

# DE LOS REGULADORES CONVENCIONALES A LOS REGULADORES BASADOS EN LOGICA DIFUSA

Ramón Ferreiro García, Xoan Pardo Martínez, José Vidal Paz  
 Dep. Ing. Industrial, E.S.Marina Civil, Paseo de Ronda 51, 15011. A Coruña  
 Email: ferreiro@udc.es

## Resumen

*En este trabajo se revisan los conceptos de control industrial referido a tareas de control típicamente afrontadas por medio de reguladores PID convencionales y que son susceptibles de ser resueltas mediante reguladores basados en reglas. Se proponen estrategias de compensación correctiva a partir de las acciones básicas de regulación mediante reglas difusas, así como la implementación de reguladores basados en reglas a partir del conocimiento adquirido acerca de los reguladores convencionales*

**Palabras Clave:** Lógica difusa Control difuso, Control basado en reglas, Control correctivo.

## 1 INTRODUCCION

El regulador PID típico basado en reglas opera sobre la base de la información de entrada, la cual está opcionalmente constituida por el error definido como  $(w-x)$ , donde  $w$  es la variable de consigna y  $x$  es la variable controlada, el incremento del error en cada período de captura o muestreo y por la acumulación de error en el mismo período, variables asociadas a la derivada e integral del error en el control convencional. Las acciones de regulación son el resultado de un proceso de defuzificación llevado a cabo con el conocimiento que proporciona una base de reglas asociada a las variables de entrada, y que denominamos Control Fuzzy en la figura 1.

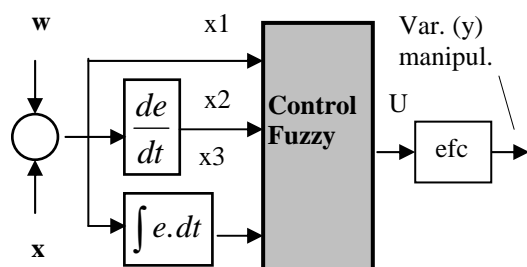


Figura 1: Variables típicas del PID basado en lógica difusa.

La variable de salida  $U$  del citado controlador entra al elemento final de control (efc), para actuar sobre el proceso a controlar.

La figura 1 ilustra la estructura descrita, en donde los conceptos de derivada e integral serán denotados por  $\Delta$  y  $\Sigma$  a partir de ahora.

Se han desarrollado varias estructuras en función de necesidades específicas de corrección para competir con las acciones correctivas clásicas y al mismo tiempo se han afrontado problemas de regulación más complejos.

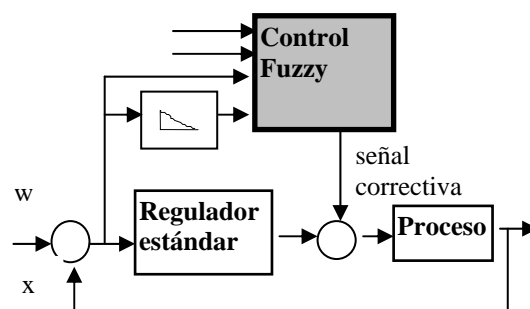


Figura 2: Ejemplo del precontrol basado en aplicación difusa

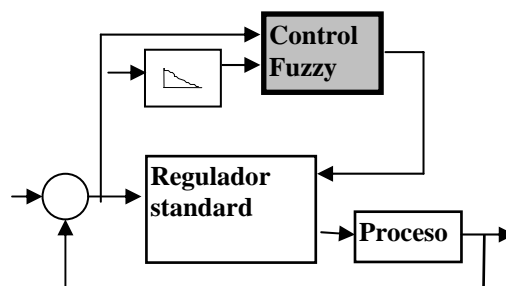


Figura 3: Ejemplo de la adaptación de parámetros sobre la base de la lógica difusa

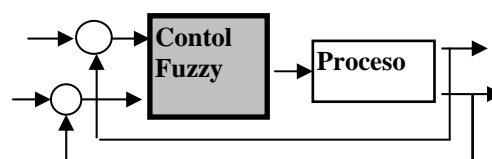


Figura 4: Ejemplo de una aplicación de control difuso directo

Los sistemas difusos aditivos son mucho más fácilmente comprensibles por los operadores que interactúan con equipos y por esta razón se implementan acciones correctivas basadas en esta estrategia.

## 2. RELACIÓN ENTRE REG. PID CONVENCION Y REG. BASADOS EN REGLAS DIFUSAS

En el caso de haber tomado la decisión de diseñar un algoritmo de control basado en reglas a partir de los modelos dinámicos convencionales, tal como P, PD, PI o PID, ello implica la necesidad de elegir las funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida, así como el contenido de los antecedentes y consecuentes de las reglas para cada una de las mismas. Los antecedentes típicos en procesos industriales que son las condiciones del estado actual del proceso bajo las cuales se necesita actuar para corregir desvíos no deseados, son:

- el error
- la derivada del error dada como el incremento observado en cada intervalo de cálculo
- la integral del error dada como la suma actual del error acumulado

La variable de control, o variable manipulada (variable de entrada al proceso), constituye el consecuente de las reglas establecidas y se elige entre

- el incremento en la variable de control
- la propia variable de control

Además, por analogía con los reguladores convencionales se tiene

$$\begin{aligned} e(k) &= Y_{sp}(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ \sum u(k) &= \sum u(k-1) + u(k) \end{aligned} \quad (1)$$

en donde  $e(k)$  es el error en el instante actual ( $k$ ),  $Y_{sp}(k)$  el valor de consigna actual, y  $u(k)$  es la variable manipulada actual.

La expresión del regulador PID convencional con la terminología propuesta es

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_I \cdot \sum e(k) + K_D \cdot \Delta e(k) \quad (2)$$

Las acciones individuales de control (proporciona, integral y derivativa), pueden ser formuladas en base a reglas establecidas intuitivamente. Por esta razón resulta comprensible el regulador resultante basado en reglas.

La representación simbólica de las acciones proporcional, derivativa e integral de un regulador lineal basado en reglas está dada como [1]

SI  $e(k)$  es (cuantificación difusa) ENTONCES  $u(k)$  es (cuantificación difusa),

SI  $\Delta e(k)$  es (cuantificación difusa) ENTONCES  $u(k)$  es (cuantificación difusa),

SI  $\sum e(k)$  es (cuantificación difusa) ENTONCES  $u(k)$  es (cuantificación difusa)

De la expresión (2) se desprende que si la acción de salida del regulador es persistente en el tiempo, se alcanzaría el límite físico admisible y soportable por el regulador. A partir de este valor, toda acción de regulación en el mismo sentido está anulada por saturación. Para evitar que cuando se alcanza el citado límite, la acción integral continua integrando y por tanto aumentando, se procede al establecimiento de una saturación integral en ambos sentidos de actuación.

La combinación adecuada de varias acciones de control proporciona un efecto similar al de los reguladores convencionales, incluso con mejoras que justifican su implantación. A continuación se verán las combinaciones entre acciones de control más usadas.

La modelización difusa de Takagi & Sugeno, consiste en un método de razonamiento difuso que usa funciones lineales para implementar la conclusión de sus reglas. Este método es equivalente a usar relaciones funcionales entre la entrada y salida de las reglas, en el formato

IF  $x$  es  $A$  AND  $y$  es  $B$  THEN  $z = ax + by + c$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los parámetros de la función lineal en el consecuente de la regla.

La estructura de una base de reglas adaptada a las variables de un regulador PID convencional al aplicar la modelización de Takagi & Sugeno resulta de la forma que ilustra la tabla 1

Tabla 1: Modelización difusa de Takagi Sugeno

Antecedente	Consecuente
SI $e = A1$	THEN $u1 = K_p \cdot A1$
SI $\sum e = A2$	THEN $u2 = K_D \cdot A2$
SI $\Delta e = A3$	THEN $u3 = K_I \cdot A3$

Mediante la condición de aditividad de los consecuentes de las reglas implicadas en la definición del regulador por el método de Takagi & Sugeno, conferida por la propiedad de linealidad y superposición se infiere una función lineal que se muestra en la tabla 2 como

Tabla 2: Consecuencias de la aditividad.

**Antecedente**  
 SI  $e = A1$   
 SI  $\Sigma e = A2$   
 SI  $\Delta e = A3$   
**Consecuente**  
 THEN  $U = Kp.A1 + KD.A2 + KI.A3$

## 2.1 PID BASADO EN REGLAS A PARTIR DEL REGULADOR CONVENCIONAL .

El conocimiento necesario para la implementación de una base de reglas que sustituya al regulador convencional bien ajustado no es trivial, teniendo que recurrir a expertos bien experimentados o al modelo dinámico de un regulador convencional convenientemente ajustado.

Dado un regulador convencional adecuadamente ajustado, es posible determinar la base de reglas que debiera ser implementada para satisfacer el comportamiento dinámico con aproximadamente similares prestaciones a partir del conocimiento de los parámetros del mismo, esto es conociendo la ganancia, la constante de acción derivativa y la constante de acción integral del PID convencional. Esta facilidad sirve para implementar en PLC's algoritmos de control basados en reglas con las mismas prestaciones de los reguladores convencionales. Posteriormente con algunas correcciones a las reglas, es posible incluso mejorar el comportamiento respecto de los reguladores convencionales. La disponibilidad de conocimiento acerca de

Variables:  $u(k), e(k), \Sigma e(k), \Delta e(k)$  (3)

Parámetros:  $Kp., KI, KD.$  (4)

Modelo:

$$u(k) = Kp.e(k) + KI.\Sigma e(k) + KD.\Delta e(k)$$

con

$$e(k) = Ysp(k) - y(k)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (5)$$

$$\Sigma e(k) = \Sigma e(k - 1) + e(k)$$

en donde  $e(k)$  es el error en el instante actual ( $k$ ),  $Ysp(k)$  el valor de consigna actual,  $e(k)$  es el error de control y  $u(k)$  es la variable de control actual. En consecuencia, la metodología de diseño del regulador basado en reglas [1,2] partiendo del regulador convencional adecuado al proceso a controlar, se ilustra mediante un caso práctico:

Consideremos el caso de mapear la dinámica de un regulador convencional PD. Se procedería de la siguiente forma:

- Rango de la variable de error: (-5 +5)

- Rango de la derivada del error: (-2 +2)
- Número de funciones de pertenencia del error equidistantes :5 (-5,-2.5, 0, 2.5, 5)
- Número de funciones de pertenencia de la derivada del error:5(-1,-0.5, 0, 0.5,1)
- Parámetros del regulador convencional:  $KP=2, KD=1$
- Rango de la variable de salida (-10, 10)
- Número de funciones de pertenencia de la salida: a elegir dentro del rango de existencia de la salida.
- Modelo:  $u(k) = KP.e(k) + KD.\Delta e(k)$

El resultado de procesar el modelo matemático del regulador PD convencional con los parámetros propuestos se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Base de reglas obtenida del modelo del regulador convencional PD:  $KP=2, KD=1$

INCREMENTO DE ERROR						
	-1	-0.5	0	0.5	1	
E	-5	-11	-10.5	-10	-9.5	-9
R	-2.5	-6	-5.5	-5	-4.5	-4
R	0	-1	-0.5	0	0.5	1
O	2.5	4	4.5	5	5.5	6
R	5	9	9.5	10	10.5	11

## 2.2 PID CONVENCIONAL A PARTIR DEL PID BASADO EN REGLAS DIFUSAS.

Dado que las funciones bloque PID a implementar en los PLC convencionales suponen una alternativa a los reguladores basados en reglas, debido a estar soportadas por la misma arquitectura hardware, resulta de utilidad la aplicación de cualquier algoritmo de transformación. Este método resulta de utilidad en los casos en que se disponga de la base de reglas de un regulador PID lineal y se desee implementar mediante la función bloque PID convencional. Tal regulador basado en reglas es lineal si las reglas están definidas mediante funciones de pertenencia que satisfagan

- estar simétricamente distribuidas respecto de un valor de equilibrio
- igualdad de rango entre func. de pertenencia
- estar asociadas en modo aditivo para cada variable de entrada.

La información necesaria para tal transformación es extraída de la aplicación de las reglas de control al regulador en cuestión al aplicar el citado algoritmo. La estructura adecuada para la captura de información necesaria en la tarea de adquisición de conocimiento acerca de la dinámica de una base de está expresada a continuación como:

Si el error vale  $e(i)$  entonces  $U1(i)=Kp.e(i)$   
 Si la derivada del error vale  $De(i)$  entonces  $U2(i)=KD.De(i)$   
 Si la integral del error vale  $Ie(i)$ , entonces  $U3(i)=KI.Ie(i)$

La aplicación de las reglas a la información acumulada en un mapa entrada/salida, permite el establecimiento de un sistema de ecuaciones cuya solución proporciona los parámetros del regulador PID asociado al bloque función a determinar.

Aprovechando la propiedad aditiva de reglas por tratarse de un regulador lineal, se consigue una estructura algebraica cómodamente manipulable para ser ordenada de modo matricial.

La aplicación de reglas sobre la estructura mapeada proporciona el sistema expresado en (6) y (7)

$$\begin{aligned} U1 &= KP.e1 + KD.\Delta e1 + KI.\Sigma e1 \\ U2 &= KP.e2 + KD.\Delta e2 + KI.\Sigma e2 \quad (6) \\ U3 &= KP.e3 + KD.\Delta e3 + KI.\Sigma e3 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e1 & \Delta e1 & \Sigma e1 \\ e2 & \Delta e2 & \Sigma e2 \\ e3 & \Delta e3 & \Sigma e3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} KP \\ KD \\ KI \end{bmatrix} \quad (7)$$

Así son conseguidos los parámetros del bloque función PID con la posibilidad de ser reajustados en base a la dinámica observada del sistema controlado. Si esto ocurre, la base de reglas resultante en caso de aplicar un nuevo regulador basado en reglas habrá cambiado como es obvio [2]. La solución viene dada por (8)

$$\begin{bmatrix} KP \\ KD \\ KI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e1 & \Delta e1 & \Sigma e1 \\ e2 & \Delta e2 & \Sigma e2 \\ e3 & \Delta e3 & \Sigma e3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3. CORRECTOR POR CASCADA Y ADELANTO BASADO EN REGLAS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Entre las estructuras de regulación asociadas a la clásica realimentación de la variable controlada descrita en sus posibles modos de control, esto es proporcional integral y derivativa por medio de reglas difusas expuestas en el epígrafe correspondiente, destacan la compensación en cascada, la compensación por adelanto, el control de relación, el control de gama parcial y el control

selectivo, como los modos de compensación mas frecuentemente usados frente a otros posibles.

La variable de control, o variable manipulada (variable de entrada al proceso), constituye el consecuente de las reglas establecidas cuyos antecedentes son las acciones individuales de control (proporcional, integral y derivativa y combinaciones de ambas), las cuales pueden ser formuladas en base a reglas establecidas intuitivamente y/o posteriormente ajustadas experimentalmente mediante prueba y error o por métodos automáticos con el objeto de mejorar el comportamiento dinámico de los procesos controlados.

#### 3.2. CONTROL POR REALIMENTACIÓN CASCADA Y ADELANTO BASADO EN REGLAS

La compensación en cascada tiene por objetivo provocar que la variable de control por realimentación sea fielmente seguida (con rapidez prescrita y precisión) por el elemento final de control (EFC) para obtener el valor de la variable manipulada especificado dinámicamente por la variable de control del lazo de realimentación. Por lo tanto, la estrategia de actuación en cascada obliga al EFC a ajustar el valor de la variable manipulada al valor de demanda dado por el regulador de realimentación.

La figura 5 muestra la estructura fundamental del control en cascada propuesto asociado al control por adelanto con la particularidad de responder a la perturbación de manera que tome en consideración la dinámica de la variable de control generada por realimentación y cascada. El bloque Pr (proceso) está afectado de las entradas de perturbación y la variable manipulada procedente de (efc).

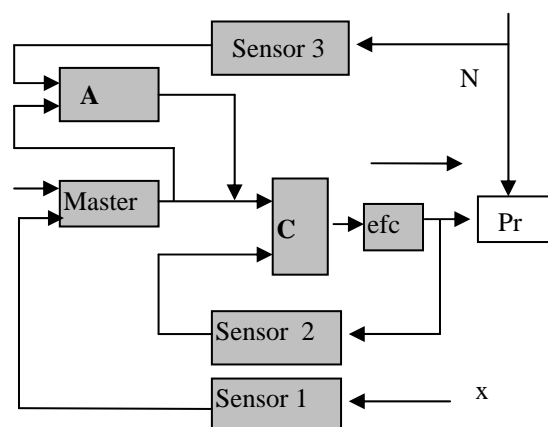


Figura 5: Estructura del sistema de control en realimentación y cascada y adelanto predictivo.

El bucle de cascada constituye un lazo imbuido en el bucle de realimentación mostrado en la figura 5. El error del lazo de cascada es la diferencia entre el valor de la variable de control por realimentación corregida por adelanto y el valor de la variable manipulada

Experimentalmente se sabe que el elemento final de control debe poseer una estructura física tal que sea estable y estar dotado de características dinámicas susceptibles de ser aproximadas por un modelo matemático de orden bajo. Entonces se elige un algoritmo de control para este lazo capaz de seguir la variable motriz (variable de control por realimentación). Un algoritmo PI (bloque C de la figura 5) basado en reglas es suficiente en muchas aplicaciones prácticas puesto que la función de transferencia del elemento final de control está diseñado como un servo de primer o segundo orden sobre-amortiguado.

La acción integral se implementa mediante la acumulación de la variable de error de cascada, esto es, la idea de persistencia del error supone un síntoma inequívoco de que la variable de error mantiene el desvío indeseado cuya causa reside en el hecho de presentar cierta resistencia al seguimiento de la variable manipulada

El objetivo fundamental del compensador en adelanto es evitar que las perturbaciones entren al proceso controlado (bloque A de la figura 5). Para ello, deben ser anuladas antes de su entrada operando por adelanto sobre la variable manipulada. La opción de compensación mas simple consiste en medir la perturbación con suficiente anticipación, para accionar el elemento final de control en sentido tal que anule el efecto de la perturbación, ya que la actuación absorbe cierto tiempo, el correspondiente a su frecuencia natural.

Intuitivamente se deduce que la actuación compensadora de las perturbaciones a la carga podría ser deducida por la estimación de la carga perturbadora. Tal hecho es parcialmente cierto debido a que la eficiencia compensadora depende del estado dinámico del proceso. Quiere esto decir que si la acción compensadora debe actuar en un sentido y a su vez la variable de control parcial de regulador de realimentación evoluciona en el mismo sentido, tal acción compensadora no es absolutamente necesaria. Es más, puede incluso ser perjudicial. Este razonamiento conduce hacia la necesidad de considerar la posibilidad de aplicar otras variables dinámicas tales como el índice de cambio de la variable controlada, el sentido de evolución así como el estado dinámico de la variable manipulada como consecuencia de otras acciones de control. El bloque C (cascada) de la figura 5 ilustra la compensación en cascada basada

en reglas, en donde entran dos variables, es decir, la variable de perturbación y la variable de salida del lazo de realimentación. Con esta estrategia se logra evitar la corrección de una perturbación cuando la dinámica de la variable de control favorece tal corrección sin ayuda de la compensación por adelanto. El algoritmo global de compensación por realimentación cascada y adelanto basado en reglas difusas se muestra en la figura 6

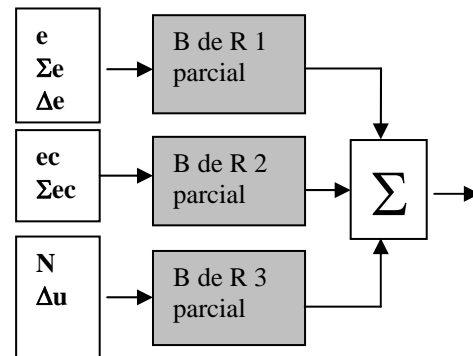


Figura 6: La acción global de control por realimentación cascada y adelanto basada en reglas.

Cada base de reglas parcial mostrada en la figura 6 está constituida por un conjunto de reglas cuyo número es igual al de funciones de pertenencia de cada variable de entrada por estar asociadas en modo aditivo [1, 3, 4].

Suponiendo que el número de funciones de pertenencia para cada variable de entrada a la base de reglas correspondiente es de tres, (positivo nulo negativo), se deduce de esta descripción que la base de reglas (B de R 1) está formada por  $3 \times 3 = 9$  reglas, (B de R 2) está formada por  $3 \times 2 = 6$  reglas y que (B de R 3) está formada por  $3 \times 2 = 6$  reglas. Entonces la base de reglas global está constituida por tan sólo 21 reglas.

La acción correctiva de perturbaciones denotada por C en la figura 5, es el consecuente de una base de reglas de dos entradas, es decir la variable de perturbación y el incremento de la acción de cascada. Con esta estrategia se logra que ante una perturbación en determinado sentido, si la variable de cascada actúa acorde con ese sentido correctivo, se atenúa el efecto de compensación por adelanto ya que está siendo soportado por las acciones de realimentación y cascada. Esta estrategia resulta particularmente útil en procesos de dinámica lenta susceptibles de ser aproximados por modelos de primer orden o suficientemente amortiguados. Son ejemplos de ello los procesos térmicos de constantes de tiempo elevadas.

La figura 7 ilustra la estructura aditiva parcial de las bases de reglas correspondientes al regulador del lazo de realimentación o master, al de cascada, así como la corrección adoptada mediante la compensación por adelantado. La particular ventaja de este modo descriptivo de conocimiento radica en que el conocimiento vago de un operador experto puede ser fácilmente transferido al algoritmo de control de la planta, probado y modificado en modo comprensible.

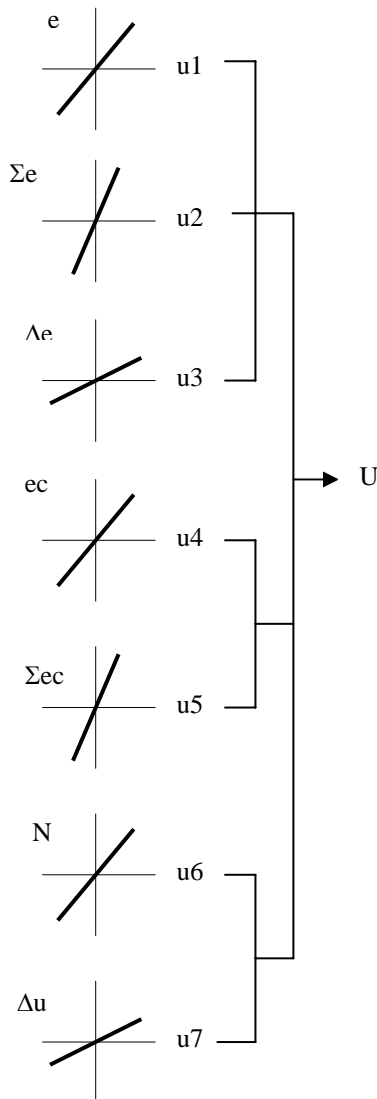


Figura 7: La estructura aditiva de la base de reglas

### Conclusiones

La aplicación de algoritmos de control basado en reglas difusas supone la posibilidad de implementación de reguladores basados en reglas en entornos industriales mediante PLC's. Ello supone la reducción de costes de desarrollo e implementación de los sistemas de control en base a la disponibilidad de software y hardware de bajo

coste, tanta mas bajo cuanto mayor es el tamaño de la planta o número de lazos de control. Además de estas ventajas está la mas importante que consiste en desarrollar aplicaciones bajo en estándar IEC 1131-7 que deben cumplir los fabricantes de autómatas y software de los mismos.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la CYCYT La palabra agradecimientos debe ir alineada a la izquierda, no numerada y en negrita. Todos los agradecimientos deben figurar al final del trabajo.

### Referencias (10 pts, negrita)

- [1] E. H Mamdani, 1974. Applications of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. Pproceedings of IEE 121, 12:1585-1588. U.S.A
- [2] J.Zhou and J.Eklund, 1996. Parameter seneitivity in turning fuzzy contollers.1996 IEEE conference on Systems, Man and Cybernetics, Beijing, China.
- [3] Sugeno, M. 1985. An Introductory survey on fuzzy control. Information Sc iences, 36: 59-83
- [4] T..Takagi and M. Sugeno, 1985. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans. Syst.Man Cybern., Vol 15,Nº1 January/Feb, 1985,pp 116-132