

# **Diseño de un Controlador Lógico Difuso para un sistema de calefacción**

**Tania Liseth Acevedo Gauta**

Universidad de Pamplona, Instituto de Investigación y Desarrollo de tecnologías Aplicadas, Pamplona, Colombia,  
tlacevedo@unipamplona.edu.co

**Carolina Martínez Quintero**

Universidad de Pamplona, Pamplona, Instituto de Investigación y Desarrollo de tecnologías Aplicadas, Colombia,  
cmartinezq@unipamplona.edu.co

## **RESUMEN**

La necesidad de sistemas autónomos en el ámbito de control de procesos se ha convertido en el punto de partida para crear modelos difusos, que permitan la toma de decisiones a partir de normas que surgen de los diferentes procesos a controlar. Para este proyecto la falta de confiabilidad de sistemas manuales existentes y la necesidad de constante supervisión se convierte en la motivación de desarrollar este tipo de sistemas. En virtud de que el control de temperatura constituye un problema de control de carácter no lineal, se justifica el uso de estas técnicas de inteligencia artificial para el modelado y control del sistema de calefacción.

**Palabras claves:** Modelado, Simulación, Lógica difusa, Controlador, Temperatura.

## **ABSTRACT**

The need for autonomous systems in the field of process control became the starting point in the creation of 'fuzzy models' that allows making decisions based on rules that arise from the different processes to be controlled. In this project, the lack of reliable manual systems in existence and the need for constant supervision turn out to be the motivations to develop this type of system. Since temperature control constitutes a non-linear control problem, the use of these artificial intelligence techniques to model and control heating systems is justified.

**Keywords:** Modelling, Simulation, Fuzzy logic, Controller, Temperature.

## **1. Introducción**

El diseño de sistemas de control de temperatura, basados en Inteligencia Artificial, ha sido un área de tremenda efervescencia científica y de gran impacto en todos los sectores. Por un lado, ha habido una cantidad de trabajos para el diseño de leyes de control que garanticen estabilidad y confiabilidad en sistemas de control de temperatura, desde otro ángulo, el enfoque Lógico Difuso ha permitido la concepción de esquemas de control y de estimación de variables, donde el paradigma esencial ha sido la emulación del razonamiento humano a través del uso de la lógica multivaluada que resulta de la definición de los conjuntos difusos.

La lógica difusa ha sido ampliamente utilizada para resolver problemas de control de sistemas complejos y en diversos campos [Altrock 1995]; el control de temperatura constituye un problema clásico para la aplicación de esta técnica. El comportamiento de la temperatura en el ámbito de control de procesos, típicamente esta asociado a una dinámica no lineal, por lo que un esquema de control convencional de carácter lineal, pudiera no ser robusto para mantener las especificaciones requeridas. Esto justifica la selección de esta técnica para llevar a cabo el diseño de un esquema de control de temperatura utilizándolo para el sistema de calefacción por suelo que será desarrollado en este proyecto. Aunque se estudian diferentes fenómenos físicos debido al manejo de temperatura,

la transferencia de calor, control de corriente, el soporte de esta investigación es el diseño y construcción de un modelo matemático autónomo, el cual es simulado basado en Teorías de Takagi-Sugeno-kang (TSK), y el cual es controlado por mecanismos de razonamiento Mamdani, [Mamdani, 1975, 1983] quien aplica la lógica difusa a un sistema de control de vapor y desde ahí se han venido sucediendo numerosas aplicaciones.

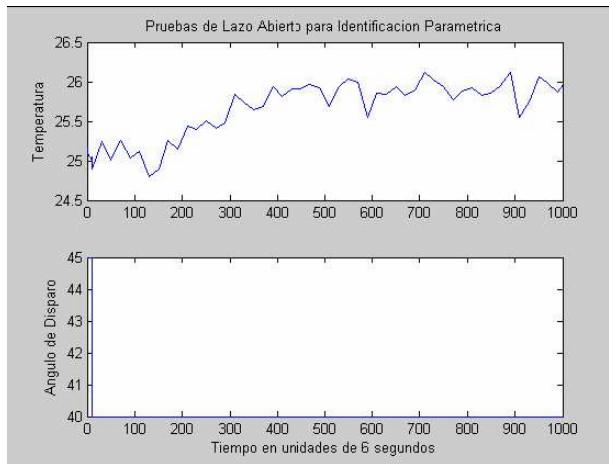
## 2. Modelado Difuso por Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

### 2. Identificación Paramétrica Del Sistema

Pruebas a lazo abierto (Variando en forma escalonada el ángulo de disparo del triac para observar el comportamiento de la temperatura ante las variaciones).

Como resultado de las pruebas se observó que el sistema en las diferentes regiones de operación presentaba un comportamiento amortiguado y sin sobre impulso; por esto se decidió asumir como estructura del modelo la correspondiente a un sistema de primer orden con retardo para cada región de operación, esto significa que aunque el sistema es no lineal se puede aproximar por un conjunto de sistemas lineales a trozo.

En la figura 1 se muestra una de las pruebas de lazo abierto asociadas a una condición normal de temperatura donde pueden calcularse, partiendo de la gráfica, los parámetros correspondientes a una función de transferencia  $G(s)$  de un sistema de primer orden con retardo.



**Figura 1. Identificación Paramétrica (Condición Normal de temperatura).**

$$\Delta Y = 0.9^{\circ}C$$

$$0.632\Delta y = 0.56$$

$\Delta U = -5$ , Variación del ángulo de disparo del triac,

$R=150$  unidades de 6 segundos.

Esta variación se proyecta en el tiempo obteniendo  $T$  medido desde que el sistema empieza a responder,

$T=100$ ,

Obteniendo la siguiente representación en la ecuación (1);

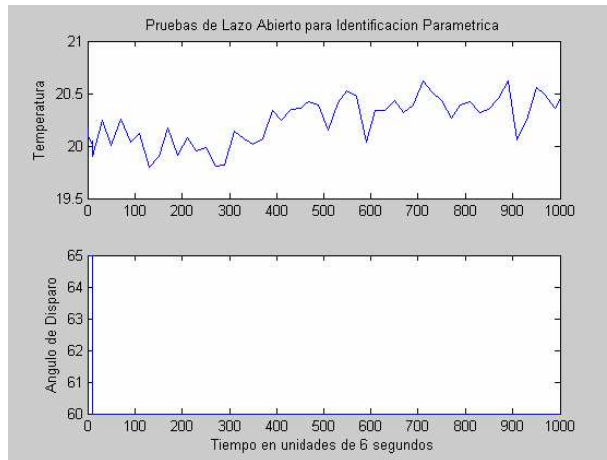
$$G_1(s) = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta U} e^{-R_s U}}{T_s + 1} \tag{1}$$

Donde la ecuación (1) quedaría,

$$G_1(s) = \frac{-0.18}{100s + 1} e^{-150s} U$$

Donde U es el ángulo de disparo del triac.

Igualmente para la condición de temperatura baja uno de los resultados de las pruebas a lazo abierto se muestra en la figura 2.



**Figura 2. Identificación Paramétrica (Condición Baja de Temperatura).**

Haciendo el seguimiento anterior se obtiene de la figura 2;

$$\Delta Y = 0.4^{\circ}\text{C}$$

$$0.632\Delta y = 0.253$$

$$\Delta U = -5, \text{ ángulo de disparo del triac,}$$

$$R=300 \text{ unidades de 6 segundos}$$

$$T=100$$

Obteniendo la siguiente representación, ecuación (2):

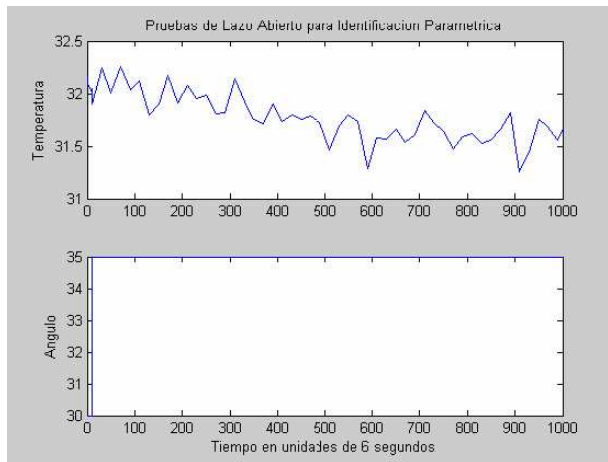
$$G_2(s) = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta U} e^{-Rs} U}{Ts + 1} \quad (2)$$

Donde la ecuación (2) quedaría;

$$G_2(s) = \frac{-0.08}{100s + 1} e^{-300s} U$$

Donde U es el ángulo de disparo del triac.

Para la condición de temperatura alta los resultados de las pruebas de lazo abierto se muestran en la figura 3.



**Figura 3. Identificación Paramétrica (Condición Alta de Temperatura).**

Haciendo el seguimiento respectivo a la figura 3, tenemos:

$$\Delta Y = -0.4^{\circ}\text{C}$$

$$0.632\Delta y = -0.253$$

$\Delta U \approx 5$ , ángulo de disparo del triac,

$R=300$  unidades de 6 segundos

$T=100$

En la ecuación (3), representamos lo anterior:

$$G_3(s) = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta U} e^{-RS} U}{Ts + 1} \quad (3)$$

Donde la ecuación (3) sería;

$$G_3(s) = \frac{-0.08}{100s + 1} e^{-300s} U$$

Donde U es el ángulo de disparo del triac.

Aplicando el modelado difuso de Takagi-Sugeno-Kang, discretizamos y obtenemos:

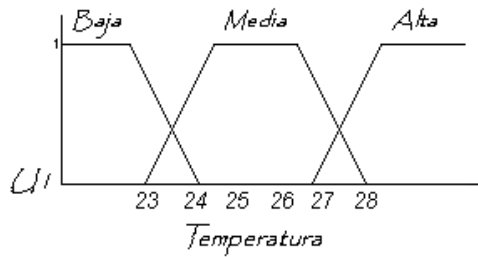
Si la temperatura es baja, normal ó alta entonces tenemos la ecuación (4);

$$y(k) = a_i y(k - T) + b_i u(k - R_i) \quad (4)$$

Con la variación de  $i = 1, 2$  y  $3$  correspondiente para cada caso.

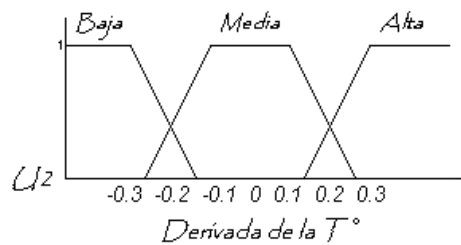
### 3. Diseño Del Controlador

Fijaremos como primer paso el universo de discurso [Aguilar, 2001] de la temperatura en  $[0, 35]$  y tres particiones según lo representado en la figura 4.



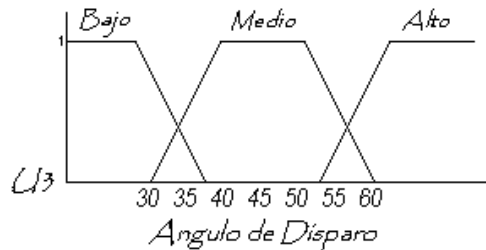
**Figura 4. Función de Membresía de Temperatura**

De modo similar se realiza una representación de la segunda variable, llamada derivada de la temperatura,  $[-2, 2]$  dividida de igual manera en tres conjuntos difusos nombrados Baja (B), Media (M), Alta (A), representado en la figura 5.



**Figura 5. Función de Membresía de la derivada de temperatura**

Discretizamos la variable de salida consta de un vector de 101 posiciones y una discretización de 0.3



**Figura 6. Caracterización difusa de la salida**

#### 4. Base de Reglas

**Tabla 1. Base de reglas del controlador**

Si U1 es y	U2 es y	U3 es	→ U3 es
Baja	Baja	Bajo	Bajo
Baja	Baja	Medio	Bajo
Baja	Baja	Alto	Bajo
Baja	Media	Bajo	Bajo
Baja	Media	Medio	Bajo
Baja	Media	Alto	Bajo
Baja	Alta	Bajo	Medio
Baja	Alta	Medio	Medio
Baja	Alta	Alto	Medio
Media	Baja	Bajo	Bajo
Media	Baja	Medio	Bajo

Media	Baja	Alto	Medio
Media	Media	Bajo	Alto
Media	Media	Medio	Medio
Media	Media	Alto	Medio
Media	Alta	Bajo	Medio
Media	Alta	Medio	Medio
Media	Alta	Alto	Alto
Alta	Baja	Bajo	Alto
Alta	Baja	Medio	Alto
Alta	Baja	Alto	Alto
Alta	Media	Bajo	Alto
Alta	Media	Medio	Alto
Alta	Media	Alto	Alto
Alta	Alta	Bajo	Alto
Alta	Alta	Medio	Alto
Alta	Alta	Alto	Alto

Como en este caso disponemos de un conocimiento intuitivo de las acciones de control a realizar sobre el sistema, nos decantaremos por el empleo de reglas tipo Mamdani, [Martín del Brío, Sanz Molina, 2002]

### 5. Simulaciones

Se simulo el sistema a lazo cerrado en el simulink de Matlab, se muestra en la figura 7. En el bloque del proceso está el modelo Takagi-Sugeno-Kang seguido de un retenedor de orden cero para simular el muestreo, posteriormente se implementa la derivada de la temperatura utilizando un bloque de retraso en tiempo discreto para realizar la diferencia de temperatura. Los bloques de memoria se utilizan para asignar condiciones iniciales para las realimentaciones y el controlador se implementa en una función de Matlab. Los escalones utilizados permiten sumar en cada instante de tiempo el valor de condición inicial de las variables, en virtud de que el proceso se considera lineal a trozos y el punto de equilibrio para un sistema lineal es cero. Estas contribuciones permiten trasladar el punto de equilibrio del sistema lineal a las condiciones de operación del sistema no lineal, para que puedan ser procesadas por el controlador lógico difuso.

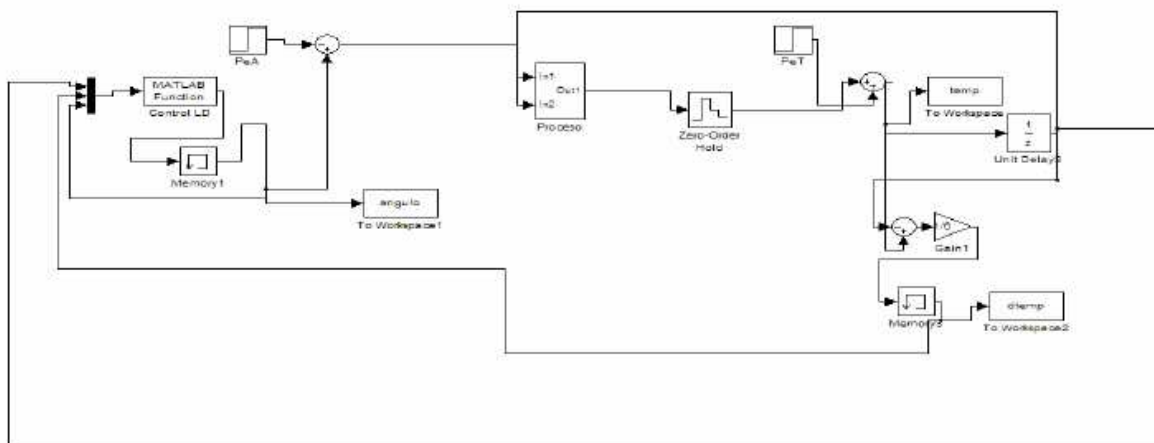
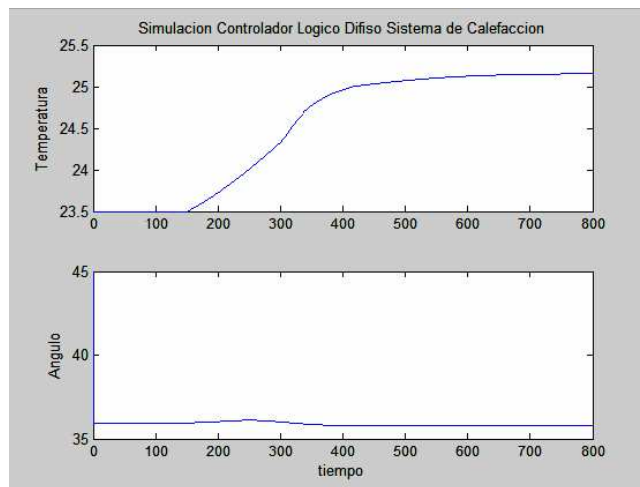
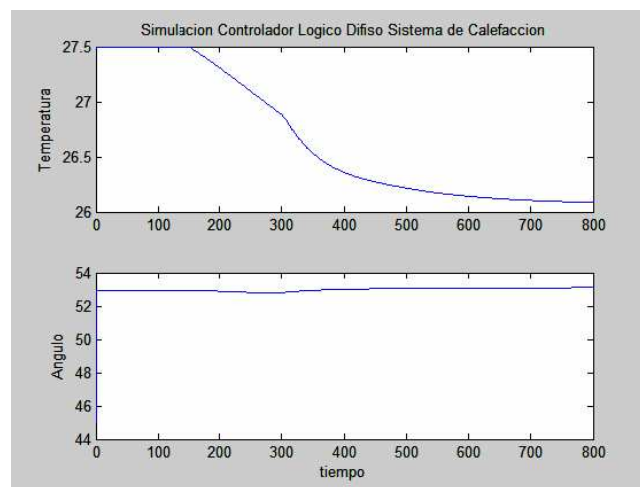


Figura 7. Simulación del Sistema.

Colocando diversas condiciones iniciales ligeramente fuera del rango normal de operación se observa en las figuras 8 y 9, como el controlador lleva el rango normal de operación, evitando que converja a rangos no deseados.



**Figura 8. Condición inicial Ligeramente Fuera de Condición Normal de Operación tendiendo a Baja Temperatura.**



**Figura 9. Condición inicial Ligeramente Fuera de Condición Normal de Operación tendiendo a Baja Alta.**

## 6. Resultados

Una vez diseñado el controlador en función de los resultados de los experimentos a lazo abierto se llevaron a cabo las pruebas de estabilidad, en función de las linealizaciones realizadas para el sistema. El controlador diseñado se puede aproximar a un controlador Proporcional Derivativo no lineal, ya que utiliza información de la temperatura de la superficie y su derivada para tomar acciones de control.

Angulo=f (Temperatura, Derivada de la temperatura, Angulo Actual)

El controlador lineal se puede representar por la siguiente función de transferencia ideal, ecuación 5

$$C(s) = K_p (1 + Tds) \tag{5}$$

Donde  $K_p$  y  $Td$  varían de acuerdo a la región de operación y a las funciones de membresía que caracterizan el controlado. Se realizaron diferentes experimentos simulados utilizando las linealizaciones del proceso controlado por lógica difusa para encontrar una aproximación lineal del controlador con parámetros variantes en el tiempo y poder así llevar a cabo pruebas formales de estabilidad. Las pruebas consistieron en colocar diversas condiciones iniciales para así verificar los diferentes aportes de la señal de control respecto a la temperatura y su derivada encontrando los siguientes resultados:

- **Condición Alta y Baja de Temperatura, ecuación 6**

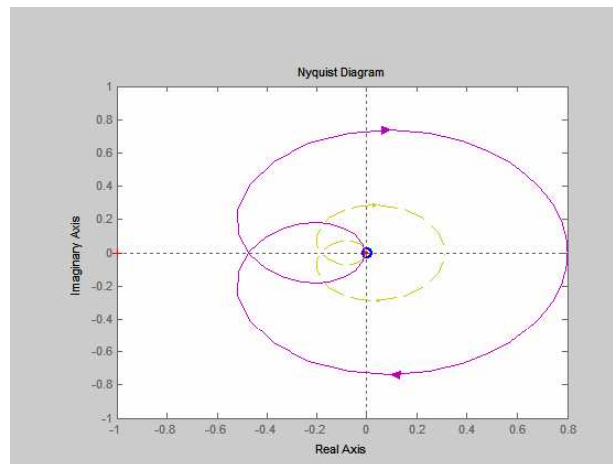
$$3.87 \leq Kp_1 \leq 10 \quad (6)$$

$$0 \leq Td_1 \leq 1$$

La función de transferencia a lazo abierto incluyendo el controlador y aproximado el retardo del proceso con la aproximación de Padé se puede representar de la siguiente manera, ecuación (7):

$$C(s)G(s) = \frac{-0.08(1 - (300/2)s)(-K_{p1})(1 + Td_1s)}{(1 + (300/2)s)(1 + 100s)} \quad (7)$$

A ganancia negativa del controlador es por la acción reversa del controlador lógico difuso. Llevando a cabo un análisis de estabilidad de Nyquist permitiendo determinar gráficamente la estabilidad absoluta del sistema [Ogata, 2004], para las cuatro posibles combinaciones de los casos asociados a la ecuación (7), el resultado se muestra la figura 10.



**Figura 10. Análisis para la estabilidad de Nyquist para condición Alta y Baja de temperatura.**

Para los casos de acción derivativa nula el diagrama se circunscribe al origen en los otros dos casos, con acción derivativa máxima, el diagrama no rodea el punto  $-1 + j0$ . Los casos intermedios están dentro del rango de los diagramas presentados así que se puede concluir que el sistema será estable para esta condición de operación, con las acciones del controlador lógico difuso.

- **Condición de Temperatura Normal, ecuación (8):**

$$2.2 \leq Kp_2 \leq 2.95 \quad (8)$$

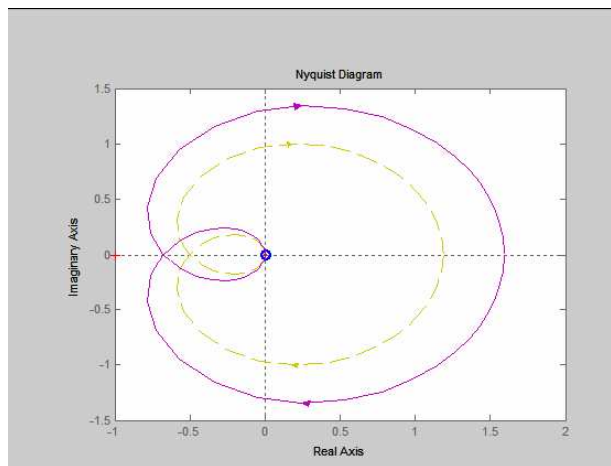
$$0 \leq Td_2 \leq 3$$

La función de transferencia a lazo abierto incluyendo el controlador y aproximando el retraso el proceso con la aproximación de Padé se puede representar de la siguiente manera, ecuación (9)

$$C(s)G(s) = \frac{-0.18(1 - (300/2)s)(-K_{p2})(1 + Td_2s)}{(1 + (300/2)s)(1 + 100s)} \quad (9)$$

La ganancia negativa del controlador es por la acción reversa del controlador lógico difuso. Llevando a cabo un análisis de estabilidad de Nyquist para las cuatro posibles combinaciones de los casos asociados a la ecuación (9), el resultado lo vemos en la figura 10.





**Figura 10. Análisis para la estabilidad de Nyquist para condición Normal de temperatura.**

Al que la condición de operación anterior, para los casos de acción derivativa nula el diagrama se circunscribe al origen en los otros dos casos, con acción derivativa máxima, el diagrama no rodea el punto  $-1+0j$ . Los casos intermedios están dentro del rango de los diagramas representados así que se puede concluir que el sistema también será estable para esta condición de operación, con las acciones del controlador lógico difuso.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el diseño e implementación del prototipo, demuestran que el controlador Lógico Difuso cumple con las características para la aplicación del proceso, con un funcionamiento satisfactorio de respuesta.

Técnicas de control como la lógica difusa son lo suficientemente robustas para el control de temperatura, teniendo en cuenta que esta es una variable no lineal.

## 8. REFERENCIAS

- Altrock, C. von. *Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications Explained*. Prentice-Hall, 1995
- Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Pertince Hall, Cuarta edición, Madrid 2004
- Mamdani, E. H., Odtenggaard, J.J., Lembessis, E. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. Int J. Man. Machine Studies, vol. 7, PP 1-3, 1975
- Mamdani, E. H., Odtenggaard, J.J., Lembessis, E. *Use of fuzzy logic for implementing rule-based control of industrial processes*. Advances in Fuzzy Sets, Possibility Theory and Applications (Wang eds) Plenum Press, 1983.
- Aguilar, J, Rivas E. *Francklin Introducción a las técnicas de computación Inteligente*. Universidad de los Andes, Mérida Venezuela 2001.
- Martín del Brío, B, Sanz Molina A, *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*, Alfaomega, Segunda edición, México D.F.2002