

Neutralización de los Niveles de pH por Medio de Lógica Difusa

Casimiro. A. Rocha

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE, Barranquilla, Colombia, crocha@uautonoma.edu.co

José R. Escorcía Gutierrez

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE, Barranquilla, Colombia, jescorcía@uautonoma.edu.co

RESUMEN

En este artículo se detalla la caracterización de un proceso no lineal como es el de neutralización de pH, dentro del modelo matemático se presenta el modelado del sensor transmisor y del elemento final de control, es decir, una válvula comercial con las características específicas que requiere el proceso en mención. Una vez finalizado el modelado de los elementos que componen el lazo abierto del sistema planta, sensor transmisor y actuador se prosigue con el diseño de controladores PID y Fuzzy y sus respectivas pruebas de rendimiento para resaltar en qué ambiente de operación cada controlador se aventaja con respecto al otro. El diseño y pruebas que se realizan son concernientes a controladores Fuzzy y tipo PID sintonizados bajos los criterios de IAE y Dahlin por la dinámica que presenta el proceso.

Palabras claves: Controlador, Criterios de sintonización, Control realimentado, Lógica difusa y Neutralización de pH.

ABSTRACT

On this article it's detailed the characterization of a non linear process just as the pH neutralization process, inside this model it's presented the transmitter sensor model an the final element of control, which is a commercial valve with specific characteristics that the process requires. Once finished the modeling stage on open loop, the transmitter sensor and the actuator it's then designed a PID and a Fuzzy controller with their own performance criteria to select in which environment of operation each controller is better than the other. The designs and tests made are based on Fuzzy and PID controllers tuned with IAE and Dahlin criteria depending on the dynamics of the process.

Keywords: Controller, Tuning Criteria, Feedback Control, Fuzzy and Neutralization

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de control ha estado evolucionando con el pasar del tiempo en busca de estrategias más robustas y flexibles en pro de las exigencias de los procesos industriales, donde los métodos de producción sean lo más eficiente posible para que no repercutan en pérdidas sin sacrificar la calidad del producto. Las nuevas estrategias de control son integrables al momento de relacionar todos los elementos del sistema de control para su supervisión, administración, recopilación y manipulación de variables que intervengan para ejercer control al proceso a un nivel específico para que éste disponga de los recursos necesarios, aumentado así la eficiencia de producción. La integración de los elementos de control trae consigo la capacidad de adaptación del sistema de control ante comportamientos no lineales que presente el proceso por su naturaleza.

El proceso en desarrollo es la neutralización de pH del ácido nítrico (HNO_3) en presencia de una sustancia amortiguadora (NaHCO_3) mediante la manipulación de la base hidróxido de sodio (NaOH). Este proceso presenta un comportamiento no lineal con gran dificultad para su modelamiento matemático. Gracias al modelo desarrollado por Gustafsson se logra llegar a una aproximación del modelo en mención, siendo esta la apertura del primer tema a tratar. En el proceso de neutralización de pH se presentan comportamientos no lineales y no

predictivos por lo que se debe desarrollar una estrategia de control tal que el principal papel sea la experticia del operario debido a que el proceso responde mejor al conocimiento de él que de una técnica de control automático. La información proveniente de la experticia del operario se puede plasmar en una estrategia de control difuso, la cual se desarrolla en el apartado 3. Con el fin de realizar comparaciones y afirmar la idea planteada acerca que el proceso de neutralización de pH presenta mejores resultados ante la experticia del operario, se desarrolla en la última parte la implementación de técnicas de control automático con el propósito de desarrollar comparaciones a nivel técnico ante los esquemas de control planteados. [1]

2. COMPORTAMIENTO Y MODELO DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN DE PH

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En muchos procesos biotecnológicos como por ejemplo procesos alimenticios, manejo de residuos tóxicos, manejo de líquido contaminante, entre muchos otros, el nivel de pH es de vital importancia debido a que en él se amparan muchos estándares y entes reguladores del ambiente y de salud por lo que se hace necesario la implementación de un esquema de control que asegure un nivel dada la aplicación. Como se planteó en la introducción, el control de esta variable es complicado por el hecho de que su naturaleza es no lineal evidenciada en la curva de titración (característica del flujo de salida del proceso) que define el modelo matemático del pH que se enseña en la Ecuación 1 y Figura 1. Además, el comportamiento no lineal es exhibido por los reactivos que entran al sistema que establecen el nivel de pH. El incremento o decremento que presenta el nivel de pH en un proceso obedece a la dinámica de los reactivos sustentando un comportamiento en el proceso de fase mínima.

$$pH = -\log(H^+) \quad \text{Ecuación 1}$$

En la Figura 2 se presenta el modelo a tratar, el cual consta de un Tanque 2 ó Reactor con tres líneas de abastecimiento. Una de ellas corresponde al flujo de la solución ácida (HNO_3) denotada como q_{s1} que actúa como perturbación al proceso proveniente de un Tanque 1 que funciona como un sistema de rebalse con el objetivo de mantener una presión constante en el válvula (q_{s1}) y a su vez un caudal proporcional a la apertura de la válvula, el otro flujo denotado como q_3 es la solución amortiguadora ($NaHCO_3$) cuyo pH se desea neutralizar mediante el mezclado de las 3 soluciones que se vierten en el tanque 2, y la manipulación del flujo q_2 de NaOH que es una solución base debido a que éste exhibe un flujo mayor que las otras soluciones exhibiendo la mayor constante de tiempo. Una verificación de esto se encuentra plasmada en la Figura 3. En otra instancia cabe resaltar que el nivel de pH en el flujo de salida presenta un retardo producto del tiempo que se toma en lograr una mezcla homogénea entre las líneas de abastecimiento del tanque 2 y el tiempo que se toma el sensor en dar la lectura. [2]

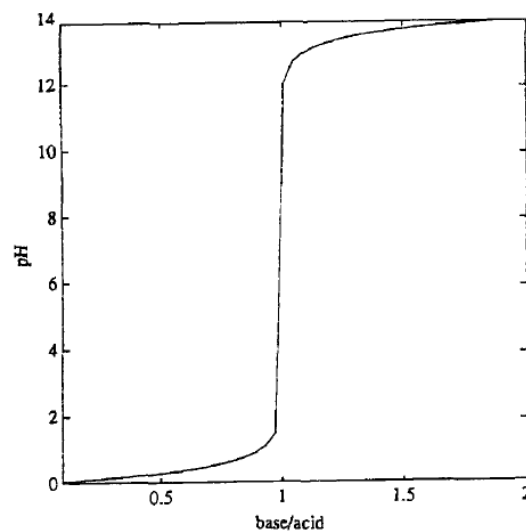


Figura 1. Curva de titración para un proceso de neutralización de pH para un ácido y base fuerte.

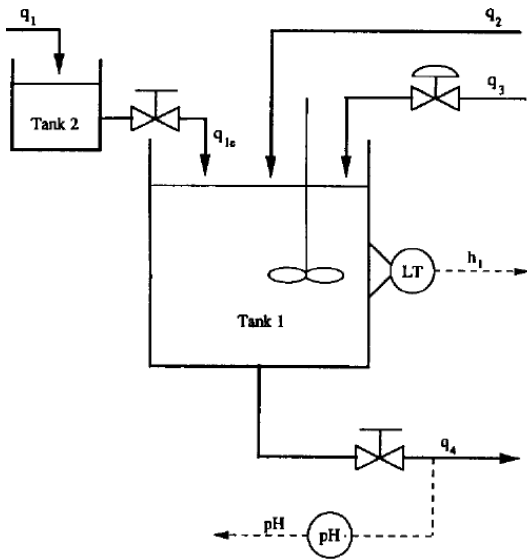


Figura 2. Proceso de Neutralización de pH.

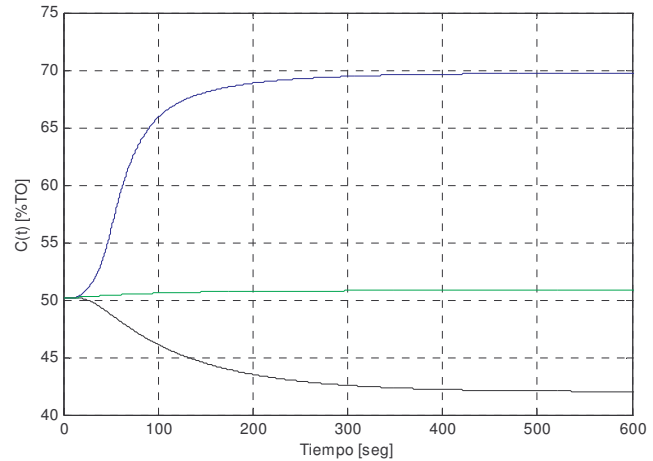


Figura 3. Comportamiento del Nivel de pH ante Cambios del 20% en Aumento de los Flujos del Proceso.

2.2 MODELO MATEMÁTICO ANALÍTICO DEL PROCESO

El proceso descrito anteriormente y que se enseña en la Figura 1 fue descrito por Hall y Seborg [3], y Henson y Seborg [4] basados en el modelo dinámico de un proceso de pH desarrollado por Gustafsson y Waller [5], quienes plantearon como solución al proceso dos modelos, estático y dinámico. Del concepto de equilibrio químico se desarrolla el modelo matemático estático mediante la introducción de los momentos invariantes de reacción para cada flujo entrante, definidas en la Ecuación 2 y Ecuación 3.

$$W_{a1} = [H^+]_i - [OH^-]_i - [HCO_3^-]_i - 2[CO_3^{2-}]_i \quad \text{Ecuación 2}$$

$$W_{b1} = [H_2CO_3]_i - [HCO_3^-]_i - [CO_3^{2-}]_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde i toma los valores de 1, 2, 3 y 4 para ácido, amortiguador, base y flujo de salida respectivamente. W es la carga invariante y C la concentración de carbono.

A partir de los momentos invariantes de la reacción se definen las constantes de disociación consignadas en la Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6. Mediante ellas se plantea el modelo matemático del nivel de pH en el proceso expresado en la Ecuación 7 que da lugar a la Ecuación 1.

$$K_{a1} = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$K_{a2} = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$K_w = [H^+][OH^-] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$W_b \frac{K_{a1} + 2K_{a1}K_{a2}}{[H^+] + \frac{2K_{a1}K_{a2}}{[H^+]}} + W_a + \frac{K_w}{[H^+]} - [H^+] = 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

Descrito el modelo estático que da lugar a la disociación y asociación de las soluciones presentes en el proceso se procede al desarrollo del modelo dinámico del sistema. En primera instancia se define un balance de masa en el tanque 2 (línea de abastecimiento de ácido) mediante el conjunto de ecuaciones: Ecuación 8, Ecuación 9. Donde A_2 , son el área transversal y la altura de solución ácida en el tanque 2, y C es el coeficiente de la válvula.

$$A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = q_1(t) - q_{e1}(t) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$[q_{e1}(t)]. [h_2(t)] \quad [1, 2]$$

$$q_{e1}(t) = C_{v1} h_2^{0.5}(t) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$[2, 2]$$

Tal y como se prosiguió en la descripción del modelo dinámico del tanque 2, se realiza el mismo balance de masa descrito anteriormente pero en el tanque 1. Ecuación 10 y Ecuación 11 hacen referencia al modelo en donde interceden A_1 , son el área transversal y la altura del tanque 1, y C_{v4} son el coeficiente, el exponente de la válvula y z es la distancia vertical del fondo del tanque 1 hacia la válvula.

$$A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) - q_4(t) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$[q_4(t)]. [h_1(t)] \quad [3, 4]$$

$$q_4(t) = C_{v4} [h_1(t) + z]^n \quad \text{Ecuación 11}$$

$$[4, 4]$$

Aunque el modelo dinámico del proceso de neutralización de pH esté cerrado, no significa que intervengan todas las variables que inciden en el proceso, por lo que se plantea una última ecuación donde se relaciona los momentos invariantes de la reacción, tanto la solución ácida (Ecuación 12) y la solución base (Ecuación 13) a la salida del proceso.

$$A_1 h_1 \frac{dW_{a4}(t)}{dt} = W_{a1} q_1(t) + W_{a2} q_2(t) + W_{a3} q_3(t) - W_{a4}(t) q_4(t) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$[5, 5]$$

$$A_1 h_1 \frac{dW_{b4}(t)}{dt} = W_{b1} q_1(t) + W_{b2} q_2(t) + W_{b3} q_3(t) - W_{b4}(t) q_4(t) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$[6, 6]$$

2.3 SELECCIÓN Y MODELADO DEL ELEMENTO FINAL DE CONTROL

Los elementos finales de control (EFC) son implementados en un sistema de control con el propósito de mantener la variable del proceso en un valor predeterminado por el usuario o por la misma estrategia de control implementada. Los EFC mantienen una acción de control sobre la variable manipulada cuyo valor modifica la variable controlada. En el caso del proceso de neutralización de pH se sabe por la descripción del proceso que la variable a manipular es el flujo de la solución base.

Las válvulas de control pertenecen al gran grupo de los EFC y el propósito de ellas es la manipulación de flujo de un líquido compresible o no para controlar la variable de interés. Para la estructura interna de la válvula consultar [6].

Las válvulas se clasifican según la acción de control, sea de falla abierta, es decir, que en caso de ausencia de la señal de control ésta permitirá el flujo máximo de la variable a manipular, en el caso de falla cerrada, la válvula

estrangula en su totalidad el paso flujo. De acuerdo con los Doctores Smith y Corripio, quienes plantean que la seguridad del proceso requiere que se considere el efecto que el flujo ejercería sobre los equipos que se encuentran antes y después de la válvula de control, conlleva a la pregunta: ¿En caso de ausencia de la señal de control, cuál es la condición segura del proceso? Para poder dar una respuesta es necesario conocer la dinámica química del proceso. En condición de estado estacionario se surte al tanque en un segundo, 16.6 ml de ácido, 0.55 ml de amortiguador y 15.6 ml de base para que el nivel de pH del sistema se mantenga en 7. Si se incrementa el valor de solución del ácido a la tasa máxima que puede entregar, es decir, 50 ml y se mantiene constante la solución amortiguadora, se llega a que se necesitan 47 ml de base para mantener el nivel de pH; bajo este margen es claro que no se puede seleccionar una válvula de falla abierta debido a que una falla en el sistema de control ésta permitirá el paso de 80 ml de base en un segundo tornando la solución resultante con un alto nivel de pH. Una válvula de falla cerrada es la indicada a implementar en el sistema de control del proceso de neutralización de pH debido a que ante un falla en el sistema de control, la condición segura de la planta se lleva a cabo con el mezclado de la solución ácida y amortiguadora durante un tiempo no muy prolongado para altos volúmenes de ácido.

Seleccionado el EFC adecuado para el sistema de control se procede con el modelamiento de éste y para ello es necesario consultar entre los fabricantes de válvulas una que tenga las características necesarias para manejar el flujo máximo que se tiene en la línea de abastecimiento de la solución base, el comportamiento físico del fluido y, de vital importancia, la rapidez del cambio del flujo en presencia de la señal de control debido a que se busca que el flujo cambie en pequeñas proporciones ante cambios altos en las perturbaciones. De acuerdo con lo anterior se escoge una válvula isoporcentual de referencia K-98651-00 del fabricante Cole-Parmer debido a que él presenta pruebas de velocidad de respuesta de la válvula, parámetro necesario para su modelamiento (ver Ecuación 14).

$$\tau_v \frac{dq_v(t)}{dt} + q_v(t) = a \frac{m}{100} \quad \text{Ecuación 14}$$

[6,6]

2.4 SELECCIÓN Y MODELADO DEL SENSOR TRANSMISOR

El sensor cumple con la función de convertir una variable física medible en otra capaz de interactuar con el sistema de control por medio del transmisor, el cual tiene como principal propósito generar una señal de salida en %TO que relacione la variable de proceso sensada o medida.

Un sensor transmisor exhibe tres características relevantes al momento de su selección y son: sensibilidad, exactitud y resolución. Gracias al modelo planteado por Seborg y Henson no hay necesidad de su seleccionamiento debido a que ellos presentan los parámetros del sensor implementado en su esquema de control. En la Ecuación 15 se enseña el modelo del sensor transmisor con una constante de tiempo de 15 segundos.

$$\tau_s \frac{dC(t)}{dt} + C(t) = K_s(pH(t) - pH_{min}) \quad \text{Ecuación 15}$$

[7,7]

Para finalizar se plantean las hipótesis que se consideran para la redacción del modelo:

- ✓ Mezclado Ideal
 1. No se agrega energía en forma de trabajo.
 2. No se presentan gradientes de temperatura al interior del sistema.
 3. Las propiedades físicas y químicas de lo que sale del sistema son las mismas de lo que hay en el interior del sistema.
- ✓ El sistema se encuentra aislado térmicamente
- ✓ Los efectos de la presión dinámicas no son relativas.

En la Tabla 1 se presenta la descripción de las variables de entrada y salida del proceso de neutralización de pH.

Tabla 1: Descripción de Variables de Entrada y Salida del Proceso de Neutralización de pH.

Variable de Entrada	Variable de Salida
$q_1(t)$	$q_4(t)$
$q_2(t)$	

3. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES REALIMENTADOS Y DIFUSOS AL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN DE PH.

3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO

Del comportamiento y modelo del proceso propuesto por Henson y Seborg [4] se llegó a que éste presenta no linealidades por las razones expuestas anteriormente. Luego de implementar el sensor transmisor y el EFC en el proceso en mención se procede a evaluar el proceso evidenciando su comportamiento no lineal por medio de la ganancia en estado estable, Figura 4; constante de tiempo, Figura 5 y tiempo muerto o retraso que presenta el proceso, Figura 6. De acuerdo a la dinámica del proceso presentada en la Figura 3 ante cambios en los flujos de entrada se asegura que el proceso presenta un comportamiento de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), modelo matemático que se presenta en la Ecuación 16.

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad \text{Ecuación 16}$$

En la Tabla 2 se consignan los valores del modelo FOPDT ante un cambio en la señal de control $m(t)$ del 20%.

Tabla 2: Parámetros de Caracterización del Proceso de Neutralización de pH Ante un Cambio en la Señal de Control de 20%.

K_p	2.119 %TC/%C
τ	30.420 seg
θ	9.872 seg

3.2 SELECCIÓN, SINTONIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL PID

Antes de definir la selección del algoritmo de control, se debe proceder con la acción de control, la cual se obtiene mediante el supuesto de un aumento en la lectura del sensor transmisor, es decir, una elevación en el nivel de pH de la solución de salida. Ante esta situación el controlador debe tomar una decisión que conlleve al proceso a una condición segura, ésta es la de disminuir la señal de control para estrangular el flujo de la solución base debido a que el aumento en el nivel de pH significa que en la solución de salida está en presencia de mas iones de hidróxido de sodio. Ante la condición aumento/decremento y la falla de la válvula definida anteriormente, la acción de control del controlador es inversa o reversa.

Los criterios de sintonización a implementar en el proceso en desarrollo son IAE y Dahlin que maneja un margen de error pequeño ante cambios en la consigna del controlador PID con modificaciones de fondo. Además, los criterios a implementar se evaluaron en diferentes plantas industriales de [7].

En la Tabla 3 se encuentran consignados los parámetros de sintonización del controlador en base a los criterios de sintonización IAE y Dahlin. Implementado y sintonizado el controlador, sin importar el criterio de sintonización, se re-sintoniza según el nivel experticia del operario a causa de las no linealidades que presenta el proceso y con base a la Figura 7 para obtener la dinámica deseada por el proceso de pH.

Tabla 3: Parámetros de Sintonización del Controlador por los Criterios de Dahlin e IAE.

	<i>Dahlin</i>	<i>IAE</i>
K_c	1.2118 %TO/%t	1.4541 %TO/%t
τ_i	30.4200 seg	30.4200 seg
τ_d	4.9360 seg	4.9360 seg

Factor	Tiempo Levantamiento	Sobre Impulso	Tiempo Asentamiento	Error estado Estable	Estabilidad
Incrementar K_c	Disminuye	Aumenta	Poco aumento	Disminuye	Degrada
Incrementar τ_i	Poco Aumento	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Mejora
Incrementar τ_d	Poca Disminución	Disminuye	Disminuye	Poco Cambio	Degrada

Figura 7. Efectos de los Parámetros de un Controlador PID. [8]

Al igual que se desarrollaron las pruebas de rendimiento de los controladores implementados en las plantas industriales descritas en [7], se prosigue con las 2 pruebas típicas de rendimiento que son: 1. Cómo responde el proceso ante un cambio en la consigna y 2. Qué tanto se desvía la variable de interés de la consigna en presencia de una perturbación. Las pruebas en mención se enseñan en la Figura 8 y Figura 9.

De la Figura 8 no es claro qué controlador es el más adecuado a implementar en el sistema de control del proceso neutralización de pH. Aunque de la Figura 9 se nota que el controlador sintonizado por el criterio de IAE presenta menor desviación de la consigna en presencia de la consigna, cabe aclarar que las respuestas presentadas en la Figura 8 y Figura 9 pueden ser revaluadas con base a la experticia del diseñador con el propósito de mejorar la respuesta del sistema, tal como se enseña en la Figura 10, la cual se obtuvo eliminando el efecto derivativo y reduciendo la ganancia del controlador. Sin embargo, ante la evidente mejora del proceso en un cambio en la consigna y la desviación de la variable de interés con respecto a la consigna (Nivel de pH), se ve sacrificada la velocidad de respuesta del proceso.

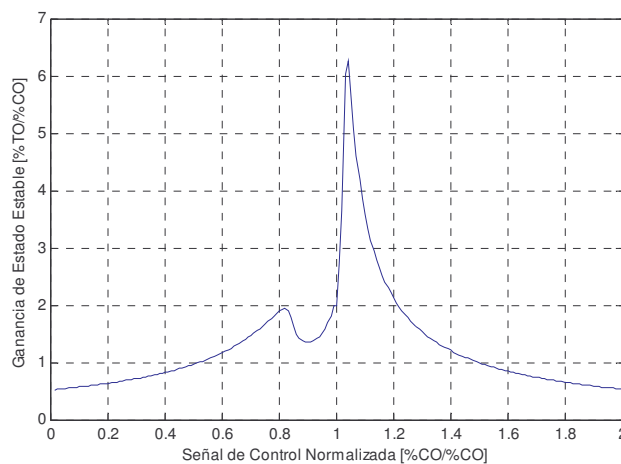


Figura 4. Análisis del Comportamiento No Lineal de la Ganancia de Estado Estable del Proceso de Control de pH.

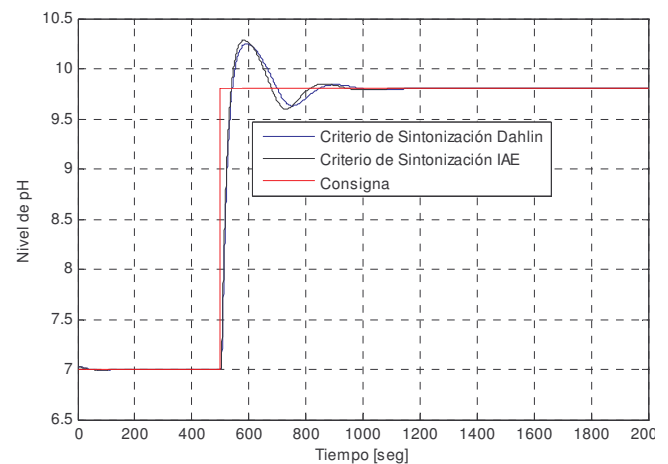


Figura 9. Comportamiento de la Variable Controlada en Presencia de una Perturbación del 40% en la Entrada de la Solución Ácida.

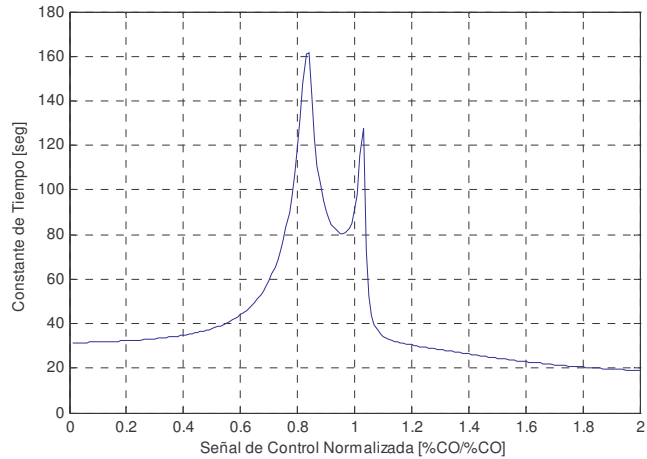


Figura 5. Análisis del Comportamiento No Lineal de la Constante de Tiempo del Proceso de Control de pH.

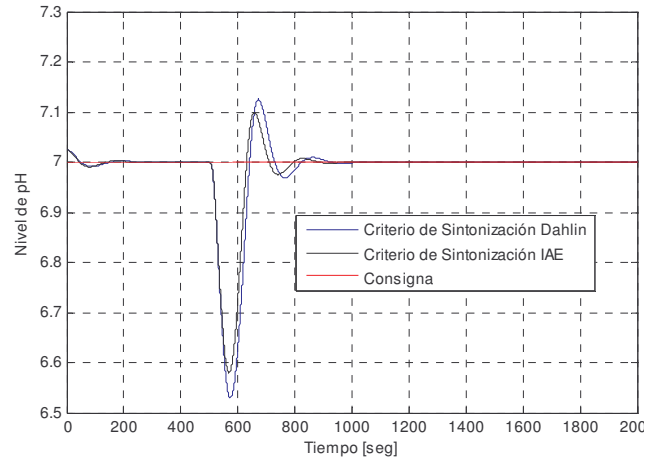


Figura 8. Comportamiento de la Variable Controlada Ante un Cambio en la Consigna de 40%.

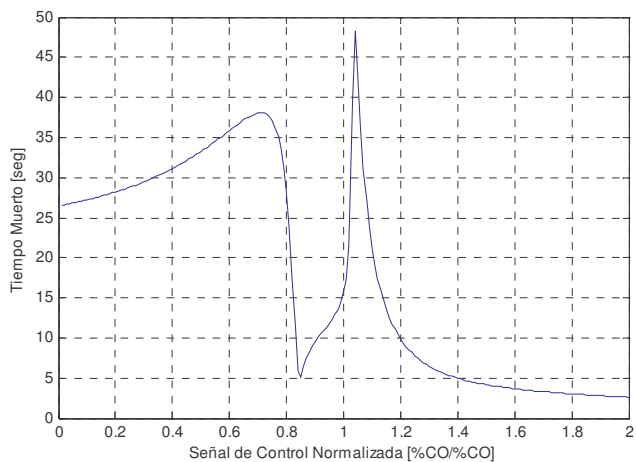


Figura 6. Análisis del Comportamiento No Lineal del Tiempo de Retardo del Proceso de Control de pH.

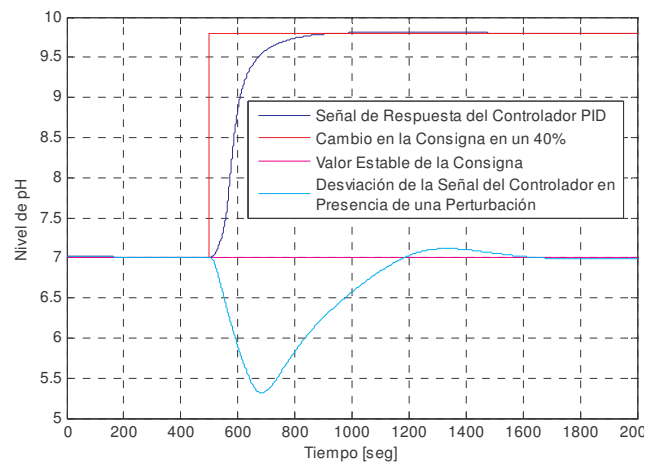


Figura 10. Comportamiento de la Variable Controlada ante un Cambio en la Consigna y en Presencia de una Perturbación del 40 % en la Entrada de la Solución Ácida.

3.3 SINTONIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIFUSO TIPO PI

El controlador difuso que se desea implementar está basado en la experticia de los autores de [9], donde el principio de funcionamiento se basa en la heurística de los controladores PI. El método de ajuste de los parámetros de sintonización se lleva a cabo por el ajuste de escaladores cuya función es la de relacionar la variable de entrada al controlador de la función de membresía. En [9] se plantean dos métodos de ajuste o bancos de ecuaciones de los parámetros de sintonización: 1. Relación entre tiempo de muestreo y señales de error, 2. Dependencia de los parámetros estáticos y dinámicos del proceso.

Para desarrollar la sintonización de un controlador difuso generalizado se parte del estudio previo desarrollado para el conocimiento del proceso de neutralización de pH. En la Tabla 4 se consignan los parámetros de

sintonización por medio del método 2 de [9] ya que éste no presenta ambigüedad en la definición del tiempo de muestreo del controlador, es decir, el método de ajuste está bajo la dependencia del comportamiento no lineal del proceso.

Tabla 4: Parámetros de Sintonización del Controlador Difuso Generalizado.

K_{ε}	0.0160 %TO
K_{dc}	0.8755 %CO/%TO
K_{dm}	0.1697 %CO/%TO

Sintonizado el controlador difuso se procede de igual forma a evaluar el comportamiento del controlador proceso en el inciso anterior, es decir, comportamiento de la variable de interés ante un cambio en la consigna y en presencia de una perturbación en la solución ácida, ambas en un aumento del 40%. En la Figura 11 se presenta los comportamientos a los que se hace referencia.

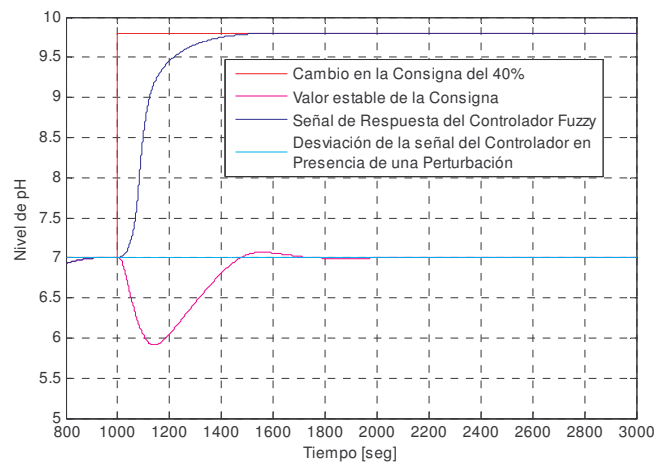


Figura 11. Comportamiento de la Variable Controlada en el Controlador Fuzzy ante un Cambio en la Consigna y en Presencia de una Perturbación del 40 % en la Entrada de la Solución Ácida.

Empero, a pesar de que la acción del controlador PID re-sintonizado es la que causa menor desviación de la variable de interés con respecto a la consigna en presencia de una perturbación y que la velocidad de respuesta es más rápida que la acción del controlador Fuzzy, éste último logra corregir el valor de la variable sin introducir comportamiento oscilatorio al sistema, comportamiento que si introduce la acción del controlador PID.

4. CONCLUSIONES

Es comparable cómo la acción del controlador Fuzzy mejora la dinámica del sistema gracias a la experiencia del Ingeniero en Planta o la persona que conozca la dinámica de ésta con relación a la acción del controlador PID, que por más que se re-ajusten los parámetros que intervienen en el esquema de sintonización del controlador, no se puede eliminar el comportamiento oscilatorio que introduce éste a la dinámica del proceso pero sí se logra obtener una velocidad de respuesta rápida y desviación de la variable de interés menor con respecto a la consigna que la acción del controlador Fuzzy. Sin embargo, no es suficiente el comportamiento que presenta el proceso ante los cambios que se producen en la consigna sobre la variable manipulada; debe complementarse con el comportamiento del proceso en presencia de perturbaciones que en el proceso de interés intervienen el flujo de la solución ácida y amortiguadora. Ante esta perspectiva, el controlador Fuzzy presenta su fuerte ya que éste correlaciona el error presente con el cambio del error en el tiempo mientras que el controlador PID al no definir la

variación del error lleva al sistema a un estado críticamente oscilatorio, es decir, al límite de la región de estabilidad de éste.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Alfredo Gutierrez Vivius por el conocimiento impartido en la asignatura de Tópicos Avanzados de Control en la Maestría de Ingeniería Electrónica con Énfasis en Automatización y Control.

REFERENCIAS

- [1] Nie; J, Loh; A y Hang; C. Modeling pH Neutralization Processes Using Fuzzy-Neural Approaches. Elsevier, Fuzzy Sets and Systems. Dec. 1993.
- [2] Duarte; M y Rojo; F. Control de pH usando un Controlador de Ganancia Programada. <http://www2.ing.puc.cl/~iing/ed431/anales/anal01.htm>
- [3] Hall; R y Seborg D. Modeling and Self-Tuning Control of a Multivariable pH Neutralization Process. Proc. Amer. Control Conf. 1989.
- [4] Henson; M y Seborg; D. Adaptive Nonlinear Control of a pH Neutralization Process. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol 2, No 3. Ago. 1994.
- [5] Gustafsson; T y Waller; K. Dynamic Modeling and Reaction Invariant Control of pH. Chem. Engr. Sci. 38. 1983.
- [6] Smith; C y Corripio; A. Principles and Practice of Automatic Process Control. Third Edition.
- [7] Escorcia; J. Sintonización de Controladores en Planta Industriales. Laboratorio de Tópicos Avanzados de Control. Maestría en Ingeniería Electrónica. Universidad del Norte. Jul. 2009.
- [8] Notas de Clase. Tópicos Avanzados de Control. Maestría en Ingeniería Electrónica, Universidad del Norte. Ing. Alfredo Gutierrez Vivius.
- [9] Gutierrez; A y Sanjuan; M. Estrategia de diseño para un Controlador Difuso Generalizado.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editors no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito