

IDENTIFICATION AND FUZZY CONTROL OF A TWO TANK SYSTEM**IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DIFUSO DE UN SISTEMA DE NIVEL DE
LÍQUIDOS EN DOS TANQUES****PhD. Juan Antonio Contreras Montes****Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla**

Escuela Naval Almirante Padilla, Facultad de Ingeniería Naval

Cartagena, Colombia, Tel.: 57-5-6694124.

E-mail: epcontrerasj@ieeee.org

Abstract: This work presents the implementation of a new methodology for identification and control using fuzzy systems with triangular membership functions with 0.5 overlap in the antecedent and consequent singleton type. Average operators are used instead of T-norm operators for rule evaluation. To check the performance of the proposed method has been developed an experiment identifying and controlling liquid level in parallel tanks, as addressed by other researchers who try to emulate these systems in chemical processes and also in handling problems variations in the plant and disturbances. To prove the asymptotic stability of the fuzzy controller was used fuzzy Lyapunov synthesis, which is the version of the classical method of *Lyapunov* in the so-called *computing with words*.

Resumen: Se presenta la aplicación de una novedosa metodología para identificación y control empleando sistemas difusos con funciones de pertenencias triangulares con solapamiento de 0.5 en el antecedente y consecuentes tipo singleton en los consecuentes. Se emplean operadores de promedio en vez de operadores tipo T-normas para la evaluación de las reglas. Para comprobar el desempeño del método propuesto se ha desarrollado un experimento de identificación y control de nivel de líquidos en tanques paralelos, ya abordado por otros investigadores con el cual se trata de emular sistemas presentes en los procesos químicos y que, además, permite enfrentar problemas de variaciones en la planta y perturbaciones. Para demostrar la estabilidad asintótica del controlador difuso se empleó la *síntesis difusa de Lyapunov*, la cual es la versión del método clásico de Lyapunov en la denominada *computación con palabras*.

Keywords: Identification, Fuzzy logic, Fuzzy control, Tanks systems.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales áreas de aplicación de la lógica difusa ha sido sin duda el control automático de procesos debido, principalmente, a la especial característica de los sistemas difusos de manejar en el mismo marco información numérica y lingüística.

Muchos procesos industriales que son regulados manualmente por los operadores no han podido ser

automatizados por la naturaleza lineal de los controladores convencionales y, además, porque el operador integra diversas estrategias que no pueden ser implementadas en una estrategia de control clásica (Albertos y Sala, 2004).

Estas falencias de los controladores convencionales se han ido superando con la aplicación de la lógica difusa en la implementación de sistemas expertos para control de procesos.

Los primeros sistemas basados en reglas difusas eran construidos con base en la información suministrada por expertos; sin embargo, para el caso de sistemas complejos las reglas así construidas no permitían una aproximación aceptable del sistema. La búsqueda de sistemas difusos que aproximen de manera aceptable la dinámica de sistemas complejos ha conllevado al desarrollo de investigación en técnicas de extracción de reglas difusas a partir de datos experimentales de entrada y salida; es decir, al desarrollo de técnicas de identificación difusa (Wang y Mendel, 1992; Paiva y Dourado, 2004).

Muchas de estas técnicas de identificación borrosa generan sistemas precisos pero con poca interpretabilidad (Diez et al., 2004), debido a que en el proceso de ajuste de las funciones de pertenencia se generan solapamiento de más de 2 conjuntos, particiones en valores superiores a 0.5, y funciones de pertenencia con formas irregulares. Otros investigadores han desarrollado métodos de identificación borrosa que garantiza la interpretabilidad mediante la restricción de solapamientos en 0.5, pero con una leve disminución en la precisión (Espinosa y Vandewalle, 2000; Guillaume y Charnomordic, 2005)

Durante los últimos 20 años se han empleado de manera exitosa un gran número de técnicas de control difuso para regular complejos procesos industriales sin requerir de complejos modelos matemáticos de los procesos (Chengying y Yung, 2005; Contreras *et al.*, 2007b).

2. SISTEMA DE DOS TANQUES

Se ha desarrollado un experimento, que se muestra en la figura 1, ya abordado por otros investigadores (Thomas and Sebatian, 1994; Ordoñez et al, 1997; Zumberge and Passino, 1998) con el cual se trata de emular sistemas presentes en los procesos químicos y que, además, permite enfrentar problemas de variaciones y perturbaciones en la planta.

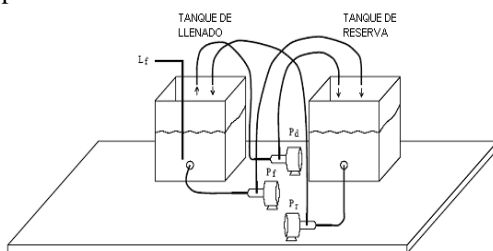


Fig. 1. Sistema de Nivel de Líquido en dos Tanques

El tanque de la izquierda, llamado tanque de llenado, contiene un volumen de líquido que va a ser controlado y tiene una capacidad total de 5 galones. El volumen de este líquido es proporcional a su nivel y se denotará por L_f . El tanque de la derecha, denominado tanque de reserva, contiene el líquido que será bombeado hacia dentro y hacia fuera del tanque de llenado y tiene la misma capacidad. Se dispone de tres bombas: la primera bomba, denotada por P_i , es una bomba de 12 voltios de corriente directa cuyo flujo depende del voltaje aplicado, y bombea líquido desde el tanque de reserva hacia el tanque de llenado; la segunda bomba, denotada por P_o , solo opera en las condiciones de encendida y apagada, y se emplea para bombear líquido del tanque de llenado al tanque de reserva; la tercera bomba, denotada por P_p , de características similares a la bomba P_i , es empleada para generar una perturbación removiendo líquido del tanque de llenado hacia el tanque de reserva. La señal de control es un valor de voltaje de CD de manera tal que si el valor es positivo, y superior a una magnitud dada, la bomba P_i se activará y suministrará líquido del tanque de reserva al tanque de llenado a una rata de flujo proporcional al valor de voltaje positivo aplicado; si el valor de voltaje es negativo y de magnitud superior a un valor dado, se activará la bomba P_o y fluirá líquido del tanque de llenado al tanque de reserva. La figura 2 muestra la razón de flujo de entrada (valores positivos) o de salida (valores negativos) de acuerdo al valor y polaridad de la señal de control u .

Las características del exp. que ocasionan problemas con la regulación de nivel son:

- El sensor de nivel consiste de un flotador colocado al final de un brazo que está conectado al eje de un potenciómetro lineal. El bombeo de líquido hacia y desde el tanque de llenado crea ondas que causan problemas en la medición.
- Las bombas tienen "zonas muertas"; es decir, para que exista bombeo de líquido el nivel de voltaje aplicado a cada bomba debe alcanzar un valor determinado. Se debe aclarar que el voltaje necesario para iniciar el bombeo de líquido es diferente al voltaje al cual el bombeo se detiene.
- Existe no linealidad, tipo saturación, en la relación al cual las bombas pueden transferir líquido entre los tanques.
- Las bombas introducen ruido en el sistema, el cual ocasiona castañeo (*chattering*) en la salida de control, lo cual a su vez puede incrementar el ruido que las bombas introducen al sistema y afecta la vida útil de éstas.

- Existe un pequeño retardo en el sistema cuando se encienden o apagan las bombas
- Existe una pequeña perturbación en el sistema ocasionada por un flujo de agua que permanece, en uno u otro sentido, cuando las bombas son apagadas.

Un modelo razonable del proceso está dado por

$$\dot{L}_f = \mathbf{a}_r(u) - \mathbf{a}_f(L_f) \quad (1)$$

Donde $\mathbf{a}_r(u)$ representa el efecto de las bombas P_i y P_o , siendo u el voltaje de control aplicado a las bombas, y $\mathbf{a}_f(L_f)$ es la perturbación causada por la bomba P_d , siendo L_f el nivel en el tanque de llenado. También se tiene que:

$$\mathbf{a}_r(u) = R(u) \quad (2)$$

$$R(u) = \begin{cases} -0.0044 & \text{si } u < -7.5 \\ 0 & \text{si } -7.5 \leq u < 2.5 \\ 0.000745u - 0.00142 & \text{si } 2.5 \leq u \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

Como se muestra en la figura 2, y:

$$\mathbf{a}_f(L_f) = \begin{cases} 0.87R(d_{L_f}) & \text{si } d_{L_f} \geq 0 \\ 0 & \text{si } d_{L_f} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Donde d_{L_f} representa la perturbación al nivel de líquido, la cual se escogió como:

$$d_{L_f} = \frac{6}{p} \tan^{-1}(L_f)$$

Por dos razones. Primero, para que el modelo opere en una región controlable fuera de la zona muerta de cada bomba, el valor de la perturbación estará entre 2.5 y 2.6 voltios. Note que para un nivel L_f mayor que 4 galones el valor de voltaje aplicado a la bomba d_{L_f} será superior a 2.5 voltios, por lo que la entrada de referencia es condicionada a ser mayor de 4 galones. Segundo, la perturbación se asemeja al efecto de un ser humano, o de otro subsistema, que remueve más líquido del tanque cuando hay más líquido disponible.

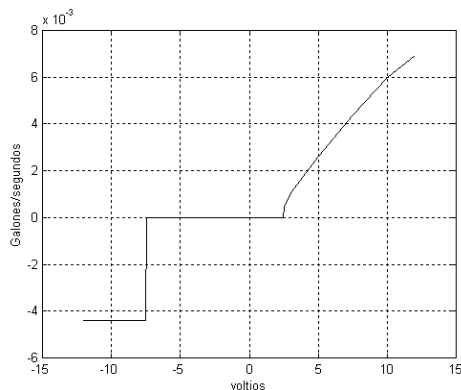


Fig. 2. Gráfica de $R(u)$

El sistema debe seguir a una entrada de referencia dada como una onda cuadrada de frecuencia 0.00125 Hz que toma valores entre 4 y 4.5 galones. Se consideran dos plantas diferentes:

- Planta nominal (sin perturbación: $\mathbf{a}_f(L_f) = 0$)
- Planta con perturbación: $\mathbf{a}_f(L_f) = 0.87 d_{L_f}$

3. IDENTIFICACIÓN BORROSA DEL SISTEMA DE DOS TANQUES

3.1 Identificación de la Planta

Para la identificación difusa del proceso se empleará el algoritmo basado en la minimización del error de inferencia presentado por (Contreras et al, 2007a; Contreras et al, 2009). El usuario solo debe introducir los datos de las variables de entrada y salida. El algoritmo determina los rangos de cada variable, distribuye uniformemente las funciones de pertenencia triangulares en los universos de cada variable de entrada, ubica los consecuentes tipo singleton en el espacio de salida (un consecuente por cada función de pertenencia triangular), determina las reglas y ajusta la ubicación de los consecuentes, empleando mínimos cuadrados, para minimizar el error de aproximación. El algoritmo se detiene cuando se ha alcanzado una métrica de error menor a la requerida por el usuario o cuando el número de conjuntos borrosos por variable de entrada es mayor a 9. La distribución de las funciones de pertenencia en cada universo de entrada se hace de manera uniforme para garantizar que la partición resultante sea suma 1; es decir, la suma de los grados de pertenencia de un dato en una variable de entrada será siempre igual a 1. El modelo difuso tiene la forma:

$$Y = Wq \quad (5)$$

Donde W contiene los valores de la evaluación de cada dato de entrada en las funciones de pertenencia triangulares y q contiene los consecuentes singleton asociados a cada función de pertenencia triangular del antecedente.

Se entrenó, o identificó, un controlador difuso para que remplazara a un controlador proporcional que regula el nivel de líquido en la planta. Para lograrlo se utilizó el algoritmo de identificación borrosa, empleando como señal de entrada la señal de control, del controlador proporcional, y como señal de salida, el nivel de líquido en la planta. Inicialmente no se consideraron las perturbaciones, las cuales se emplean posteriormente para analizar la forma de ajuste de parámetros del nuevo controlador difuso.

La figura 3 muestra la respuesta del sistema sin perturbación y con controlador proporcional con ganancia igual $K_p = 300$, la cual se empleará como señal de salida en el proceso de identificación. La figura 4 muestra la salida del controlador proporcional, la cual se empleará como entrada en el proceso de identificación.

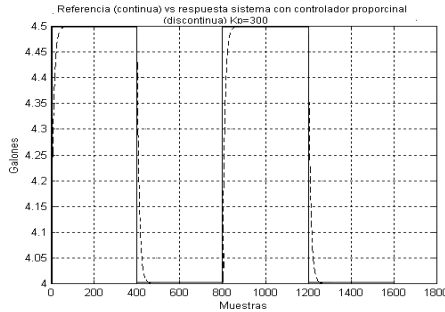


Fig. 3. Salida del sistema de nivel con controlador proporcional, $K_p=300$.

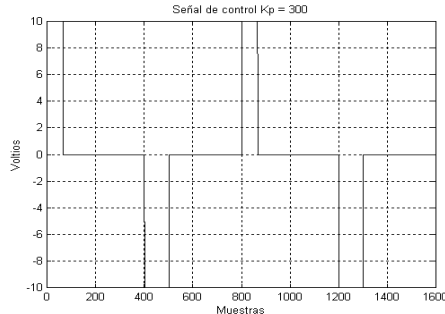


Fig. 4. Acción del controlador ($K_p=300$).

Con esos datos se procedió a una primera identificación, obteniendo la partición y distribución de consecuentes mostrada en la figura 5. Para realizar la identificación se tomaron como entrada al sistema la variable de entrada al proceso $u(k)$ y la primera regresión de la señal de nivel $y(k-1)$ y como salida la señal de nivel $y(k)$. El modelo borroso resultante solo requirió de 2 conjuntos por variable de entrada.

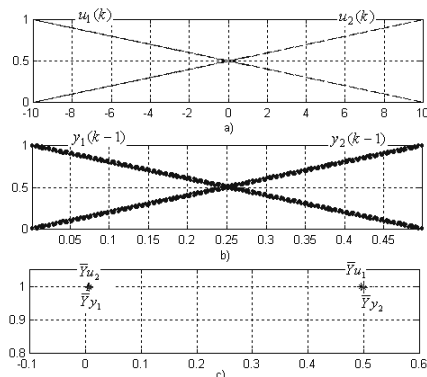


Fig. 5. Modelo borroso del sistema: a) partición de $u(k)$; b) partición de $y(k-1)$; c) ubicación de los consecuentes en el espacio de salida

De la figura 5 se aprecia que el consecuente $\bar{Y}u_2$ generado por $u_2(k)$ quedó ubicado en la misma posición que el consecuente $\bar{Y}y_1$ generado por $y_1(k-1)$, por lo que estas dos reglas se puede fusionar en una sola. La base de reglas queda de la forma:

$$\begin{aligned} u_2(k) \wedge y_1(k-1) &\rightarrow y^{-1} \\ u_1(k) &\rightarrow y^{-2} \\ y_2(k-1) &\rightarrow y^{-3} \end{aligned}$$

Luego del ajuste por mínimos cuadrados, el vector de consecuentes quedó de la forma:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -3 \\ y & y & y \end{bmatrix} = [0.0037 \ -0.0077 \ 0.500]^T$$

El error cuadrático medio alcanzado fue de 0.000000027.

3.2 Obtención del Controlador Borroso

A partir del modelo borroso obtenido inicialmente se procedió a obtener el control inverso borroso (Babuska, 2001). Se estipuló como modelo de referencia Y_r una señal empleada por otros investigadores a este mismo problema y que está dada por:

$$\begin{aligned} L_d &= 0.5 - 0.5e^{-0.022t}; \text{ para } 0 \leq t \leq 400 \text{ seg} \\ L_d &= 0.0 + 0.5e^{-0.022t}; \text{ para } 400 < t \leq 800 \text{ seg} \end{aligned}$$

Considerando que la variación del nivel ocurrirá sobre la línea de 4 galones. El intervalo de muestreo T empleado fue de 0.5 segundos y el tiempo de duración de la prueba fue de 800 segundos.

La base de reglas del modelo borroso obtenido puede expresarse de la forma

$$\begin{aligned} W &= \left[\begin{matrix} u_2(k) + y_1(k-1) & u_1(k) & y_2(k-1) \end{matrix} \right]^T \\ \mathbf{q} &= \begin{bmatrix} -1 & -2 & -3 \\ y & y & y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Y_r , que es el valor de salida deseado ó modelo de referencia, puede entonces expresarse de la forma

$$Y_r = W_1 \mathbf{q}_1 + W_2 \mathbf{q}_2$$

Donde

$$\begin{aligned} W_1 &= [y_1(k-1)^T \quad y_2(k-1)^T] \\ \mathbf{q}_1 &= \begin{bmatrix} -1 & -3 \\ y & y \end{bmatrix}^T \\ W_2 &= [u_1(k)^T \quad u_2(k)^T] \\ \mathbf{q}_2 &= \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ y & y \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

Los vectores $y_1(k-1)^T$, $y_2(k-1)^T$, $u_1(k)^T$ y $u_2(k)^T$ contienen los grados de pertenencia en las particiones de las variables $y(k-1)$, y $u(k)$ respectivamente.

Los dos primeros vectores son conocidos y corresponden a la señal modelo de referencia Y_r retardada. El objetivo es encontrar cuál es el valor de entrada (acción de control) necesaria para producir Y_r , lo cual se obtiene a partir de:

$$W_2 q_2 = Y_r - W_1 q_1$$

W_2 incluye a $u_1(k)$ y $u_2(k)$, pero sabemos que $u_2(k) = 1 - u_1(k)$ por lo que el problema se reduce a determinar $u_1(k)$ y, seguidamente, se procede a determinar la forma de la señal de control requerida para que la salida del modelo borroso, y del sistema real, siga el modelo de referencia. La figura 6 muestra la forma que debe tener la señal de entrada al proceso, o señal de control, para alcanzar la respuesta dada por el modelo de referencia.

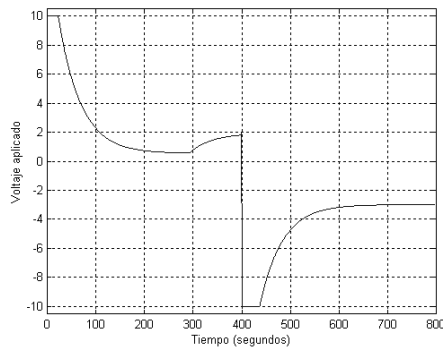


Fig. 6. Acción de control requerida para seguimiento de modelo de referencia en el sistema de nivel de dos tanques

El controlador borroso tiene como entradas la señal del modelo de referencia $yr(k+1)$ y la salida real del proceso $y(k)$ y tiene como salida la señal de control. $u(k)$. Se obtuvieron dos conjuntos difusos por variable de entrada distribuidos uniformemente sobre el rango de cada variable. Las etiquetas para los conjuntos de las variables de entrada son:

$y_1(k)$: Nivel de líquido en el tanque BAJO

$y_2(k)$: Nivel de líquido en el tanque ALTO

$yr_1(k+1)$: Nivel de líquido deseado en el tanque BAJO

$yr_2(k+1)$: Nivel de líquido deseado en el tanque ALTO

La base de reglas obtenida está dada por:

$$\begin{aligned} yr_2(k+1) \wedge y_2(k) &\rightarrow y^{-1} \\ yr_1(k+1) &\rightarrow y^{-2} \\ y_1(k) &\rightarrow y^{-3} \end{aligned}$$

Luego del ajuste por mínimos cuadrados, el vector de consecuentes quedó de la forma:

$$q = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -3 \\ y & y & y \end{bmatrix} = [0.5 \quad -1414 \quad 1414]$$

A continuación se procedió a incluir la perturbación, lo cual afectó el desempeño de ambos controladores. Para el caso del controlador proporcional fue necesario incrementar la ganancia a 650 para conseguir una respuesta similar, como se observa en la fig. 7.

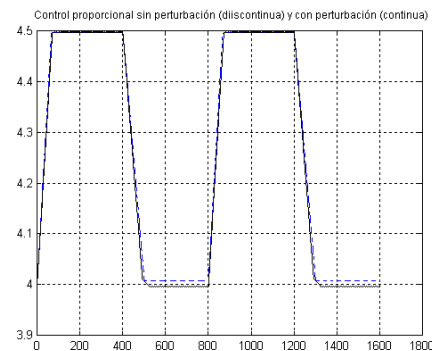


Fig. 7. Respuesta del sistema sin perturbación y $K_p = 300$ vs con perturbación y $K_p = 650$.

Ante la presencia de perturbación y con la señal de referencia como modelo de referencia, el controlador borroso ajustó los consecuentes, ubicándolos en:

$$d = [0.3996 \quad -1492 \quad 1533]$$

Las fig. 8 y 9 muestran las señales de control producidas por el controlador proporcional y el controlador adaptativo borroso. Se aprecia una acción más "suave" del segundo controlador.

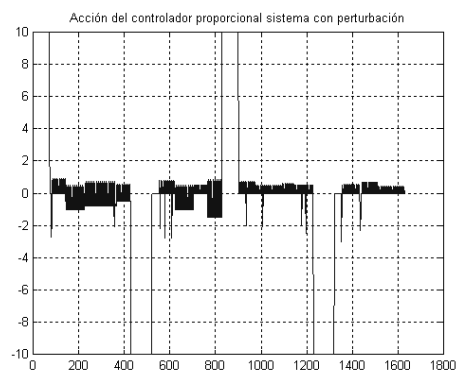


Fig. 8. Acción del controlador proporcional sistema con perturbación

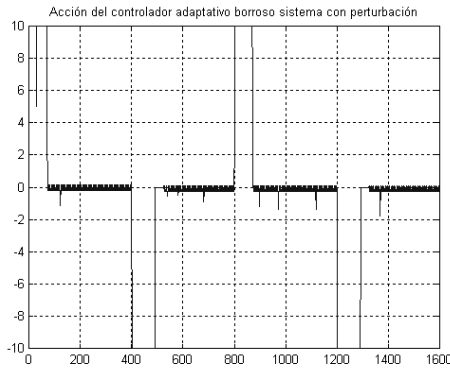


Fig. 9. Acción del controlador borroso en sistema con perturbación

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Las propuestas de análisis de estabilidad basada en la técnica de *computación con palabras* (Margaliot and Langholz, 1998, 2004; Zhou, 2002) resultan bastante atractivas por la facilidad en su aplicación. Aunque las estrategias que los autores mencionados plantean está encaminada al diseño del un controlador borroso estable basándose en la función de Lyapunov y en el conocimiento básico del funcionamiento de la planta, en esta investigación se van a utilizar para demostrar que el controlador obtenido es asintóticamente estable.

Antes de iniciar con el análisis de estabilidad, y para dar más claridad al mismo, la base de reglas obtenida inicialmente se representará mediante 4 reglas, así:

$$\text{Re gla 1: } y_2(k+1) \rightarrow 0.5$$

$$\text{Re gla 2: } y_2(k) \rightarrow 0.5$$

$$\text{Re gla 3: } y_1(k+1) \rightarrow -1414$$

$$\text{Re gla 4: } y_1(k) \rightarrow 1414$$

Si tenemos en cuenta que la salida del controlador está regida por el consecuente singleton de cada regla, el voltaje aplicado a las bombas P_1 y P_0 será proporcional a la magnitud y polaridad del consecuente tipo solitario \bar{y}^j . Las reglas anteriores podrían representarse de manera lingüística de la siguiente forma.

Regla 1: “Si la señal de referencia es ALTA el voltaje aplicado a las bombas será positivo bajo”

Regla 2: “Si el nivel de líquido en el tanque es ALTO el voltaje aplicado a las bombas será positivo bajo”

Regla 3: “Si la señal de referencia es BAJA el voltaje aplicado a las bombas será negativo alto”

Regla 4: “Si el nivel de líquido en el tanque es BAJO el voltaje aplicado a las bombas será positivo alto”

Considerando la función de Lyapunov candidata $V = (y - yr)^2 / 2$, donde y es el nivel o salida real en el tanque y yr es la señal de referencia que, sin pérdida de generalidad, asumiremos constante. La derivada de la función está dada por

$$\dot{V} = (y - yr) \dot{y} = (y - yr)(q_{ent}(t) - q_{sal}(t)).$$

Donde $(q_{ent}(t) - q_{sal}(t))$ representa la variación en el nivel de líquido en el tanque dado por la diferencia entre el caudal de entrada de agua $q_{ent}(t)$ y el caudal de salida $q_{sal}(t)$, los cuales son gobernados por las bombas P_i y P_o respectivamente. La ecuación presentada nos permite inferir las condiciones para hacer que \dot{V} sea negativa en cada uno de los modos de operación, así:

- Si el nivel de líquido y es bajo; es decir por debajo del valor de la referencia (ó el valor de referencia por encima del nivel real de líquido), entonces $(y - yr) < 0$. Por lo tanto, para que \dot{V} sea negativa es necesario que el factor $(q_{ent}(t) - q_{sal}(t))$ sea positivo, lo cual se deduce de las reglas activadas en esta condición (reglas 1 y 4).
- Si el nivel de líquido y es alto; es decir por encima del valor de la referencia (ó la referencia por debajo del nivel de líquido), entonces $(y - yr) > 0$. Por lo tanto, para que \dot{V} sea negativa es necesario que el factor $(q_{ent}(t) - q_{sal}(t))$ sea negativo, lo cual se deduce de las reglas activadas en esta condición (reglas 2 y 3), ya que la regla 2 produce un voltaje positivo bajo para las bombas mientras que la regla 3 produce un voltaje negativo alto.

Se puede apreciar la facilidad de la aplicación de la propuesta de *computación con palabras* para el análisis de estabilidad de controladores borrosos obtenidos mediante la metodología propuesta en esta investigación, en especial por su garantía de interpretabilidad.

5. CONCLUSIONES

Se presentó la identificación borrosa de un sistemas de nivel de dos tanques empleando dos variables de entrada, cada una con dos funciones de pertenencia triangulares normales y solapamiento en 0.5, y una variable de salida. De esta manera se mantiene la interpretabilidad del modelo difuso que es afectada en otros métodos de identificación borrosa.

Se realizó la identificación empleando dos casos: primero sin considerar la perturbación y posteriormente considerando perturbación. La estructura del modelo difuso se mantuvo y solo fue necesario un ajuste de la ubicación de los consecuentes tipo *singleton*, lo que muestra la facilidad del método de identificación para adaptaciones en línea.

Se determinó el controlador borroso empleando la técnica de control inverso. La estabilidad del controlador se realizó empleando el novedoso método de la *síntesis difusa de Lyapunov*, la cual es la versión del método clásico de Lyapunov en la denominada *computación con palabras*. La aplicación de este método para el análisis de estabilidad fue posible gracias a la condición de interpretable del modelo difuso obtenido.

REFERENCIAS

- Albertos, P., Sala A. (2004) *El control borroso: una metodología integradora*. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Babuska, R. (2001) *Fuzzy and Neural Control*. Disc Course Lecture Notes. Delft University of Technology. Delft, the Netherlands.
- Chengying, X., Yung, C.S. (2005) *Design of a Multilevel Fuzzy Controller For Nonlinear Systems and Stability Analysis*. IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 13, No. 6, pp.761-778.
- Contreras, J., Acuña, O. (2009) *Generating Dynamic Fuzzy Models for Prediction Problems*. 28th North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference, Cincinnati, Ohio, USA.
- Contreras, J., Misa, R., Murillo, L., Paz J., Sarabia J. (2007) *Identificación Borrosa Eficiente Basada en Error de Inferencia*. Revista Tecnologías Avanzadas. Vol.1, No.9, pp. 62-67. Universidad de Pamplona. Colombia.
- Contreras, J., Misa, R., Murillo, L. (2007) *Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach*. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE Computational Intelligence Society. Pags.: 1591-1596.
- Espinosa, J., Vandewalle, J. (2000) *Constructing fuzzy models with linguistic integrity form numerical data-afreli algorithm*. IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 8, pp. 591 – 600.
- Guillaume, S., Charnomordic, B. (2004) *Generating an interpretable Family of Fuzzy Partitions Form Data*. IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 12, No. 3, pp. 324 – 335.
- Margaliot, M., Langholz, G. (1999) *Fuzzy Lyapunov Based Approach to the Design of Fuzzy Controllers*. Fuzzy Sets and Systems, 106(1). 49-59.
- Margaliot, M., Langholz, G. (2004) *Fuzzy Control of a Benchmark Problem: a Computing with Words Approach*. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 12(2). 230-235.
- Paiva, R. P., Dourado, A.(2004) *Interpretability and Learning in Neuro-Fuzzy Systems*. Fuzzy Sets and System. 147, pp. 17-38.
- Thomas, H., Sebastian, E. (1994) *Approximately Time Optimal Fuzzy Control of a Two-Tank System*. IEEE Contr. Sys. Mag., vol 14, pp 24-30.
- Wang , L-X., Mendel, J.M. (1992) *Generating Fuzzy Rules by Learning form Examples*. IEEE Transactions System, Man and Cybernetics, vol. 22, pp. 1414-1427.
- Zhou, Ch. (2002) *Fuzzy-Arithmetic-Based Lyapunov Synthesis in the Design of Stable Fuzzy Controllers: a Computing-with-Words Approach*. Int. Journal. Appl. Math. Comput. Sci., 12(3), 411-421.
- Zumberge, J., Passino, K. (1998) *A Case Study in Intelligent vs. Conventional Control for a Process Control Experiment*. Journal of Control Engineering Practice, Vol. 6, No. 9, pp. 1055-1075