

Artículo Invitado

LA LÓGICA DIFUSA EN INGENIERÍA: PRINCIPIOS, APLICACIONES Y FUTURO

D. Guzmán, V. M. Castaño^{1*}

1. Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada. Universidad Nacional Autónoma de México,
Campus Juriquilla, 76000, Querétaro, México

Abstract

Fuzzy logic is a mathematical tool that mimics the way humans manage and process information. It is a method of great simplicity for processing of information, decision making and process control. This article discusses the basic concepts and applications, and analyses *pros* and *cons* of this methodology.

Key words: Fuzzy logic, control, greenhouse.

Palabras claves: Lógica difusa, control, invernadero.

I. Introducción

El concepto de *lógica difusa* fue concebido a mediados de los años sesentas por Lofti Zadeh, ingeniero eléctrico iraní y profesor de la Universidad de California, en Berkeley, quien en 1965 publica el primer artículo de lógica difusa llamado "*Fuzzy Sets*" [1], donde se dan a conocer por primera vez los conceptos de esta técnica.

Más tarde, en 1974 Ebrahim Mamdani aplica los conceptos de lógica difusa en el control de procesos y desarrolla el primer control difuso para la regulación de un motor de vapor [2].

En 1985 Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa del método Mamdani.

La unión de los conceptos de lógica difusa desarrollados por Zadeh y el área de control de procesos encuentra numerosas aplicaciones en la industria, medicina, aeronáutica, electrónica [5, 6, 9], etc., e incluso en los últimos años, en el mundo de los aparatos electrodomésticos.

*Autor correspondiente: meneses@servidor.unam.mx

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera:

En la siguiente sección de Conceptos y aplicaciones se introduce a los conceptos de lógica difusa y se analiza su importancia como un método de toma de decisiones, así como sus posibles aplicaciones.

En la sección Control difuso se diseña y simula un control difuso utilizando tanto la arquitectura Mamdani como TSK.

Finalmente, en la sección de Conclusiones y perspectivas se analizan ventajas y desventajas de un control difuso.

II. Conceptos y aplicaciones

En esta sección mediante un ejemplo práctico se introducirán los conceptos básicos de la lógica difusa. El problema consiste en realizar un control de temperatura de un invernadero. Actualmente, el control de temperatura lo lleva a cabo el operador del invernadero de forma manual y lo hace cerrando y abriendo una válvula que permite el paso de aire caliente, manteniendo una temperatura aproximada de 23 °C. El objetivo es automatizar el proceso, utilizando la experiencia del operador y mediante la aplicación de los conceptos de la lógica difusa.

Como primer paso de la solución del problema se clasificarán las posibles temperaturas que puede haber en el proceso, por ejemplo: CALIENTE, TIBIO y FRÍO.

En lógica difusa se parte del hecho de que conceptos como alto, bajo, ruidoso, dulce, caro, amargo, barato, delgado, etc. son percibidos de manera diferente por cada persona. Por ejemplo, para una persona de Alaska el concepto de caliente puede ser arriba de 10 °C, mientras que para un mexicano caliente es arriba de 30 °C o en un proceso de fundición caliente es arriba de 300°C. Por esta razón los conjuntos CALIENTE, TIBIO y FRÍO son llamados *conjuntos difusos*. Un conjunto difuso es un conjunto con límites borrosos o “no muy bien” definidos.

Una vez clasificadas las temperaturas del invernadero en conjuntos difusos, se les asignarán valores, los valores que se les asociarán a cada conjunto difuso tienen necesariamente que ver con el contexto del problema, en este caso el invernadero. Esto se hace tomando en cuenta la experiencia del operador, quien define los siguientes rangos de temperatura (T), para cada conjunto:

Supongamos que se mide en el invernadero la temperatura y la medición es de 29,9 °C, la temperatura pertenece al conjunto TIBIO, pero está únicamente a 0,1 grados para ser caliente, podemos decir que la temperatura es *prácticamente, o casi* caliente pero para la clasificación de la figura 1 se dice que está TIBIO, de este razonamiento surge la necesidad de definir un rango donde 29,9 °C esté incluido también dentro del conjunto CALIENTE.

Lógica difusa lo hace asignándole a la medición un porcentaje de pertenencia al conjunto debido a que está numéricamente cerca del mismo, por ejemplo 29.9 °C es

98 por ciento perteneciente a CALIENTE. Este concepto en lógica difusa es llamado *grado de membresía*, que puede tomar valores de 0 a 1, donde el 1 representa pertenencia total al conjunto y 0 ninguna pertenencia al conjunto. De esta manera, al igual como razonamos los humanos podemos incluir en los conjuntos conceptos como: “*está poco menos que caliente*” o “*esta demasiado frío*” o “*está medio tibio*”, etc.

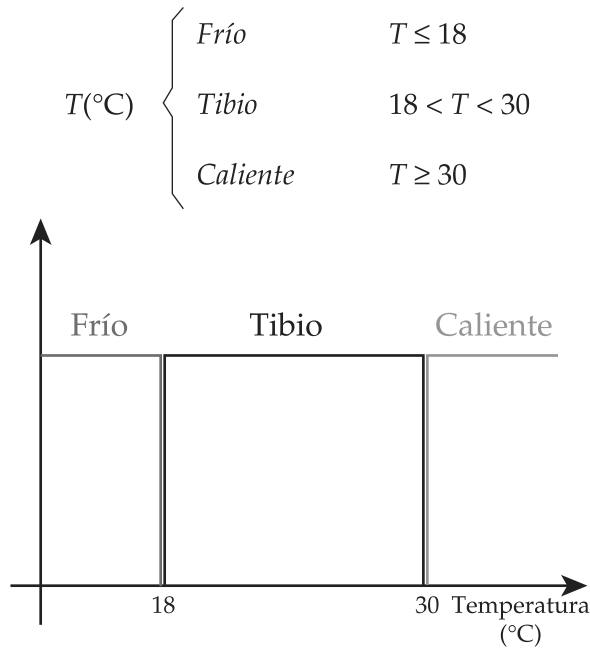


Figura 1. Clasificación de temperaturas.

Se definen entonces los nuevos intervalos de los conjuntos difusos como se muestran en la figura 2, la cual es llamada *función de membresía* (μ). La forma de los intervalos se elige tomando en cuenta la experiencia del operador del invernadero. A esta traducción de los valores del mundo real a lógica difusa, a través de funciones de membresía, se le llama *fuzzyficación*.

En la figura 2 se pueden apreciar los siguientes elementos:

- El eje Y es el grado de membresía, que describe cuantitativamente la función de membresía.
- El eje X es la temperatura.
- El nombre asociado (caliente, tibio y frío) es llamado significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía.
- La forma de la función de membresía se debe elegir de acuerdo al problema que se desea resolver. Existen muchas formas diferentes entre ellas: triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmoïdal, etc.

- Se puede observar que para una medición de temperatura, por ejemplo 29 °C, se le asocia un grado de membresía tanto en CALIENTE como en TIBIO como

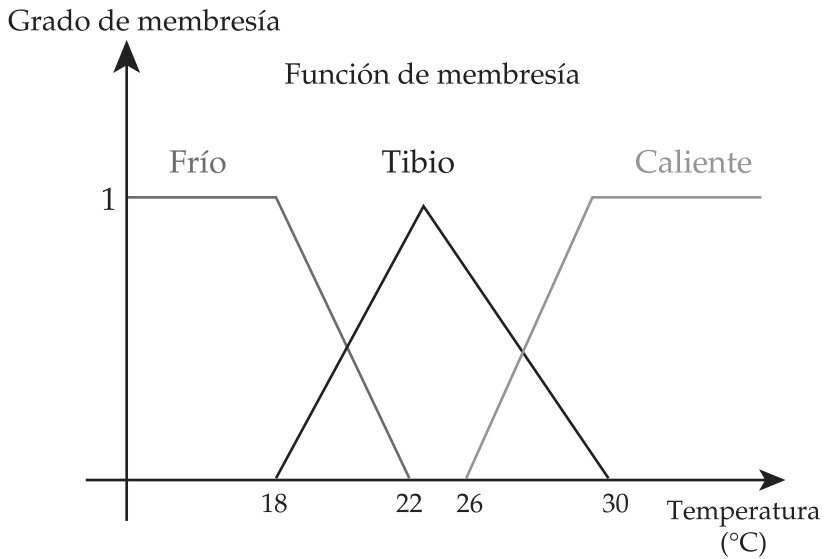


Figura 2. Funciones de membresía para temperaturas

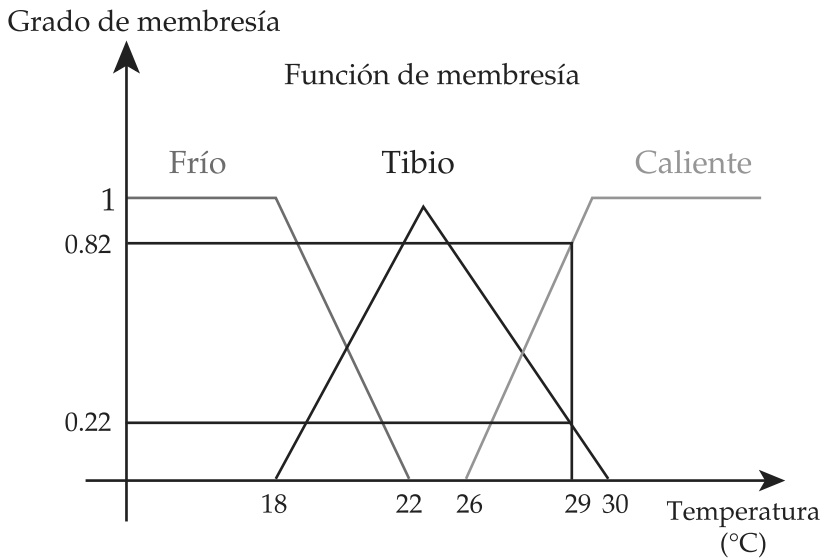


Figura 3. Grados de pertenencia de T=29 °C

se muestra en la Figura 3. Lo que puede interpretarse como: 29 °C es una temperatura mucho más que tibia o 29 °C es prácticamente caliente.

El grado de membresía asociado dependiendo de la función de membresía, es llamado *grado de pertenencia* (GP) y se representa de la siguiente manera:

$$GP(29\text{ }^{\circ}\text{C, CALIENTE}) = 0,82$$

$$GP(29\text{ }^{\circ}\text{C, TIBIO}) = 0,22$$

$$GP(29\text{ }^{\circ}\text{C, FRÍO}) = 0$$

A partir de la información de la figura 2 se desea tomar la decisión de abrir o cerrar la válvula que permitirá el paso del aire caliente para controlar la temperatura y mantener el invernadero siempre a 23 °C, a este paso en lógica difusa se le llama *inferencia*.

El operador del invernadero hace esta misma función siguiendo su lógica y experiencia. Por ejemplo, él sabe que para una temperatura de 10 °C es necesario abrir $\frac{3}{4}$ partes la válvula y para una temperatura de 40 °C hay que cerrar totalmente la válvula. Esta información será plasmada en la siguiente tabla y en la función de membresía de salida de la figura 4:

TABLA 1.
REGLAS DE LÓGICA DIFUSA

Temperatura	Descripción
FRÍO	Abrir válvula de aire caliente
TIBIO	Entre-abrir la válvula
CALIENTE	Cerrar válvula de aire caliente

Al conjunto de reglas de la Tabla 1 se le llama *reglas difusas*. Y pueden ser escritas de la forma SI... ENTONCES, por ejemplo:

SI FRÍO **ENTONCES** ABRE VÁLVULA
SI TIBIO **ENTONCES** ABRE Y CIERRA VÁLVULA
SI CALIENTE **ENTONCES** CIERRA VÁLVULA

En el eje X se presenta el rango de operación de la válvula. Donde 1 representa una válvula totalmente abierta y 0 una válvula totalmente cerrada, 0,3 representaría abrir la válvula al 30 por ciento.

A partir de las funciones de membresía de entrada y de salida se aplica la siguiente metodología:

1. **Proceso de inferencia.** Para cada grado de pertenencia asociados a la medición de temperatura se generan conclusiones. Por ejemplo, para los grados de pertenencia asociados a la medición de 29 °C se debe concluir la acción que se realizará y existen diversos métodos, entre ellos:

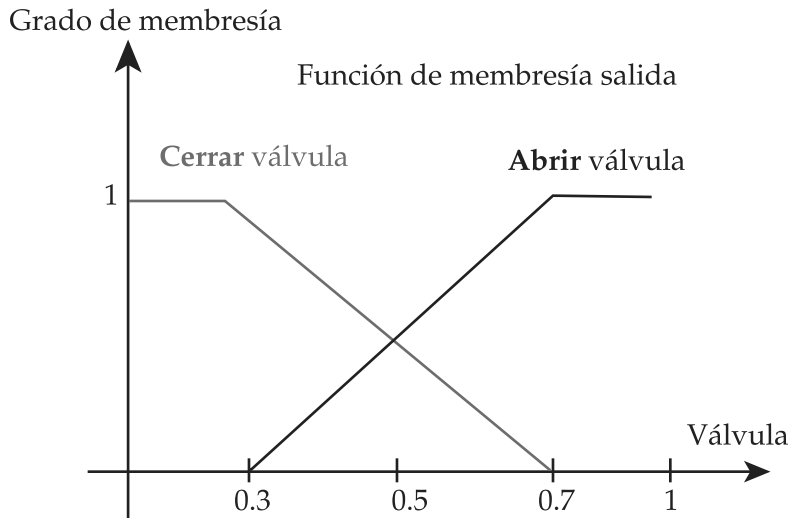


Figura 4. Función de membresía de salida

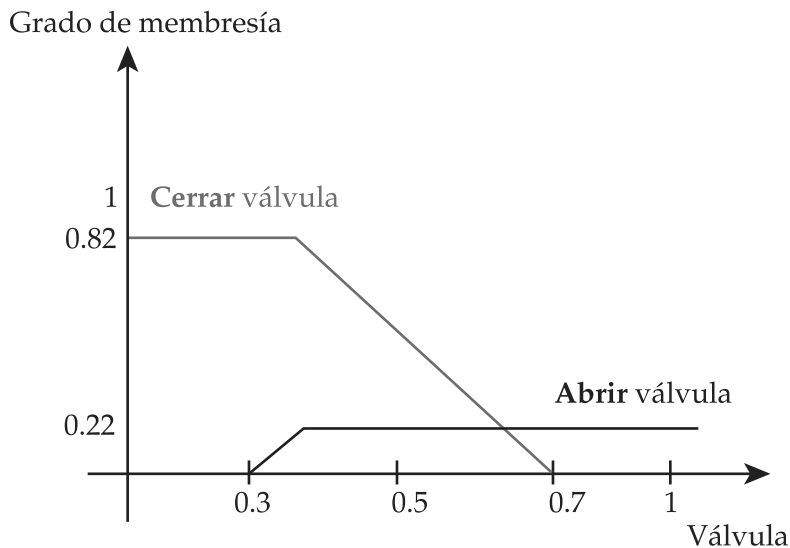


Figura 5. Conclusión por método de truncamiento.

- **Método de truncamiento**, que consiste en cortar la función de membresía de salida, de tal forma que los valores mayores al grado de pertenencia asociado desaparezcan, como se muestra en la figura 5.

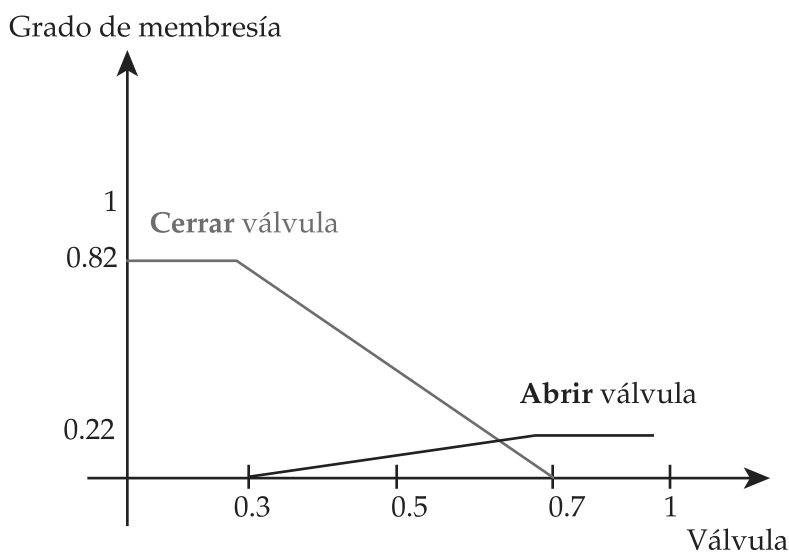


Figura 6. Conclusión por Método de escalamiento

- **Método de escalamiento**, consiste en escalar la función de membresía en proporción con el grado de pertenencia. (véase figura 6).

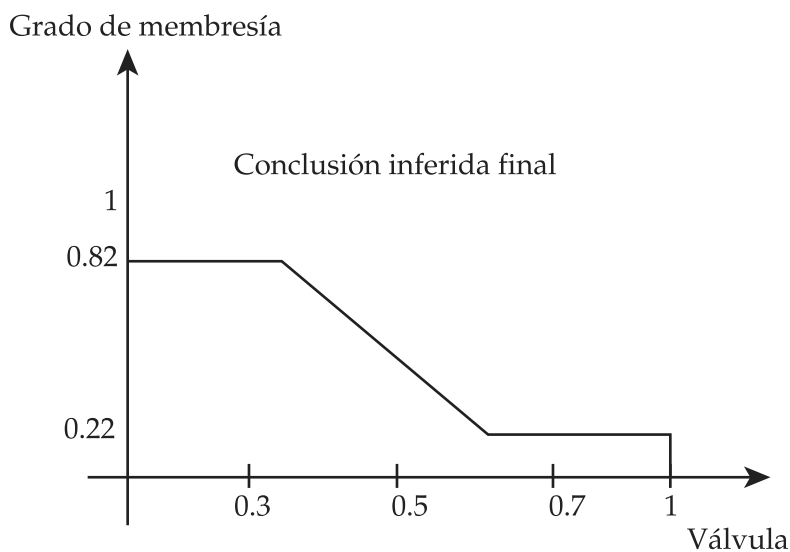


Figura 7. Conclusión inferida final método de truncamiento.

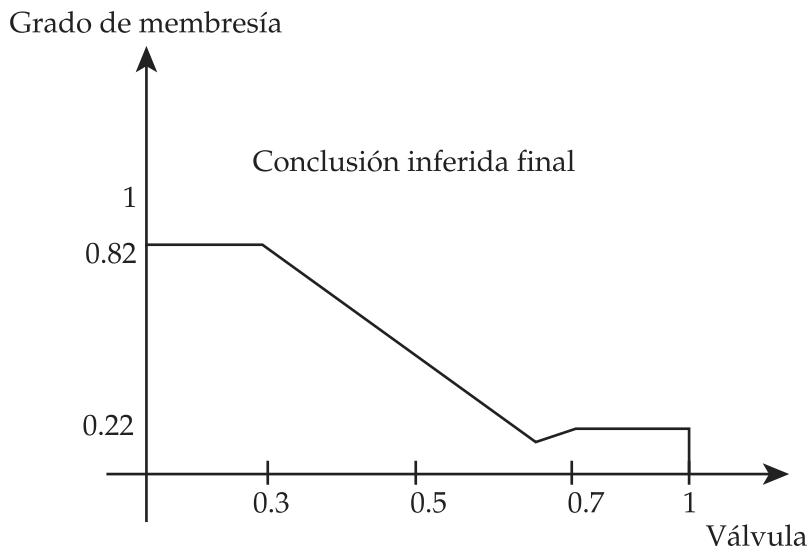


Figura 8. Conclusión inferida final método de escalamiento

2. Se genera la conclusión final combinando las conclusiones difusas como se muestra en las figuras 7 y 8.
3. Finalmente la conclusión final se defuzzyfica, es decir, se lleva nuevamente al mundo real, esta información indica cuánto se debe abrir la válvula. Para ello existen diversas técnicas de defuzzyficación, entre ellas:
 - Promedio de máximos, que consiste en calcular el promedio de todas las variables que tienen el mayor valor de grado de membresía. Para el método de truncamiento se obtiene 0,195 es decir la válvula se abrirá 19,5 por ciento. (Véase figura 9)
 - Método de centroide, que consiste en calcular el promedio ponderado de la salida. Para el método de truncamiento se obtiene 0.346 es decir la válvula se abrirá 34,6 por ciento, como se muestra en la Figura 9.

Cabe mencionar, que la selección del método de defuzzyficación será el que mejor se adapte a las necesidades y dinámica del proceso.

Sin embargo, se puede apreciar que el correcto funcionamiento del sistema dependerá ampliamente del conocimiento de la dinámica del proceso y dicho conocimiento surge de la experiencia del operador humano. A pesar de ello, los conceptos de la lógica difusa han encontrado gran campo de aplicación en sistemas cuyo comportamiento es difícil de predecir o modelar matemáticamente.

Como por ejemplo: control difuso para el ahorro de energía en aire acondicionado, sistema de generación de ciclos óptimos de lavado para lavadoras caseras, control difuso para el procesamiento de alimentos, control difuso para un

secador de ropa, lógica difusa para el control de la calefacción, ventilación y aire acondicionado en autos, control difuso adaptable para una transmisión automática de cinco velocidades [5], entre muchas otras, aplicaciones en su mayoría enfocadas al *control de procesos*.

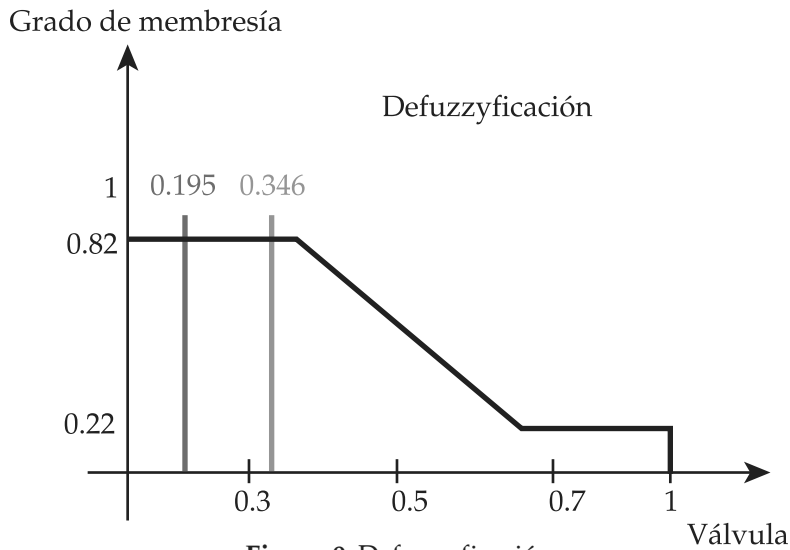


Figura 9. Defuzzyficación

El método utilizado en esta sección puede visualizarse como un controlador en lazo abierto que se ha sintonizado para una sola temperatura. Lo que se desea es generalizar el problema para cualquier temperatura de referencia. A continuación, en la siguiente sección se plantea el problema de control con retroalimentación de temperatura y se generaliza para cualquier temperatura deseada.

Para información sobre la simulación del sistema de esta sección en MATLAB refiérase al Anexo 1.

Control Difuso. La lógica difusa ha ganado un gran campo de acción en procesos difíciles de modelar matemáticamente, ya que el diseño y sintonización del controlador difuso se basa únicamente en la experiencia del experto en el proceso. Es decir, a través de la lógica difusa se incorpora el razonamiento humano en el algoritmo de control y simplifica el diseño de controlador.

El problema de control del invernadero se define mediante el siguiente diagrama a bloques:

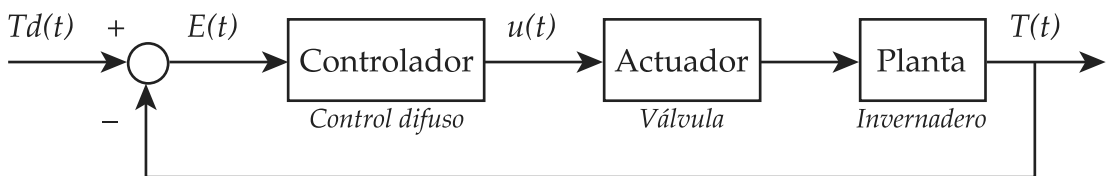


Figura 10. Diagrama a bloques del sistema de control.

donde,

TABLA 2.
NOTACIÓN DEL DIAGRAMA A BLOQUES.

Notación	Descripción
$T_d(t)$	Temperatura deseada. Rango de 0-10Vcd (0 a 50°C)
$T(t)$	Temperatura sensada del invernadero. Rango de 0-10Vcd (0 a 50°C)
$E(t)$	Error ($T_d(t)-T(t)$)
$u(t)$	Salida del controlador a la planta rango de operación -1 a 1 Vcd

El controlador difuso genérico se presenta en el diagrama a bloques de la figura 11. Es común el diseño de controladores difusos genéricos debido a que generalmente tienen la misma forma de diseño, independientemente del proceso que se desee controlar. La diferencia es la sintonización de las reglas del controlador difuso y esto se hará de acuerdo, como se mencionó anteriormente, a la experiencia del operador humano.

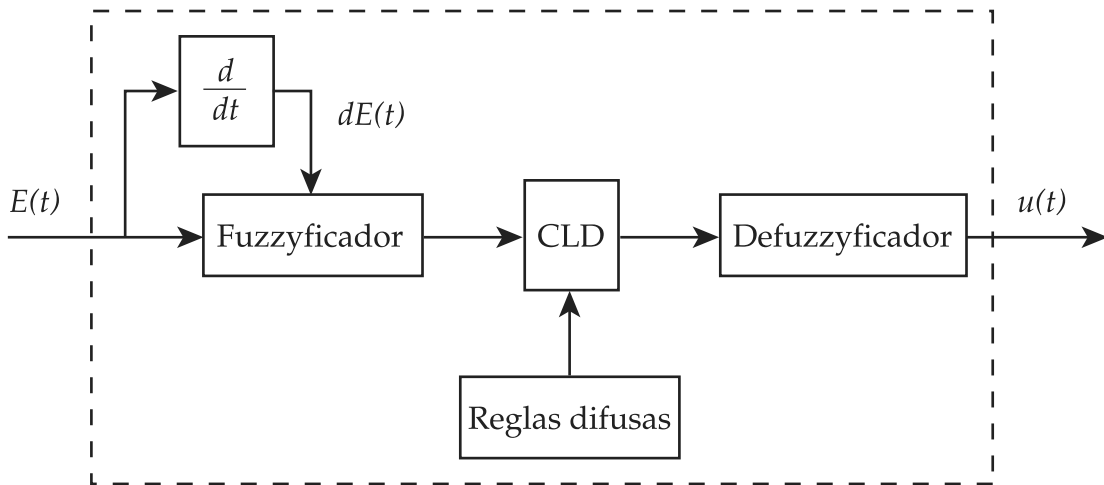


Figura 11. Diagrama a bloques de un controlador difuso genérico.

La entrada del controlador es el error y la variación del error, ya que con ellos se puede determinar el comportamiento del sistema. Sus funciones de membresía se definen como se muestra en la figura 12. El error y la variación del error en el caso del invernadero tomarán valores de -20 a 20Vcd.

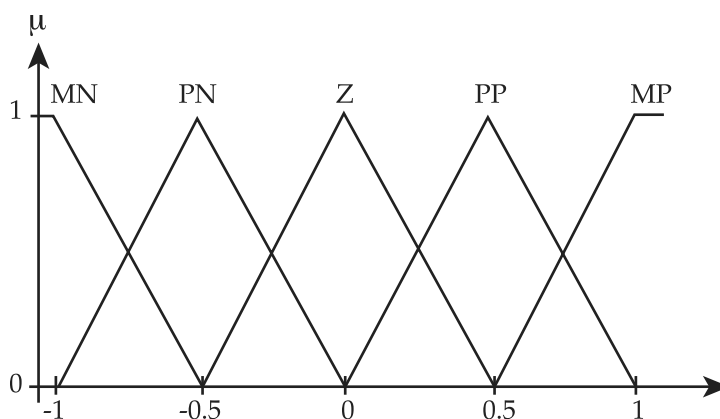


Figura 12. Función de membresía de E(t) y dE(t)

donde,

TABLA 3.
NOTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA DEL ERROR.

Notación	Descripción
MN	Muy negativo
PN	Poco negativo
Z	Cero
PP	Poco positivo
MP	Muy positivo

La salida del control difuso que controlará la válvula de paso del aire caliente, tiene la función de membresía de la Figura 13. Se modificó la función de salida de la Figura 4 para tener un mejor desempeño del controlador:

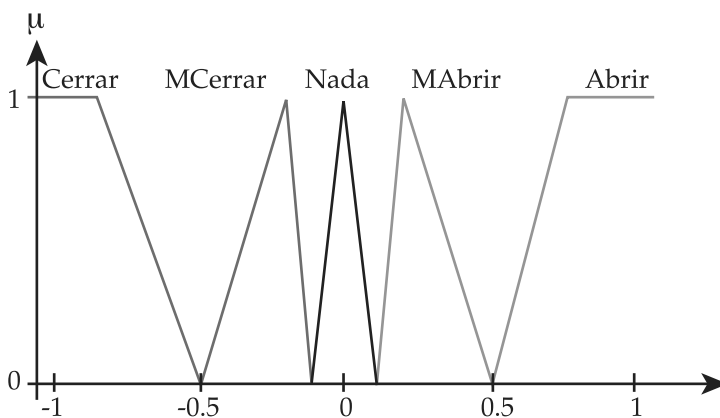


Figura 13. Función de membresía de salida.

donde -1 indica totalmente cerrada, 1 totalmente abierta y 0 indica que no se mueve de la posición donde se encuentra.

Para cuestiones de simulación del controlador la planta se define como un sistema de primer orden:

$$Gp(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

donde k es la ganancia del sistema y τ es la constante de tiempo. A continuación se generarán las reglas del control difuso siguiendo una arquitectura Mamdani.

Arquitectura Mamdani

La arquitectura Mamdani consiste en una serie de reglas si-entonces de la forma:

Si X es **FRÍO** entonces Z es **ABRIR**

Donde tanto **FRÍO** como **ABRIR** son conjuntos difusos, X son los atributos observables o medibles del sistema (temperatura) y Z son los atributos controlables del sistema (válvula). De las siguientes expresiones y la Figura 14 se derivan las reglas difusas que se muestran en la Tabla 4.

1. E(t) es negativo cuando la temperatura del invernadero $T(t)$ es mayor que la temperatura de referencia $Td(t)$.
2. E(t) es cero cuando $Td(t)=T(t)$.
3. E(t) es positivo cuando $Td(t)>T(t)$.
4. $dE(t)$ es negativa cuando el error anterior es mayor que el error actual y se tiene una gráfica de pendiente positiva.
5. $dE(t)$ es positiva cuando el error anterior es menor que el error actual y se tiene una gráfica de pendiente negativa.

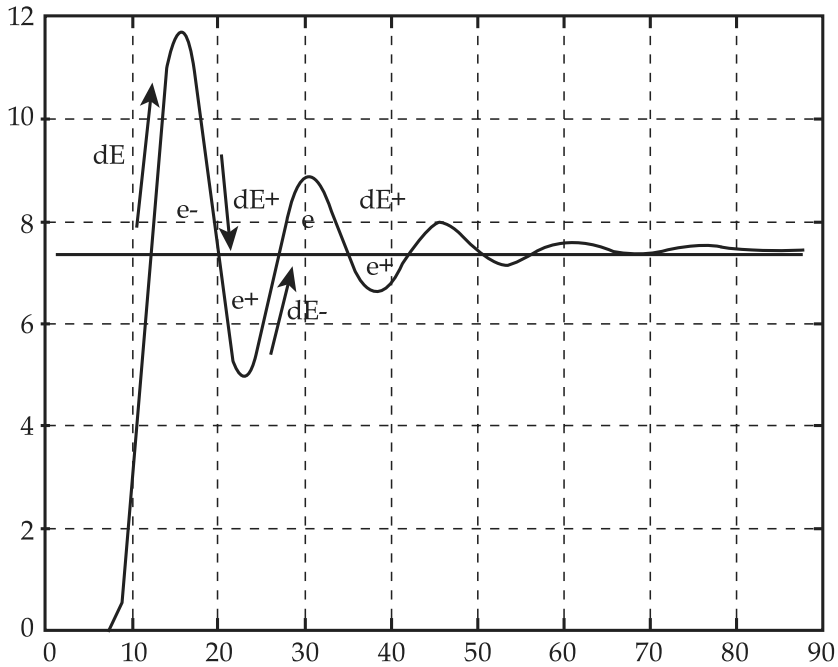


Figura 14. Significado del Error y variación del Error

TABLA 4.
CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA MAMDANI.

		$dE(t) = E(t) - E(t-T)$				
		MN	PN	Z	PP	MP
E(t)	MN	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar
	PN	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar
	Z	Cerrar	MCerrar	Nada	MAbrir	Abrir
	PP	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir
	MP	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir

La simulación del controlador se hizo en MATLAB. Primero se implementaron en el Editor FIS las funciones de membresía tanto de entrada como salida (véase Anexo 1) y en SIMULINK se construyó el siguiente diagrama a bloques del sistema:

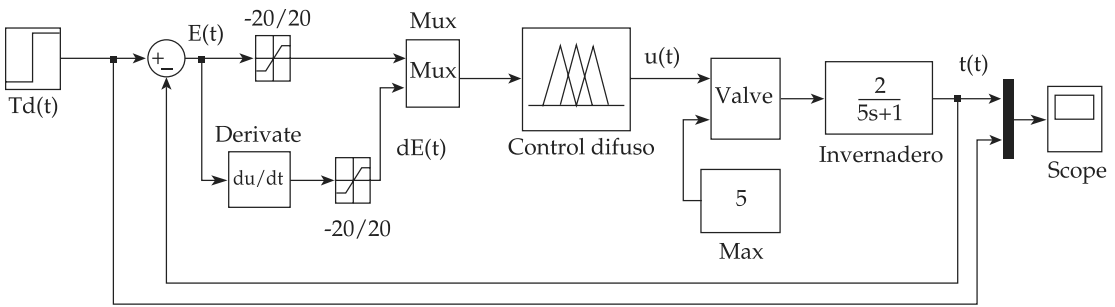


Figura 15. Diagrama a bloques del control en SIMULINK de MATLAB

El bloque de “control difuso” se encuentra en el *toolbox* de *Fuzzy Logic* de MATLAB. En él se puede especificar el archivo FIS que se desea correr, dando doble clic sobre el bloque.

El bloque “Valve” es bloque predeterminado de MATLAB y consiste en una válvula proporcional a la cual se le puede asignar el valor máximo de operación en la sección “Max”. De la simulación se obtuvieron los resultados de la figuras 16 y 17.

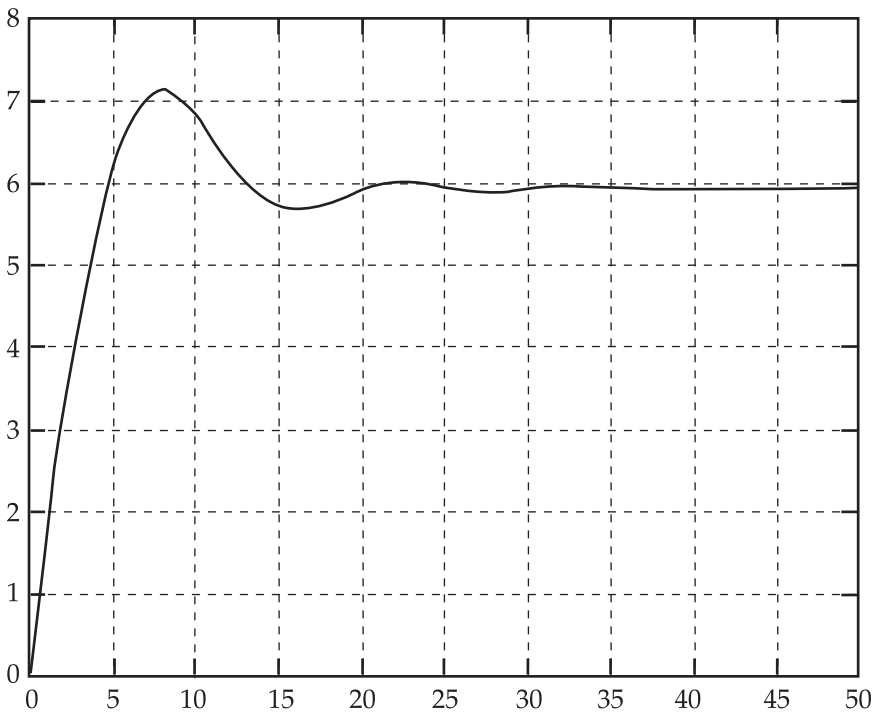


Figura 16. Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C)

Como se puede observar la referencia es alcanzada por el sistema en aproximadamente 40 segundos, con un error de estado estacionario de 0,1 aproximadamente debido a la forma de las funciones de membresía.

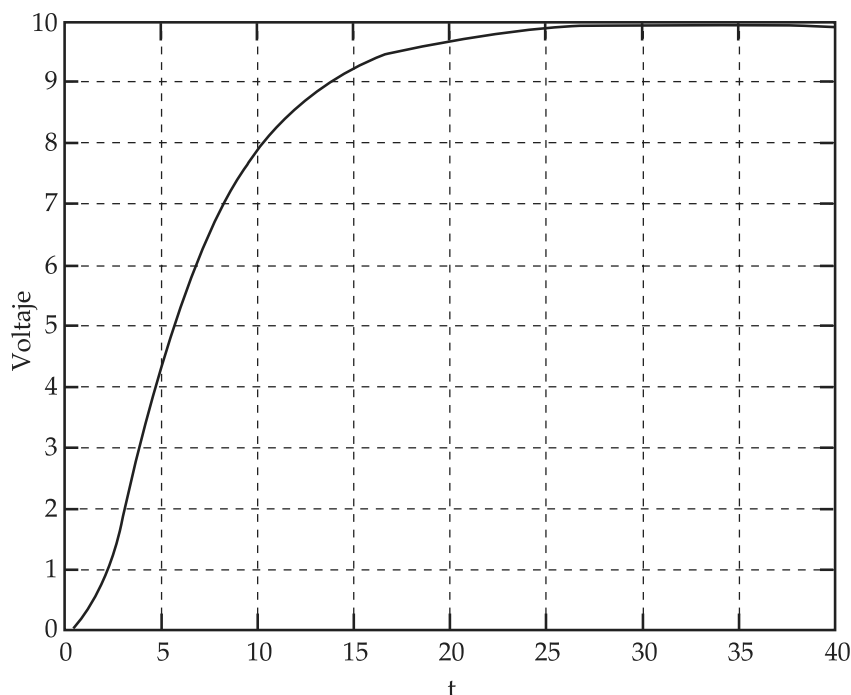


Figura 17. Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C)

De las figuras 15 y 16 se puede observar que la referencia es alcanzada por el sistema. Como se puede ver el diseño de un controlador difuso es muy sencillo, sin embargo si se desea reducir el tiempo de estabilización, el sobretiro o se desea que la respuesta de salida se comporte de cierta manera, es necesario definir nuevamente las reglas difusas de la Tabla 4, las funciones de membresía de entrada y salida, el método de inferencia y defuzzyficación [5]. Dichos cambios son bajo la apreciación empírica del experto en el proceso.

Arquitectura Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

La arquitectura TSK consiste en una serie de reglas si-entonces de la forma:

$$\text{Regla } i: \text{ Si } X(t) \text{ es } A \text{ entonces } Z \text{ es } Y = k_{i0} + k_{i1}X(t)$$

donde A es un conjunto difuso, X son los atributos observables o medibles del sistema, Z son los atributos controlables del sistema y Y es una ecuación de salida lineal.

Para la solución del problema invernadero las ecuaciones de salida tendrán la siguiente forma [4]:

$$\text{Regla } i: \text{ Si } E(t) \text{ es } A \text{ y } dE(t) \text{ es } B \text{ entonces } u(t) = k_{i0} + k_{i1}E(t) + k_{i2}dE(t)$$

Se analizará el caso más sencillo donde k_{i1} y k_{i2} son cero y la salida $u(t)$ es únicamente una constante, cuyos valores se elegirán de acuerdo a la experiencia del experto en el proceso y se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5.
CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA TSK

		$dE(t) = E(t) - E(t-T)$				
		MN	PN	Z	PP	MP
E(t)	MN			-1		
	PN			-0.5		
	Z	-1	-0.5	0	0.5	1
	PP			0.5		
	MP			1		

La simulación en MATLAB es idéntica a la de la arquitectura Mamdani con la diferencia de que el editor FIS se elige la arquitectura Sugeno y las funciones de membresía de salida son las constantes seleccionadas. Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figuras 18 y 19.

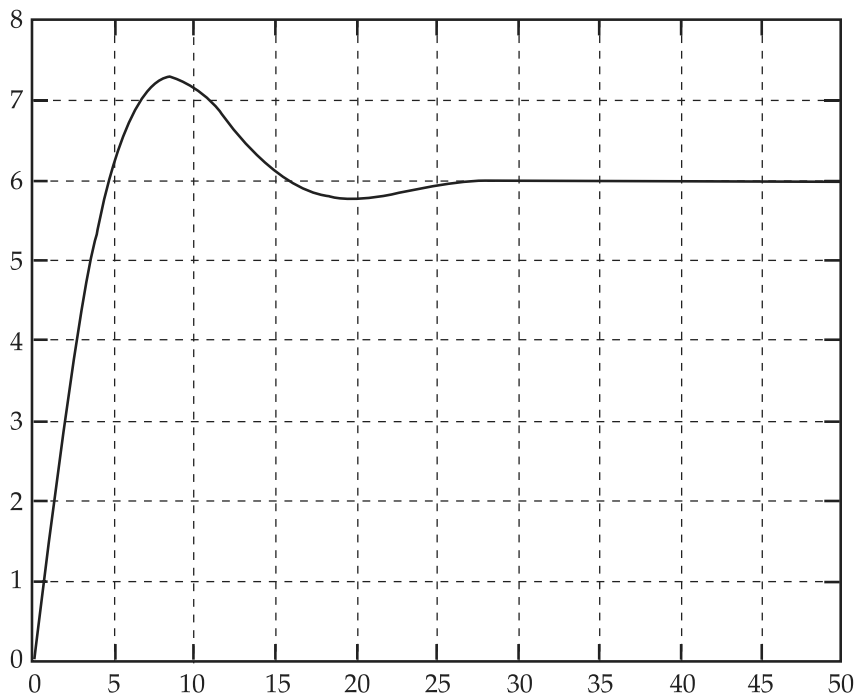


Figura 18. Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C)

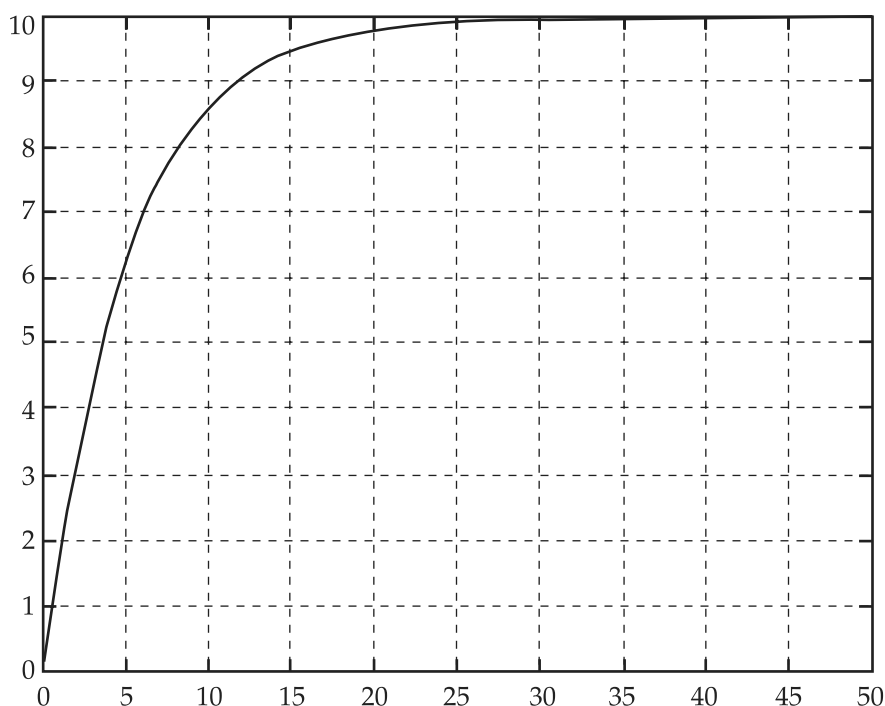


Figura 19. Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C)

De las Figuras 18 y 19 se aprecia que el sistema alcanza el valor de referencia alrededor de los 40 segundos. Las salidas son muy similares a las mostradas en las Figuras 16 y 17 de la arquitectura Mamdani, pero con la diferencia de que el caso TSK el error en estado estacionario es cero. En cuestión de implementación en un microcontrolador es mucho más sencilla la arquitectura TSK ya que las salidas son constantes.

Para la implementación de un controlador difuso en microcontroladores y DSP's existen paquetes como el *FuzzyTECH* [5] y *FUDGE* (*Fuzzy Design Generator*), los cuales se introducen las funciones de membresía de entrada y de salida de manera gráfica, como se hizo en MATLAB y generan el código para el microcontrolador o DSP. Son compatibles entre otros con microcontroladores PIC, Motorola y DSP's TI.

Conclusiones y perspectivas

Mediante el conocimiento y aplicación de los conceptos de Lógica Difusa se logró el objetivo de diseñar un controlador difuso para el control de temperatura de un invernadero. A partir de los resultados obtenidos de la arquitectura Mamdani y TSK, concluyo que ambos son comparativamente muy parecidos, pero en cuestión de implementación el TSK (para salidas constantes) es mucho más sencillo si se

genera el código manualmente. En el caso de utilizar paquetes computacionales como *FuzzyTECH* y *FUDGE*, no habrá dicha diferencia.

No cabe duda que el control difuso es una herramienta muy sencilla de aplicar y diseñar para todo tipo de procesos, sin embargo se encontraron importantes deficiencias como lo son:

- La dependencia en la experiencia del experto en el proceso, para un correcto funcionamiento del controlador.
- Una vez obtenida la simulación del sistema no es fácil determinar que cambios se necesitan hacer en las funciones de membresía, reglas difusas, métodos de inferencia y defuzzyficación para poder obtener un resultado de salida deseado. Esto se complica aún más por la no linealidad del controlador difuso.
- La dificultad de garantizar la estabilidad del sistema para cualquier referencia dada, dado que el controlador es no lineal.

Sin embargo, el auge de la lógica difusa sigue en ascenso debido a su gran simplicidad y a los avances logrados para cubrir estas deficiencias.

Anexo 1.

Simulación de las reglas difusas del control de temperatura en matlab

Para utilizar el Toolbox de lógica difusa de MATLAB, teclee en la ventana de comandos "Fuzzy". A continuación se abrirá el Editor FIS donde se implementarán las funciones de membresía tanto de entrada (temperatura) como de salida (válvula).

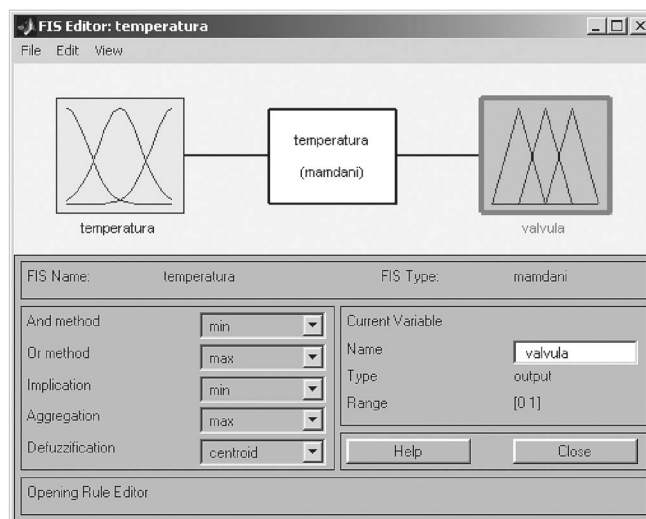


Figura A1. Editor FIS de MATLAB.

El editor FIS tiene también la opción para elegir el método de defuzzyficación que se desea utilizar. Dando doble-click en la función de membresía de entrada y de salida se pueden generar las funciones de membresía tanto de temperatura como de la válvula.

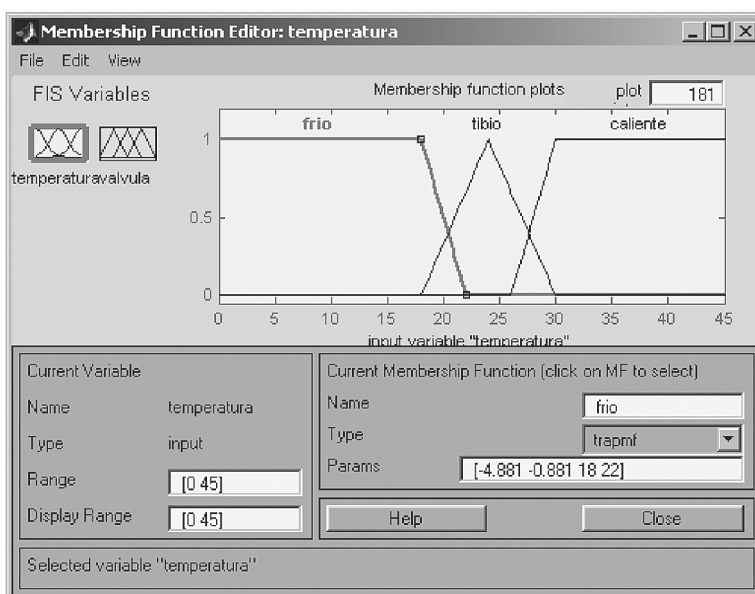


Figura A2. Función de membresía de temperaturas.

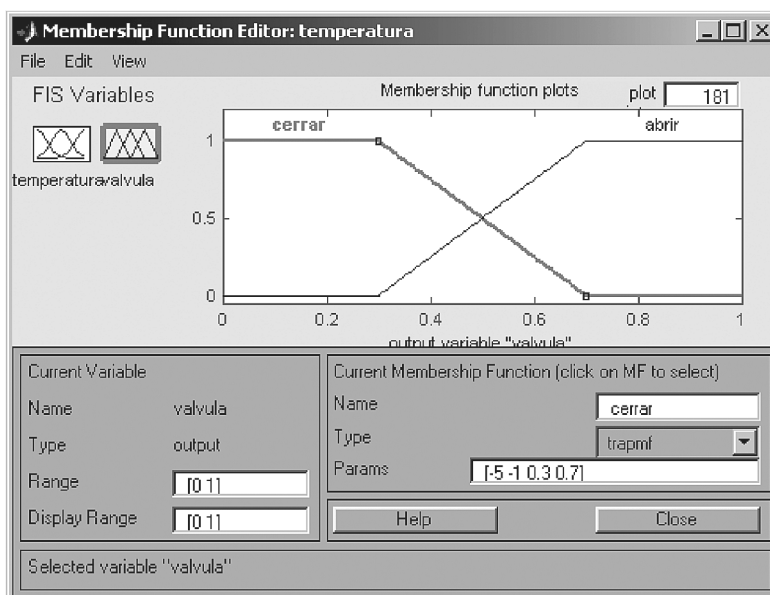


Figura A3. Función de membresía de salida.

En el Editor FIS dando doble clic en la sección “Mamdani” se introducen las reglas del controlador (Tabla 1) y finalmente en “Ver-Reglas” se puede ver la salida defuzzyficada a la válvula para diversas entradas de temperatura.

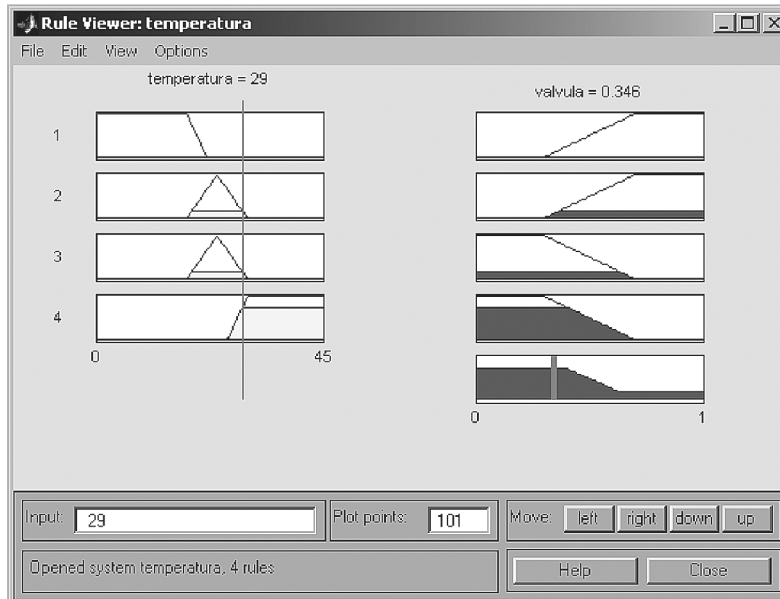


Figura A4. Reglas y defuzzyficación.

Referencias

- [1] Zadeh, L. A., *Information and Control* **1965**, 8(3), 338-353.
- [2] Mamdani, E. H., *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant*, Academic Press: Nueva York, 1974.
- [3] Takagi, T.; Sugeno, M., *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics* **1985**, , 15, 116-132.
- [4] Yen; Langari, R., *Fuzzy Logic: Intelligence, control, and information*, Prentice Hall: Nueva York, 1998.
- [5] Altrock, C. V., *Fuzzy Logic and NeuroFuzzy Applications Explained*, Prentice Hall: Nueva York, 1995.
- [6] Godoy, R. S.. *Diseño y Construcción de un prototipo para una prótesis de mano y su control utilizando alambres con memoria de forma como actuadores de movimiento*, Tesis Doctoral, CINVESTAV, pp. 64-75, 1997.

- [7] So, Wing-Chi; Tse, Chi K.; Lee, Yim Shu, *IEEE Transactions on Power Electronics* **1996**, *11*, 24-26S.
- [8] Pirrello, L.; Yliniemi, L.; Leiviskä, K. Development of a Fuzzy Logic Controller for a Rotary Dryer with Self-Tuning of Scaling Factor. *University of Oulu, Control Engineering Laboratory, Report A No. 17*, **2001**, 15-18.

