

Aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo

Gustavo Adolfo Díaz*
gustavo.diaz@sena.edu.co

Jesús Alfonso López Sotelo**
jalopez@uao.edu.co

Eduardo Caicedo Bravo***
ecaicedo@univalle.edu.co

Fecha de recepción: 16-02-2009

Fecha de selección: 21-04-2009

Fecha de aceptación: 11-04-2009

ABSTRACT

We report the use of fuzzy logic type 1 and 2 for industrial process control, as well as the implementation of an industrial PLC (PLC) and comparisons across the parameters of performance ISE, IAE, control effort. Matlab software is used to develop the machines, a type of fuzzy inference and two kinds Mandami, which helped get the parameters that were sent through a multilayer neural network to the PLC, the utility of the

OPC and for the control of variables Process flow and level

KEYWORDS

PLC, Fuzzy logic type 1, Fuzzy logic type 2, Neural networks, Fuzzy Logic system , OPC Server.

RESUMEN

Se presenta el uso de la lógica fuzzy tipo 1 y 2 para el control de procesos industriales, así como la implementación en un autómata programable

* Profesor de la Universidad Icesi e Instructor del Centro de Electricidad y Automotización Industrial C.E.A.I. del Sena Regional Valle del Cauca.

** Profesor de la Universidad del Valle.

*** Profesor de la Universidad del Valle.

industrial (PLC) y las comparaciones a través de los parámetros de desempeño EFC y IAE. Se utiliza el software Matlab para desarrollar las máquinas de inferencia fuzzy tipo uno y dos tipo Mandami, las cuales permitieron obtener los parámetros que se enviaron a través de una red neuronal multicapa al PLC , con la utilidad del OPC y para el control

de las variables de proceso, flujo y nivel.

PALABRAS CLAVE

Autómata programable, lógica difusa tipo 1, lógica difusa tipo 2, redes neuronales, servidor OPC.

Clasificación Colciencias: Tipo 5

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia el uso de las tecnologías para el control de procesos como el PLC es muy cotidiano y no se conocen mayores avances en lo referente al control de procesos con la lógica difusa tipo 2.

En la década pasada, los sistemas difusos han desplazado a las tecnologías convencionales en muchas aplicaciones científicas y sistemas de ingeniería, especialmente en los sistemas de control y el reconocimiento de patrones. La misma tecnología difusa, en la forma de razonamiento aproximado, está también resurgiendo en la tecnología de información, donde proporciona soporte de decisiones y sistemas expertos con las capacidades de razonamiento poderosos, limitados a un mínimo de reglas.

Los sistemas de lógica difusa están muy extendidos en la tecnología cotidiana, por ejemplo en cámaras digitales, sistemas de aire acondicionado, lavarropas, etc. Los sistemas basados en lógica difusa imitan la forma en que toman decisiones los humanos, con la ventaja de ser mucho más rápidos. Estos sistemas son generalmente robustos y tolerantes a imprecisiones y ruidos en los datos de entrada.

En la aplicación de la lógica difusa se tiene la intención de imitar el razonamiento humano en la programación de computadoras. Con la lógica convencional, las computadoras pueden manipular valores estrictamente duales, como verdadero/falso, sí/no o ligado/desligado. En la lógica difusa se usan modelos matemáticos para representar nociones subjetivas, como caliente/tibio/frío, para valores

concretos que puedan ser manipulados por los ordenadores.

Los conjuntos difusos tipo-2 se usan para modelar incertidumbre e imprecisión. Los conjuntos difusos tipo-2 fueron originalmente propuestos por Zadeh en 1975 y son esencialmente conjuntos “difusos - difusos” en los que los grados de pertenencia son conjuntos difusos tipo-1. En lo referente a control de procesos con lógica difusa tipo 2 en nuestro país existe muy poca información y se quiere comparar con los controladores tradicionales, logrando visualizar las diferencias entre la tipo 1 y la tipo 2.

En este paradigma, también tiene un especial valor la variable del tiempo, ya que los sistemas de control pueden necesitar retroalimentarse en un espacio concreto de tiempo, pueden necesitarse datos anteriores para hacer una evaluación media de la situación en un periodo anterior.

La utilización de sistemas difusos tipo dos en control está justificada cuando existe un alto nivel de incertidumbre, y en estos casos se trata de encontrar mejores resultados que la lógica difusa tradicional.

En este trabajo se plantea la teoría y conceptos básicos de lógica difusa Tipo 2, así como la estructura de un controlador difuso tipo 2 con sus componentes; la implementación en una planta de procesos didáctica del SENA (variables nivel y flujo) y las conclusiones de la experimentación en dicha plataforma.

No se encontraron trabajos similares en plantas reales para control de procesos como nivel y flujo (u otras variables), pues los autores de estas

investigaciones se limitan a simulaciones en software como Matlab.

2. CONTENIDO

2.1 Sistemas de lógica difusa tipo 2

Terminología de FS Tipo 2

Variable primaria

La variable principal de interés se denomina variable primaria y se denota con letras como x y significan temperatura, presión, nivel, etc.

Pertenencia primaria

Cada valor de la variable primaria x tiene una banda (i.e. un intervalo) de valores de pertenencia, se denota

$$J_{x'} = [MF_1(x'), MF_N(x')]$$

Variable secundaria

Cada elemento de la pertenencia primaria se llama variable secundaria y se nota $u \in J_x$, ejemplo u_1, u_2, \dots, u_N

Grado secundario

Es el peso (probabilidad) asignada a cada variable secundaria, escrita así

$$f_{x'}(u_1) = w_{x'1}$$

FS Tipo2 \tilde{A}

Un FM tridimensional con ternas $(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u))$ donde $x \in X, u \in J_x$

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1, \text{ donde } f_x(u) = \mu_{\tilde{A}}(x, u)$$

Función de pertenencia secundaria para x

Una función de pertenencia secundaria para x , es una FS tipo 1 para x también llamado un corte vertical. En la Figura 2.1 gráfica insertada arriba y denotada con a .

Huella de incertidumbre de \tilde{A} : $FOU(\tilde{A})$

Es la unión de todas las pertenencias primarias: el dominio D de \tilde{A} ; el área entre $UMF(\tilde{A})$ y $LMF(\tilde{A})$; Por ejemplo la región sombreada en la Figura 2.1.

MF bajo de \tilde{A} : $LMF(\tilde{A})$ o $\mu_{\tilde{A}}(x)$

Es la banda de abajo de $FOU(\tilde{A})$. Por ejemplo en la Figura 2.1 la línea triangular inferior de la región sombreada que representa la $FOU(\tilde{A})$. También se puede decir que es el límite inferior de una $FOU(\tilde{A})$. [Liang, 2000]

Diferencia entre lógica difusa T1 y T2

La diferencia fundamental entre la lógica difusa tipo1 y tipo 2 está en su definición: Un conjunto difuso A en U puede ser representado como un conjunto de pares ordenados de elementos x , y su valor de pertenencia está dado por:

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\}$$

Donde U es el universo del discurso continuo (por ejemplo, todos los números reales: $U = \mathbb{R}$)

Un conjunto difuso tipo 2 es denotado por \tilde{A} y es caracterizado por una función de pertenencia $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ donde $x \in X$ y $u \in J_x^u \subseteq [0,1]$ y $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$, es definido mediante la ecuación

$$\tilde{A} = \{(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u)) / x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\}$$

Luego se puede afirmar que existe incertidumbre en la lógica difusa T2 tanto en la variable primaria como en la secundaria (ver Figura 2.1), mientras que en la lógica T1 no existe incertidumbre en la variable primaria.

MF Superior de \tilde{A} : $UMF(\tilde{A})$ o $\bar{\mu}_A(x)$

Es la banda superior de $FOU(\tilde{A})$. Por ejemplo en la Figura 2.1 la línea triangular superior de la región sombreada que representa la $FOU(\tilde{A})$. También se puede decir que es el límite superior de una $FOU(\tilde{A})$.

Intervalo FS T2

Un intervalo denotado **FS IT2**, es una FM tridimensional, con todos sus grados secundarios iguales a 1 y descrita completamente por su FOU.

Si $\tilde{A} = 1/_{FOU(\tilde{A})}$

donde esta notación significa que todos los grados secundarios son iguales a 1 para todos los posibles valores de $FOU(\tilde{A})$.

FLS T2

Sistema de lógica difusa tipo 2 representado en la Figura 2.2 y compuesto por cuatro componentes, que allí se detallan [Mendel, 2007].

La lógica difusa Tipo 2 proporciona una medida de dispersión que capta

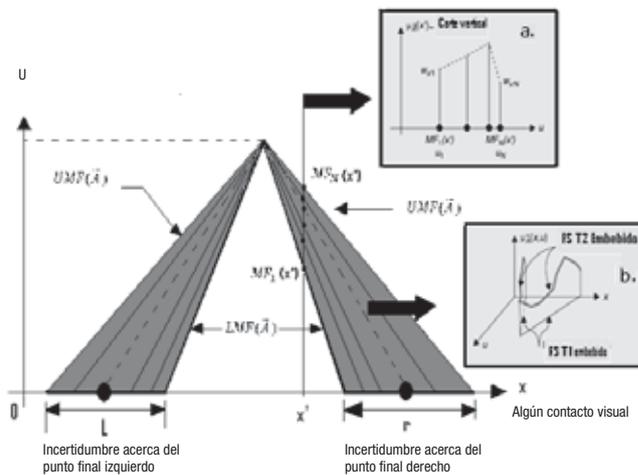


Figura 2.1
Función de pertenencia triangular

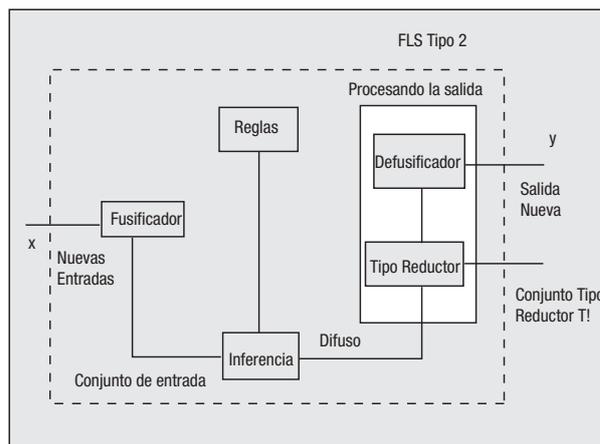


Figura 2.2.
Componentes de un FLS Tipo 2

los efectos de las incertidumbres. Esto parece ser lo más fundamental para el diseño de sistemas que incluye valores de incertidumbre tales como la media y la varianza.

Un FLS T2 basado en reglas contiene cuatro componentes: reglas, fusificación, motor de inferencia y procesador de salida, que están interconectados, como lo muestra la Figura 2.2. Una vez que las reglas han sido establecidas, el FLS puede ser visto como un mapeo de entradas a salidas (El camino sólido de la Figura 2.2, de entradas fijas a salidas fijas) y su mapeo puede ser expresado como $Y = f(x)$. Esta clase de FLS es muy utilizado en aplicaciones de ingeniería de lógica difusa (FL), tal como un controlador y una señal procesada, y es también conocida como un controlador difuso o Sistema difuso T2 (o T1).

Las reglas son la cabeza de un FLS, ellas pueden ser provistas por un experto o sacadas de datos numéricos. En este caso las reglas pueden ser expresadas como una colección de declaraciones de la forma Si- Entonces.

La parte **Si** de una regla es su antecedente, y la parte **Entonces** es su consecuente. Las FSs están asociadas con términos que aparecen en los antecedentes o consecuentes de las reglas, y con las entradas y salidas de las FLS. Las MFs son utilizadas para describir esas FSs, y ellas pueden ser T1 o T2.

Este último nos permite cuantificar los diferentes tipos de incertidumbres que pueden ocurrir en un FLS [Mendel, 2007].

Cuatro formas en las que la incertidumbre puede ocurrir son:

- 1) Las palabras que se utilizan en los antecedentes y los consecuentes en las reglas pueden significar diferentes cosas para diferentes personas.
- 2) Los consecuentes obtenidos por votación de un grupo de expertos suelen ser diferentes para la misma regla, porque los expertos no siempre están de acuerdo.
- 3) Solamente formación de datos ruidosos son habilitados por sintonización (optimización) de los parámetros de un ITS FLS.
- 4) Mediciones de ruido activan el FLS.

Un FLS que está descrito completamente en términos de FS T1 es llamado una FLS T1, mientras que una FLS que está descrita usando FS T2 es llamado FLS T2. FLSs T1 no pueden directamente manejar estas incertidumbres, porque ellos usan FSs T1 que son seguros (ciertos), pues no consideran incertidumbre en los valores de las variables ni en las funciones de pertenencia. Los FLSs T2, por otra parte, son muy útiles en circunstancias donde es difícil determinar con exactitud una MF para una FS; por lo tanto ellas pueden ser utilizadas para manejar esas incertidumbres.

Retornando a la Figura 2.2 del FLS, el fuzificador mapea números fijos en FSs. El necesita activar las reglas que están en términos de variables lingüísticas, las cuales tienen FSs asociadas con ellas. Las entradas para el FLS antes de ser fuzzificadas pueden ser determinadas (ejemplo mediciones perfectas) o indeterminadas (ejemplo mediciones de ruido).

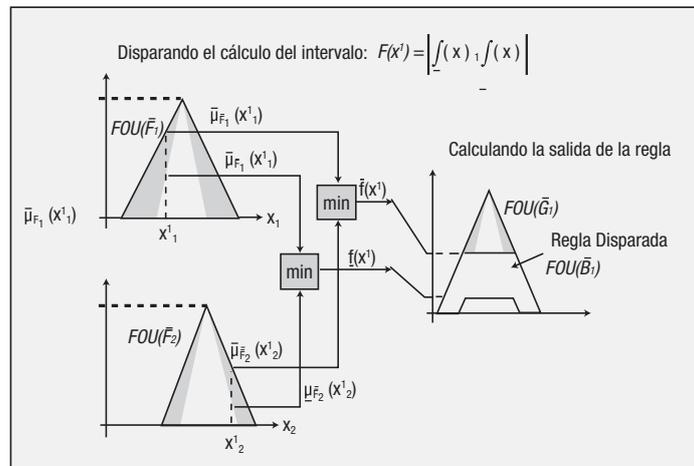


Figura 2.3 Inferencia de FLS T2: intervalo de disparo de salida a la regla FOU

Las funciones de pertenencia FM para FS T2 nos permiten manejar cualquier tipo de medición [Mendel, 2007].

En la Figura 2.3 el cálculo para FLS T2. Ahora cuando $x_1 = x'_1$, la línea vertical para x'_1 , intercepta $FOU(\tilde{F}_1)$ en el intervalo

$[\underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1), \bar{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1)]$; y, para $x_2 = x'_2$, la línea vertical para x'_2 intercepta $FOU(\tilde{F}_2)$ en todos los puntos en el intervalo

$[\underline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2), \bar{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)]$

Dos salidas de nivel son calculadas, un disparo nivel bajo $f(x')$, y un disparo de nivel superior, $\bar{f}(x')$ donde

$$\underline{f}(x') = \min [\underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1), \underline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)]$$

y $\bar{f}(x') = \min [\bar{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1), \bar{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)]$

Lo más importante de esta figura que se puede ver es el resultado de operaciones entrada y antecedente

es un intervalo. El intervalo disparo $F(x')$ está dado por:

$$F(x') = [f(x'), \bar{f}(x')].$$

$f(x')$ Es entonces t-normado con $LMF(\tilde{G})$ y $\bar{f}(x')$ es t-normado con $UMF(\tilde{G})$. Cuando $FOU(\tilde{G})$ es triangular, y la t-norma es el mínimo, entonces el resultado de la regla disparada FOU es la FOU trapezoidal. [Mendel, 2001]

Dos representaciones muy importantes para FS T2

Se puede ver que el conjunto difuso \tilde{A} se puede representar de dos maneras diferentes utilizando los cortes verticales y las funciones embebidas así:

Representación corte vertical

$$\tilde{A} = \bigcup_{x \in X} \text{Corte Vertical}(x) \quad (2-1)$$

Es muy utilizado en computación

Representación corte ondulado

$$\tilde{A} = \bigcup_{x \in X} \text{Embebido FS T2}(j) \quad (2-2)$$

Las representaciones de cortes verticales son muy importantes y básicas para realizar los cálculos (computacionales), mientras que las representaciones de cortes ondulados son básicas para derivaciones teóricas. La última es conocida como el teorema de la representación (RT) de John Mendel. La unión de todos los cortes verticales y la unión de todas las FSs embebidas T1 cubren la totalidad de la FOU.

A pesar de que la RT es muy útil para los desarrollos teóricos, aún no es útil para cálculos debido a que el número de conjuntos embebidos en la unión pueden ser muy grandes o astronómicos. [Mendel, 2007].

Normalmente, la RT se utiliza para llegar a la estructura de un resultado teórico (Ejemplo, la unión de dos FS IT2). Después en la práctica se encuentran los algoritmos para calcular la estructura.

Por un FS IT2, la RT establece que una IT2 FS es la unión de todos los FSs T1 embebidos (incorporados) que cubren su FOU. [Mendel, 2007].

La importancia de este resultado es que nos permite obtener todo acerca de FSs IT2 o sistemas utilizando matemáticas de FS T1. Esto resulta en un tremendo ahorro en tiempo.

Matemáticas de Sistemas difusos T1 para FS IT2

En orden para ver el Árbol de la Figura 2.4 se hace un enfoque a una sola regla "Si x es \tilde{F}^1 entonces y es \tilde{G}^1 ". Si tiene un antecedente y un consecuente y es activada por un número único. La clave para utilizar las matemáticas de FS T1 para obtener una salida de la regla FS IT2 está en un gráfico como el de la Figura 2.3 Se puede ver que

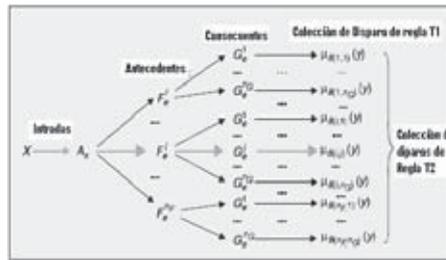


Figura 2.4 Conjunto T1 resultado- regla para todas las combinaciones $n_F \times n_G$

el antecedente se descompone en sus n_F T1 FSs embebidas y el consecuente es descompuesto en sus n_G T1 FSs embebidas. Cada uno de los $n_F \times n_G$ caminos actúa como una inferencia T1. Cuando se toma la unión de todos los resultados de las reglas de conjuntos T1, el resultado es el conjunto disparos de la regla de conjuntos T2. Lo último que se toma es el límite inferior y superior porque cada uno de los conjuntos de los **resultados – regla T1** está enlazado. Para hallar una fórmula para $B(y)$ se requiere calcular los límites superior e inferior y ellos solamente involucran FOUs inferiores y superiores, funciones de pertenencia de antecedentes y consecuentes. Así se puede extender esta gráfica para reglas que tienen más de un antecedente o más reglas y a otros tipos de Fuzzificación [Mendel, 2007].

Comparación de Desfuzzificación T1 y T2

Ahora se puede apreciar cómo el método utilizado para realizar la Desfuzzificación en un Sistema difuso tipo 1 es similar al utilizado en un sistema difuso tipo 2.

Desfuzzificación de un sistema difuso T1

Se calcula el Centroide de cada uno de los consecuentes de reglas del FS T1. Se llama c^l ($l = 1, 2, 3, \dots, M$)

a. Se calcula el disparo de nivel para cada regla. Se llama f^l ($l = 1, 2, 3, \dots, M$)

b. Se hace el siguiente cálculo

$$y_{cos}(x) = \frac{\sum_{l=1}^M c^l f^l}{\sum_{l=1}^M f^l} \quad (2-3)$$

Desfuzzificación en un sistema difuso T2

Los pasos seguidos para la Defuzzificación de un sistema Difuso Tipo 2 son:

a. Cálculo del Centroide de cada uno de los consecuentes de las reglas de FS IT2, usando el algoritmo KM (Karnik - Mendel). Este se llamará así:

$$[y_l^i, y_r^i] \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (2-4)$$

Cálculo del intervalo de disparo de cada regla. Este se llamará así:

$$[f^l, \bar{f}^l] \quad (l = 1, 2, \dots, M) \quad (2-5)$$

b. Se calcula

$$Y_{cos}(x) = [y_l(x), y_r(x)],$$

(2-6), donde $y_l(x)$ es la solución para el siguiente problema de minimización [Mendel, 2001]

$$y_l(x) =$$

$$\min_{y \in [f^l, \bar{f}^l]} \left[\frac{\sum_{l=1}^M y_l^l f^l}{\sum_{l=1}^M f^l} \right] \quad (2-7)$$

Este problema es solucionado utilizando el algoritmo KM, y $y_r(x)$ es la solución del siguiente problema de maximización, el cual se resuelve utilizando el algoritmo KM

$$y_r(x) =$$

$$\max_{y \in [f^l, \bar{f}^l]} \left[\frac{\sum_{l=1}^M y_r^l f^l}{\sum_{l=1}^M f^l} \right] \quad (2-8)$$

Centroide de un FS IT2 y su cálculo Algoritmo de Karnik-Mendel

Sea la FOU la mostrada en la Figura 2.5 usando el RT (Tipo reductor), se calcula el Centroide de todas las FSs T1 embebidas, algunas de las cuales son mostradas con diferentes colores en la gráfica. Porque cada uno de los centroides es un número finito, este conjunto de cálculos conduce a un conjunto de centroides que es llamado el Centroide de \tilde{B} , $C(\tilde{B})$. $C(\tilde{B})$ tiene dos valores uno pequeño c_l y uno grande c_r , así $C(\tilde{B}) = [c_l(\tilde{B}), c_r(\tilde{B})]$. Así, para calcular $C(\tilde{B})$ es necesario solamente calcular c_l y c_r . Se calcula c_l y c_r utilizando dos algoritmos iterativos llamados Algoritmos Karnik-Mendel. Se puede notar que

$C_l = \text{Min}(\text{Centroide de todas FSs T1 embebidos en Fou}(\tilde{B}))$

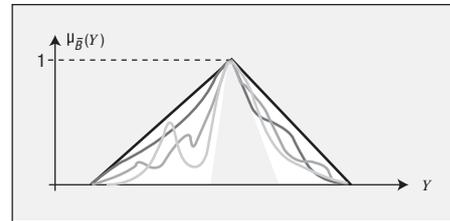


Figura 2.5 FOU y sus FSs T1 embebidos

El valor de c_l se calcula así:

$$c_l = c_l(L) = \frac{\sum_{i=1}^L y_i UMF(\tilde{B}/y_i) + \sum_{i=L+1}^N y_i LMF(\tilde{B}/y_i)}{\sum_{i=1}^L UMF(\tilde{B}/y_i) + \sum_{i=L+1}^N LMF(\tilde{B}/y_i)} \quad (2-9)$$

Uno de los algoritmos KM calcula el punto al cambiar a L, esto se muestra en la Figura 2.6.

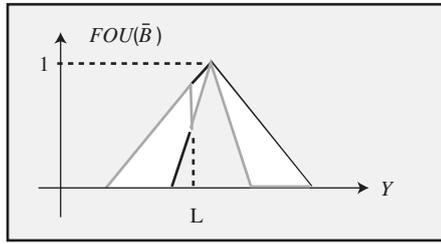


Figura 2.6 La FS T1 embebida de color rojo es usada para calcular $c_r(L)$

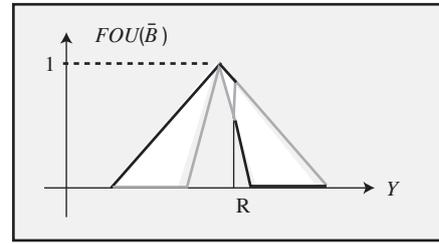


Figura 2.7 La FS T1 embebida de color rojo es usada para calcular $c_r(R)$

Además se puede notar que:

$$C_r = \text{Max} (\text{Centroide de todas las embebidas FSs T1 en } FOU(\tilde{B}))$$

El análisis muestra que c_r se calcula así:

$$c_r = c_r(R) = \frac{\sum_{i=1}^R y_i LMF(\tilde{B}/y_i) + \sum_{i=R+1}^N y_i UMF(\tilde{B}/y_i)}{\sum_{i=1}^R LMF(\tilde{B}/y_i) + \sum_{i=R+1}^N UMF(\tilde{B}/y_i)} \quad (2-10)$$

El otro algoritmo KM calcula el otro punto al cambiar a R, esto se muestra en la Figura 2.7. Referidos a la Figura 2.2 se observa que la salida del bloque de inferencia es procesada por la salida del procesador que consiste de dos etapas, la del Tipo reductor (TR) y la Defuzzificación. Todos los métodos TR son extensiones T2 de métodos de Defuzzificación T1, cada uno de los cuales es basado en el tipo de cálculo del Centroide. Por ejemplo, en los FLS T1, todos los disparos de regla de salida fija pueden ser combinados por

la operación unión, así el Centroide del FS T1 resultante es calculado. Lo anterior es llamado Defuzzificación Centroide. Alternativamente, como la operación unión es computacionalmente costosa, cada disparo de nivel puede ser combinado con el Centroide de su consecuente, por medio de un cálculo distinto de Centroide, llamado Centro de conjuntos de Defuzzificación. El T2 análogo de esas dos clases de Defuzzificación es llamado Centroide TR y Centro de conjuntos TR, el resultado para un FS IT2 es un intervalo fijo $[y_l(x), y_r(x)]$. En la Figura 2.8 se puede apreciar este tipo de computación en FLS T2.

En la Figura 2.8 se puede apreciar que el último cálculo realizado es el

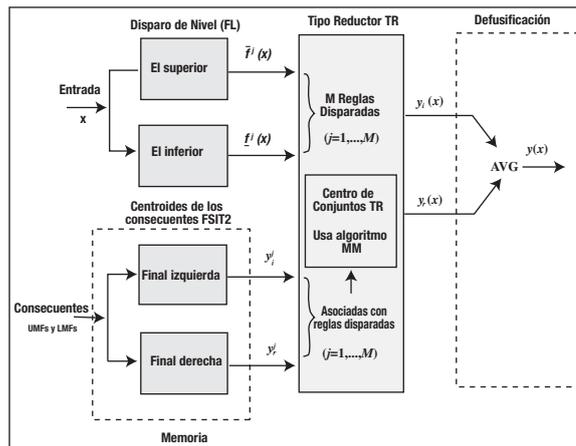


Figura 2.8 Computaciones en un FLS IT2 que usa Centro de conjuntos TR

promedio de $y_l(x)$ y $y_r(x)$, es decir $y = [y_l(x) + y_r(x)]/2$ (2-10) [Mendel, 2002].

3. PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se realizó en una planta de procesos del SENA, en el centro CEAI de la ciudad de Cali. Un diagrama de procesos se muestra en la Figura 3.1.

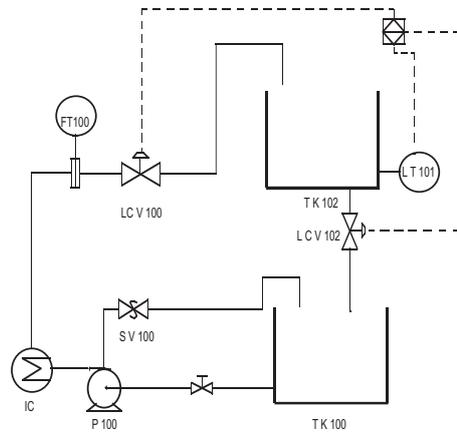
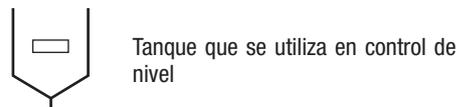
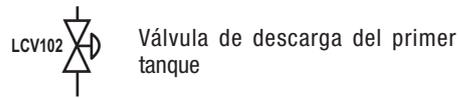
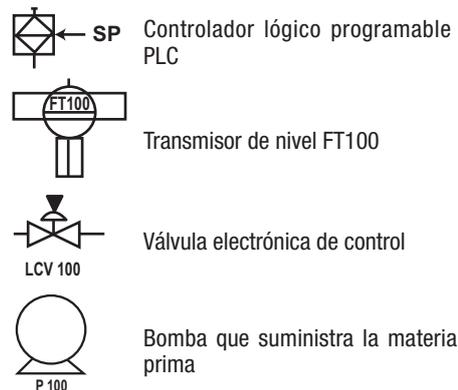


Figura 3.1. Diagrama de proceso.

En la Figura 3.1 se puede apreciar el diagrama de procesos de la plataforma de experimentación.

La simbología de los elementos que aparecen en el gráfico es la siguiente:



Se dispone de dos equipos de control, los cuales permiten realizar las pruebas directamente sobre la planta o en forma remota. La línea punteada que va del transmisor FT100 al PLC indica que se le enviará la señal para que éste establezca el control sobre la válvula y por ende sobre la variable.

4. REDES NEURONALES

Debido al problema que conlleva la implementación de los controladores difusos FLS T1 y T2 en el PLC, hubo la necesidad de hacer uso de una red neuronal para que aprendiera la salida de los controladores (Superficie en R^3) y a través de una rutina se enviara al controlador lógico programable PLC.

Para poder enviarle los parámetros de la superficie al PLC (utilizando el OPC), se empleó una rutina llamada "Neuronal". Esta rutina es llamada por el programa principal ("Main-Routine") y envía la superficie representada en estas ecuaciones para

establecer el control sobre la planta de procesos ya sea nivel o flujo.

La red neuronal implementada en los FLC T1 y T2 es una red elemental artificial con diez neuronas en cada una de las dos capas ocultas, como se puede apreciar en la Figura 4.1.

Las entradas de la red neuronal son el error y la derivada del error representados por x_1 y x_2 , los pesos sinápticos θ_i y θ'_i con $i = 1, 2, \dots, 10$ y los pesos W_{ij} con $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ y $j = 1, 2, 3, \dots, 10$. La salida está representada por la función *salida*.

Las ecuaciones (4-2) a (4-5) describen el proceso de la red neuronal.

$$netdiC1 = X * \theta_i + Bias_i \quad (4-1)$$

$$SC_1 = f(netdi) = \frac{2}{1+e^{-2netdiC1}} - 1 \quad (4-2)$$

$$netdiC_2 = W * SC_1 \quad (4-3)$$

$$SC_2 = \frac{2}{1+e^{-2netdiC2}} - 1 \quad (4-4)$$

$$Salida = SC_2 + Y \quad (4-5)$$

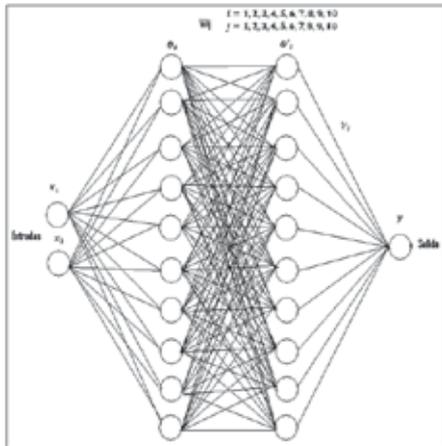


Figura 4.1. Red neuronal aplicada al FLC T1

En la gráfica de la red Neuronal se puede observar que cada capa oculta tiene 10 neuronas. La función de las

neuronas es la del aprendizaje de la salida de FLS T2 o T1 (Superficie) que relaciona las entradas con la salida. [Melin 2002]

Parámetros de desempeño

Para la respuesta en lazo cerrado de un sistema de control por computador se utilizarán los mismos criterios de desempeño que normalmente se usan en el ajuste de las constantes del controlador PID. Estos son:

Integral del cuadrado del error

$$ISE = \int_0^{\infty} (e(t))^2 dt \quad (4-6)$$

Integral del valor Absoluto del error

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4-7)$$

Integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (4-8)$$

Esfuerzo de control

$$EFC = \frac{\sum_{i=1}^N MV}{N} \quad (4-9)$$

IAE es la integral del valor absoluto del error y se medirá en porcentaje, así como el *EFC*.

El parámetro *EFC*, mide el promedio del esfuerzo de la variable manipulada *MV* en porcentaje [Melin, 2002]

La selección de los criterios depende del tipo de respuesta deseada. El error contribuye de manera distinta para cada criterio, así que para un error grande se incrementa el valor del *ISE* más que *IAE*, puesto que en el *ISE* se suman los cuadrados de los errores mientras que en el *IAE* se suman los valores absolutos de los errores.

El *ISE* responde a favor con pequeños rebasamientos en cambios de carga, pero *ISE* dará más tiempos largos. En *ITAE* el tiempo aparece como un factor y por lo tanto *ITAE* penaliza fuertemente los errores que se producen con retraso en el tiempo, pero ignora los errores que ocurren temprano en el tiempo. Diseñando y utilizando *ITAE* nos dará tiempo corto, pero es el más largo rebasamiento de los tres criterios considerados. Con el criterio *IAE* dará un resultado intermedio. La selección de un criterio depende del tipo de respuesta deseada.

En este trabajo de grado se usarán solamente los criterios de desempeño *IAE* y *EFC*.

Otros valores importantes que se tienen en cuenta en este documento son:

T_{ss} : Tiempo en el que la variable de proceso (medido en minutos) alcanza una estabilidad según los criterios de control.

T_s : Tiempo en el cual la variable alcanza por primera vez la referencia SP.

K : Constante de ganancia del error que se logra cuando el sistema es estable.

K_p : Constante de la derivada del error que se logra cuando el sistema es estable.

K_{sat} : Constante de la salida del sistema cuando se logra la estabilidad.

M_p : Valor medido en porcentaje del sobrepaso de la variable de proceso respecto de la referencia SP

Diagrama de pasos que se utilizaron en la implementación de los controladores FLS T1 o FLS T2 en Nivel y en flujo en el PLC

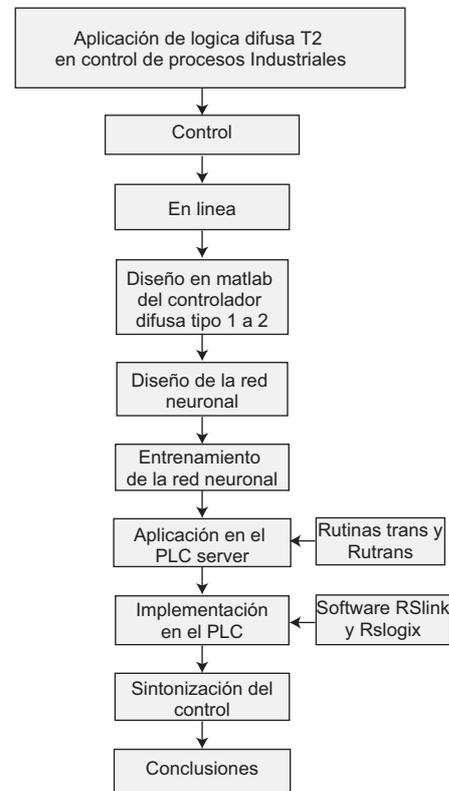


Figura 4.2 Diagrama de bloques de procedimiento para la implementación del control difuso

En la Figura 4.2 se puede apreciar los pasos utilizados en la implementación de los controladores difusos T1 y T2 a través de la red neuronal en el PLC.

5. IMPLEMENTACIONES Y RESULTADOS

5.1 Descripción del controlador Difuso T1 implementado para Nivel

Para controlar la planta respecto de la variable nivel se implementó

un controlador difuso FLS Tipo 1 Mamdani, teniendo como variables de entrada, el error y la derivada del error y como salida la apertura de la válvula **LCV100** de la Figura 2.8.

Para la fuzzificación de la variable “Error” y “derivada del error” se utilizaron funciones de pertenencia Gaussianas Tipo 1. Se declararon 25 reglas entre las entradas y la salida, que se desglosarán más adelante. Para la salida se utilizaron dos funciones de pertenencia Tipo 2 trapezoidales y 3 triangulares. La estructura, los conjuntos asociados y las reglas se presentan a continuación. La Figura 5.1 representa la estructura del FLS T1 para el control de nivel.

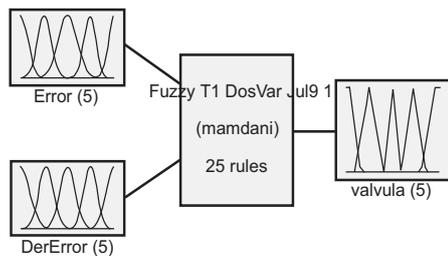


Figura 5.1 Sistema difuso FLS T1 con 2 entradas y 1 salida para el control de nivel

En el sistema FLS T1 se aprecia que las entradas Error y DerError están representadas en la fuzzificación con 5 funciones de pertenencia Gaussianas tipo 1 y la salida con 3 triangulares y 2 trapezoidales tipo 1. Se han implementado 25 reglas entre las entradas y la salida y el conectivo lógico utilizado para el enlace es y. [King, 1999]

En el sistema FLS T1 se aprecia que las entradas Error y DerError están representadas en la fuzzificación con 5 funciones de pertenencia Gaussianas tipo 1 y la salida con 3 triangulares y 2 trapezoidales tipo 1.

El conjunto de fuzzificación asociado a la variable “Error” se presenta en la Figura 5.2 con 5 funciones de pertenencia Gaussianas T1 (con las etiquetas lingüísticas, MuNeg, Neg, Cero, Pos y MuPos,) teniendo en cuenta el intervalo de incertidumbre de la variable.

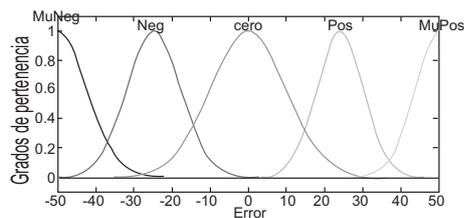


Figura 5.2 Funciones de pertenencia para FLS T1 para el Error

El conjunto de fuzzificación asociado a la variable “Derivada del error” se puede apreciar en la Figura 5.3, en la cual se ha determinado con cinco funciones de pertenencia Gaussianas (con las etiquetas lingüísticas, MNegativo, PocNeg, Cero, PocPos y MuPositivo,).

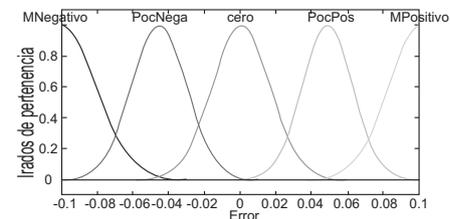


Figura 5.3 Funciones de Pertenencia para la variable DerError del FLS T1

El conjunto de fuzzificación asociado a la salida “válvula (apertura)” se puede ver en la Figura 5.4, con 3 funciones de pertenencia triangulares (con etiquetas lingüísticas CerrSuav, Nocambio y AbreSuav) y 2 funciones trapezoidales (con etiquetas lingüísticas CerrRap y AbreRap).

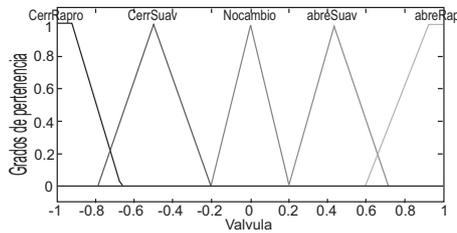


Figura 5.4 Funciones de pertenencia para la salida del FLS T1 para el control de la planta

Resultados obtenidos al implementar FLS T1 del sistema real

Con los datos tomados del PLC cuando se aplica el controlador FLS T1 a la planta de procesos se construye la gráfica de la Figura 5-5, que relaciona las curvas de las variables PV, MV y SP.

Para el análisis de los datos se calculan los parámetros de desempeño IAE y EFC, además de las constantes como el tiempo de establecimiento (T_{ss}) tiempo subida (Alcance de la referencia por primera vez) T_s , el sobrepaso (MP), el error de estado estacionario (E_{ss}), constante del error (K), constante de la derivada del error (K_d), y constante de salida (K_{sal}). Estos valores se muestran en la Tabla 5-1.

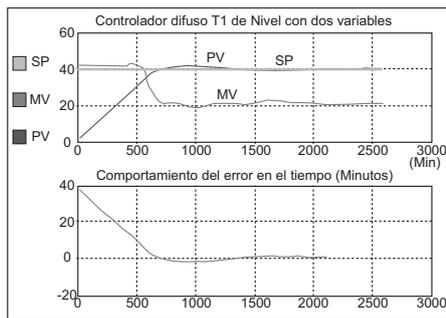


Figura 5.5 Respuesta de la planta de nivel al controlador difuso FLS T1

En la Tabla 5-1 se pueden apreciar los resultados de los parámetros de

desempeño. Se logra que el error de estado estacionario sea cero y el tiempo de establecimiento es de 6.22 minutos, ya que la curva PV tiene dos oscilaciones antes de alcanzar el estado estacionario. Sin embargo el sistema es estable. El sobrepaso MP es de 1% respecto del SP.

Tabla 5.1 Parámetros de desempeño del FLS T1

FLS	IAE %	EFC %	T_{ss}	T_s	MP %
T 1	7.629	25.733	6.2min	1 min	1

5.2 Descripción del controlador Difuso T2 implementado

Para controlar la planta respecto de la variable nivel se implementó un controlador difuso Tipo 2 Mamdani, teniendo como variables de entrada, el error y la derivada del error y como salida la apertura de la válvula LCV100 de la Figura 2.8.

Para la fuzzificación de la variable “Error” y “derivada del error” se utilizaron funciones de pertenencia Gaussianas Tipo 2. Hubo necesidad de establecer, según la información extractada de un experto, 25 reglas que relacionan la entrada y la salida, que se desglosarán más adelante. Para la salida se utilizaron dos funciones de pertenencia Tipo 2 trapezoidales y 3 triangulares. La estructura, los conjuntos asociados y las reglas se presentan a continuación en la Figura 5.6 [Castro, 2006]

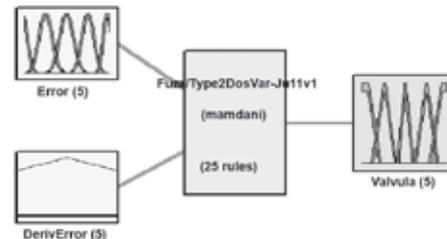


Figura 5.6 Sistema Tipo 2; Dos entradas, una salida y 25 reglas

El conjunto de fuzzificación asociado a la variable “Error” se presenta en la Figura 5.7 con cinco funciones de pertenencia Gaussianas (con las etiquetas lingüísticas, MuNeg, Negat, Cero, Posi y MuPos,) teniendo en cuenta el intervalo de incertidumbre de la variable. Se utilizó la herramienta “Interval Type-2 Fuzzy Logic Toolbox” autorizada por el doctor Oscar Castillo, profesor de posgrado del Instituto Tecnológico de Tijuana, en México.

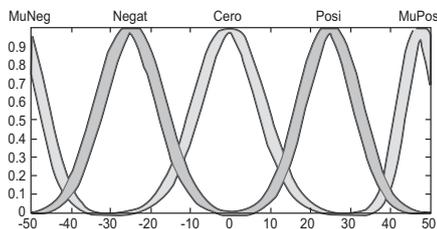


Figura 5.7 Fuzzificación de la entrada “El Error”

El conjunto de fuzzificación asociado a la variable “Derivada del error” se puede apreciar en la Figura 5.8, en la cual se ha tenido en cuenta después de varias pruebas cinco funciones de pertenencia Gaussianas (con las etiquetas lingüísticas, MuNeg, PoNegat, Cero, PoPos y MuPos,).

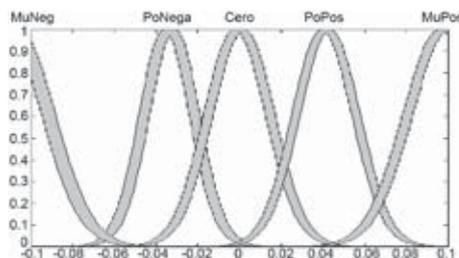


Figura 5.8 Fuzzificación de la entrada “Derivada del Error”

El conjunto de fuzzificación asociado a la salida “válvula (apertura)” se puede ver en la Figura 5.9, con 3 funciones de pertenencia triangulares

(con etiquetas lingüísticas CerrSuav, Nocambio y AbreSuave) y 2 funciones trapezoidales (con etiquetas lingüísticas (cerrRap y AbrRap) [Castro, 2006]

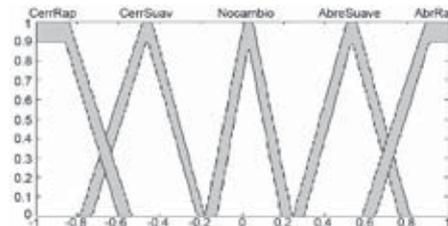


Figura 5.9 Fuzzificación de la salida “válvula”

Respuesta en el tiempo del sistema real

Después de implementar el controlador difuso T2 en el autómata programable se toman los datos relacionados con la referencia (Set point SP), la variable manipulada (el nivel MV) y la variable del proceso (PV), del PLC y se grafica la respuesta en el tiempo: En la Figura 5.10 se aprecian los resultados.

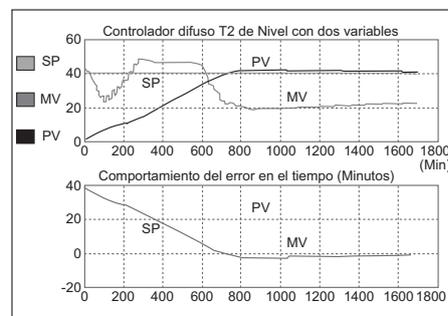


Figura 5.10 Respuesta en el tiempo de la planta según FLS T2 para nivel

Para el análisis de los datos se calculan los parámetros de desempeño IAE y EFC, además del tiempo de establecimiento (T_{ss}) tiempo de alcance de la referencia T_S , el sobrepaso (MP), el error de estado estacionario

(E_{ss}). Estos valores se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Parámetros de desempeño del FLS T2

FLS	IAE (%)	EFC (%)	T_{ss} (min)	T_s (Min)	MP (%)	E_{ss} (%)
T2	5.23	24.78	3.12	1.40	1%	0

La curva de la parte inferior de la Figura 5.10 muestra el comportamiento de error durante la experimentación, iniciando con un valor grande del 40% hasta llegar a ser cero en 3.12 minutos. El sistema es muy estable.

La variable manipulada MV inicia en 42% y termina en 25%, lográndose con esto que la válvula tenga un mínimo de esfuerzo en adelante. Las constantes en la tabla del error, de la derivada del error y de la salida son aquellas que tendrá el sistema difuso T2 cuando se alcanza la estabilidad.

Análisis de los parámetros de desempeño de los FLS T1 y T2 en nivel

Teniendo como base las tablas de los parámetros de desempeño de los controladores Difusos FLS T1 y T2 se puede hacer el siguiente análisis, según la Tabla 5.3.

- Los procesos que se desee controlar de una forma precisa es necesario que presenten una etapa de realimentación, para reducir en gran medida el margen de error.
- Los tiempos de establecimiento también son menores en el FLS T2 que en el T1po 2 (6.12min respecto de 3.12 min), este tiempo casi es duplicado por el FLS T1 respecto del T2. Así el sistema reacciona más rápido hasta llegar

a tener un error de cero en estado estacionario.

- El esfuerzo de control es mucho menor en el Controlador Difuso tipo 2, es decir la energía utilizada por este controlador es menor respecto del Difuso tipo 1, pues existe una diferencia de 0.953%, así la válvula tiene un mejor comportamiento.
- Respecto de los tiempos de subida T_s es más rápido el controlador tipo 1, pero en los sobrepasos los valores son iguales 1%. Esto lo equilibra el FLS T2 con su mejor comportamiento al alcanzar en menor tiempo el valor deseado, es decir el sistema demora más tiempo inicialmente pero después logra un mejor comportamiento.
- En el parámetro IAE se puede apreciar que el Difuso tipo 2 es menor que el tipo 5.23 contra 7.62 (Diferencia de 2.39), sin embargo en ambos casos se obtienen muy buenos resultados. El hecho de que el IAE sea menor significa que la suma de los valores absolutos (para evitar el signo negativo) de los errores son más bajos y como se suman positivos se nota claramente que la diferencia no es muy alta. Estos valores se pueden apreciar en la Figura 5.11.

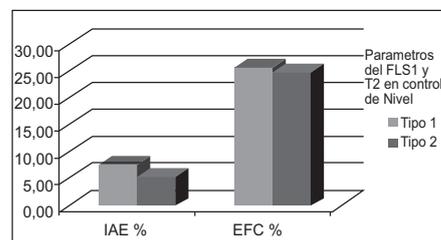


Figura 5.11 Parámetros de desempeño de los controladores FLS T1 y T2 Nivel

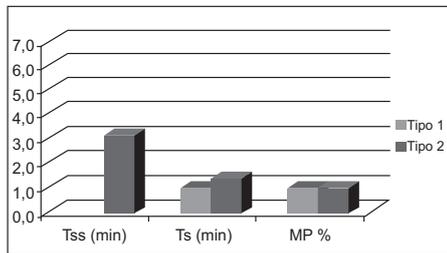


Figura 5.12 Parámetros T_{ss} , T_s y MP para los FLS T1 y T2 en Nivel

En la Figura 5.12 se pueden apreciar los parámetros de tiempos de establecimiento, tiempo de subida y sobrepaso de los FLS de la Tabla 5-3.

Tabla 5.3 Parámetros de desempeño del FLS T1 y T2 en nivel

FLS	IAE (%)	EFC (%)	T_{ss} (min)	T_s (min)	MP (%)	E_{ss} (%)
T1	7.629	25.733	6.2	1	1	0
T2	5.23	24.78	3.12	1.40	1	0

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar los controladores difusos tipo 1 y tipo 2, en control de procesos industriales en la planta de experimentación del SENA, se puede concluir lo siguiente:

- Los parámetros de desempeño como el IAE (Integral del valor absoluto del error) y el EFC (esfuerzo de control) son menores en el controlador difuso T2 que en el T1, como se puede apreciar en la Tabla 5.3, lo cual implica un mejor desempeño del FLS T2 en tiempo y energía necesaria.
- El manejo de la lógica difusa tipo 2 debido a su forma de trabajo, con parámetros difusos (relativos), permite obtener una mayor versatilidad en el control de parámetros de medición del flujo y nivel en esta

planta, los cuales se encuentran en una variación constante, con lo que un proceso muy sistemático puede generar mayor error, aduciendo que es mejor el control en procesos reales (como nivel y flujo) con muchas interferencias y dificultades en el controlador Difuso tipo 2 que en el T1, como se aprecia en las Figuras 5.5 y 5.10. Lo anterior se puede afirmar pues en la investigación la mayoría de los casos fueron tratados a nivel de simulación y no se involucran dentro de ellos verdaderas incertidumbres como las que aparecen en un proceso real.

- El desarrollo de los controladores difusos T1 y T2 resultaron más económicos en este trabajo que los convencionales (PID) por su diseño, ya que no se necesitaron módulos adicionales en el PLC (estos son obligatorios en el diseño y montaje de un PID). En la experimentación solo se requirió dos rutinas para la implementación de los controladores difusos T1 y T2.
- Los tiempos de respuesta y establecimiento son menores en los controladores Difuso T2 que en los Difuso T1, donde se observa que reaccionan con mayor exactitud a problemas de incertidumbre ocasionados por interferencias y otros factores que en ocasiones no son tenidos en cuenta. Así mismo se puede afirmar que los sobrepasos máximos son iguales en ambos, como se puede apreciar en la Tabla 5.3. También se puede afirmar entonces que al aplicar unas cuantas reglas a los controladores se abarca una gran cantidad de complejidades.

- La implementación del controlador difuso T2 requirió de mayor tiempo y depuración debido a su estructura, pues presenta incertidumbre tanto a nivel de las variables primarias “el error y la derivada del error” tanto en flujo y nivel así como de sus variables secundarias pertinentes (Ver Figuras 5.7, 5.8 y 5.9).
- Dentro de la investigación del estado del arte de este trabajo se encontró que la mayoría de los resultados fueron obtenidos a partir de simulaciones en un software como la de Matlab y no en otras plantas reales o similares a la del SENA.
- La realización de los controladores Difusos T1 y T2 requirió de la ayuda de un experto en la planta de procesos del SENA para definir las funciones de pertenencia y las reglas (se construyeron 25 reglas para cada controlador) confiables, que relacionaran las entradas y la salida.
- La implementación de la red neuronal en el PLC se realizó para el aprendizaje de la superficie de la salida del controlador difuso (T1 o T2), que relaciona las dos entradas (error y derivada del error) y la salida (válvula). Lo anterior se hizo mediante las ecuaciones 4-1 a 4-5, con dos rutinas, estableciendo comunicación directa entre Matlab y el PLC mediante el driver OPC. No se implementaron directamente los controladores difusos en el PLC, porque se quería observar la aplicación del aprendizaje de la red neuronal de la respuesta de los controladores mencionados, además la implementación directa se plantea como un nuevo trabajo de investigación.
- Una desventaja, que se tuvo en la implementación de los controladores difusos, fue el tiempo dedicado a la depuración y simulación para lograr los mejores resultados en la planta de procesos.
- Para la implementación de los controladores difusos T1 y T2 se notó que los elementos teóricos de la lógica difusa tipo 2 presentan un nivel de complejidad mucho más alto que los de la tipo 1.

6. EXPECTATIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Después del trabajo realizado quedan expectativas por cubrir, ya que el campo es nuevo y se presentan muchos interrogantes. Entre los futuros trabajos a realizar se podrían nombrar los siguientes:

- La implementación completa del control difuso tipo 1 en el PLC, es decir las funciones de pertenencia y toda la estructura del FLS T1 implementada en el PLC.
- Implementación completa del control difuso tipo 2 en el PLC, es decir las funciones de pertenencia y toda la estructura del FLS T2 implementada en el PLC.
- Incorporación de los conceptos de estabilidad de Liapunov en el control de procesos industriales, a través de los controladores difusos tipo 1 y tipo 2.
- Realizar un desarrollo propio para la implementación de los sistemas difusos T2, sin utilizar los que se hicieron para el software Matlab.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. P. Melin and O. Castillo. Intelligent control of non-linear dynamic plants using type-2 fuzzy logic and neural networks. Proceedings of the Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2002
2. Juan R. Castro. "Interval Type-2 Fuzzy Logic Toolbox". Proceedings of International Seminar on Computational Intelligence, pp.100-108. Tijuana Institute of Technology. October 2006
3. Q. Liang and J. Mendel, "Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design". IEEE Transactions Fuzzy Systems, vol. 8, pp. 535-550, 2000
4. J. Mendel. Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions. NJ: Prentice-Hall, 2001.
5. Jerry M. Mendel. "Type 2 Fuzzy set and systems: An Overview". IEEE Computational Intelligence Magazine- February 2007.

CURRÍCULOS

Eduardo Caicedo Bravo. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle de Cali Colombia; Máster en Tecnologías de la Información en Fabricación y Doctor en Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Director del Grupo de Investigación Percepción y Sistemas Inteligentes, Profesor Titular de la Universidad del Valle. Líneas de interés: Inteligencia Artificial, Robótica e Inteligencia Computacional.

Jesús Alfonso López. Nacido en Cali en 1972, obtuvo su grado como Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle en 1996, posteriormente se graduó como Magíster en Automática en la misma Universidad en el año 1998, recientemente obtuvo su grado como Doctor en Ingeniería en la Universidad del Valle en el año 2007. Sus áreas de interés son: Las Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones, Lógica difusa y sus aplicaciones, Inteligencia de enjambres y sus aplicaciones, el control automático, la Identificación de sistemas, la Enseñanza de la inteligencia computacional y la enseñanza del control automático. Es miembro profesional de la IEEE y pertenece a la sociedad de inteligencia computacional de la IEEE. Actualmente está vinculado a la Universidad Autónoma de Occidente como docente de planta y director del programa de Ingeniería Mecatrónica

Gustavo Adolfo Díaz. Licenciado en Matemáticas de la Universidad Santiago de Cali; Especialista en Matemáticas Avanzadas de la Universidad Nacional; Especialista en Sistemas Digitales y Computadoras de la Universidad del Valle; Especialista en Automatización Industrial de la Universidad del Valle; Candidato a obtener el título de Magíster en Ingenierías con énfasis en Automática de la Universidad del Valle. Actualmente se desempeña como Profesor H.C. de la Universidad ICESI y Profesor T.C. del SENA Centro CEAI del Valle. ☀