
- Error en Temperatura Gases inferior.

Las funciones de pertenencia definidas para estas variables (MF) lo fueron de tipo no-

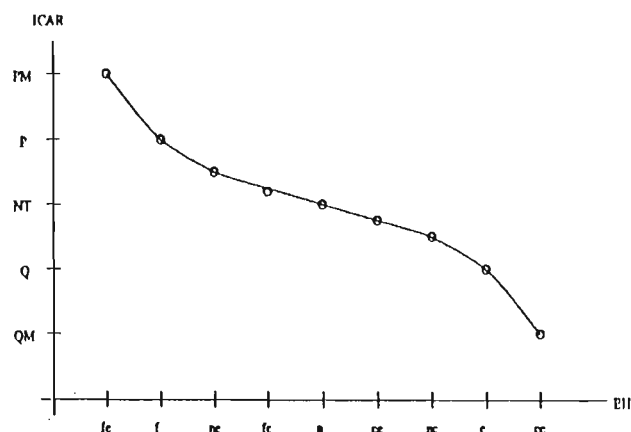


Figura 10: Base Acción de Carbón.

discriminante rectangular pues se demostró suficiente para conseguir los objetivos.

- Aunque de forma indirecta, la Acción de Carbón se ve influenciada por la inclusión de la Tendencia de Carbón (TCAR) en la Base Estado de Horno. Quizá la solución más sencilla y directa hubiera sido incorporar en esta base la información de dicha Tendencia (TCAR). Se optó por trasladarla a la base anterior por dos motivos:

- No cargar excesivamente la base Acción Carbón, ya ampliada por los puntos 1 y 2.
- Hacer más intuitivo el modelo realizado, puesto que la variable estado de horno es la que más se acerca al concepto que los operadores tienen del sistema.

5.4 Anomalías.

El control mediante la variable Incremento de Carbón (ICAR), una vez tenidos en cuenta los refinamientos anteriores, se demuestra suficiente en gran

cantidad de estados de funcionamiento, pero no resuelve todos los problemas que se plantean, sobre todo en un ambiente de perturbaciones producido por diversas magnitudes, algunas de las cuales ya se han nombrado. Se adoptó la solución de definir una *Matriz de Decisión* a partir de las magnitudes que son fuente de *Anomalías* en el funcionamiento del horno, tomando funciones no discriminantes rectangulares de dos estados. Dicha matriz lleva al Controlador a una situación *Normal* (si todas las magnitudes anteriores se encuentran en sus valores deseados) o a una situación etiquetada por el estado de *Anomalía*, y caracterizada por una o varias de estas magnitudes fuera de sus valores deseados. Así se identifican los siguientes estados anómalos:

- Bajada rápida del par.
- Exceso de CO.
- Exceso de Cal Libre.
- Exceso de Temperatura de gases.
- Exceso de depresión en los satélites.

A cada *Anomalía* se le asocia una Base de Conocimientos adicional a las descritas anteriormente, incorporando acciones de control sobre dos magnitudes, no tenidas en cuenta hasta la fecha:

- Velocidad de giro del Horno (VGII)
- Caudal de material primas (CMP)

5.5 Anormalidades.

A pesar de todo, el sistema se demuestra insuficiente en algunas circunstancias, por lo que la solución adoptada es, tras su detección, el aviso al operador para que asuma el control manual.

6 Resultados

Los resultados que se presentan muestran la variable de control carbón aportado al mechero principal. En la figura 11 se pone de manifiesto que el objetivo de producción al mínimo costo con una calidad aceptable se cumple. En efecto desde el inicio de la prueba (8 de la mañana), el sistema de control tiende a reducir la aportación de carbón siempre con la calidad dentro de la consigna previamente establecida. La consigna para la calidad (CL) está fijada entre 0.7 y 1.3.

Como se observa en la figura 12, entre las 19h y las 4 de la mañana del día siguiente, el carbón aportado se mantiene en 7.8 Tn., mientras que al inicio de la prueba era de 8.4 Tn., es decir, hay un ahorro sensible y la calidad permanece dentro de los límites establecidos.

En la figura 11, que corresponde a la misma prueba se pueden observar dos perturbaciones, una a las 12 horas y otra a las 5 de la mañana que corresponden a sendos desencostres del material en la zona de clinkerización. Para solucionar este tipo de anomalías hay que hacer uso de otras variables de control (velocidad del horno) que en este caso estaban desconectadas. El desencastre provoca una avalancha del material a la zona de clinkerización que supone un aumento de

la cal libre (CL). Para solucionar este problema hay que reducir la velocidad del horno de manera que el material permanezca más tiempo en la zona de clinkerización y alcance mayor temperatura.

El primer desencastre a las 12h es de pequeña importancia y pudo ser solucionado con aportación adicional de carbón (12.30-13.30). También se puede observar que la calidad permanece fuera de la franja consigna durante un cierto tiempo. A las 4 h, el par tiende a subir y, por lo tanto el sistema de control tiende a reducir el carbón aportado para mantener la calidad al menor coste posible. A las 5h aparece otro desencastre que no se puede solucionar con aportación de carbón. En otras pruebas realizadas, con las variables de control velocidad del horno y crudo activadas, la situación anterior pudo ser solucionada.

7 Conclusiones.

- Las técnicas de Inteligencia Artificial son adecuadas para modelar y controlar el Horno de Cemento.
- El uso de un sistema basado en variables y relaciones heurísticas permitió una eficaz adquisición y elaboración del conocimiento procedente de los operadores de planta, que eran hasta ahora los que controlaban el proceso gracias a su enorme experiencia.
- Los procesos con una dinámica bien definida, tal como la de los gases del horno, pueden ser controlados adecuadamente con procedimientos clásicos.
- La implementación mediante Técnicas de conjuntos borrosos y Sistemas Expertos permite cubrir de una forma eficiente la operación normal así como formas excepcionales y anormales, supervisando adecuadamente el cambio entre ellas.

Referencias

- [1] Albertos, P. "Fuzzy Controllers". Application of Artificial Intelligence in process control. Pergamon Press, 1992.
- [2] Barber, F. "Sistemas Expertos dependientes del tiempo: Un modelo para representación y razonamiento". Tesis Doctoral. Dto. Sistemas Informáticos y Computación. Univ. Politécnica de Valencia 1990.
- [3] Crespo, A.; de la Puente, J.A.; Espinosa, A.; García-Fornés A. "Ada Tools for Rapid Prototyping of Real-Time Systems". Ada-Europe Conference. 1989.
- [4] Graham, I. "Expert Systems, Knowledge, Uncertainty and Decision". Ed. Chapman and Hall Computing. 1988.
- [5] Holmblad, L.P.; Ostergaard, J.J. "Control of a cement kiln by fuzzy logic". F.L. Smith review n 67, 1981.
- [6] Laffey, T.; Coxx, P.; Schmitdt, J.; Kao, S.; Read, J. "Real-time knowledge-based systems" AI Magazine spring 1988.

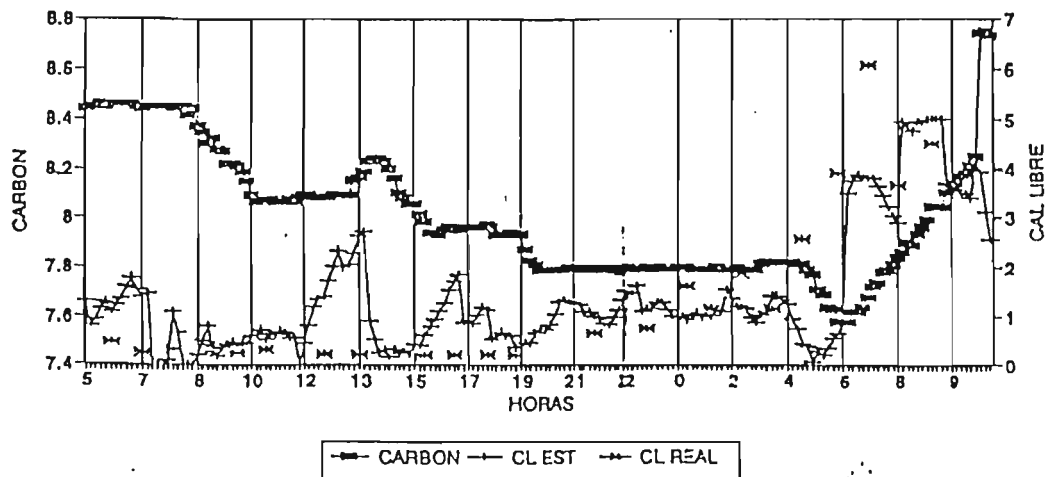


Figura 11: Evolución carbón-cal libre

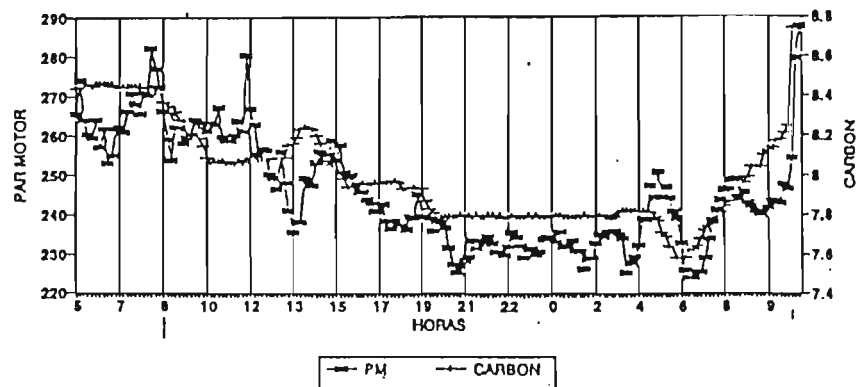


Figura 12: Evolución par motor-carbón

- [7] Martínez, M; Albertos, P.; Navarro, J.L. "Fuzzy Control Methodology in the Process Industry". 2nd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications. SICICA'94. Budapest. 1994.
- [8] Mok, A.K. "The decomposition of real-time system requirements into process modes". IEEE Real-Time Systems Symp. 1984.
- [9] Sygiyama, K. "Rule-Based self-organising controller". Fuzzy Computing. M. M. Gupta and T. Yamakawa (Editors). North-Holland. (1988).
- [10] Umbers, I.J.; King, P.G. "An analysis of human decision making in cement kiln control and the implications". Int. J. Man-Machine Stud. 1980 v12, 11-23.

Agradecimientos: A los compañeros del Grupo de Automática e Informática Industrial: A. Crespo, F. Morant y R. Vivó por su colaboración en el desarrollo de este trabajo y a los técnicos de la planta que participaron también.

CONECTIVOS MIXTOS DE LA LOGICA BORROSA PARA LA COORDINACION EN CONTROL FUZZY

Joseph AGUILAR-MARTIN
équipe Commande Supervisée
groupe Automatique Symbolique
LAAS-CNRS, TOULOUSE (France)
aguilar@laas.fr

Juan-Carlos HERNANDEZ
Grup Sistemes Avançats de Control
Dept ESAII - TERRASSA
Universitat Politècnica de Catalunya
hernandez@csaii.upc.es

RESUMEN

En este artículo se presenta una nueva proposición de controladores simples basados en las especificaciones externas del problema clásico de regulación, y en las limitaciones de potencia que existen siempre al momento de diseñar un controlador. Este diseño se hace posible gracias a la consideración del control de forma lógica y al uso subsecuente de conectivos de la Lógica Borrosa.

Ejemplos simulados ayudan a visualizar el ámbito de aplicación de esta metodología.

0 - INTRODUCCION

El control fuzzy ha llegado a un estado de estandarización que permite su aplicación a muy diversos sistemas de regulación, y existen en el mercado tanto reguladores basados en esta técnica como programas de diseño de sistemas de regulación.

Es de notar que la regulación en general consiste, como se muestra en la figura 1, en convertir la señal de error en anillo cerrado en una acción de compensación que lleve lo mejor posible a un error nulo. Las especificaciones clásicas de un regulador provienen de la consideración de la calidad de las medidas de la variable a regular y de las posibilidades del accionador.

Tratamos aquí de considerar el papel que puede jugar la Lógica Fuzzy dentro de la consideración de esas especificaciones, y para esto, reducimos las otras funciones del regulador fuzzy a una simple función normalizante dentro de las restricciones impuestas por el sistema de acción. Así podemos llamar esta nueva proposición de regulación, "regulador lógico natural", puesto que toma como base de diseño las especificaciones del usuario, y no precisa de una base de conocimientos expertos. Su capacidad de ajuste puede reducirse al parámetro del conectivo de asociación. A pesar del carácter simplificador de esta proposición, pensamos que su interés reside en dos constataciones:

- Tal como se realiza la regulación fuzzy tradicional, no se ha estudiado de manera satisfactoria la influencia de los conectivos de asociación en la inferencia porque su efecto queda inmerso en las reglas dadas por el experto. Por el contrario esta influencia se analiza aquí aislada de otros efectos.

- En los casos en que esta nueva proposición de regulación puede dar resultados satisfactorios, se pueden tener en cuenta varias medidas o variables de regulación, en cuanto la regulación fuzzy, para ser analizable, se limita casi siempre a dos variables de regulación, ya sea el error y su integral, o el error y su derivada.

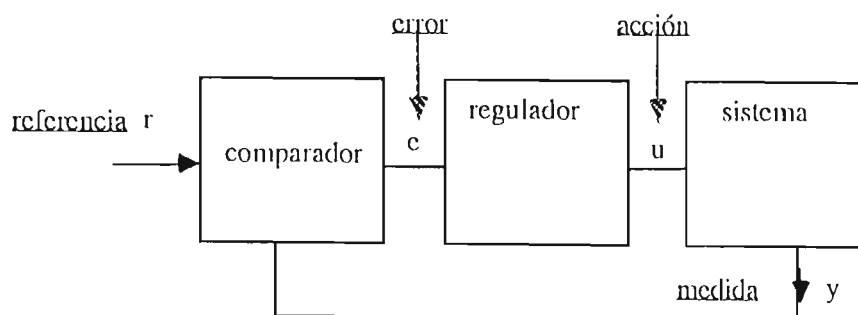


Figura 1

ESPECIFICACIONES DE LA REGULACION

Consideremos el sistema de la figura 1 en el cual se especifica que el bloque "regulador" no puede producir más que acciones comprendidas entre un mínimo y un máximo: $u(t) \in [u_-, u_+]$. Esta situación es obligatoria en todo sistema físico que dispone de una energía finita, y por lo tanto si no se tiene en cuenta esta limitación, rápidamente se saturan las acciones de control, como se puede apreciar en la mayoría de curvas que se presentan en los trabajos que tratan de utilizar únicamente las propiedades del control lineal, sin tener en cuenta las saturaciones.

Por otra parte el bloque "comparador" está constituido por aparatos medidores y tiene forzosamente una precisión por debajo de la cual es imposible apreciar el error. Sea $[\epsilon_-, \epsilon_+]$ el intervalo de tolerancia en el cual, si se encuentra el error $e(t)$, es imposible determinar si $e(t) = 0$, o $e(t) \neq 0$.

También el usuario sabe cuales son los valores límites del error absolutamente inadmisibles, o límites $[\eta_-, \eta_+]$ de excursión, lo cual viene a decir que si se sobrepasan estos valores es necesario actuar con la máxima energía, es decir hacer $u(t) = u_+$, o $u(t) = u_-$. Nos limitaremos aquí a los sistemas centrados en los cuales $\epsilon_+ = -\epsilon_- = \epsilon$ y $\eta_+ = -\eta_- = \eta$.

Con estas especificaciones podemos trazar el gráfico de la figura 2, en el cual se ha interpolado por una función continua entre los valores extremos

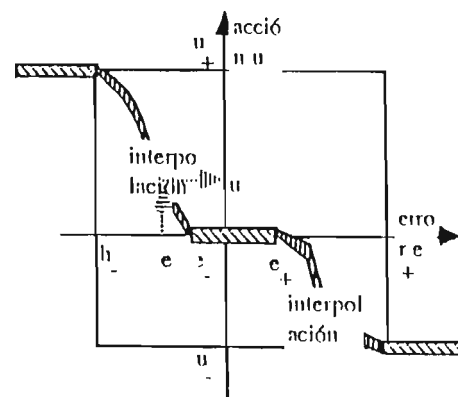


figura 2.

GRADUACION DE LA ACCION

Suponiendo que se dispone de la función interpolada de la figura 2, la acción correspondiente a una medida de error $e(t) \in [\eta_-, \eta_+]$ corresponde una acción de control $u(t) \in [u_-, u_+]$. Mediante una transformación normalizadora podemos transformar $u(t)$ en $u_p^*(t) \in [0, 1]$, por ejemplo:

$u_p^*(t) = \frac{u(t) - u_-}{u_+ - u_-}$, dicha variable indica la intensidad del control dentro del intervalo. Es equivalente a la proposición de tipo regla:

R1: Si el error vale e , entonces el control tendrá la intensidad u^*

Supongamos que se procede a varias transformaciones del error, como es clásico en los reguladores PID, y se obtienen dos nuevas variables de error

$$e_d(t) = \frac{de(t)}{dt}, \text{ y } e_i(t) = \int_0^t e(s) ds.$$

Con estas nuevas variables de error se obtendrán otros dos valores de la intensidad de la acción control $u_d^*(t)$ y $u_i^*(t) \in [0, 1]$.

Dichos valores corresponden a las proposiciones siguientes:

R2: Si la derivada del error vale e_d , entonces el control tendrá la intensidad u_d^*

R3: Si la integral del error vale c_i , entonces el control tendrá la intensidad u_i^* .

Por lo tanto el conocimiento del control puede resumirse a $[R1, R2, R3]$. se trata de combinar las tres reglas para obtener una intensidad única, $u^*(t)$ tras la cual usando la transformación inversa de la normalización obtendremos el valor de la acción a efectuar realmente $u(t)$. En el caso presente

$$u(t) = u_- + u^*(t) \cdot (u_+ - u_-).$$

COMBINACION LOGICA DE INTENSIDADES

A partir de las medidas de $c_p(t)$, $c_i(t)$, $c_d(t)$, se obtienen las proposiciones declarativas:

E1: El error medido vale c ,

E2: La derivada del error medido vale c_d

E3: La integral del error medido vale c_i ,

La simple aplicación del modus ponens nos da las tres proposiciones siguientes:

C1: El control tendrá la intensidad u_p^*

C2: El control tendrá la intensidad u_d^*

C3: Entonces el control tendrá la intensidad u_i^* .

Se pueden tomar varias posiciones en frente del problema de asociar una situación compuesta por varias situaciones elementales, la actitud más estricta consiste en considerar que la situación compuesta está descrita por la proposición: $A = C1 \text{ y } C2 \text{ y } C3$, o sea la conjunción lógica.

La actitud menos estricta estará descrita por $B = C1 \text{ o } C2 \text{ o } C3$.

COMBINACION DIFUSA DE INTENSIDADES

Como es sabido, en la teoría de la lógica difusa la conjunción y corresponde a una t-norma $t(x,y)$. Por otra parte a la disjunción o se asocia una t-conorma dual de una t-norma respecto a una negación, o sea sea $s(x,y) = n(t(n(x),n(y)))$.

Considerando la negación canónica $n(x) = 1 - x$ tendremos

$$s(x,y) = 1 - t(1-x, 1-y).$$

Gracias a la propiedad asociativa las t-normas y las t-conormas se pueden extender a más de 2 argumentos.

Las t-normas más usuales son $m(x,y) = \min(x,y)$, $p(x,y) = x \cdot y$ y $w(x,y) = \max(x+y-1, 0)$, pero otras pueden también utilizarse.

En el caso A se utilizará una t-norma, por ejemplo el mínimo, de tal manera que $u^*(t) = t(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t))$.

En el caso B se utilizará una t-conorma, por ejemplo el máximo, de tal manera que $u^*(t) = s(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t))$.

Si $s(x,y)$ es la t-conorma dual de $t(x,y)$, y $0 \leq \lambda \leq 1$, se define un conectivo mixto por interpolación lineal $c_{\lambda}(x,y) =$

$\lambda \cdot t(x,y) + (1-\lambda) \cdot s(x,y)$. Hay que notar que los conectivos mixtos no son asociativos. por lo tanto hay que calcular la t-norma y la t-conorma iteradas antes de realizar la interpolación lineal, así: $u^*_{\lambda}(t) = c_{\lambda}(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t))$, o sea

$$u^*_{\lambda}(t) = \lambda \cdot t(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t)) + (1-\lambda) \cdot s(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t)).$$

Finalmente el control a aplicar será

$$u_{\lambda}(t) = u_- + u^*_{\lambda}(t) \cdot (u_+ - u_-).$$

Utilizaremos mas tarde dos casos, el del mínimo y el del producto.

$$u^m_{\lambda}(t) = \lambda \cdot \min(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t)) + (1-\lambda) \cdot \max(u_p^*(t), u_d^*(t), u_i^*(t)).$$

$$u^p_{\lambda}(t) = \lambda \cdot (u_p^*(t) \cdot u_d^*(t) \cdot u_i^*(t)) + (1-\lambda) \cdot (u_p^*(t) + u_d^*(t) + u_i^*(t) - u_p^*(t) \cdot u_d^*(t) - u_i^*(t) \cdot u_p^*(t) - u_d^*(t) \cdot u_i^*(t) + u_p^*(t) \cdot u_d^*(t) \cdot u_i^*(t)).$$

AJUSTE SISTEMATICO DE LOS ERRORES DERIVADO E INTEGRAL

La teoría expuesta hasta aquí supone que se pueden establecer tres funciones como la de la figura 1, para el error, su integral y su derivada.

Vamos a restringirnos a una formulación en tiempo discreto en la cual el intervalo

de muestreo será Δ , y por lo tanto la derivada será reemplazada por $\epsilon_d(t) = \frac{\epsilon(t) - \epsilon(t-1)}{\Delta}$ y la integral por una suma

$$\sum_{i=t-1}^t$$

finita $\epsilon_i(t) = \Delta \cdot \sum_{i=t-1}^t \epsilon(i)$. Por lo tanto si

e es la tolerancia de $\epsilon(t)$, y su excursión η , la tolerancia de $\epsilon_d(t)$ será $\epsilon_d = \frac{2e}{\Delta}$ y su

excursión $\eta_d = \frac{2\eta}{\Delta}$; de forma similar la

tolerancia de $\epsilon_i(t)$ será $\epsilon_i = \Delta \cdot N \cdot e$ y su excursión $\eta_i = \Delta \cdot N \cdot \eta$.

AJUSTE LIBRE DE LA PONDERACION ENTRE VARIABLES SECUNDARIAS

Esta definición sistemática de las características de las variables secundarias formadas a partir del error $e(t)$ permite proponer un controlador en el cual el único parámetro de ajuste es λ . Sin embargo puede ser conveniente dar al usuario mas latitud de ajuste, y para eso cabe dejar libres las excursiones η_d y η_i .

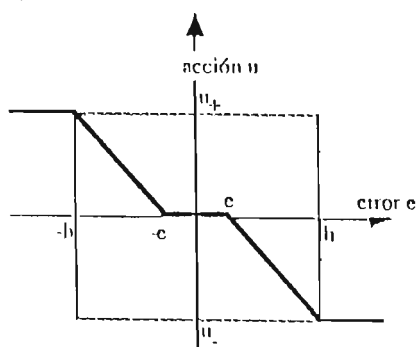


Figura 3

En la figura 3 la interpolación se hace linealmente y las pendientes, o ganancias asignadas a cada variable vienen determinadas por la diferencia entre la excursión y la tolerancia correspondiente, y se pueden escoger

libremente las relaciones $k_d = \frac{\epsilon_d - \eta_d}{\epsilon - \eta}$

y $k_i = -\frac{\epsilon_i - \eta_i}{\epsilon - \eta}$, en tal caso las excursiones vienen dadas por

$$\eta_d = \frac{2e}{\Delta} + k_d(\epsilon - \eta)$$

y $\eta_i = \Delta \cdot N \cdot e + k_i(\epsilon - \eta)$.

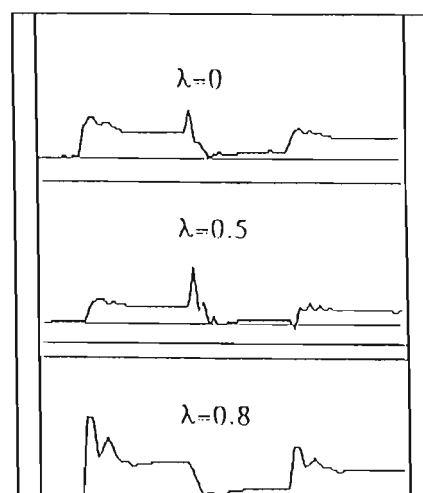
En este caso tendremos tres parámetros de ajuste λ , k_d y k_i .

ILUSTRACION EXPERIMENTAL

Hemos escogido un sistema dinámico discreto de orden 2 con un retardo de 1 instante de muestreo, y consideramos

$\Delta = 1$, y $N = 5$.

Se puede apreciar en la figura 4 el efecto de λ en la respuesta indicial.



curvas de respuesta obtenidas con el conectivo mixto min-max para tres valores diferentes de λ .

Figura 4

REFERENCIAS

- Aguilar-Martin J. & N. Piera i Carreté (1986). *Les Connectifs Mixtes, de nouveaux Opérateurs d'Association des Variables dans la Classification Automatique*, in *Data Analysis and Informatics*, J. Diday et al. (Editors), Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland), 253-265.

Demostraciones de Software

FuzzyControlDesk

Rainer Albersmann, Rudolf Felix

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20

44227 Dortmund, Germany

Tel.: +Ger 231 9700 921, Fax: +Ger 231 9700 929

Abstract

The features of the software tool FuzzyControlDesk are described and applikation examples are given.

FuzzyControlDesk is a powerful tool for developing fuzzy controllers. It provides for a broad spectrum of engineering features and is independent of any additional hard- and software.

FuzzyControlDesk generates a fuzzy controller in C-code. The user specifies the controller either in the rule-oriented language FuzzyTalk or by using a graphical user interface (see Fig. 1).

FuzzyControlDesk generates both the ANSI and the Kernighan & Ritchie C-standard code. Using an appropriate C-compiler any target architecture, for example 80C51 or 80C166 micro controller, can be supported. Test functions can be generated optionally for both tuning and error detection.

Special requirements regarding the performance and memory space are met for example by automatical renunciation of float variables. The inference methods to be used are the max-min and the max-prod inference, which can be chosen by the user. For the defuzzification the centre of gravity method is applied. If required, additional defuzzification methods can be provided.

Key features of FuzzyControlDesk:

- textual or graphical specification of the controller
- table-oriented representation of linguistic variables and membership functions
- function-oriented representation of linguistic variables and membership functions
- max-min inference
- time-optimized max-prod inference
- centre of gravity defuzzification
- optimized code generation for 8 bit micro controller
- memory-optimized integer arithmetic
- generation of ANSI and Kernighan & Ritchie C-standard
- generation of test functions
- C-code integrability by automatically generated header files
- on-line help functions
- DIF interface to standard tools (for example MS-Excel or Lotus, see Fig. 2)
- MS-Windows graphical user interface
- flexible simulation of the controller

FuzzyControlDesk has been successfully applied in the following fields:

- heating and air conditioning technics
- testing technics in the automotive industry
- controlling of processes in the chemical industry

Demonstration objects developed with FuzzyControlDesk:

- filling plant
- inverted pendulum

FuzzyControlDesk is available for IBM compatible PCs with Microsoft Windows 3.1. If required FuzzyControlDesk can be adapted to any hardware or be integrated as a part of a problem specific system solution.

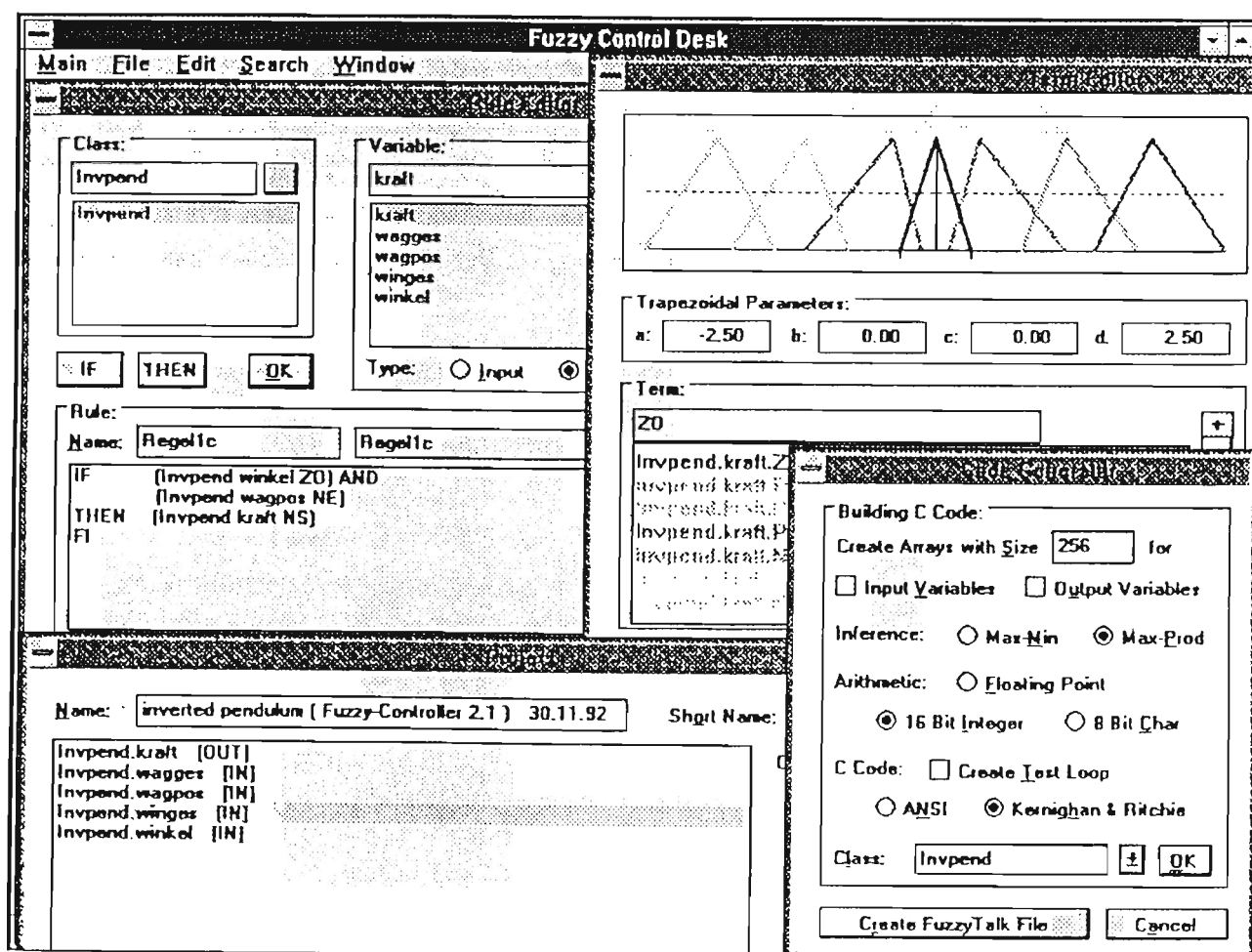


Fig. 1: Graphical User Interface of FuzzyControlDesk.

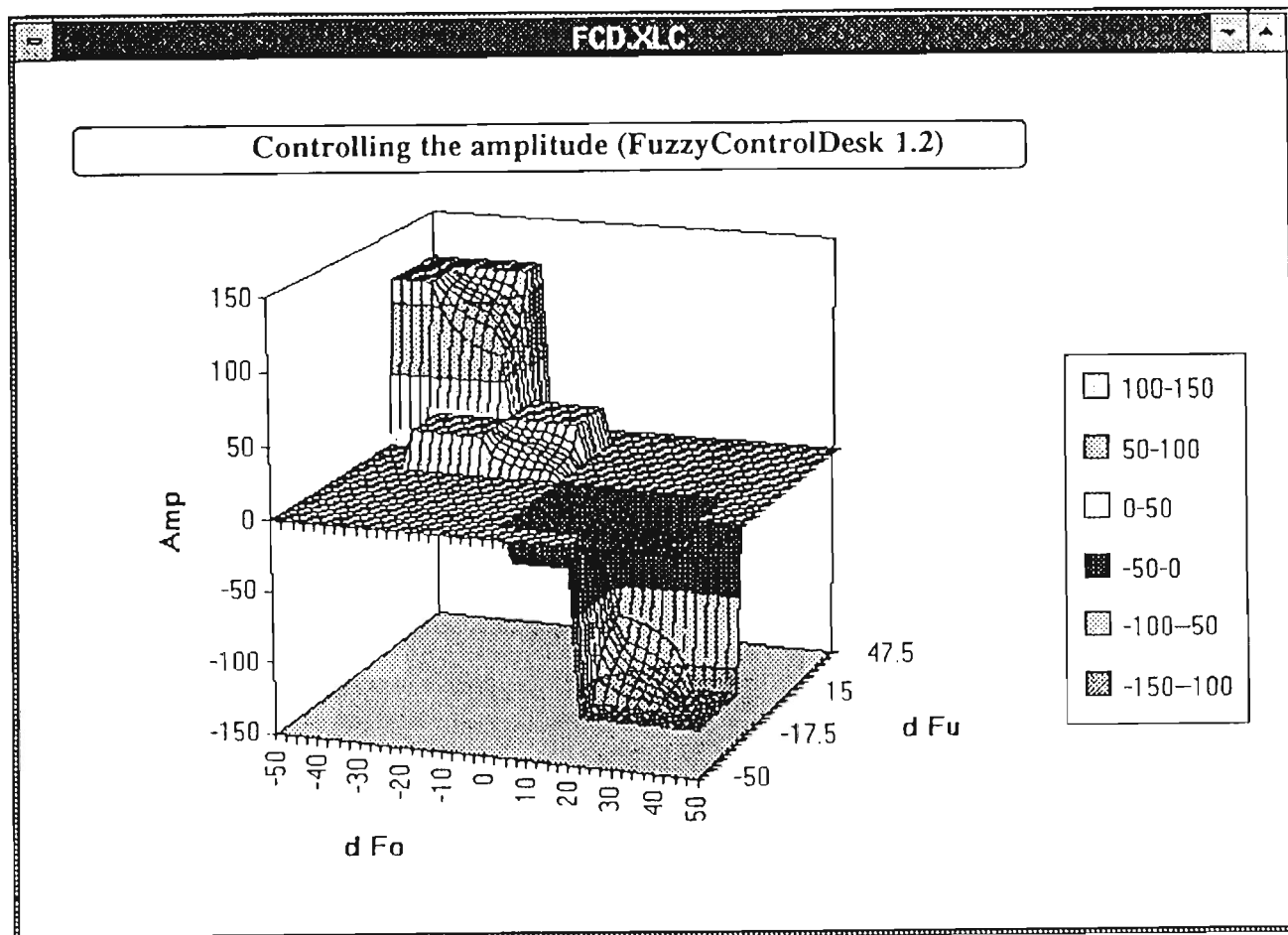


Fig. 2: Controllers input / output visualisation.

FuzzyDecisionDesk

Rainer Albersmann, Rudolf Felix

Fuzzy Demonstrations-Zentrum Dortmund
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20
44227 Dortmund, Germany
Tel.: +Ger 231 9700 921, Fax: +Ger 231 9700 929

Abstract

The features of the software tool FuzzyDecisionDesk are described and applikation examples are given.

In case of optimization of industrial tasks, fuzzy logic has proved itself to be an efficient method of solving planning and classification problems.

The tool **FuzzyDecisionDesk** is based on a universal problem independent approach. The tool can be used for solving complex optimization problems in both technical and management oriented applications.

Through the orientation on both qualitatively and quantitatively specified goals (see Fig. 1) and their relationships **FuzzyDecisionDesk** provides for analysis and solutions easy to understand even in case of very complex optimization problems.

The optimization algorithm of **FuzzyDecisionDesk** refers to a powerful model of the optimization process. The model is based on fuzzy estimates of the impact of optimization and decision alternatives (short actions) on the goals and their priorities. **FuzzyDecisionDesk** first analyzes the consequences of each action and derives relationships (see Fig. 2) between the goals (for instance competition or

cooperation). Based on the relationships either a single optimization alternative or a fuzzy set of optimization alternatives is determined.

FuzzyDecisionDesk has been successfully applied in the following fields:

- process analysis
- forming technology (beam bending)
- VLSI design
- production planning
- operations research (OR)
- image recognition
- management decision making
- optimization problems

FuzzyDecisionDesk is available for SUN compatible workstations with OS Release 4.1.2 and Motif-user interface and for IBM compatible PCs with Microsoft Windows 3.1. If required **FuzzyDecisionDesk** can be adapted to any hardware or be integrated as a part of a problem specific system solution.

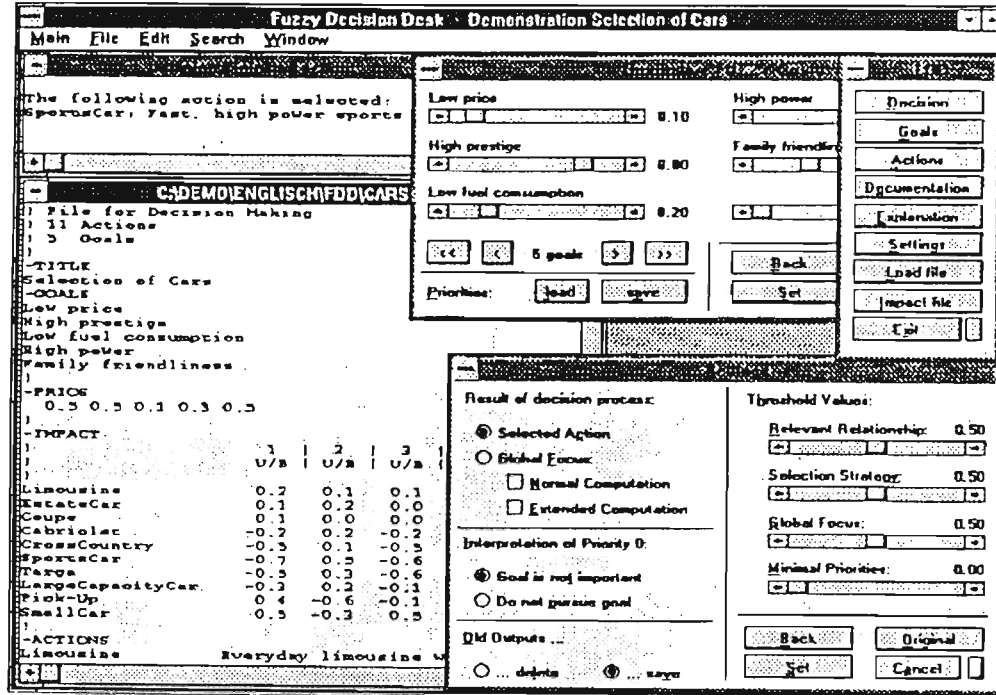


Fig. 1: Selection of the best car with FuzzyDecisionDesk.

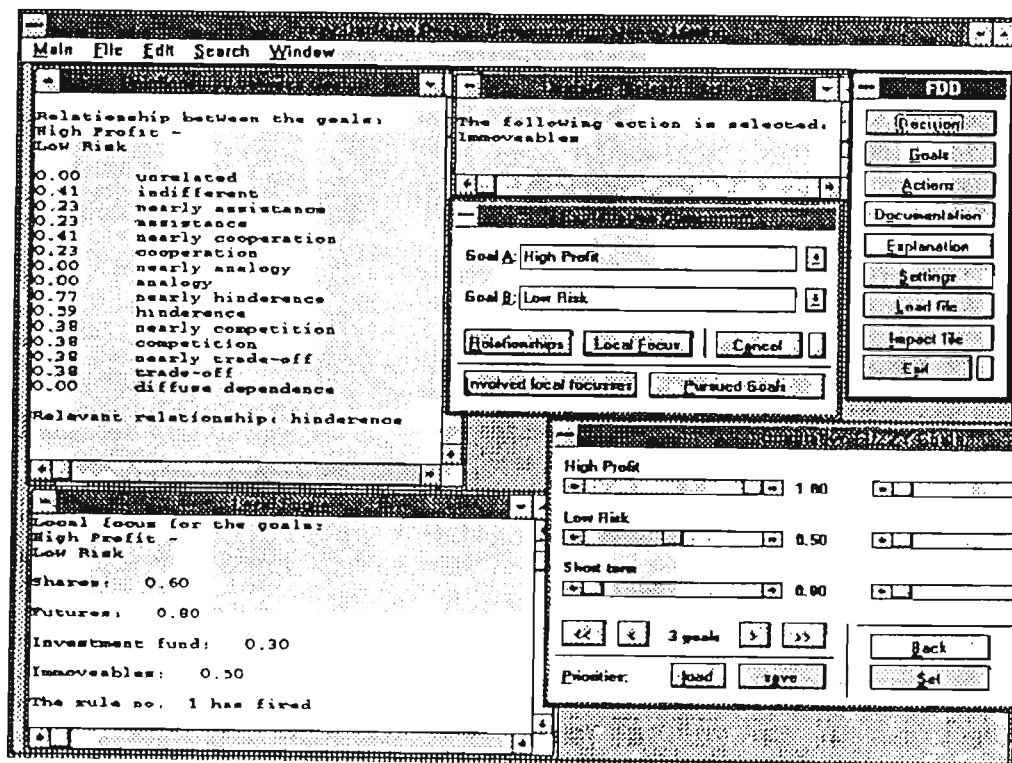


Fig. 2: Graphical user interface of FuzzyDecisionDesk.

GENIAVIS: Modelo de Algoritmo Genético para el Análisis de Inventarios con Programación Visual

Enrique López González

Dpto. Direc. y Eco. de la Empresa
Facultad CC. EE. y Empresariales
Universidad de León

Cristina Mendaña Cuervo

Dpto. Direc. y Eco. de la Empresa
Facultad CC. EE. y Empresariales
Universidad de León

Miguel Ángel Rodríguez Fernández

Dpto. Direc. y Eco. de la Empresa
Facultad CC. EE. y Empresariales
Universidad de León
Campus de Vegazana
E- 24071 León

Las decisiones de análisis de inventarios tienen por objeto, como problema de control de gestión empresarial, minimizar los costes de los stocks. De hecho, existe un nivel óptimo de inversión para cualquier clase de activo, bien sea éste efectivo, una nave industrial, o inventarios, para cada clase hay una inversión teóricamente mejor que las demás.

En el control de inventarios interesa pues descubrir y mantener el nivel óptimo de la inversión en inventarios. Este nivel debe encontrarse entre dos puntos: uno, inferior, que si se llega trastocaría la producción o venta, y podría ocasionar pérdidas; y otro, que produce costes adicionales si se tienen inventarios adicionales. Por tanto, la pregunta más importante que conviene responder es ¿Cuánto debemos comprar o fabricar?.

La solución tradicional considera que los únicos costes que intervienen en el cálculo de la cantidad óptima de pedido o fabricación son los costes de pedido y los costes de almacén.

Los costes de pedido son aquellos que se incurren cada vez que se ordena o solicita una cantidad a un proveedor o a otra sección de la empresa. Así, dadas unas necesidades de artículos para un período de tiempo determinado y una cantidad de pedido constante, cuanto más pequeñas sean las cantidades ordenadas, mayor será el coste de pedido y viceversa.

Por otro lado, los coste de almacén son aquellos que se incurren al tener una unidad almacenada. Entonces, si se mantienen las anteriores hipótesis, cuanto más pequeña sea la cantidad de pedido menor será el stock medio y menor el coste de almacén.

El problema así planteado se reduce a calcular el óptimo de una función lineal y por ello de fácil

resolución. De esta forma, si tenemos:

Q:	Cantidad por ordenar
Cp:	Coste de realizar un pedido
Ca:	Coste de almacenamiento
N:	Necesidades para un período de tiempo determinado.

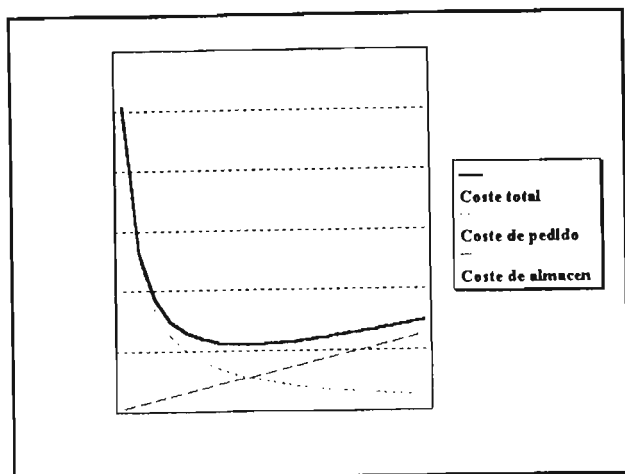
La cantidad óptima de pedido será:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Cp \cdot N}{Ca}}$$

Esta ecuación se restringe a situaciones de linealidad en la función de costes totales. En la realidad esta función se aleja mucho de esta simplificación, pues hay que incorporar muchas más circunstancias económicas de las que el modelo matemático lineal supone.

Así, olvida que los costes anteriormente mencionados no tienen por qué ser lineales sino presentar discontinuidades por tamaños o repeticiones, como por ejemplo el personal necesario para llevar el almacén no variará de forma continua sino que al pasar de determinados niveles se precisará de un empleado más.

Asimismo, olvida que existen normalmente tramos en el coste unitario de adquisición o de fabricación de los artículos en función del tamaño del pedido o lote de fabricación. Este coste, ante tamaños grandes de pedido disminuirá, tomando los mayores valores cuando la cantidad ordenada es pequeña.



Figural: Representación de los costes en el enfoque tradicional (lineal).

También, olvida que existen costes de depreciación. Cualquier producto por el mero hecho de estar almacenado pierde valor. Aunque a primera vista parece que este coste pueda estar incluido en el de almacén, no es así, la depreciación que experimenta un artículo en función del tiempo transcurrido no tiene por qué ser lineal sino que podría ser exponencial.

Por todo ello nos encontramos con un vacío de soluciones al cálculo de la cantidad óptima de pedido en ambientes reales o complejos, lo cual nos ha incitado a plantear la utilización de Algoritmos Genéticos que, como procedimientos de búsqueda u optimización basados en los mecanismos de la genética y la selección natural, son una herramienta de gran utilidad en estas situaciones, pues, aunque el problema sea complejo y lejos de ser lineal, el algoritmo puede llegar a soluciones suficientemente buenas. (No siempre la óptima).

El algoritmo no precisa que la función sea continua o derivable, sino únicamente una representación binaria de las variables del problema para realizar sus operaciones (selección, cruce y mutación).

En nuestro caso, el diagrama de flujo del algoritmo genético para resolver el problema sería:

1. CREACIÓN DE UNA POBLACIÓN ALEATORIA DE SOLUCIONES (CANTIDADES ÓPTIMAS DE PEDIDOS)

2. REPRESENTACIÓN BINARIA

3. CÁLCULO DEL GRADO DE ADECUACIÓN DE CADA INDIVIDUO DE LA POBLACIÓN

4. ELITISMO: SELECCIÓN DEL INDIVIDUO DE COSTE MENOR

5. SELECCIÓN DE LOS PADRES MEDIANTE UNA RULETA DE PROBABILIDADES

6. APLICACIÓN DEL OPERADOR DE CRUCE

7. APLICACIÓN DEL OPERADOR DE MUTACIÓN

8. COMPROBACIÓN DE SI SE HA MEJORADO EL INDIVIDUO ELITISTA ANTES SELECCIONADO Y SI NO INCLUIRLO

9. COMPROBAR SI SE CUMPLE LA CONDICIÓN DE PARADA:

SÍ: MOSTRAR EL MEJOR INDIVIDUO DE LA ÚLTIMA POBLACIÓN

NO: VOLVER AL PASO 3.

El algoritmo para la resolución del problema de la cantidad óptima de pedido ha sido implementado en el lenguaje Visual Basic y sus utilidades, pues al tratarse de una programación orientada a objetos y dentro del entorno operativo de WINDOWS resulta más amigable y accesible a la hora del manejo, aunque el tiempo de ordenador requerido sea ligeramente superior al de otros lenguajes de programación, pero despreciable ante la ventaja de maniobrabilidad o navegación del programa.

La interfaz de usuario de GENIAVIS es una ventana con varios campos de entrada y botones. Se divide en secciones:

- Costes:**
 - Costes de almacen:** Campo de texto con el valor 0.5.
 - Costes de pedido:** Campo de texto con el valor 10.
 - Costes diario de depreciación:** Campo de texto con el valor 1.
- Restricciones:**
 - Necesidades anuales:** Campo de texto con el valor 5000.
 - Capacidad:** Campo de texto con el valor 1000.
 - Pedido mínimo:** Campo de texto con el valor 20.
- Datos del Algoritmo Genético:**
 - Probabilidad de cruce:** Campo de texto con el valor 0.06.
 - Probabilidad de mutación:** Campo de texto con el valor 0.01.
 - Generaciones:** Campo de texto con el valor 12.
- Parámetros de la Programación:**
 - Numero de tramos de precios:** Campo de texto con el valor 5.
 - Precios para cada tramo:** Campo de texto con el valor 5.
 - Límite superior para cada tramo:** Campo de texto con el valor 2.
- Botones:** "Comenzar" y "Continuar".
- Resultado:** Una tabla con dos columnas: "Cantidad" y "Coste". La fila "Coste" muestra el valor 0.

Figura 2: Interfaz de usuario de GENIAVIS.

SCD: Una Herramienta Gráfica para el Estudio de Controladores Difusos

Esteban Cárdenas Cano¹, Juan Carlos Castillo Parra¹, Oscar Córdón García²,
Francisco Herrera Triguero², Antonio Peregrín Rubio¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Universidad de Granada. 18071 - Granada

² Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Granada
e-mail: herrera, ocordon@robinson.ugr.es

Resumen

En este trabajo se introduce un entorno gráfico desarrollado con el propósito de estudiar el rendimiento de controladores difusos diseñados por el usuario combinando distintos operadores difusos sobre una serie de aplicaciones. Dicho entorno, denominado SCD, incluye además una herramienta de manejo de bases de conocimiento que permite al usuario diseñar éstas de un modo amigable y emplearlas en el control de las aplicaciones, así como un método de ajuste de bases de reglas para un controlador difuso concreto basado en el empleo de algoritmos genéticos.

Palabras clave: control difuso, base de conocimiento, operador de conjunción, operador de implicación, método de defuzzificación, algoritmo genético.

1 Introducción a SCD

SCD es una aplicación gráfica en entorno DOS que puede ser ejecutada en cualquier plataforma x86 (aunque se recomienda como mínimo un 386) con tarjeta gráfica VGA. Está integrada por varias herramientas que permiten estudiar el comportamiento de controladores difusos (CDs) en el control de tres sistemas reales: péndulo invertido, cart pole y móvil difuso. Los controladores pueden escogerse combinando la selección del operador de conjunción de entre los 6 presentados, de la función de implicación entre 14 disponibles, y del método de defuzzificación entre las 14 implementaciones realizadas. La herramienta para el manejo de bases de reglas permite crear y modificar bases de conocimiento, las cuales pueden ser empleadas en el control de los sistemas propuestos. Finalmente, la herramienta para el ajuste de bases de conocimiento particularizada

al caso del péndulo invertido permite ajustar la semántica de la misma para conseguir un control óptimo.

La combinación de estas herramientas permite el estudio comparativo de los distintos controladores que pueden configurarse, así como de las diferentes bases de reglas que se diseñen, pudiéndose obtener importantes conclusiones sobre su comportamiento y aptitud en sistemas reales.

2 Controladores difusos de SCD

Como es sabido, el rendimiento de un CD depende directamente de los operadores difusos escogidos para modelar sus distintos componentes en el proceso de inferencia. De este modo, la elección de los operadores de conjunción e implicación junto con la del método de defuzzificación constituye uno de los problemas principales en el diseño de CDs.

Por esta razón, y puesto que SCD es un software desarrollado con el propósito de estudiar el comportamiento de los distintos operadores difusos en CDs, hemos tratado de dotarlo de una alta funcionalidad en este sentido. Así, el software incluye la implementación de seis t-normas para ser empleadas en el papel de operadores de conjunción, catorce operadores de implicación y otros catorce métodos de defuzzificación, los cuales, al ser combinados, permiten de una manera sencilla el diseño de hasta 1176 CDs distintos por parte del usuario. En [1,2,3] se recogen las expresiones de los operadores seleccionados.

Un hecho destacable es que los operadores escogidos para ser implementados en cada tarea pertenecen a distintas familias. En lo referente a los operadores de implicación, se incluyen entre los mismos seis t-normas [7], siete funciones de implicación (dos S-implicaciones, tres R-implicaciones, una R y S implicación y una QM-

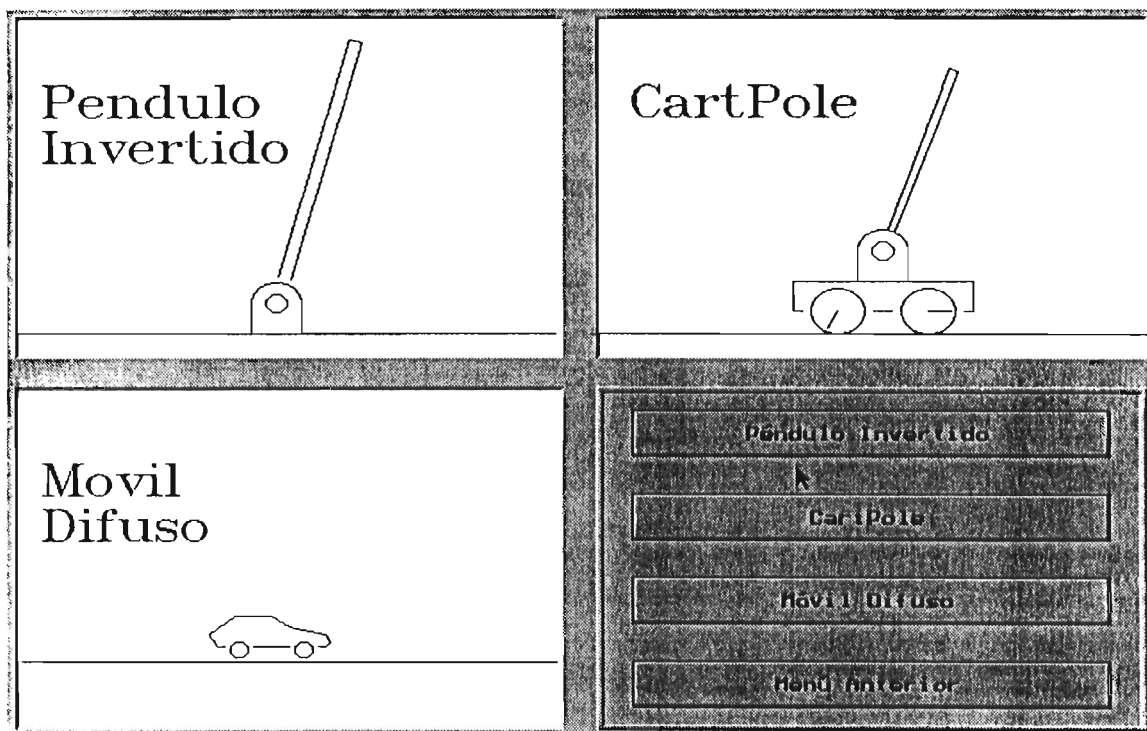


Figura 1: Modelos de simulación implementados

implicación [12]) y un operador no perteneciente a ninguna familia con propiedades claramente definidas. Entre los métodos de defuzzificación hemos seleccionado seis basados en el Centro de Gravedad y ocho en el Punto de Máximo Criterio, distinguiendo dentro de ambos grupos métodos ponderados y basados en el mayor Grado de Importancia [1].

Ello da lugar a que SCD sea útil para analizar la influencia de las distintas familias de operadores en CDs, problema que ha sido ampliamente tratado en la literatura especializada [1,2,3,5,7,9].

3 Simuladores de sistemas

SCD incluye tres modelos de simulación de sistemas reales, dos de los cuales han sido ampliamente estudiados en Teoría de Control. El propósito de estos simuladores es el de permitir el estudio de la eficacia de los distintos controladores diseñados en cada una de las aplicaciones concretas.

El problema del péndulo invertido [13] es tratado en el primero de los simuladores. Dicho sistema está basado en un péndulo sostenido por un eje en su base y que únicamente puede realizar movimientos laterales en ambos sentidos. El problema consiste en estabilizarlo en la vertical mediante la aplicación de fuerzas instantáneas sobre su centro de masas.

La segunda aplicación seleccionada, el cart pole [4,11,13], consiste en un péndulo invertido portado por

un móvil. El péndulo, que debe ser equilibrado en la vertical, se articula con el móvil a través de un eje perpendicular a la dirección de movimiento del vehículo, el cual se desplaza en ambos sentidos impulsado por las fuerzas de control que tratan de mantener el equilibrio citado del péndulo.

Finalmente, el tercer simulador maneja el problema del posicionamiento de un móvil en un punto concreto de una superficie [6]. El sistema presenta un vehículo que se desplaza sobre un perfil con una velocidad inicial y el objetivo es detener éste en un punto especificado. Dicho objetivo se realiza en dos fases: una primera de frenado del vehículo una vez superado el punto en cuestión y otra en la que se realiza el posicionamiento en sí. En el simulador desarrollado se han incluido tres perfiles distintos.

La figura 1 recoge la pantalla de SCD en la que se selecciona la aplicación que se desea controlar.

4 Manejo de bases de conocimiento

El manejador de bases de conocimiento es una herramienta que permite crear y modificar bases de reglas y la semántica asociada a éstas, con gran flexibilidad. En lo referente a la definición de la semántica (figura 2), existe la posibilidad de particionar el universo de discurso de dos modos distintos, efectuando una equipartición en la que todas las funciones de perten-

cia presentan la misma forma u otro tipo de partición en la que se distinguen las de los extremos.

La especificación de la semántica depende del número de etiquetas lingüísticas y del valor de los parámetros W y K especificado. El factor W de anchura de etiqueta relaciona la amplitud de la función de pertenencia asociada a la misma con el dominio con en el que se mueve la variable lingüística. En cambio, el factor K de anchura de meseta hace alusión a la amplitud de la parte superior de la etiqueta, expresando la proporción de la base que se desca adopte ésta. Este parámetro permite la definición de funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares.

La modificación de estos parámetros permite la creación de distintas bases de conocimiento para una aplicación concreta. De este modo, podemos considerar el manejador como una herramienta de ajuste manual que permite obtener buenas bases de conocimiento mediante la obtención de una relación adecuada entre ambos.

5 Método de ajuste: algoritmo genético

SCD incorpora un método para el ajuste de bases de conocimiento basado en algoritmos genéticos [8]. Se

trata de un método heurístico para el ajuste de la semántica de la base de reglas lingüísticas particularizado en este caso para el controlador del simulador del péndulo invertido. Los cromosomas con los que trabaja el algoritmo representan la base de conocimiento. La función de adaptación que mide la adecuación de los mismos está basada en el cálculo del error cuadrático obtenido por el CD que use la base en cuestión sobre un conjunto de datos de entrenamiento. El algoritmo genético trata de optimizar esta función proporcionando tras su ejecución la mejor base de conocimiento obtenida. La figura 3 recoge una ejecución del mismo.

El algoritmo genético de SCD cuenta con la capacidad de poder escoger entre tres funciones de evaluación distintas. La primera de ellas está basada en la medida de error cuadrático tal y como se ha indicado. Las dos restantes se basan respectivamente en emplear una medida de error perteneciente a otra familia (en concreto, una medida de convergencia) y en la combinación de las dos medidas anteriores [2].

Las bases de reglas obtenidas mediante este procedimiento pueden ser empleadas en el control del péndulo invertido.

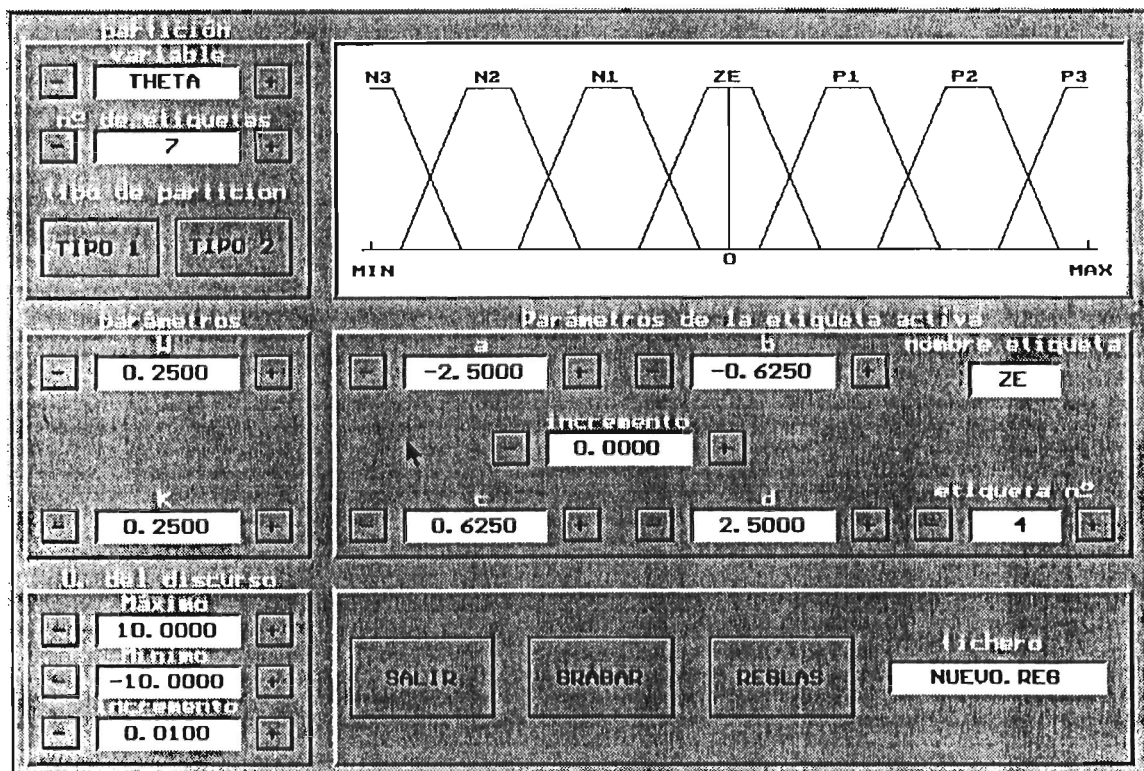


Figura 2: Pantalla de definición de la semántica de las bases de conocimiento

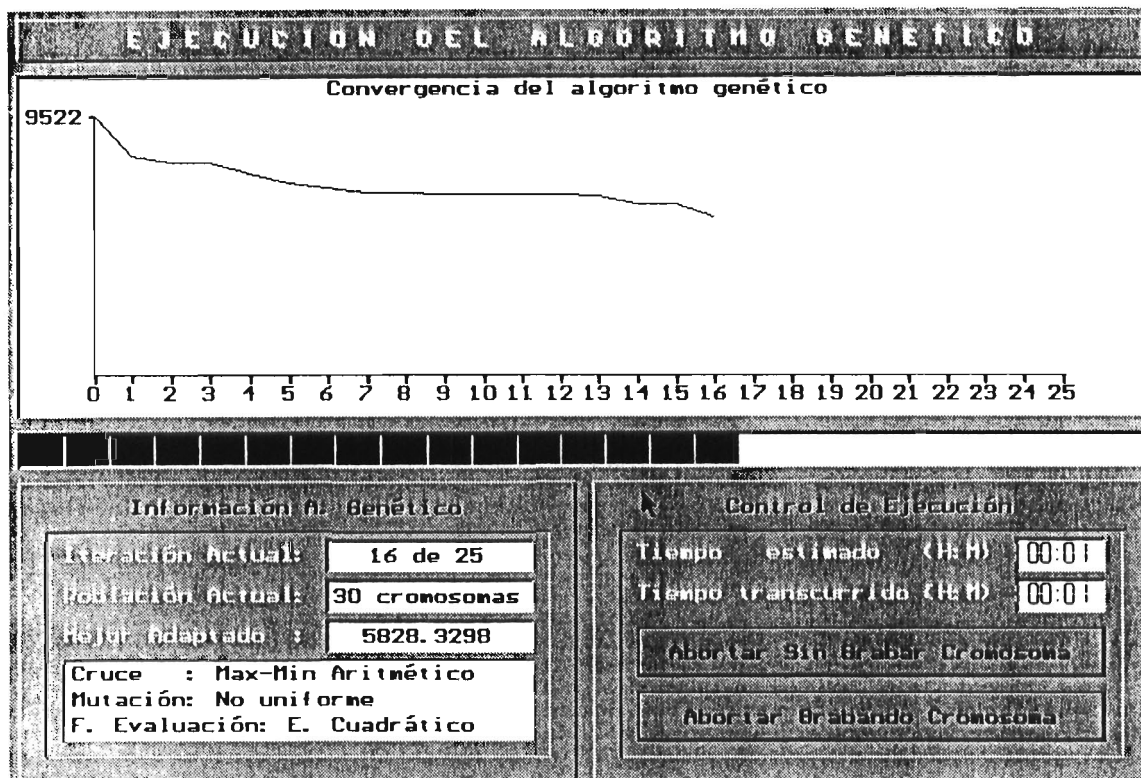


Figura 3: Ejecución del algoritmo genético

Referencias

- [1] Cárdenas, E., Castillo, J.C., Cordon, O. y Peregrín, A., Estudio Comparativo de Sistemas de Inferencia y Métodos de Defuzzificación aplicados al control difuso del Péndulo Invertido, *III Congreso Español de Tecnologías y Lógica Fuzzy*, pp. 259-266, 1993.
- [2] Cárdenas, E., Castillo, J.C., Cordon, O., Herrera, F. y Peregrín, A., Influence of Fuzzy Implication Functions and Defuzzification Methods in Fuzzy Control, *Busefal* 57, pp.69-79, 1994.
- [3] Cárdenas, E., Castillo, J.C., Cordon, O. y Peregrín, A., Influencia de las T-normas en Controladores Difusos, *IV Congreso Español de Tecnologías y Lógica Fuzzy*, Blanes, pp. 259-264, 1994.
- [4] Chen, Y.Y. y Tsao, T.C., A Description of the Dynamical Behaviour of Fuzzy Systems. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 19, nº 4, pp. 745-755, 1989.
- [5] Cordon, O., Herrera, F. y Peregrín, A., T-norms vs. Implication Functions as Implications Operators in Fuzzy Control, aceptado para su presentación en el *Sexto Congreso IFSA*, 1995.
- [6] Wolf, T., Das Fuzzy-Mobil (en alemán), *Magazin für Computerpraxis*, Marzo, pp. 50-63, 1991.
- [7] Gupta, M.M. y Qi, J., Design of Fuzzy Logic Controllers Based on Generalized T-operators, *Fuzzy Sets and Systems* 40, 1991, pp. 473-489.
- [8] Herrera, F., Lozano, M. y Verdegay, J.L., Un Algoritmo Genético para el Ajuste de Controladores Difusos, *III Congreso Español de Tecnologías y Lógica Fuzzy*, Santiago, pp. 251-258, 1993.
- [9] Kizska, J., Kochanska, M. y Sliwinska, D., The influence of Some Fuzzy Implication Operators on the Accuracy of a Fuzzy Model - Parts I and II, *Fuzzy Sets and Systems* 15, pp. 111-128, 223-240, 1985.
- [10] Lee, C.C., Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Parts I and II, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, 2, pp. 404-418, 419-435, 1990.
- [11] Matsura, K., Fuzzy Control of Upswing and Stabilization fo Inverted Pole Including Control fo Cart Position. *Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems*. Vol. 5, nº 2, pp. 239-253, 1993.
- [12] Trillas, E. y Valverde, L., On Implication and Indistinguishability in the Setting of Fuzzy Logic, J. Kacprzyk, R. R. Yager, Eds., *Management Decision Support Systems Using Fuzzy Sets and Possibility Theory*, pp. 198-212, 1980.
- [13] Yamakawa, T., Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System, *Fuzzy Sets and Systems* 32, pp. 161-180, 1989.

UN SISTEMA BASADO EN REDES DE RESTRICCIONES BORROSAS PARA LA SELECCION DE PRODUCTOS FITOSANITARIOS

S. Túnez¹, I. del Aguila¹, A. Bosch¹, F. Bienvenido¹ y R. Marín²

¹ Dept. de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería. 04120 Almería, España. E-mail: stunez@ualm.es

² Dept. de Informática y Sistemas. Universidad de Murcia. 30071 Murcia, España. E-mail: roque@dif.um.es

1.- Introducción

El software que presentamos implementa el modelo de decisión basado redes de restricciones vectoriales binarias borrosas para la adquisición y representación de conocimiento para el control fitosanitario en invernaderos presentado en ESTYLF'95 (Túnez et al., 1995). El control de plagas en cultivos representa un problema complejo debido a los cambios a que están sometidas todas las cuestiones relacionadas con los productos fitosanitarios, tanto en su aspectos legales, como a la selección y aplicación de los mismos.

El sistema que pasamos a describir a continuación integra técnicas de decisión borrosas (Dubois y Prade, 1988; Yager, 1988; 1992) con redes de restricciones borrosas basadas en una generalización del modelo FTCN (Fuzzy Temporal Constraint Networks) propuestas para razonamiento temporal (Marín et al., 1993; 1994) como una buena aproximación para poder representar valores en términos relativos, imprecisos y susceptibles de ser expresados lingüísticamente; y por otro lado, que sean fácilmente modificables por el usuario (técnico agrícola). El sistema incluye mecanismos automáticos de eliminación de las redundancias y detección de las inconsistencias que el usuario pueda introducir durante los procesos de modificación del conocimiento.

2.- Descripción del sistema.

La estructura del sistema se muestra en el diagrama siguiente.

Partiendo de una base de conocimiento con los productos fitosanitarios y mediante las indicaciones del usuario se realiza la especificación del espacio de opciones. Se genera una red de restricciones por cada una de las características de los productos. Dicha red consta de nodos (productos) y arcos (restricciones). La estructura de objetos sobre la que se plasma la red es una estructura dinámica (generada en tiempo de ejecución) en la que se han definido dos tipos de objetos básicos. Los objetos de la clase NODOS, representan un producto, y contendrán como propiedades los datos relevantes para ese producto. Los objetos de la clase RESTRICCIONES representan un arco en la red de restricciones; como propiedades se incluyen los datos que definen la restricción y los

productos que relaciona. La red de cada atributo consistirá por tanto en un árbol con dos niveles de objetos, el primer nivel define los nodos de la red y el segundo las restricciones. La generación de una nueva descripción consistirá en crear un nuevo objeto restricción y ligarlo al objeto nodo apropiado.

Definidas las redes se debe verificar la consistencia y eliminar la redundancia de éstas recorriendo la implementación de la red con algoritmos ya conocidos y experimentados por el grupo. Para optimizar este proceso, se pueden usar algoritmos incrementales (en estudio) o módulos en C para los procesos de mayor complejidad computacional.

Un proceso similar se realiza con la red de grados de importancia, que vincula los distintos criterios que configuran el perfil de tratamiento deseado y permiten establecer criterios de primer y segundo orden (Yager 1992).

Para la elaboración de la aplicación se ha empleado la herramienta SmartElements versión 2.1, que incluye tanto Open Interface como Nexpert Object, permitiéndonos integrar este sistema como un módulo más del sistema de información para el control fitosanitario que está desarrollando el Grupo. Y entre otras tiene la ventaja de la fácil definición de la interfaz gráfica de usuario, y en la rápida modificación de ésta si es preciso, sin afectar a los procesos de decisión y verificación de la red, que son los que soportan el mayor coste computacional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al soporte del CDTI (proyecto PACE-PASO PR 191/93), la CICYT (proyecto TIC95-0604) y la Consejería de Cultura y Educación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (proyecto PCT94/48). Agradecemos también la colaboración del Departamento de Sanidad Vegetal de la Delegación de Agricultura y Pesca de Almería, y en particular, la colaboración de Vicente Aparicio Salmerón.

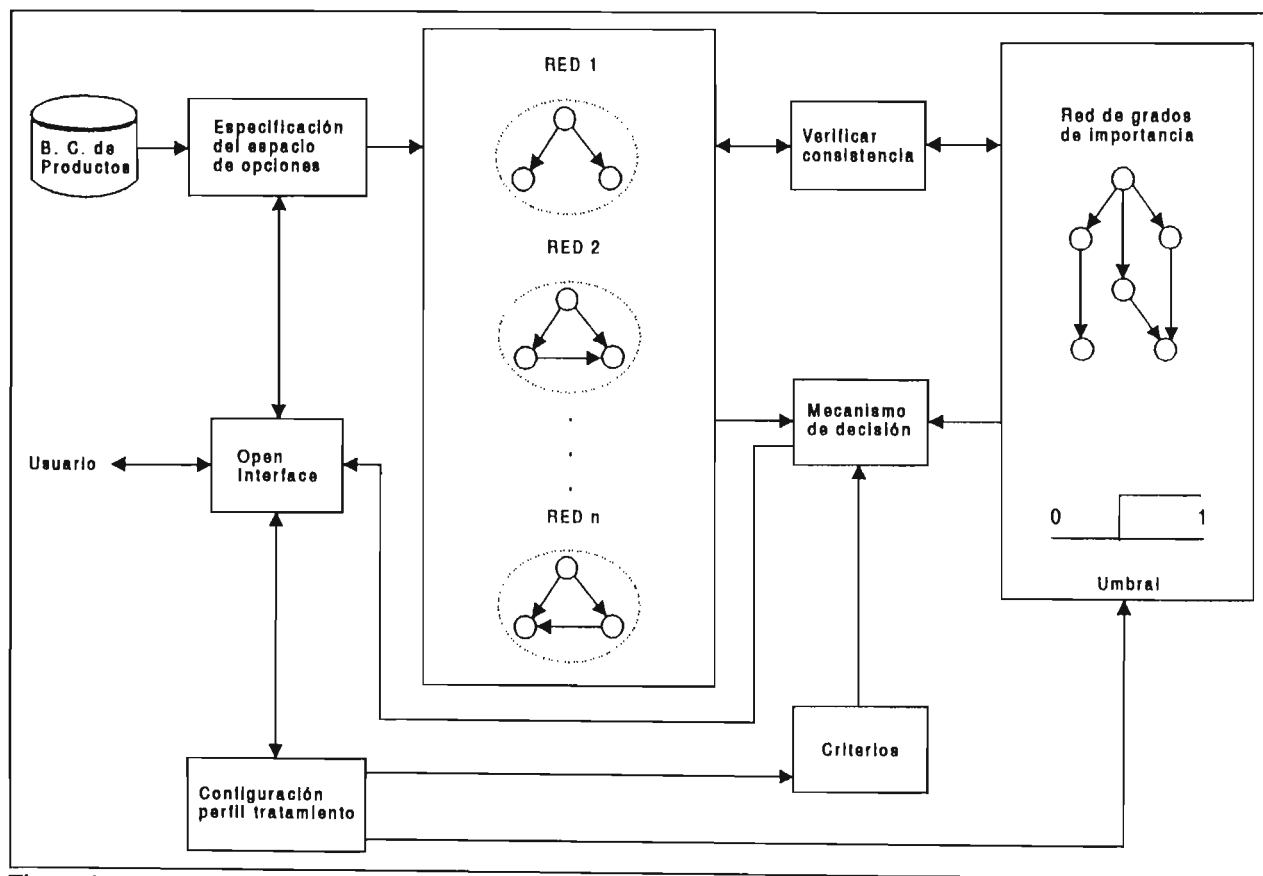


Figura 1

Referencias

- [1] Bellman, R. y Zadeh, L., Decision-making in a fuzzy environment, *Manage. Sci.*, 17, 141-164, 1970.
- [2] Dechter, R., Meiri, I. and Pearl, J., Temporal Constraint Networks, *Artificial Intelligence*, 49: 61-95, 1991.
- [3] Dubois, D. y Prade, H., Possibility Theory: an approach to computerized processing of Uncertainty, Plenum Press, New York, 1988.
- [4] Marín, R., Barro, S., Bosch, A., and Mira, J., Modeling the representation of time from a fuzzy perspective, *Cybernetics and Systems: an International Journal*, 25: 217-231, 1994.
- [5] Marín, R., Barro, S., Bosch, A., Navarrete, I., Cárdenas, M., Bugarín A., y Mira, J., Un modelo para la representación de información temporal borrosa. *Actas del Tercer Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, 209-216, Santiago de Compostela, 1993.
- [6] Tsang, E., Foundations of Constraint Satisfaction, Academic Press, 1993.
- [7] Túnez, S., Bosch, A., Bienvenido, F., Marín, R., Cañabate, F., Mira J., and Soria, F., Strategic knowledge in a expert system for agriculture. *Cybernetic and Systems: an International Journal*, 23, 401-415, 1992.
- [8] Yager, R., On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybern.*, 18, 183-190, 1988.
- [9] Yager, R., Second order structures in multi-criteria decision making, *Int. J. Man-Machine Studies*, 36, 553-570, 1992.

Indice de Autores

Aguilar, J., 89
Albersmann, R., 95
Albertos, P., 77

Bienvenido F., 107
Bonissone, P., 11
Bosch, A., 107

Cádenas, E., 103
Castillo, J.C., 103
Cordón, O., 103

Del Aguila, I., 107

Esteva, F., 23

Felix, R., 95

Gómez, A.F., 45
García-Alegre, M.C., 25
García-Cerezo, A., 63

Hernández, J.C., 89
Herrera, F., 103

López, E., 101

Mamdani, E.H., 3
Marín, R., 107
Martínez, M., 77
Mendaña, C., 101

Navarro, J.L., 77

Ollero, A., 63

Peregrín, A., 103

Rodríguez, M.A., 101
Ruiz, R., 45

Túnez, S., 107

Vila, A., 35

