

Implementación y análisis de rendimiento de un control industrial de nivel para tanques con fluidos, basado en lógica difusa

Gary Ampuño¹, Wilton Agila¹, Holger Cevallos²

¹ Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Guayaquil, Ecuador.

² Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador.

Autor para correspondencia: gampuno@ups.edu.ec

Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2014 - Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2015

RESUMEN

El algoritmo de lógica difusa fue desarrollado utilizando conjuntos de múltiples entradas y salidas, con el fin de tener un sistema de control que proporcione un mejor rendimiento en el control de velocidad y de apertura, de una bomba y una válvula respectivamente; esto se lo compara con los sistemas de control actuales que posee la planta, que se basan en algoritmos de control PID convencional. Con este enfoque propuesto, un algoritmo difuso fue buscado para que podamos tener un sistema de control de calidad mejor; con el fin de dar una respuesta de rechazo a las perturbaciones, así como un monitoreo satisfactorio a la referencia. Los inconvenientes en la aplicación de algoritmos de lógica difusa, junto con su estrategia de sintonización en diferentes puntos de funcionamiento se pueden resolver mediante la aplicación de controladores difusos que utilizan conjuntos de reglas basadas en la experiencia vivida en la planta a controlar. Para las pruebas se llevó a cabo un análisis de ambos enfoques de control y también fueron comparados los mecanismos de ajuste con cada una de las respuestas para el cumplimiento de la validación de los resultados. Por lo cual, no sólo se logró la simulación de la planta sino también captura de datos reales. El resultado fue la obtención de un controlador difuso que nos permitió lograr una estrategia mucho más eficaz de control a la planta. Por otra parte, también se alcanzó una solución adicional para la 'vida útil' de los accionadores afectados, evitando picos abruptos en las acciones de los mismos.

Palabras claves: Control, nivel, flujo, PID, difuso, fuzzy designer.

ABSTRACT

A fuzzy logic algorithm was developed using sets for multiple inputs and outputs to have a control system that provides an improved performance in the control of the rotational speed and opening of a pump and a modulating valve compared to the current control systems of pumps, which are based on conventional PID control algorithms. In the proposed approach, a fuzzy algorithm was developed, it is a control system that is able to provide a rejection response to disturbances and a satisfactory quote when the monitoring approaches the reference functioning. The drawbacks in fuzzy logic algorithms, together with its tuning strategy in different operating points, can be solved by applying fuzzy controllers, which use sets and rules based on the experience gained from an operating plant. An analysis of both control systems, the PID and fuzzy algorithm, was carried out. Also the adjustment mechanisms of both control systems were tested and mutually compared. To this end not only simulation results of the plant, but also actual data were collected. The research yielded a fuzzy controller offering a more effective strategy to control the plant, avoiding abrupt peaks and actions in the operation, which most probably shall enhance the lifetime of the plant components.

Keywords: Control, level, flow, PID, fuzzy, fuzzy designer.

1. INTRODUCCIÓN

En las industrias a nivel mundial una de las etapas más empleadas en los procesos es la dosificación (Anderson, 1997; Creus Solé, 2012). La dosificación marca un punto de partida para todos los procesos industriales; un buen cálculo y control de la dosificación aseguran que la materia prima sea empleada adecuadamente evitando pérdidas, reprocesos y tiempos de cambios de formatos. Es así como los controles de nivel son los principales componentes de la dosificación, ya que de acuerdo a las características del producto a dosificar dependerá el sistema mecánico y las pérdidas que puedan causar perturbaciones externas. Debido a lo expuesto, la selección de los algoritmos de nivel resultarán de mucha importancia para diferentes casos como: a) para la industria alimenticia las cuales pueden recibir sanciones por no cumplir con el peso reglamentado por la ley; b) procesos químicos donde deben cumplirse con rangos muy pequeños para la homogeneidad de un producto; y c) en el caso de tecnologías donde al obtener energía, el residuo no debe inundar el elemento que la contiene (Agila Gálvez, 2013).

Para los inconvenientes mencionados existen varias formas de obtener las características de los controladores o los datos de sintonización de los mismos. Existen diferentes métodos de control entre los cuales tenemos: los ‘controladores clásicos’, el cual está diseñado para sistemas continuos - lineales e invariantes en el tiempo, por lo general en procesos lentos, son la primera generación de controladores mecánicos, neumáticos, hidráulicos, etc. (Ogata, 2004). Este método es uno de los más empleados en las industrias, pero no es tan eficiente para procesos con referencias que cambian continuamente. Otro método de control es el uso de inteligencia artificial, el cual resulta ser muy complejo y con la necesidad de emplear software que permitan soluciones numéricas para las ecuaciones. El método resulta ser eficiente pero tiene la limitante de ser costoso por las licencias de los mismos. En ambos casos se debe tener conocimiento sobre la teoría de control, que por lo general, este se obtiene mediante estudios superiores, a los cuales los operadores y técnicos no acceden con facilidad.

El presente trabajo propone un sistema de control de nivel complementándolo con flujo empleando ‘control moderno’, este se basa en sistemas digitales - lineales o no lineales, los controladores emplean la tecnología digital como los procesadores y micro-controladores (Misa Llorca, 2011). A través de conjuntos y reglas de operación que ofrece la lógica difusa, las cuales, se basan en las características del proceso y de la experiencia del operador, obteniendo una mejor exactitud de la respuesta de los actuadores a ser controlados. Los resultados que se proporcionan servirán para evaluar el desempeño del sistema propuesto, mediante la comparación de los modelos de control PID y difusos.

El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera: Sección 2, describe el escenario para el análisis de variables y consideraciones para medición del nivel y flujo en el tanque a ser controlado; en la Sección 3 se muestra la descripción del mecanismo propuesto y la rutina de la prueba; en la Sección 4 se realiza la evaluación del desempeño de los sistemas de control donde además se analizan los resultados; y finalmente las conclusiones se resumen en la Sección 5.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del escenario

El escenario de experimentación consta de un tanque controlado T_D y un tanque reservorio T_R . Los dos tanques están ubicados a una altura H el uno respecto al otro. Los tanques tienen una capacidad de 10 litros y están conectados de tal manera que el fluido circulará de T_R hacia T_D mediante una bomba B_i , la cual posee una capacidad máxima de entrega de flujo determinado y puede cambiar su velocidad acorde a la necesidad de compensar la altura requerida H_{TD} en dicha señal que es capturada por un sensor ultrasónico para nivel L_{TD} .

El flujo de la tubería de entrada Q_i (flujo de T_R hacia T_D) puede ser regulado por la variación de velocidad de B_i y también por la apertura de V_{prop} que es una válvula proporcional, en la cual se puede

controlar su apertura dependiendo del requerimiento. Para medir el flujo de entrada se emplea un sensor de flujo tipo paleta (F_{Qi}). Las perturbaciones en T_D se generarán mediante una electroválvula V_{on_off} colocada en la parte inferior y es la salida del fluido, este al pasar de T_D hacia T_R genera un flujo de salida Q_o . Q_i se ve afectada por los actuadores B_i y V_{prop} , las acciones de los actuadores serán consideradas con la variable μ .

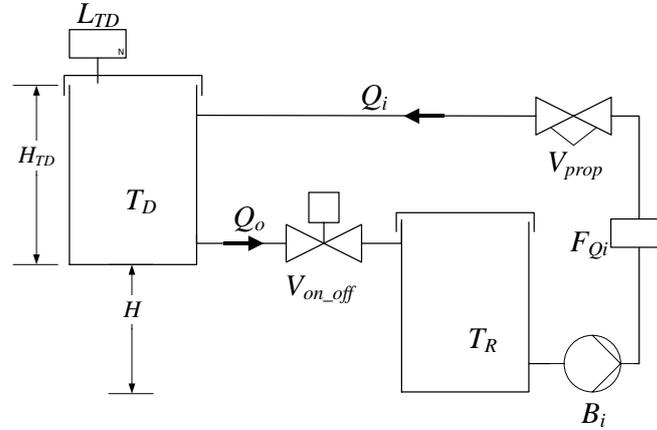


Figura 1. Escenario propuesto.

Para obtener el modelado de un sistema de tanques para fluidos según indica (Xiao *et al.*, 2010) se lo realiza como se muestra a continuación. La variable a controlar es la altura del líquido H_{TD} , reflejada por el balance de flujo de entrada y salida:

$$Q_i - Q_o = A \frac{dH_{TD}}{dt} \quad (1)$$

$$Q_i = K_\mu \mu \quad (2)$$

$$Q_o = K \sqrt{H_{TD}} \quad (3)$$

donde A es el área transversal del T_D . K_μ para este caso es la característica de los actuadores que depende del coeficiente de la bomba y de la válvula proporcional. K es un factor relativo de la válvula de descarga, ésta puede ser tomada como una constante.

La ecuación (1) expresada en su forma incremental es:

$$\Delta Q_i - \Delta Q_o = A \frac{d\Delta H_{TD}}{dt} \quad (4)$$

donde ΔQ_i , ΔQ_o , ΔH_{TD} están separadas respecto al incremento de Q_{i0} , Q_{o0} , H_{TD0} del estado de equilibrio.

Esto permitirá encontrar el modelado matemático de este escenario, el cual se podrá emplear para estudios futuros para sistemas de esta naturaleza en el caso de no contar con una planta para las pruebas.

Implementación del controlador de lógica difusa (FLC)

El FLC es empleado en el control del nivel de un tanque. Se prefiere utilizar FLC debido a que el sistema consta de un controlador denominado PID (Zhao, 2010) y se desea obtener información de cómo se comportan ambos controladores ante los cambios aleatorios en sus referencias. En la Fig. 2 se muestra la implementación del FLC en el sistema de tanques. El FLC regula la cantidad de fluido

que llega al tanque T_D mediante el voltaje de control que se aplica a los transductores de los actuadores. El FLC determina el rango efectivo de voltaje para las señales de salida, mientras que las entradas del FLC son el *error de nivel* (e_N) y *error de flujo* (e_F). El *error* es definido como la diferencia entre lo deseado y lo medido en la planta como:

$$e_N = y_d - y_a \tag{5}$$

donde y_a es el nivel actual del tanque y y_d es el nivel de referencia. El nivel de referencia será modificable de acuerdo a la necesidad del proceso y será preciso. e_F tendrá un campo de acción amplio, esto quiere decir que el flujo depende del nivel por lo tanto no tendrá un set point regulable. (Mendes *et al.*, 2011).

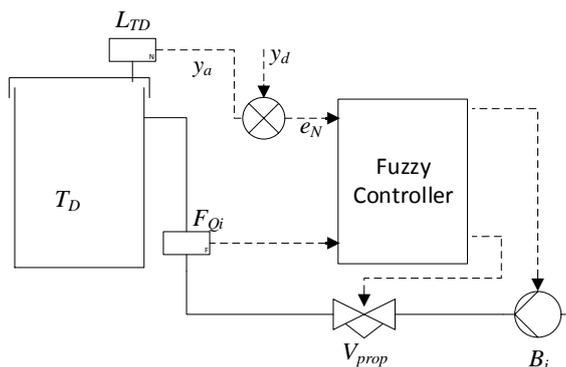


Figura 2. Esquema del FLC.

2.2. Descripción del mecanismo propuesto

Las señales de entrada que son medidas por los sensores L_{TD} y F_{Qi} son enviadas al controlador lógico programable PLC (Sivagurunathan y Jayanthi, 2012) como se aprecia en la Fig. 3, las señales de la planta pueden ser entradas o salidas analógicas (A_I , A_O) con valores que pueden ir de V_{Cmin} a V_{Cmax} en función del tiempo. También se emplean entradas o salidas digitales (D_I , D_O) con valores de V_{Dmin} o V_{Dmax} pero de manera discreta, es decir, una señal con características de alto o bajo.

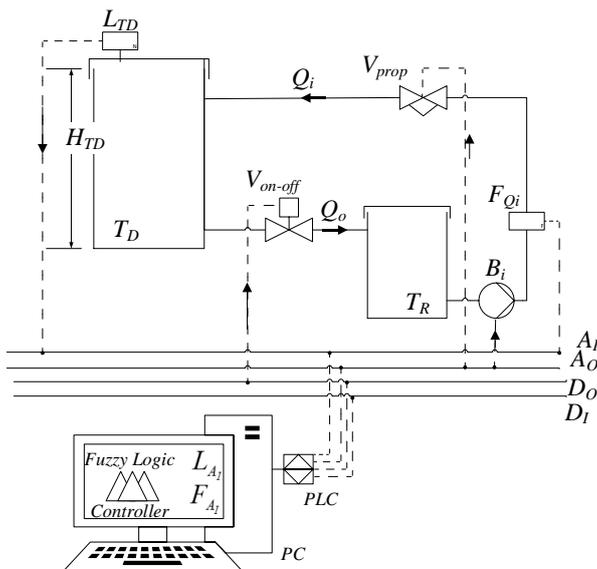


Figura 3. Mecanismo propuesto.

Estas señales se convierten en variables de memoria interna en el PLC los cuales son mapeados en una ‘Palabra’ correspondiente a 16 bits. Por lo cual, es necesario un escalamiento representado por L_{AI} y F_{AI} .

$$\begin{aligned} L_{AI} &= -0,01 * L_{TD} + 10 \\ F_{AI} &= 0,000314 * F_{Qi} + 0,3 \end{aligned} \tag{6}$$

donde L_{AI} es la señal escalada del nivel con un rango de L_{min} a L_{max} y F_{AI} es el flujo que se produce en las tuberías a la entrada con un rango de F_{min} a F_{max} .

Las salidas del controlador son señales de control de V_{Cmin} a V_{Cmax} , mediante acondicionamiento electrónico se puede elevar el voltaje de control a fuerza con una relación de V_{Fmin} a V_{Fmax} para que los actuadores puedan funcionar, por sus características estos tienen rangos de eficiencia como se muestra a continuación:

- B_i : 12 a 24 VDC (se energiza un voltaje directo (VDC) de 0 a 12 al bomba, pero no rompa la inercia).
- V_{prop} : 5 a 24 VDC (con valores por debajo de 5 VDC la válvula se energiza pero no pasa el fluido).

Parámetros experimentales

Al definir las variables de entrada y salida el siguiente paso es establecer los conjuntos difusos representativos de las variables según indica (Misa Llorca, 2011). Para construir el controlador, se representan las variables mediante 3 conjuntos difusos para cada una. Para el nivel y el flujo de entrada se definen 2 conjuntos trapezoidales **Nivel**: Bajo y Alto; **Flujo**: Bajo y Alto; y un conjunto triangular en ambos casos **Nivel**: Medio y **Flujo**, como se expresa en la Figs. 4 y 5.

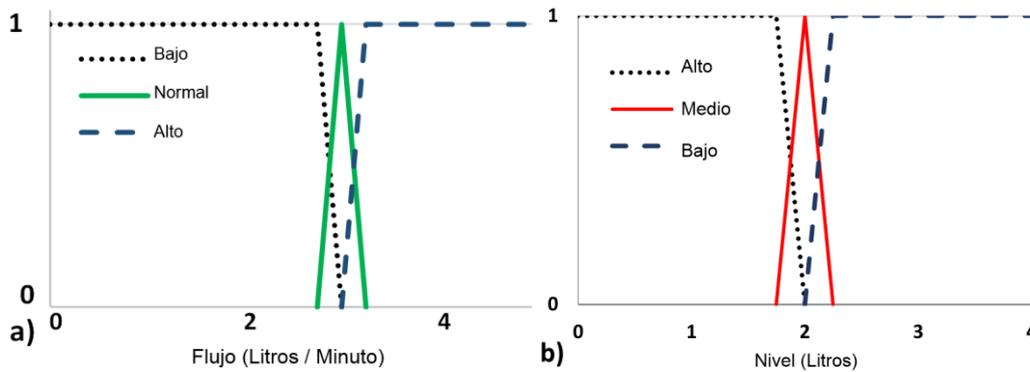


Figura 4. Conjuntos difusos de entrada de mejor resultado en las pruebas: a) nivel; b) flujo.

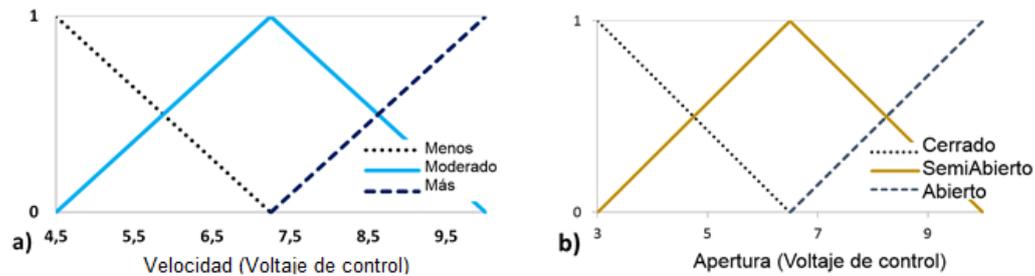


Figura 5: Conjuntos difusos de salida: a) velocidad; b) apertura.

Como se mostró anteriormente los actuadores como B_i y V_{prop} tienen rangos de trabajo óptimo, con base en esto se generan 3 conjuntos triangulares **Velocidad:** Menos, Moderado y Más; y para **Apertura:** Cerrado, Semiabierto y Abierto como se aprecia en la Fig. 6.

Tabla de reglas

Las relaciones difusas indican el grado de relación entre los diferentes grupos. Los controladores así pueden emplear todas las operaciones necesarias sobre la misma. (Misa Llorca, 2011). Basado en el comportamiento del sistema podemos expresar las reglas mediante la Tabla 1. En los sistemas basados en reglas, las relaciones entre las variables son representadas por reglas IF - THEN como se representa en la Fig. 7. Las proporciones difusas son afirmaciones que están definidas por los conjuntos difusos.

Tabla 1. Reglas del controlador.

Nivel/Flujo	Bajo	Normal	Alto
Alto	Menos & Cerrado	Menos & Semiabierto	Menos & Abierto
Medio	Moderado & Abierto	Moderado &	Moderado & Cerrado
Bajo	Mas & Abierto	Mas & Abierto	Mas & Abierto

NIVEL	FLUJO	VELOCIDAD	APERTURA
Alto	Normal	Menos	Cerrado
Alto	Alto	Menos	Cerrado
Medio	Bajo	Moderado	Abierto
Medio	Normal	Moderado	SemiAbierto
Medio	Alto	Moderado	Cerrado
Bajo	Bajo	Más	Abierto
Bajo	Normal	Más	Abierto
Bajo	Alto	Más	SemiAbierto

Figura 6. Relación entrada / salidas.

2.3. Diseño de la prueba

Se analizará con una prueba el comportamiento de la planta mediante una entrada escalón en la referencia. Se tomarán como resultados la respuesta del nivel en el tanque y las variables que gobiernan a los actuadores.

La prueba se describe en el siguiente pseudocódigo:

1. Inicialización de variables: H_{TD} , a , b , c , t , V_{on_off}
2. Ingresar los valores de $H_{TD} = a$; este valor es el nivel requerido (H_{TD}) en el tanque T_D
3. Activar la perturbación V_{on_off} ; Esta transfiere el fluido del tanque T_D al tanque reservorio T_R
4. Llamar $T_{tiempo\ de\ prueba}$; esta es una subrutina para que la planta cambie su valor de referencia (a) después de un tiempo determinado
5. Elegir el siguiente valor para H_{TD} ; evalúa el control con otro requerimiento H_{TD}
6. $H_{TD} = b$; b es el Segundo valor a probar en la referencia
7. Llamar $T_{tiempo\ de\ prueba}$; esta es una subrutina para que la planta cambie su valor de referencia (b) después de un tiempo determinado
8. Elegir el siguiente valor para H_{TD} ; evalúa el control con otro requerimiento H_{TD}
9. $H_{TD} = c$; este es el tercer valor de prueba

10. Llamar $T_{\text{tiempo de prueba}}$; esta es una subrutina para que la planta cambie su valor de referencia (c) después de un tiempo determinado
11. Guardar los valores de L_{AI}
12. Fin
13. Subrutina $T_{\text{tiempo de prueba}}$
14. Lazo $T_{\text{tiempo de prueba}}$ no es alcanzado aún
15. Inicializar la captura de datos L_{AI} ; captura los valores del nivel de tanque H_{TD}
16. Si $t < t_{\text{test}}$ entonces; t es el tiempo que lleva ejecutándose la sentencia y t_{test} es el tiempo determinado para que se finalice la acción
17. $H_{TD} = a, b, c$; valores de referencia
18. Caso contrario
19. Retornar
20. Finalizar el lazo

Figura 7. Seudocódigo de prueba.

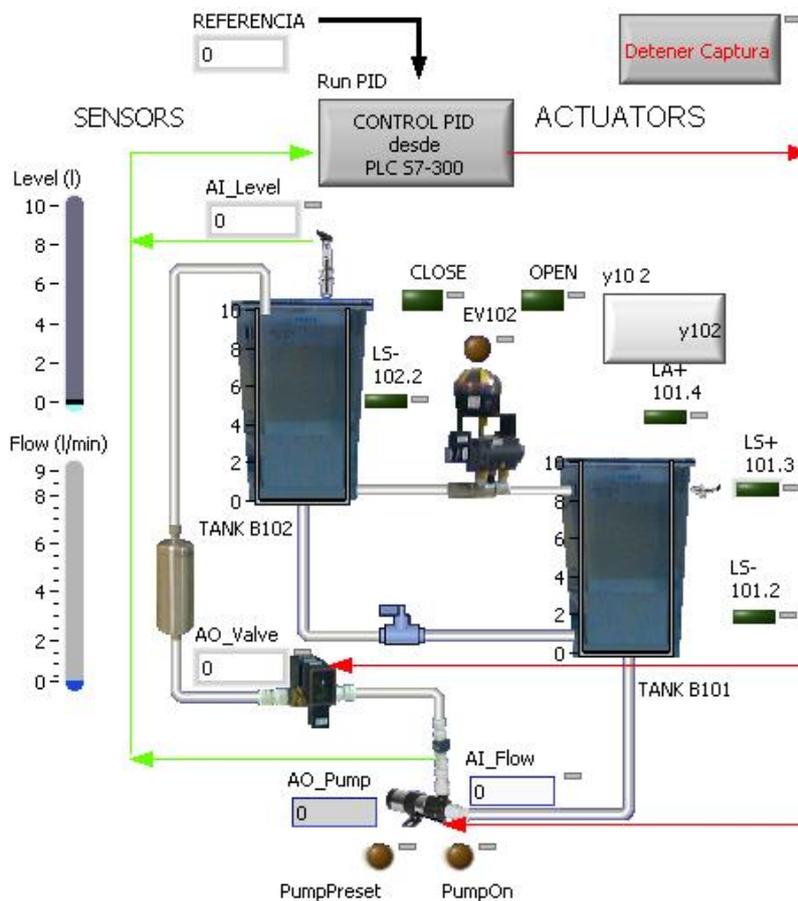


Figura 8. Sistema SCADA.

La prueba se detalla a continuación, primero se analizan las variables que fueron captadas y escaladas (L_{AI} y F_{AI}). Estas pueden visualizarse en el Scada desarrollado. Luego se debe seleccionar el controlador actual o el propuesto en este trabajo. Antes de comenzar la prueba, para generar datos exactos en el momento de la captura se encenderá la bomba en caso de faltar un nivel óptimo de fluido, si ocurriera el caso contrario y se requiere bajar el nivel, se acciona V_{on_off} para efectuar la salida de fluido, estas dos acciones se realizan hasta alcanzar el nivel requerido. Para el inicio de las pruebas (paso 1) se coloca H_{TD} en la Referencia con un valor a representado por el valor a (paso 2);

este es el primer nivel al cual se debe estabilizar el sistema en T_D , mediante la V_{on_off} se genera una perturbación que consiste en abrir la salida del líquido hacia el T_R (paso 3), en el paso 4 se procede a capturar los datos en una base. Luego de un t_{test} propuesto se cambia el valor de Referencia al valor b y se continúa con el registro de la información, los pasos anteriores se emplean hasta completar con la Referencia 3 que tiene un valor de c , para finalizar el programa se selecciona una ubicación y nombre para el archivo que contiene todos los datos almacenados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación del desempeño de los sistemas de control

Para el caso del controlador PID la planta tiene su proyecto original, en el cual el nivel solo se lo regula mediante B_i . En este caso no se cuenta con el control de la V_{prop} ; esta será agregada para convertir a la planta en un sistema MIMO el cual tendrá un mejor rendimiento como se aprecia en las Figs. 9 y 10. Los resultados estadísticos se obtuvieron de las variables una vez que el proceso lograba una estabilidad relativa, debido a las perturbaciones y cambios bruscos se trabajan con un rango de control dentro de 0,2 litros que nos dará un trabajo óptimo con las ondulaciones de la variable medida debido a la caída del producto en el tanque.

En la Fig. 9 se muestra dos controles los cuales no sobrepasan la referencia y que tienden a estabilizarse lentamente. La perturbación fue realizada con una electroválvula a la salida del tanque. El caso mencionado anteriormente lo desempeña de mejor manera el controlador Difuso, el cual logra que el sistema se adapte a las circunstancias externas buscando estabilizar el proceso.

3.2. Validación de resultados

El resumen estadístico del nivel que fue obtenida de los 3 puntos de referencia fue el siguiente:

Tabla 2. Datos estadísticos de la variable de nivel en estado estable con el controlador PID.

Referencia	Error típico control difuso	Error típico control PID
2		
2,5	0,0056	0,106
3		

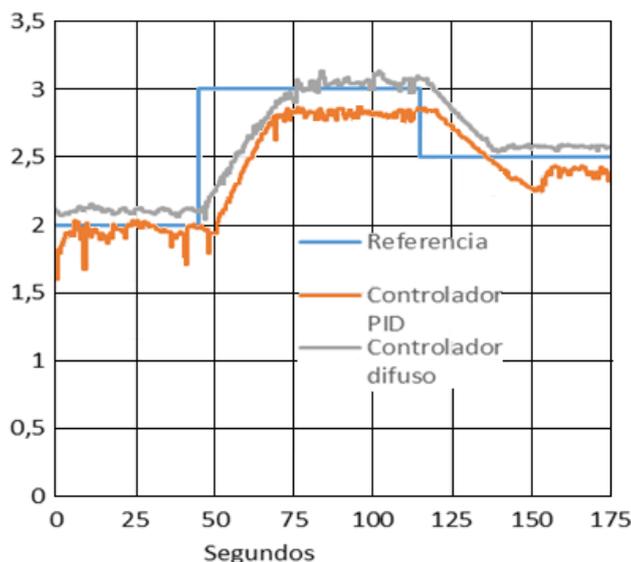


Figura 9. Curva de respuesta a diferentes referencias.

Al comparar las respuestas de los controladores revisando la media y moda, en el controlador original que es el PID no alcanza a la referencia en los puntos registrados. Pero el controlador difuso tiene un acercamiento a la referencia con error mínimo dando 0,0056 que es la mitad del error que presenta el PID.

Otro factor importante es el comportamiento de la bomba, para asegurar que esta se extienda su tiempo de vida útil, es necesario tener cuidado con el voltaje alimentado en función del tiempo, tratando de evitar picos abruptos. En la Fig. 9 se muestra el rendimiento de la bomba con el controlador PID y el controlador difuso. Realizando un acercamiento en la gráfica del comportamiento las curvas de voltaje de la bomba, se puede apreciar como el controlador Difuso lleva a la bomba a tener un funcionamiento más regular evitando posibles daños mecánicos en la misma.

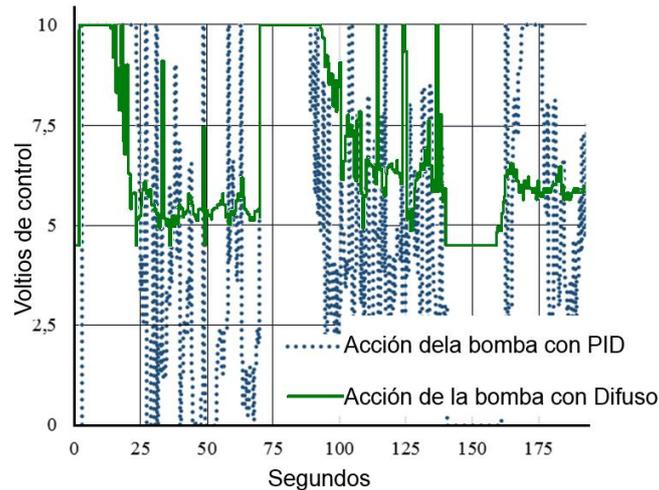


Figura 10. Curvas de consumo de la bomba.

4. CONCLUSIONES

El control PID con el transcurrir de los años ha sido de aplicación generalizada, su éxito se debe al hecho de funcionar de manera sencilla con varios fenómenos físicos. Por esto es muy empleado en las industrias. Pero se ve limitado al controlar las salidas de los procesos cuando se ven involucrados en cambios bruscos en sus referencias. El estudio comparativo muestra un FLC que es capaz de resolver la sintonización necesaria en el cambio de referencias y perturbaciones. Desde otros puntos de vista los FLC al tener esta versatilidad de ser precisos y exactos pueden ser empleados en diferentes campos como la robótica donde las acciones tienen grandes velocidades y precisión. Por lo tanto el método propuesto ofrece un mejor rendimiento con relación al error mínimo que se requiere en las industrias, brindando así una mejor acción en los actuadores evitando futuros daños.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por permitir el uso de sus laboratorios. Este trabajo fue apoyado en parte por el Grupo de Investigación en Sistemas de Control y Robótica (GISCOR) UPS-Sede Guayaquil.

REFERENCIAS

- Agila Gálvez, W.E., 2013. Detección y control del estado de una Pila PEM para funcionamiento óptimo: Arquitectura de agentes de percepción y control. Tesis Doctoral para la obtención del Título de Grado de Doctor. Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, 228 pp. Disponible en http://digital.csic.es/handle/10261/83588?mode=full&submit_simple=Mostrar+el+registro+Dublin+Core+completo+del+%C3%ADtem+%C2%BB.
- Anderson, N.A., 1997. *Instrumentation for process measurement and control* (3rd ed.). CRC Press, 512 pp.
- Creus Solé, A., 2012. *Instrumentación industrial* (8th ed.). México, Editorial Alfaomega, 792 pp. Disponible en <http://www.freelibros.org/ingenieria-industrial/instrumentacion-industrial-8va-edicion-antonio-creus-sole.html>.
- Ogata, K., 2004. *System Dynamics* (4th ed.). University of Minnesota, Pearson Education, Inc., 288 pp. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/64762492/Katsuhiko-Ogata-System-Dynamics-4th-Edition> en octubre 2014.
- Manikandan, P., M. Geetha, T.K. Vijaya, K.S. Elamurugan, 2013. Real-time implementation and performance analysis of an intelligent fuzzy logic controller for level process. *IEEE 4th International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, 6 pp.
- Mendes, J., R. Seco, R. Araujo, 2011. Automatic extraction of the fuzzy control system for industrial processes. *IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 8 pp.
- Misa Llorca, R.G., 2011. *Control inteligente. Maestría de Automatización y Control Industrial*. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, ESPOL, Guayaquil.
- Sivagurunathan, G., K.B. Jayanthi, 2012. Fuzzy logic based self tuning of PI controller for a non linear spherical tank system. *IEEE International Conference on Computational Intelligence & Computing Research (ICCIC)*, 6 pp.
- Xiao, Q., D. Zou, P. Wei, 2010. Fuzzy adaptive PID control tank level. *International Conference on Multimedia Communications*, Hong Kong, 149-152.
- Zhao, Y., 2010. Research on application of fuzzy PID controller in two-container water tank system control. *International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI)*. Kaifeng, China, 679-682.