

# CONTROL EN CASCADA POR MÉTODOS DIFUSOS

JOSÉ DAVID GRAJALES\*  
DANIEL FELIPE LÓPEZ\*  
JOAQUÍN EMILIO MUÑOZ\*  
RIGOBERTO MALDONADO\*\*

## RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de un control en cascada de flujo y nivel por métodos de lógica difusa, evaluando los algoritmos de control Mamdani y Takagi-Sugeno implementados en un sistema de mosto para la fabricación de etanol. Los algoritmos de control fueron previamente simulados en MATLAB y desarrollados en la plataforma de programación gráfica de LabVIEW 7.1 de National Instruments.

**PALABRAS CLAVE:** control difuso; control en cascada; algoritmo de control Mamdani; algoritmo de control Takagi-Sugeno.

## ABSTRACT

This article describes the development of a flow and level cascade control by diffuse methods, evaluating the Mamdani and Takagi-Sugeno control algorithms. They were implemented in the system for the ethanol manufacture. The algorithms were simulated with MATLAB 5.3 and developed in the graphical programming environment of LabVIEW 7.1, National Instruments.

**KEY WORDS:** fuzzy control; cascade control; Mamdani control algorithm; Takagi-Sugeno control algorithm.

---

\* Ingeniero en Instrumentación y Control, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. josedg1984@gmail.com; daniel\_lopez\_montes@yahoo.es; uaco1781@yahoo.es

\*\* Ingeniero Especialista en Automatización Industrial, Universidad de Antioquia. Profesor, Escuela de Ingeniería de Antioquia. ribemat@yahoo.es

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, y de modo creciente con el tiempo, el desarrollo de la técnica de control automático se ha caracterizado por los esfuerzos encaminados a perfeccionar la operación de los procesos productivos, de modo que exhiban la mejor calidad posible en su comportamiento. Esto supone la necesidad de abordar teórica y prácticamente sistemas con mayor complejidad, la cual se manifiesta en las descripciones matemáticas, criterios de comportamiento, así como en la elaboración y ejecución de acciones conducentes a alcanzar ese comportamiento deseado, basado en el diseño de controladores convencionales, adaptativos y evolutivos, en la inteligencia artificial, entre otros.

En la actualidad progresa el desarrollo de algoritmos más complejos para el control de dichos procesos y ello requiere técnicas más avanzadas entre las cuales la más importante es la lógica difusa. Ésta se clasifica como parte de la inteligencia artificial, ya que es una forma de razonamiento lógico que permite incorporar en la automatización esquemas de razonamiento propios del hombre, es decir, un controlador difuso típico infiere los consecuentes de un conjunto de reglas según conocimiento que el operador tenga del proceso; el razonamiento se puede realizar en paralelo y se obtiene como resultado una sencilla suma lógica.

En este trabajo se desarrolla una serie de algoritmos de control por técnicas de lógica difusa, con la cual se logra realizar un eficiente control en cascada de flujo y nivel, tomando como variable principal o primaria el nivel y como secundaria el flujo.

Inicialmente se identificó el sistema por métodos no paramétricos, utilizando la curva de reacción de la planta ante una excitación a la entrada del sistema. De este modo se obtuvo un modelo de primer orden y otro de segundo orden para flujo, y para nivel un modelo de orden uno, ya que este se comporta como una planta puramente capacitiva.

Para diseñar los controladores que regulan el sistema se utilizaron ecuaciones en diferencias que fueron simuladas con MATLAB. Los controladores con mejor desempeño fueron seleccionados e implementados posteriormente en LabVIEW.

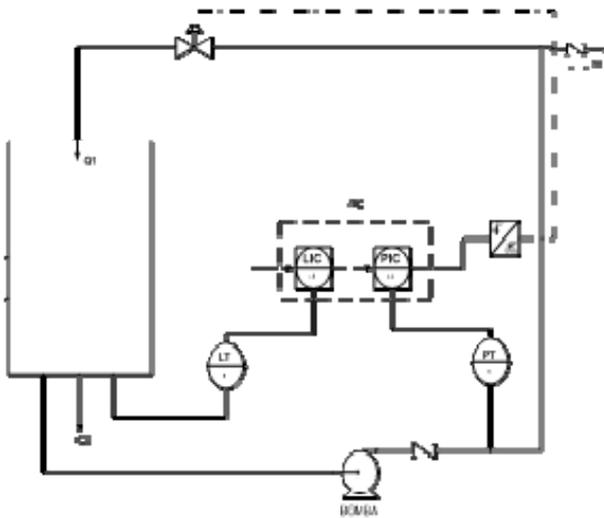
Para seleccionar los mejores controladores se hace énfasis de manera minuciosa en las parejas de controladores. Esto garantiza que el ciclo interno sea el que regule las perturbaciones y así no trasciende al ciclo primario.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se plantean la identificación del sistema; en la sección 3, el diseño de controladores; en la sección 4, la simulación del sistema; en la sección 5, la implementación y funcionamiento de los algoritmos, la 6 muestra el análisis de resultados y la 7 contiene las conclusiones.

## 2. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA EN CASCADA DE FLUJO Y NIVEL

Se denomina *identificación* a la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y posibles perturbaciones.

Se deben dejar claros varios aspectos en cuanto a la construcción de un modelo. Éste se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, por lo tanto, es una representación parcial de la realidad, para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin. Para el caso particular de este proyecto, se identificó el modelo dinámico del sistema en cascada de flujo y nivel, tomando datos simultáneamente de dichas variables, como se observa en la figura 1, donde LT es transmisor de nivel, FT transmisor de flujo, Q1 flujo de entrada, PC computador, Q2 flujo de salida, LIC controlador e indicador de nivel, FIC controlador e indicador de flujo.



**Figura 1.** Diagrama de instrumentación del proceso utilizado

En este caso se utiliza un método no paramétrico aplicando análisis transitorio, usando como modelo la respuesta del sistema ante una entrada escalón.

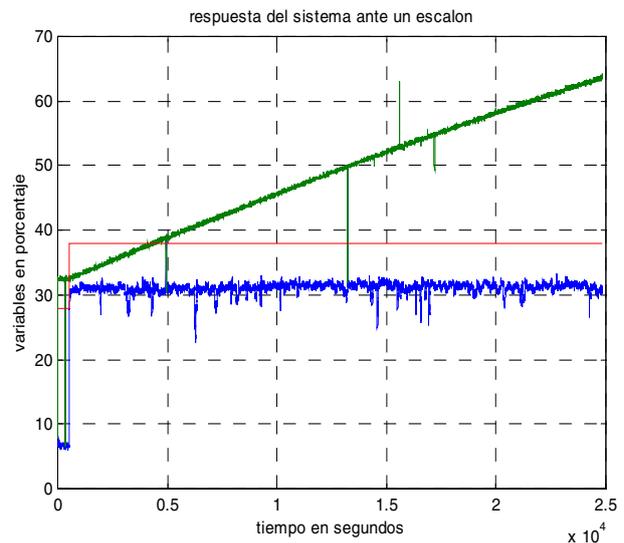
## 2.1 Identificación de planta de primer orden

La función de transferencia correspondiente a esta planta está dada por

$$G_{f(s)} = \frac{y_s}{u_s} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

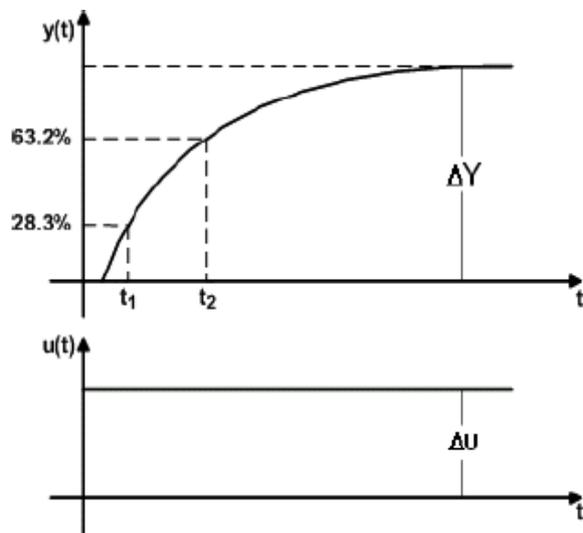
En donde  $K$  = ganancia de la planta,  $\tau$  = constante de tiempo,  $\theta$  = retardo o tiempo muerto,  $y(t)$  es la salida del sistema y  $u(t)$  es la entrada.

Para estimar este modelo se hace un análisis sobre las diferentes curvas que se obtienen. Después de aplicar varios cambios en escalón de magnitudes apropiadas, estos cambios producirán una reacción en el sistema de flujo y nivel, la cual se observa en las diferentes curvas. Una de estas curvas es la que se representa en la figura 2, donde el nivel del tanque está representado por la línea verde, el flujo por la línea azul y la línea roja continua que representa el escalón del 10 %.



**Figura 2.** Respuesta de las plantas continuas ante una entrada escalón (28 % al 38 %)

En las curvas obtenidas (figura 2) como respuesta se eligen dos puntos representativos. Por lo general, estos puntos son aquellos para los cuales la respuesta alcanza el 28,3 % y el 63,2 % de su valor final (es la sección más lineal de la curva), estos puntos se toman del tiempo transcurrido a partir del momento de aplicar un escalón y la respuesta de estado estable del sistema en lazo abierto.



**Figura 3.** Curva de reacción para sistema de primer orden

Con los datos obtenidos en la figura 3 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\theta' + \frac{\tau}{3} = t_1 \quad (2)$$

$$\theta' + \tau = t_2 \quad (3)$$

Los valores de  $t_1$  y de  $t_2$  se leen directamente de las curvas que dan las gráficas. Resolviendo simultáneamente las ecuaciones 2) y 3) se estiman los valores de  $\theta'$  y  $\tau$ .

El valor de la ganancia  $K$  se obtiene mediante el cociente  $\Delta y/\Delta x$  que se interpreta como el cociente entre el cambio de la variable de salida y el cambio en la variable de entrada (valor del escalón de entrada).

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4)$$

El modelo se obtiene reemplazando los valores de  $K$ ,  $\theta'$  y  $\tau$  en la ecuación inicial.

En este caso particular, promediando los modelos de varias curvas se obtiene la siguiente función de transferencia para una planta de primer orden.

$$G_{f(s)} = \frac{2.4062e^{-3.214s}}{12.2507s + 1} \quad (5)$$

## 2.2 Identificación de planta de segundo orden

La función de transferencia para una planta de segundo orden con retardo está dada por

$$G_{p(s)} = \frac{KW_n^2 e^{\theta s}}{s^2 + 2\xi W_n s + W_n^2} \quad \text{para } \xi < 1 \quad (6)$$

$$G_{p(s)} = \frac{Ke^{\theta s}}{(t_1 s + 1)(t_2 s + 1)} \quad \text{para } \xi \geq 1 \quad (7)$$

En donde  $t_{1,2} = \frac{\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}}{W_n}$  8) y  $K = \frac{\Delta y}{\Delta x}$

Siendo  $K$  = Ganancia de la planta

$W_n$  = Frecuencia natural

$\xi$  = Coeficiente de amortiguamiento

$\theta'$  = Tiempo muerto de la planta

$t_1$  y  $t_2$  = Constantes de tiempo

El procedimiento para estimar este modelo es muy similar al anterior de primer orden. En este caso se eligen tres puntos representativos sobre la curva y no dos como en el de primer orden de 28,3 % y 63,2 %. Los tres puntos corresponden a aquellos para los cuales la respuesta del sistema ha alcanzado el 15 %, 45 % y 75 % del valor total del cambio experimentado por el sistema ante la aplicación del escalón, como se indica en la figura 4.

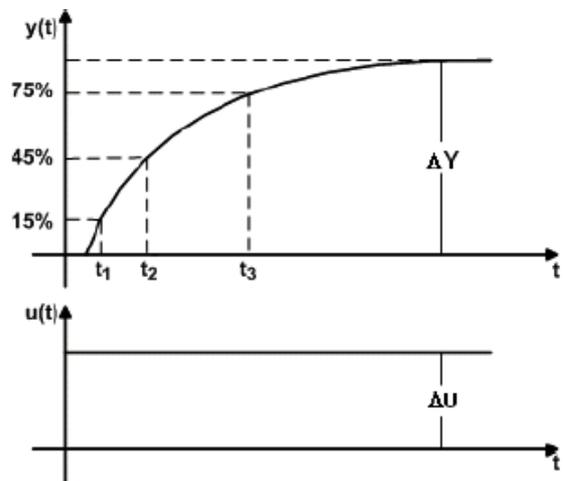


Figura 4. Curva de reacción para sistema de segundo orden

De la figura 4 se obtienen los siguientes parámetros.

$\Delta y$  = Cambio en la salida de planta.

$\Delta U$  = Magnitud del escalón aplicado.

$t_1$  = Tiempo requerido para que la respuesta alcance el 15 % del cambio total.

$t_2$  = Tiempo requerido para que la respuesta alcance el 45 % del cambio total.



$t_3$  = Tiempo requerido para que la respuesta alcance el 75 % del cambio total.

Con los valores estimados para  $\Delta y$ ,  $\Delta U$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  se calculan los parámetros del modelo experimental de la planta utilizando las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{0,0805 - 5,547(0,475 - x)^2}{x - 0,356} \quad (10)$$

$$f_2(\xi) = 2,6\xi - 0,6 \quad \text{para } \xi \geq 1 \quad (11)$$

$$f_2(\xi) = 0,708(2,811)^\xi \quad \text{para } \xi < 1 \quad (12)$$

$$W_n = \frac{f_2(\xi)}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

$$f_3(\xi) = 0,922(1,66)^\xi \quad (14)$$

$$\theta = t_2 - \frac{f_3(\xi)}{W_n} \quad (15)$$

Los valores de los parámetros estimados con las ecuaciones 10), 13) y 15) se reemplazan en la ecuación 6) o en la ecuación 7) según sea el valor de  $\xi$  (coeficiente de amortiguamiento) y así se obtiene el modelo experimental de la planta.

Para esta planta de segundo orden la función de transferencia hallada con un valor  $\theta = 0$ , ha sido la siguiente:

$$G_{f(s)} = \frac{0,055141}{s^2 + 0,34275s + 0,022916} \quad (16)$$

Los anteriores modelos corresponden a la variable de flujo. Para la variable de nivel su identificación cambia, ya que esta variable se comporta como una planta puramente capacitiva (elemento capacitivo es aquel en donde se almacena masa o energía). La capacidad puede presentarse en dife-

rentes formas, pero sus propiedades son universales en cuanto al control automático se refiere.

La función de transferencia de un sistema puramente capacitivo o integrador puro se estima con un procedimiento similar a los dos anteriores. La entrada al sistema es el escalón  $u(t) = U\Delta$  y la salida es la rampa  $y(t) = Bt$ . En la figura 5 se muestra la respuesta ante una entrada escalón [1].

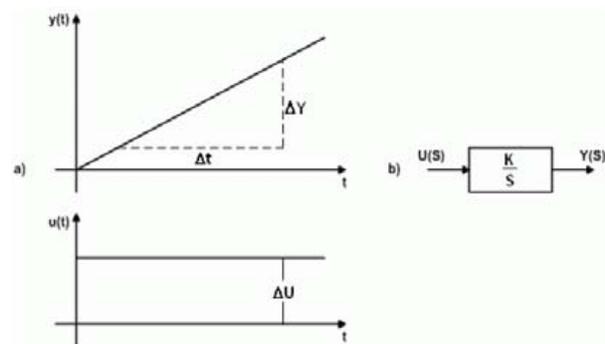


Figura 5. Sistema capacitivo puro

De la figura 5 se deduce:

Entrada  $\Delta_{(t)} = \Delta_{(u)}$  es decir  $\Delta_{(u)s} = \frac{\Delta_{(u)}}{s}$

Haciendo transformada de Laplace para  $y(t)$ :

Salida  $y_{(t)} = \frac{\Delta_{(y)}}{\Delta_{(t)}} \cdot t$  es decir  $y_s = \frac{\Delta_{(y)}}{s^2}$

La función de transferencia es, entonces:

$$G_{(s)} = \frac{y_{(s)}}{u_{(s)}} = \frac{\left(\frac{\Delta_{(y)}}{\Delta_{(t)}}\right)}{\frac{\Delta_{(u)}}{s}} = \frac{\left(\frac{\Delta_{(y)}}{\Delta_{(u)}\Delta_{(t)}}\right)}{s}$$

Haciendo  $K = \frac{\Delta_{(y)}}{\Delta_{(u)}\Delta_{(t)}} \quad (17)$

Se obtiene  $G_{(s)} = \frac{K}{s} \quad (18)$

Para nuestra planta de nivel la función de transferencia hallada fue:

$$G_{C(s)} = \frac{0,00173}{s} \quad (19)$$

En este caso particular se diseñaron los controladores flujo con respecto a la planta identificada de segundo orden cuyo valor es el ilustrado en 16). La razón por la cual se trabajó con esta función de transferencia es por la flexibilidad que nos da para el diseño de controladores; para nivel se diseñaron los controladores respectivos con base en 19).

### 3. DISEÑO DE CONTROLADORES

#### 3.1 Diseño de controladores convencionales

Las estrategias actuales de diseño de controladores pueden clasificarse en dos grupos: control convencional y control avanzado. El control convencional consiste en el control manual, proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional integral derivativo (PID), de relación, en cascada, en avance o retardo de fase. El 90 % de los controladores de procesos industriales son actualmente convencionales. Tanto para la utilización de técnicas de diseño convencionales como para técnicas avanzadas y en especial las basadas en modelación, es necesario un modelo matemático preciso del proceso. Este modelo fue calculado previamente en la identificación del sistema.

En la realización de este proyecto se diseñaron controladores proporcionales (P) y proporcional más integral (PI), para realizar el control en cascada de flujo y nivel. No se diseñaron controladores proporcional más integral más derivativo (PID), debido a que la parte derivativa le aporta al controlador una mayor velocidad de respuesta, cualidad que puede ser positiva en otros procesos, pero en este debido a que la respuesta de flujo es muy rápida le aportaba inestabilidad al proceso.

El mejor control convencional para el sistema de flujo calculado por el método de ganancia límite fue un (PI) y el mejor control convencional para nivel un (P) por este mismo método de ganancia límite.

#### 3.2 Diseño de controladores difusos

El controlador lógico difuso se basa en el modelo lingüístico de la estrategia del operador humano, es decir, tiene la capacidad para operar con conceptos propios del razonamiento cualitativo, fundado sobre un soporte matemático que permite extraer conclusiones a partir de un conjunto de observaciones y reglas cualitativas. La esencia de tal modelo es un programa basado en reglas, por lo que clasifica entre los llamados sistemas expertos [2].

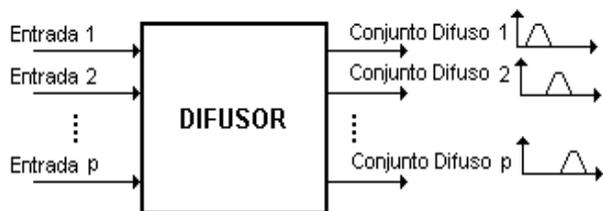
Un controlador difuso se compone de cuatro elementos: el fusificador, la base de conocimiento, la toma de decisiones (mecanismo de inferencia) y defusificador.

*Fusificado.* La primera tarea del controlador lógico difuso (FLC) es **traducir el valor medido en términos de valores lingüísticos**. El proceso consiste en la medición de las variables de entrada al controlador realizando un mapeo a escala que transforma el rango de valores de las variables de entrada en los correspondientes valores lingüísticos en el universo discurso [3].

En la *fusificación* de las entradas se hace la lectura de las señales de nivel y flujo, las cuales se codifican de tal forma que queden en términos de los conjuntos difusos, como se muestra en la figura 6. Así, en esta etapa se determina su correspondiente grado de pertenencia.

La creación del algoritmo se basa exclusivamente en descripciones lingüísticas de los operadores acerca de su actuación en la dirección del proceso [4].

Se puede concluir entonces que el *fusificado* es la transformación de la información determinista enviada del proceso al controlador difuso en



**Figura 6.** Fusificación de entradas

información cualitativa que toma como referencia conjuntos difusos y variables difusas.

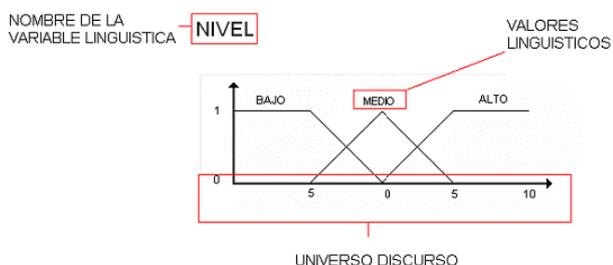
### 3.2.1 Base de conocimiento

La base de conocimiento consiste en una base de datos y otra de reglas. La base de datos proporciona las definiciones necesarias para las reglas de control y la manipulación de los datos difusos. El número máximo de reglas viene dado por el producto de números de particiones de todas las variables lingüísticas de entrada al FCL. Para hablar de una base de reglas, es preciso elegir cuáles variables se tomarán como entrada y cuáles como salida del FCL.

En la figura 7 se puede observar cómo se define la variable entrada nivel; de la misma manera se definen las demás entradas y las salidas.

### 3.2.2 Toma de decisiones

La toma de decisiones es la médula del controlador difuso (mecanismo de inferencia). Tiene la capacidad de simular la toma de decisiones humanas basada en conceptos y acciones de control y empleando implicaciones y reglas de inferencia de



**Figura 7.** Definición de variables

la lógica difusa. Estas tareas se resuelven utilizando las operaciones lógicas de disyunción, conjunción e implicación, de tal forma que la evaluación de una regla vendrá dada por un *antecedente* y un *consecuente*.

Los sistemas difusos tipo Mamdani tienen la siguiente estructura:

$$\text{Si } x_1 \in a_1 \wedge x_2 \in a_2 = \mu_1 \in b_1$$

Donde:

$$x_1 \in a_1 \wedge x_2 \in a_2 \text{ es el antecedente}$$

$$\mu_1 \in b_1 \text{ es el consecuente}$$

El *antecedente* y *consecuente* son ambos difusos; se construyen con variables difusas y funciones de pertenencia.

Donde

$x_1, x_2, \mu_1$  son variables difusas.

$a_1, a_2, b_1$  son funciones de pertenencia.

Los sistemas difusos tipo Takagi-Sugeno tienen la siguiente estructura:

$$\text{Si } x_1 \in a_1 \wedge x_2 \in a_2 = y = f(x_1, x_2)$$

Donde

$$x_1 \in a_1 \wedge x_2 \in a_2 \text{ es el antecedente}$$

$$y = f(x_1, x_2) \text{ es el consecuente}$$

El *antecedente* se construye con variables difusas y funciones de pertenencia igual que en el Mamdani, pero el *consecuente* es una función de las variables difusas.

Para evaluar un sistema Takagi-Sugeno se siguen los siguientes pasos:

1. Se calculan los grados de pertenencia de las variables difusas en el punto seleccionado.

2. Se calculan los grados de cumplimiento de acuerdo con las reglas dadas y usando el operador mínimo del Mamdani o el operador producto de Larsen.
3. Se calcula la función de acuerdo con el consecuente.
4. Se calcula la función de salida dada por:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \times \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad \text{Donde: } n \text{ en el número de reglas}$$

El sistema Takagi-Sugeno se usa principalmente en:

- Aproximación de funciones
- Modelamiento difuso
- Controladores difusos

Es importante conocer las etapas de activación y desactivación de las señales para la toma de decisiones. Supondremos en lo que sigue que la base de reglas es de tipo clásico, y las reglas se realizaran con base en la figura 8.

Si < estado del proceso > entonces < acción de control >

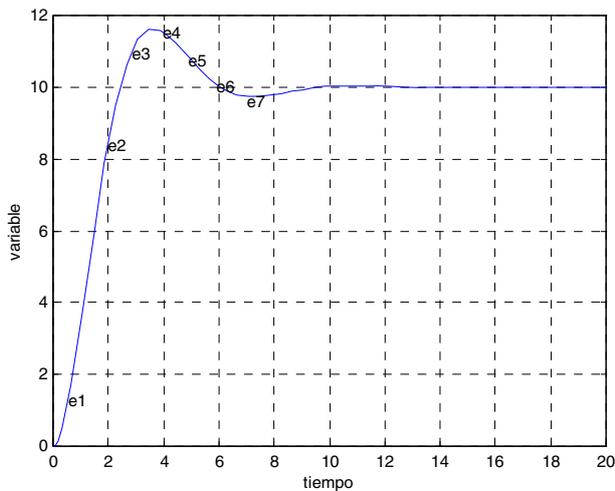


Figura 8. Posible activación de reglas

- En los puntos e<sub>1</sub> y e<sub>2</sub> el error es positivo y la derivada del error es también positiva, para lo que se generará una salida positiva.
- En el punto e<sub>3</sub> el error es negativo y la derivada del error es positiva, para lo que se generará una salida cero.
- En los puntos e<sub>4</sub> y e<sub>5</sub> el error es negativo y la derivada del error es también negativa, para lo que se generará una salida negativa.
- En el punto e<sub>6</sub> el error es cero y la derivada del error es negativa, para lo que se generará una salida cero.
- En el punto e<sub>7</sub> el error es positivo y la derivada del error es cero, para lo que se generará una salida positiva.

De esta manera se construye la tabla FAM (fuzzy asociative memory) para tres particiones, como se puede observar en la tabla 1, que describe la relación entre las variables de entrada y las variables de salida.

Tabla 1. FAM (fuzzy asociative memory) de tres particiones

e/e°	Negativo	Cero	Positivo
Negativo	Negativo	Negativo	Cero
Cero	Negativo	Cero	Positivo
Positivo	Cero	Positivo	Positivo

Entonces, un estado dado dará lugar a la “activación” de varias reglas y se activarán solamente aquellas en las que todos los conjuntos difusos del antecedente resulten ser no nulos para el estado dado [4].

### Defusificado

Es la etapa del FCL encargada de entregar al proceso acciones de control deterministas a partir de salidas difusas resultantes de la composición de reglas.



La acción sobre el proceso exige que el controlador brinde a su salida una magnitud dada, no difusa, por ejemplo, una tensión o una presión neumática dada, por lo que es necesario realizar una *defusificación*, que realiza un mapeo a escala que convierte el rango de valores de las variables de salida al correspondiente universo discurso, y *defusifica* también la acción de control difusa inferida en una acción de control concreta, como se muestra en la figura 9.

En la práctica, para adoptar cierta acción de control, hay que tener muy en cuenta la posición del elemento final de control. Ésta necesariamente tiene que influir en el algoritmo, considerándola como parte de estado del proceso.

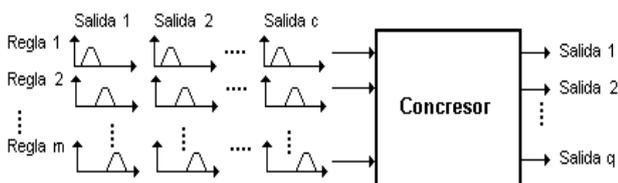


Figura 9. Definición de salida defusificado

#### 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA USANDO MATLAB

La simulación de los controladores convencionales se hizo en MATLAB usando el toolbox de Simulink, como se puede observar en la figura 10.

La simulación de los controladores difusos se hizo en MATLAB usando el sistema de inferencia difuso llamado FIS EDITOR, donde se configuran

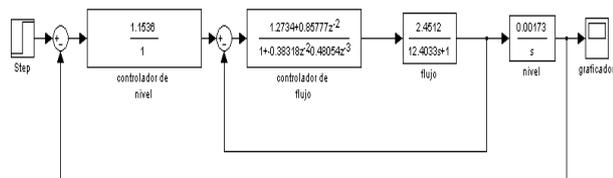


Figura 10. Diagrama de bloques en Simulink de los controladores convencionales

las reglas (entradas y salidas difusas), para luego usarse en el Simulink como un bloque de control (figura 11).

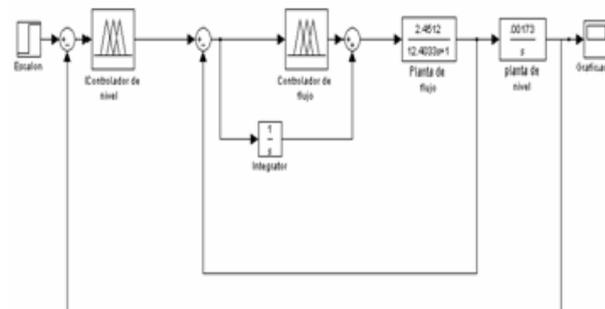


Figura 11. Diagrama de simulación utilizando Simulink y el editor de FIS de los controladores difusos

En la figura 12 puede observarse el comportamiento del elemento final de control (EFC) representado con la curva de color verde, el nivel con la curva roja, el flujo con la curva de color verde-azul y, finalmente, el *setpoint* se estableció en uno de color azul.

Puede observarse en la figura 13 el comportamiento del EFC, representado con la curva de color rojo, el nivel con la curva verde-azul, el flujo

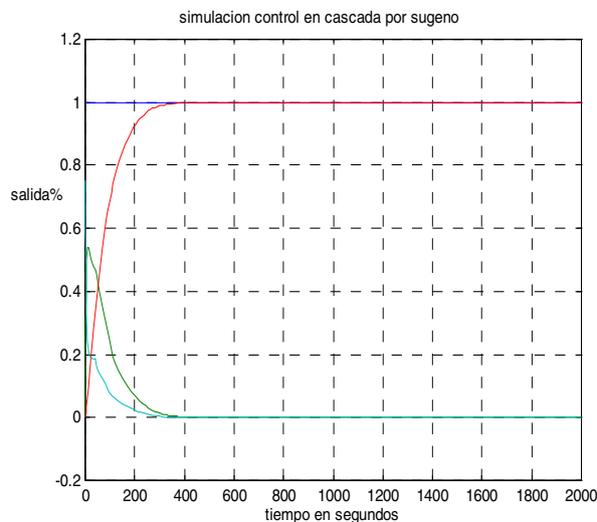


Figura 12. Respuesta simulación del controlador difuso por el método de Takagi-Sugeno

con la curva de color verde y finalmente el *setpoint* se estableció en uno con la línea de color azul.

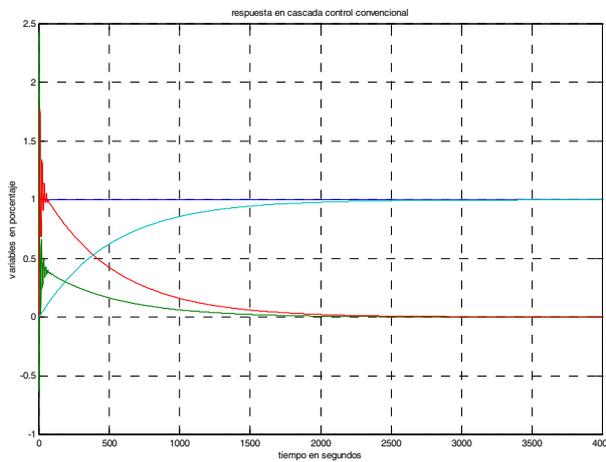


Figura 13. Respuesta de simulación controladores convencionales

Comparando la gráfica de simulación del sistema de control difuso con respecto a la gráfica del sistema de control convencional, podemos observar que el tiempo de respuesta disminuye.

## 5. IMPLEMENTACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS ALGORITMOS

El diseño e implementación del software de control se hizo en la plataforma de programación gráfica LabVIEW, la cual es idónea para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos.

Uno de los factores que llevó a la utilización de esta plataforma de programación, fue su similitud con el Simulink de MATLAB (figura 14).

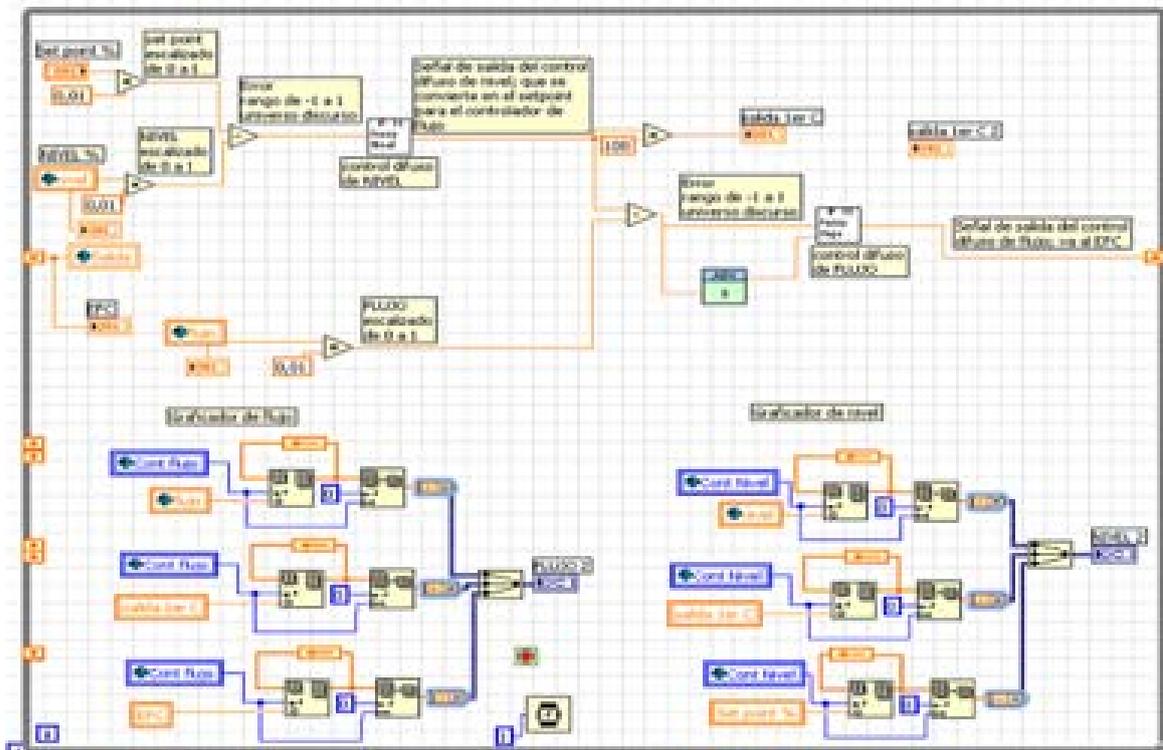


Figura 14. Diseño e implementación del algoritmo en labVIEW



Las figuras 15, 16 y 17 muestran la interfaz del usuario con el proceso que se está ejecutando, mostrando el comportamiento de las variables al aplicarles los diferentes tipos de control.

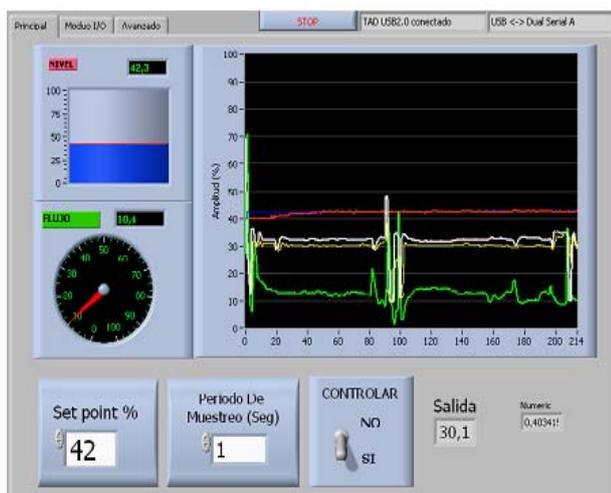


Figura 15. Panel frontal del algoritmo convencional

En la interfaz gráfica de usuario, se codificaron por colores las diferentes variables para facilitar la interpretación del usuario. En la tabla 2 se indicará cada color a qué variable corresponde.

Tabla 2. Codificación de colores figura 15

COLOR	VARIABLE
Azul	Punto de control NIVEL
Rojo	Medición de NIVEL
Blanco	Salida del controlador de NIVEL
Verde	Salida de controlador de FLUJO
Amarillo	Medición de FLUJO

La característica más importante de la figura 14 es que, ante cualquier perturbación en el sistema, el controlador interno (flujo) entrega una respuesta inmediata para evitar que dichas perturbaciones influyan en el objetivo principal de control, que para nuestro caso es nivel.

En la figura 16 observaremos la respuesta de un controlador difuso tipo Mamdani.

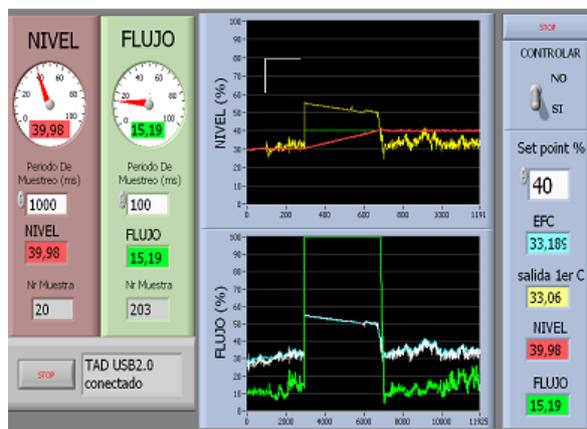


Figura 16. Panel frontal del algoritmo Mamdani

Como se puede observar en la figura 16, mejora el tiempo de establecimiento de la variable nivel que se ve representada por la línea roja. En la tabla 3 se hará la relación de cada línea con su respectiva variable.

Tabla 3. Codificación de colores para figuras 16 y 17

COLOR	VARIABLE
Verde (primer recuadro)	Punto de control NIVEL
Rojo	Medición de NIVEL
Amarillo	Salida del controlador de NIVEL
Blanco	Punto de control de FLUJO
Azul	Medición de FLUJO
Verde (segundo recuadro)	Salida del controlador de FLUJO

En la figura 17 se ve la respuesta de la planta implementando un algoritmo difuso tipo Takagi-Sugeno.

En la figura 17 se observa que su tiempo de establecimiento y velocidad de respuesta es mucho mejor, en comparación con las otras dos gráficas, en las cuales se aplicaron diferentes teorías de control

(la relación de las variables con su respectivo color son la mismas que se mencionan en la tabla 3).

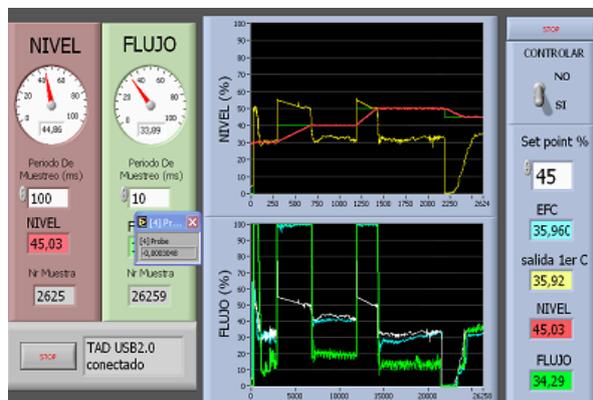


Figura 17. Panel frontal del algoritmo Takagi-Sugeno

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados experimentales mostrados en las figuras 15, 16 y 17 demuestran que la técnica de desarrollo es válida, ya que el controlador de flujo asume todas las perturbaciones antes de que estas interfieran en el proceso de nivel. De esta manera se demuestra la estabilidad que brinda implementar un control en cascada.

Aunque una técnica de control nos asegure una estabilidad en el sistema, también se debe tener en cuenta el tipo de respuesta en el instante de alcanzar algún cambio en el punto de control. Debido a esto, en todos los casos el concepto de control difuso representa una herramienta válida para emular los mecanismos de razonamiento utilizados por el cerebro humano, debido a que estas técnicas permiten el desarrollo de sistemas de control complejos a partir de la descripción lingüística del conocimiento de un operador experto, sin necesidad de emplear modelos matemáticos y con buenas características de robustez frente a cambios de las condiciones de operación.

## 7. CONCLUSIONES

Al aplicar el controlador difuso en tiempo real, se comparó su respuesta con la entregada por el sistema convencional, observando que las señales de control correspondientes a cada controlador difuso presentan un mínimo de error en el objetivo del control y logran la estabilidad del elemento final de control. Por tanto, de esta forma se concluye que los sistemas difusos eliminan el efecto timbre sin perder velocidad de respuesta.

Las ventajas más importantes de los controladores difusos que se pudieron comprobar por medio de la realización de este trabajo, es que permiten incorporar en la automatización esquemas de razonamiento cualitativos, típicamente humanos.

Otra ventaja confirmada de los controladores difusos radica en que son menos sensibles a cambios en los parámetros o perturbaciones en comparación con los controles convencionales, ya que los controles difusos han demostrado ser más robustos que los tradicionales controles P, PI y PID. Además, los controles difusos tienen la ventaja de que sus parámetros pueden actualizarse de manera sencilla si los puntos de operación de la planta cambian. En muchos casos, incluso un operador no especializado en control puede mantener la base de reglas del control, dado que no es difícil de entender dicha base, porque las reglas utilizan variables lingüísticas en vez de variables numéricas.

La estabilidad del sistema se asegura al utilizar controladores en cascada. Esto hace que las perturbaciones en el lazo interno o secundario sean corregidas por el segundo controlador, antes de que puedan afectar la variable primaria; cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso se compensa por su propio lazo y las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.



---

## REFERENCIAS

- [1] GARCÍA JAIMES, Luis Eduardo. Control Digital, Capítulo 5 Identificación de sistemas, 2003
- [2] PASSINO, Kevin. Fuzzy Control. Addison-Wesley Longman, 1998.
- [3] WANG, Li-Xin. A course in fuzzy systems and control. Prentice Hall, 1997.
- [4] JAMSHIDI, Mohamad; VADIIE, Nader y ROSS, Timothy J. Fuzzy logic and control. Prentice Hall. 1993.
- [5] LÓPEZ MONTES, Daniel Felipe; GRAJALES OSPINA, José David y MUÑOZ OCAMPO, Joaquín Emilio. Trabajo de grado (Ingeniero en Instrumentación y Control). Control en cascada de flujo y nivel aplicando métodos difusos, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, 2006.