



Escuela Politécnica Superior de Elche

CONTROL AVANZADO DE SISTEMAS
CONTROL INTELIGENTE
4º Ingeniería Industrial

PRÁCTICA 2:
Diseño de reguladores borrosos (2)
Diseño a partir de datos E-S

Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

CONTROL AVANZADO DE SISTEMAS

PRÁCTICA 2: Diseño de reguladores borrosos (2). Diseño a partir de datos E-S

1. Objetivos

Los objetivos de esta práctica son:

1. Utilizar un regulador borroso para controlar un sistema continuo a partir de datos entrada-salida.
2. Sintonizar un regulador borroso obtenido a partir de datos entrada-salida.

2. Ejercicio: Regulación de un sistema sencillo

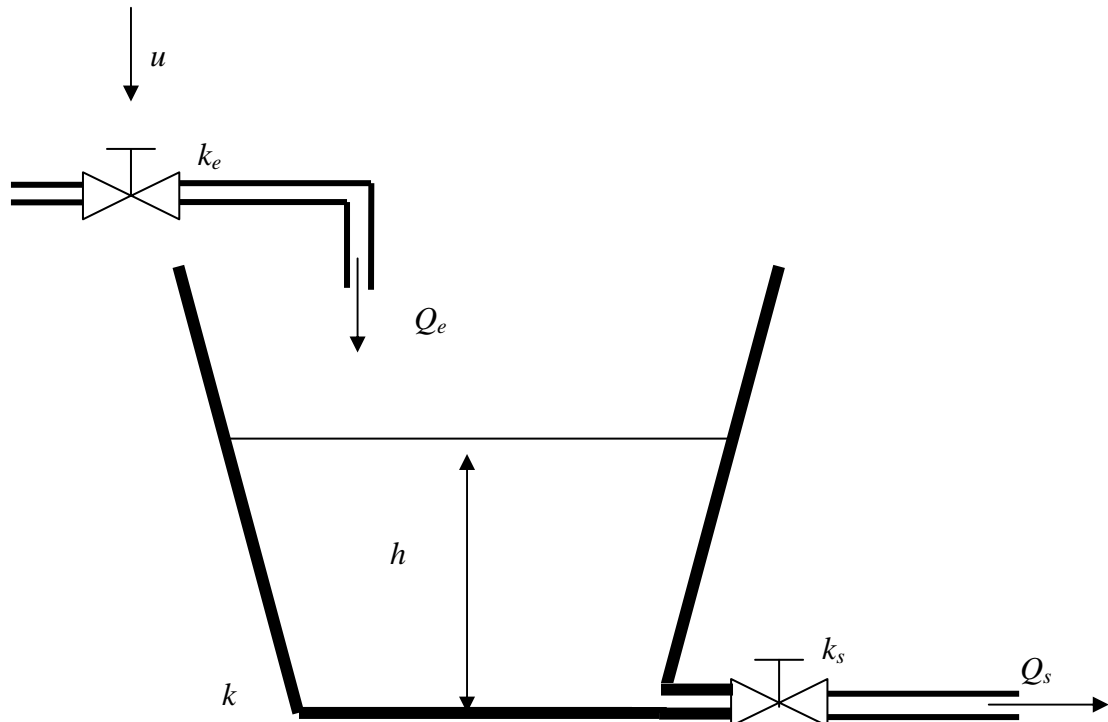
En este ejercicio se va a utilizar un sistema borroso para regular un depósito cuya sección va creciendo con la altura. Las ecuaciones del modelo son:

$$\begin{aligned}Q_s &= k_s \sqrt{2gh} \\ (A_0 + kh) \frac{\partial h}{\partial t} &= Q_e - Q_s \\ Q_e &= k_e u\end{aligned}$$

donde:

- Q_s y Q_e son los caudales de salida y entrada respectivamente,
- h es la altura del depósito,
- A_0 es el área de la base,
- k es la inclinación de la pared del depósito con respecto a la vertical,
- u es la señal de actuación (válvula),
- k_e y k_s son las constantes de carga y descarga de las válvulas de entrada y salida, respectivamente.

En la figura siguiente aparece un esquema del depósito.



```
% SimuLink model.
function [sys, x0] =
    depo(t, x, u, flag, p)
    if flag == 0
        sys = [1; 0; 1; 1; 0; 0];
        x0(1) = 0.0;
    end
    if (abs(flag) == 1) |
        (abs(flag) == 3)
        % Parámetros
        g = 9.8;
        A0 = 1;
        k = 1;
        ks = 0.25;
```

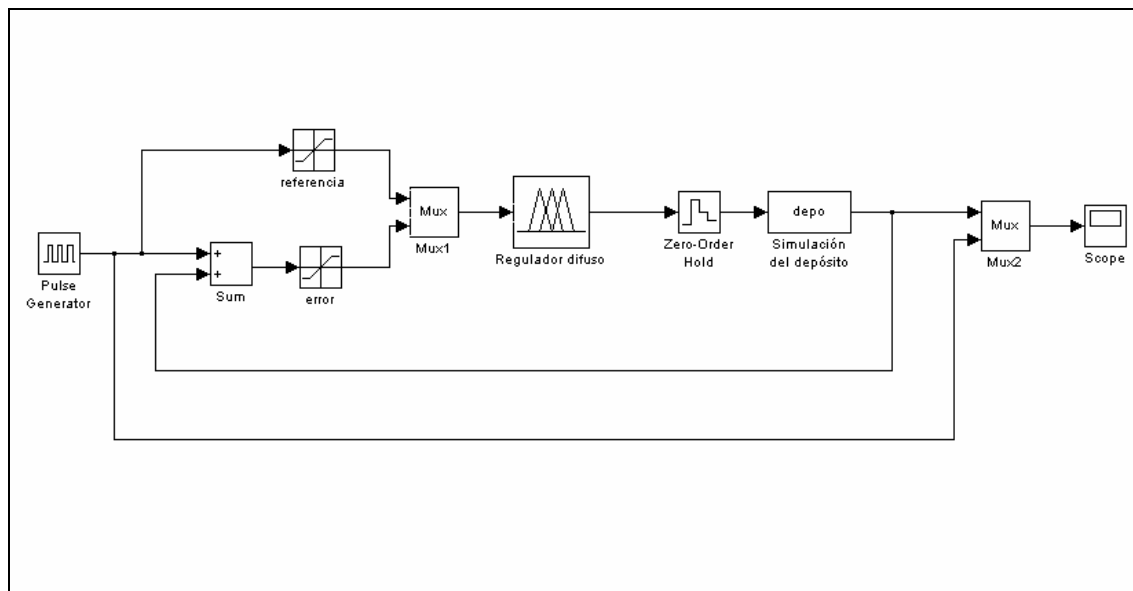
```
    ke = 2;
    ue = u(1);
    h = x(1);
    % depo.
    Qs = ks*sqrt(2*g*h);
    Qe = ke*ue
    derh = (Qe - Qs)/(A0 + k*h);
    end
    if abs(flag) == 1
        sys(1) = derh;
    elseif abs(flag) == 3
        sys(1) = h;
    elseif flag ~= 0
        sys = [ ];
    end
```

Debe simularse este sistema en Simulink para diseñar el regulador borroso. La simulación puede hacerse con bloques o usando las denominadas S-funciones (*S-function*) de Simulink. La *S-function* para el modelo de este sistema es:

Como entradas al regulador se utilizarán 2 variables:

- La diferencia entre la referencia y el nivel de líquido en el depósito (*el error*).
- La propia referencia.

Para evitar problemas en la simulación, es conveniente limitar las entradas del regulador a los valores que se hayan definido como dominio de las variables de entrada. Definiremos el dominio $[-1, 1]$ para el error, y $[0, 3]$ para la referencia. El dominio de la variable de control u será $[0, 1]$. Supondremos que la implementación real del regulador se realizará en un computador, por tanto es necesario introducir un retenedor con un periodo de, por ejemplo, 0.5 segundos. También será necesario introducir un multiplexor para combinar las dos variables de entrada al regulador. Con todos estos elementos, un esquema para la simulación del sistema de control en Simulink puede ser el siguiente:



➤ El ejercicio consiste en desarrollar e implementar un sistema borroso que permita controlar el nivel deseado del depósito. Pueden seguirse las siguientes sugerencias:

1. La *idea básica* en el diseño del regulador es la siguiente: la ganancia del mismo debe ser mayor cuanto más alto sea el nivel de referencia, pues al

tener el depósito un área mayor cuanto mayor es la altura, es necesario añadir más cantidad de líquido para incrementar el nivel.

2. Partiendo de la idea básica anterior, se debe comenzar el diseño del regulador con un conjunto de reglas IF-THEN que se consideren razonables y una distribución uniforme de las funciones de pertenencia.
3. Una vez diseñado un regulador inicial, debe probarse su comportamiento, obteniendo para ello la respuesta del sistema a partir de un nivel de referencia fijo, realizando pequeñas modificaciones (incrementos o decrementos), registrando el funcionamiento para diversos puntos de funcionamiento.
4. Si el sistema no tiene el funcionamiento deseado, deben realizarse pequeñas modificaciones en el regulador borroso y volver a probar.
5. Para el regulador borroso podéis tomar inicialmente 2 conjuntos borrosos para la variable de referencia y 5 para la variable de error.
6. Una vez obtenido el regulador adecuado, aplicar distintos tipos de señales de entrada para la referencia.

2. Ejercicio opcional: regulación de temperatura y flujo de agua

En esta parte se va a describir un regulador de la temperatura y flujo del agua de un grifo (que tiene aplicación, por ejemplo, en dispositivos para la regulación de la salida de agua en una ducha). A continuación se propondrán cambios en el regulador para estudiar su comportamiento.

2.1 Descripción del sistema

Existen dos variables que pueden controlarse en el sistema:

- La válvula de agua fría.
- La válvula de agua caliente.

Las salidas medibles del sistema son dos:

- El flujo total de salida de agua (medida, por ejemplo, en litros/minuto).
- La temperatura del agua de salida.

El flujo total de salida del agua se puede calcular como la suma del flujo de agua fría y el flujo de agua caliente:

$$f_T = f_F + f_C$$

La temperatura del agua de salida puede calcularse como la media ponderada de las temperaturas de agua fría y caliente, teniendo en cuenta los flujos:

$$T = \frac{f_F * T_F + f_C * T_C}{f_F + f_C}$$

donde f_F y f_C son los flujos de salida de agua fría y caliente, respectivamente, y T_F y T_C son las temperaturas del agua fría y caliente, respectivamente. La temperatura final del agua dependerá, por tanto, de las temperaturas originales del agua de las dos válvulas y de los respectivos flujos.

Supondremos que la temperatura deseada será fija, $T_d = 23^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, puesto que la temperatura ambiente puede variar, este valor de temperatura deseada también puede variar ligeramente. La variación de la temperatura ambiente se modelará con una onda cuadrada o de cualquier otro tipo de amplitud 4, de tal forma que la temperatura deseada (referencia) será $23 \pm 4^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la temperatura ambiente. El flujo deseado lo modelaremos de forma análoga: estableceremos un flujo deseado de 0.7, con una variación de ± 0.2 .

La temperatura de salida de cada válvula se supone que es constante. Sin embargo, debido a pequeños cambios en la presión real del agua suministrada por las

válvulas, el flujo no permanece constante. Este hecho lo vamos a modelar introduciendo una variación máxima de flujo como una señal senoidal de amplitud pequeña. El flujo de salida de cada válvula se calcula como el mínimo entre el flujo máximo permitido y la integración de la variación de flujo de la válvula correspondiente.

2.2 Simulación del sistema

La simulación de este sistema está disponible en la carpeta de instalación de Matlab. El esquema global aparece en la figura 1.

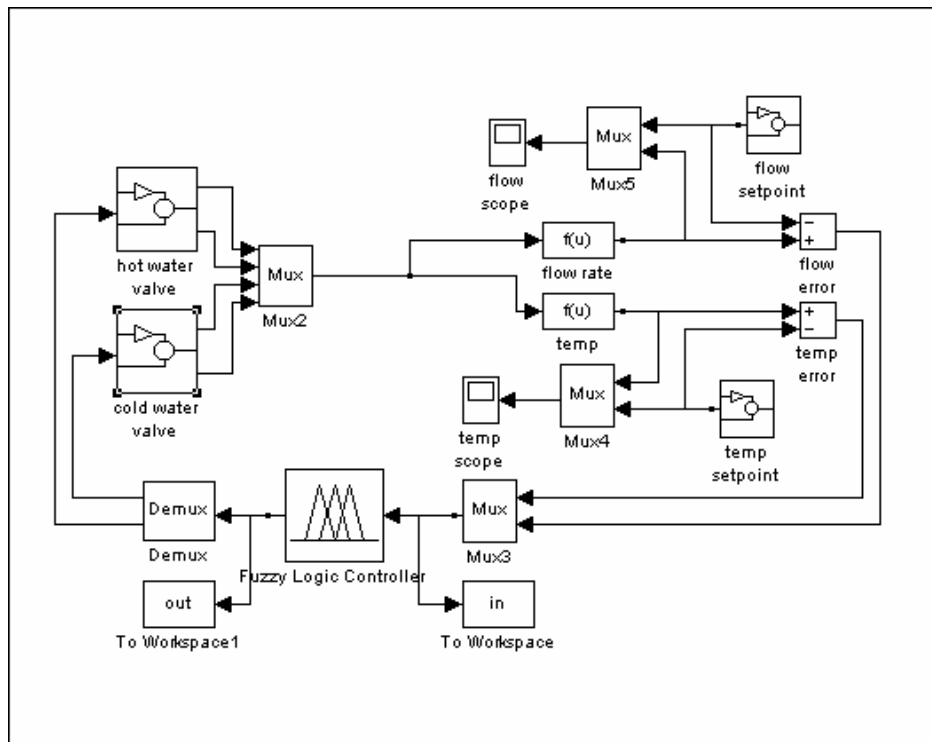


Figura 1: Esquema global del sistema de control de temperatura de agua.

Los bloques *flow rate* y *temp* son expresiones en Matlab para calcular el flujo total y la temperatura del agua, respectivamente. La expresión para el bloque *flow rate* es la siguiente:

$$u(1)+u(3)$$

donde $u(1)$ es el flujo de agua caliente y $u(3)$ es el flujo de agua fría. La expresión para el bloque *temp* es la siguiente:

$$(u(1)*u(2) + u(3)*u(4))/(u(1)+u(3))$$

que es la media ponderada de las temperaturas de agua fría y caliente ($u(2)$ es la temperatura de agua caliente y $u(4)$ la temperatura de agua fría).

Los bloques *flow setpoint* y *temp setpoint* establecen el flujo y la temperatura deseadas, con pequeñas variaciones modeladas con una señal cuadrada. En las figuras 2 y 3 aparecen los esquemas de estos bloques.

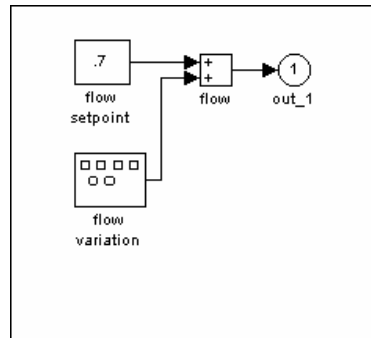


Figura 2: Bloque para el flujo deseado

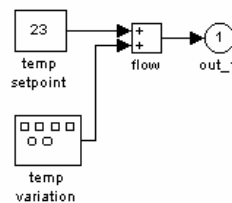


Figura 3: Bloque para la temperatura deseada

Los esquemas para simular las válvulas de agua fría y caliente son análogos. En la figura 4 se muestra el bloque para la válvula de agua fría.

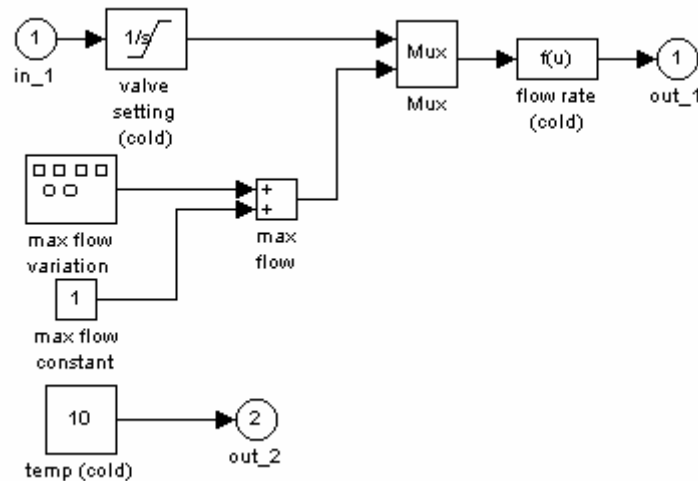


Figura 4: Simulación de la válvula de agua fría

Puede observarse que para obtener el flujo de agua fría se ha incluido un integrador para la variación de la posición de la válvula. La expresión correspondiente al bloque *flow rate* obtiene el mínimo entre el flujo máximo que tiene la válvula y el flujo aplicado (que es la salida del integrador). La expresión en Matlab es la siguiente:

$$k*u(1)* ((k*u(1)) <= u(2)) + u(2)* ((k*u(1))>u(2))$$

que es equivalente a calcular el mínimo entre $k*u(1)$ y $u(2)$, donde $k*u(1)$ es el flujo aplicado y $u(2)$ es el flujo máximo admitido por la válvula en ese instante.

2.3 Descripción del regulador

Se ha diseñado un regulador borroso para el sistema anterior. Las entradas al mismo son dos:

- (1) El error en el flujo (real – deseado)
- (2) El error en la temperatura (real – deseada)

Supondremos que la acción de control sobre las válvulas se puede expresar como un número real en el intervalo $[-1,1]$, de tal forma que si la acción es $u=0$, la posición de la válvula no cambia, si $u>0$, la válvula se abre aumentando el flujo de salida, y si $u<0$, la válvula se cierra disminuyendo el flujo de salida. La magnitud del cierre o apertura de la válvula depende del valor absoluto de la señal de control.

El regulador tiene 2 salidas, correspondientes a cada válvula. Se han definido los siguientes conjuntos borrosos:

- (1) Para la temperatura: *cold*, *good*, *hot*, con las gráficas de la figura 5. El dominio es $[-20,20]$.

- (2) Para el flujo: *soft*, *good*, *hard*, con las gráficas de la figura 6. El dominio es $[-1,1]$.

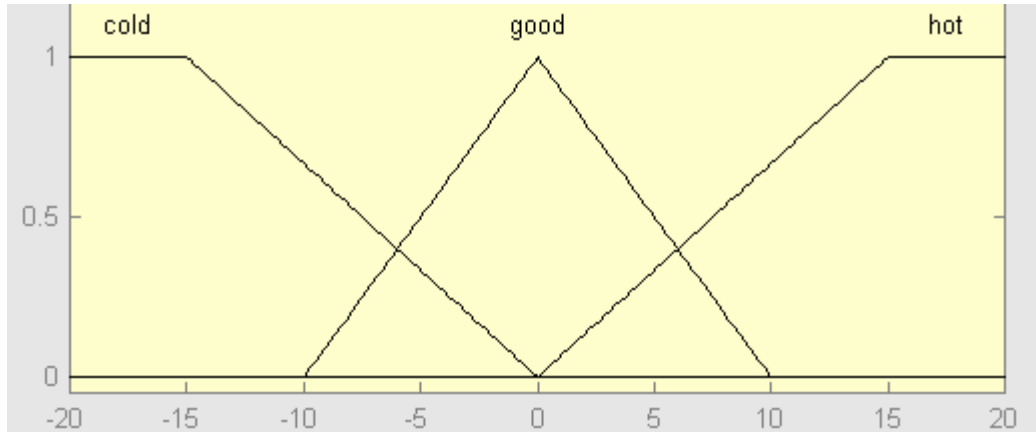


Figura 5: Conjuntos borrosos para la temperatura

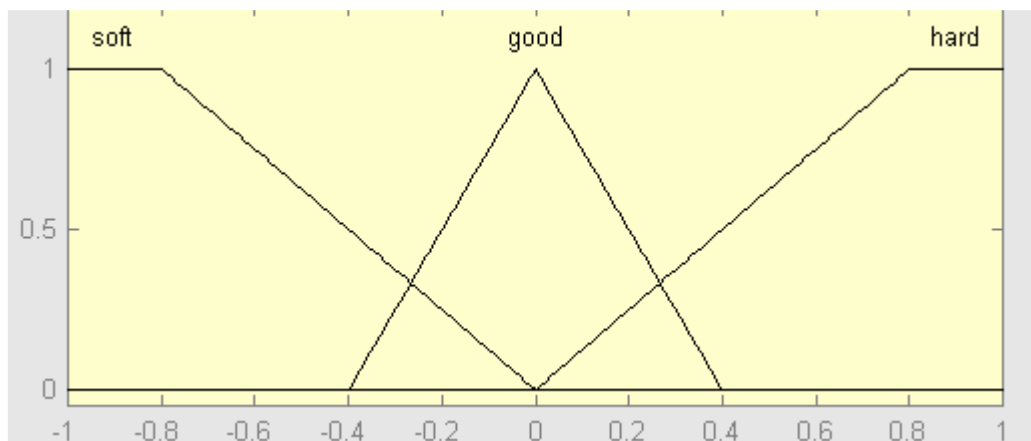


Figura 6: Conjuntos borrosos para el flujo

Para las variables de control se han definido 5 conjuntos borrosos en el dominio $[-1,1]$, cada uno de los cuales representa la variación en la apertura de la válvula. Las etiquetas de estos conjuntos son *closeFast* (cerrar rápido), *closeSlow* (cerrar lento), *steady* (mantener estable), *openSlow* (abrir lento) y *openFast* (abrir rápido). Las funciones de pertenencia aparecen en la figura 7.

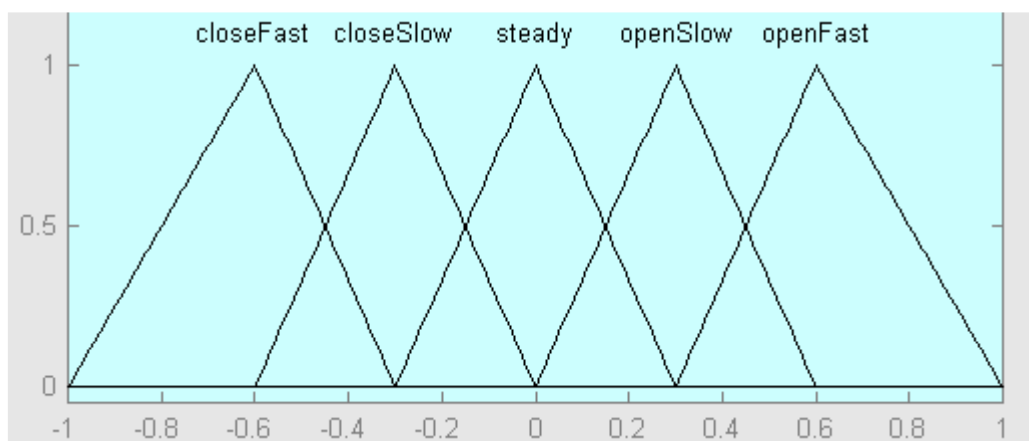


Figura 7: Conjuntos borrosos para las variables de control

Las reglas del regulador aparecen en la tabla siguiente.

ENTRADAS		SALIDAS	
Temperatura	Flujo	Control fría	Control caliente
<i>cold</i>	<i>soft</i>	<i>openSlow</i>	<i>openFast</i>
<i>cold</i>	<i>good</i>	<i>closeSlow</i>	<i>openSlow</i>
<i>cold</i>	<i>hard</i>	<i>closeFast</i>	<i>closeSlow</i>
<i>good</i>	<i>soft</i>	<i>openSlow</i>	<i>openSlow</i>
<i>good</i>	<i>good</i>	<i>steady</i>	<i>steady</i>
<i>good</i>	<i>hard</i>	<i>closeSlow</i>	<i>closeSlow</i>
<i>hot</i>	<i>soft</i>	<i>openFast</i>	<i>openSlow</i>
<i>hot</i>	<i>good</i>	<i>openSlow</i>	<i>closeSlow</i>
<i>hot</i>	<i>hard</i>	<i>closeSlow</i>	<i>closeFast</i>

Ejercicio: Análisis del regulador de temperatura y flujo de agua

- (1) Analizar las reglas del regulador, y escribir una justificación intuitiva de las mismas.
- (2) A partir de la simulación del sistema con el regulador ¿puede concluirse que tiene un comportamiento estable? ¿Cuánto tiempo tarda en alcanzar el régimen estable, si existe?
- (3) Se ha utilizado un regulador de Mamdani por mínimo. Modificar los parámetros básicos del regulador (entre ellos el método de implicación) y observar si se producen cambios en el comportamiento del sistema.

- (4) Modificar los conjuntos borrosos de entrada y salida del regulador para conseguir disminuir el tiempo de régimen transitorio (si es posible).
- (5) Visualizar la función de transferencia E/S del regulador mediante la opción *View Surface*. ¿La función E/S obtenida es lineal? ¿Puede controlarse el sistema con una acción proporcional?