

Identificación y Diseño del Controlador para un Sistema de Control de pH en un Proceso Químico

Raúl Ramón Mendoza Macías
Gabriel Oswaldo Zambrano Zambrano
Msc. César Antonio Martín Moreno
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
{raurmend, gabozamb, cmartin}@espol.edu.ec

Resumen

En la actualidad la regulación ambiental por parte de organizaciones privadas o públicas, ha influenciado de gran manera la implementación de sistemas que busquen regular el pH de un producto cualquiera. Gracias a este hecho muchas empresas han optado como solución factible la implementación de sistemas de tratamiento de residuos para mejorar su impacto ambiental. El presente trabajo presenta un método aplicado para el manejo y la estabilización del pH en un proceso químico, empleando las técnicas de Identificación de Sistemas como una opción viable en una planta real de control de pH. Y en base a los resultados obtenidos poder diseñar e implementar un controlador que se ajuste a los requerimientos deseados, de esta manera se podrá realizar un contraste entre el modelo simulado obtenido y la respuesta de la planta real de pH.

Palabras Claves: *Identificación de Sistemas, Control, Sistema de pH, Simulación.*

Abstract

Nowadays environmental regulation by private or public organizations has greatly influenced the implementation of systems that are looking forward to regulate the pH of any product. Due to this fact many companies have chosen as an accurate solution to develop wastes management systems to reduce their environmental damage. This paper presents an applied method of the management and stabilization of pH in a chemical process, using System Identification techniques as a viable option for a real plant in pH control. And based on this results design and implement a controller that meets the desired requirements, so we can make a contrast between the obtained simulated model and the response of the actual pH plant.

Keywords: *Systems Identification, Control, pH System, Simulation.*

1. Introducción

Este proyecto presenta un método aplicado para el manejo y la estabilización del pH en las reacciones químicas. Para esto un proceso químico tiene como fundamento la optimización de dos variables claves; la duración de la reacción química y la precisión con la que se obtendrán los resultados, además de los otros factores adicionales como lo son el punto de disociación de la reacción y las proporciones de las sustancias a utilizarse.

Este proyecto va a constatar que la técnica de Identificación de Sistemas aplicada para un Sistema de Control de pH en un proceso químico es válida y nos puede ser de gran ayuda incluso si la planta a tratar no es continua.

Se buscará obtener una buena estimación del modelo de la Planta a tratar y así diseñar e implementar un controlador que se ajuste a las especificaciones requeridas por nuestra planta en base a los datos obtenidos por medio de la Identificación de Sistemas.

Y por último se comparará el comportamiento de nuestra planta de pH real con las simulaciones del modelo obtenido.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Ácidos y pH

Un ácido es toda aquella sustancia capaz de aceptar y compartir un electrón, según la Teoría de Lewis.

Dentro de sus características principales constan las siguientes:

- Tienen sabor ácido como en el caso del ácido cítrico en la naranja y el limón.
- Cambian el color del papel tornasol azul a rosa, el anaranjado de metilo de anaranjado a rojo y deja incolora a la fenolftaleína.
- Son corrosivos.
- Producen quemaduras de la piel.
- Son buenos conductores de electricidad en disoluciones acuosas.
- Reaccionan con metales activos formando una sal e hidrógeno.
- Reaccionan con bases para formar una sal mas agua.
- Reaccionan con óxidos metálicos para formar una sal más agua.

El pH (Potencial Hidrógeno) es una medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en ciertas sustancias. Este término fue propuesto por el químico danés Soren Sørensen, quien lo definió como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno.

$$pH = -\log [H^+]$$

2.2. Aplicaciones del Control de pH.

- Tratamiento de Agua Residuales para la regulación de los desechos de productos de materia Prima.
- Estabilización de Ácidos para disoluciones de distintas aleaciones de metales.
- Regulaciones de pH para procesos agrícolas de cultivo de cebollas.
- Regulación del pH del suelo para sembríos de maíz y choclo.
- Regulación del pH del suelo para cultivos de flores.
- Filtro de pH para la elaboración de plásticos.
- Purificación de metales en base a sustancias de pH fijo

3. Partes de la Planta

Los elementos con los que trabajaremos son:

- Sensor de pH. (1)
- Bomba Peristáltica. (2)
- Ácido a Utilizar. (3)
- Tanques y Reservorios. (4)
- Agitadores. (5)

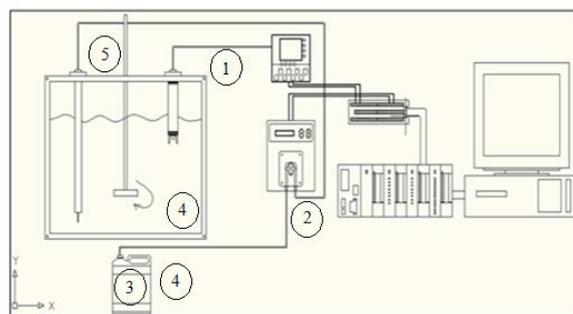


Figura 1. Esquema De La Planta Real

3.1. Sensor de pH

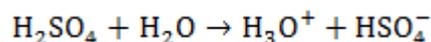
El sensor de pH que usamos es el pH ACTIVE PASSIVE TRANSMITTER DO 9785T. El módulo sensor de pH es el encargado de enviar la señal recibida del electrodo a la tarjeta de adquisición de datos. Este módulo consta de un electrodo; el cual es el encargado de estar en contacto con el ácido diluido y enviar el voltaje proporcional al modulo principal o sensor que funciona como un display mientras nos muestra en tiempo real el valor que recoge el electrodo del tanque de ácido. Este sensor posee una salida de 4-20mA.

3.2. Bomba Peristáltica

El Sistema de dosificación o Bomba Peristáltica son de la marca Basic Pro, estas bombas son las mejores al momento de manejar sustancias peligrosas y corrosivas, gracias a su sistema de cero contacto con la sustancia que permite tener un mecanismo más duradero y de mejor calidad garantizando la pureza de las sustancias que pasarán por ella. Para efecto de este proyecto se utilizará un rango entre 10%-25% del caudal de la bomba para poder aprovechar al máximo la linealidad de la misma.

3.3. Ácido a utilizar

Se va a utilizar ácido sulfúrico, este es considerado como un ácido fuerte debido a que se disocia en solución acuosa y dona 1 protón. Su concentración se puede obtener con características de un 96% de pureza, la ecuación siguiente es de la reacción de ácido sulfúrico con agua la cual muestra la formación de iones hidronio en solución acuosa.



Los ácidos fuertes concentrados producen graves daños a la piel o los músculos, pues causan quemaduras químicas semejantes a las que origina el calor y las cuales suelen ser tratadas del mismo modo.

3.4. Compact Field Point (CFP)

Para poder adquirir datos desde la planta a utilizar y poder analizarlos en un software designado es necesario utilizar una herramienta de adquisición de datos, en nuestro caso esa herramienta de adquisición es del Proveedor National Instruments (NI), un módulo CFP. . El Compact FieldPoint es un controlador de automatización programable (PAC) fácil de usar y altamente expansible compuesto de módulos de E/S robustos e interfaces de comunicación inteligentes.

4. Programa utilizado

Para trabajar en la identificación de sistemas y en el diseño del controlador se usará el software MATLAB, una herramienta muy poderosa al momento de realizar algoritmos recurrentes, métodos de estimación y demás.

Matlab

Este es un poderoso software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Entre las herramientas que contiene Matlab se usarán:

- **IDENT (Sistem Identification Tool)**
La herramienta asignada a la identificación de sistemas, a partir de la entrada y salida de un sistema se trata de estimar la función de transferencia.
- **SISOTOOL (Siso Design Tool)**
Este GUI permite el diseño de un compensador de una entrada/una salida mediante el lugar geométrico de las raíces, diagrama de bode y las técnicas de Nichols y Nyquist.
- **INPUTDESIGNGUI (Guide User Interface for Input Design)**
Servirá en el diseño de la señal de entrada para la planta, este GUI fue desarrollado por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun en el año 2002, de la Universidad de Wales, Swansea y Vrije Universiteit Brussel (VUB).

4. Diseño de la Señal de Entrada

4.1. Respuesta al escalón de la planta

Nuestra señal escalón será mandada a la bomba peristáltica, esta admite señales de 4 a 20 mA para llegar a rangos de 0% a 100% de la capacidad de flujo que puede entregar. Se escogió crear una señal que

que varió de 5.6mA a 8mA obteniendo el siguiente resultado:

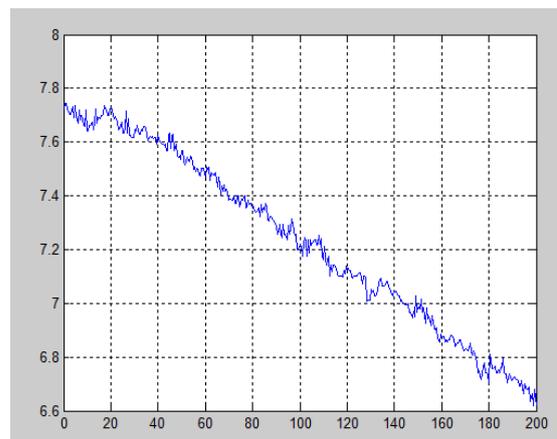


Figura 2. Respuesta al Escalón sin diferenciar

El punto más importante que se destaca es que el pH solo puede disminuir, no hay forma de volverlo elevar tal y como está diseñada la planta, ya que la señal de entrada solo permite que entre mayor o menor cantidad de ácido al tanque. Este es un problema debido a que la principal herramienta que usa el método no paramétrico es el análisis de correlación, para lo cual una de sus 3 características principales que debe tener la serie de tiempo a analizar es que sea estacionaria.

Que una serie de tiempo sea estacionaria implica que presente una varianza y media constante, por lo general un sistema no estacionario involucra un proceso integrativo como es lo que ocurre en esta planta, una solución que se usa en estos casos es la de diferenciar los datos hasta obtener una serie estacionaria.

Se filtran los datos por el exceso de ruido y se los diferencia obteniendo el siguiente resultado:

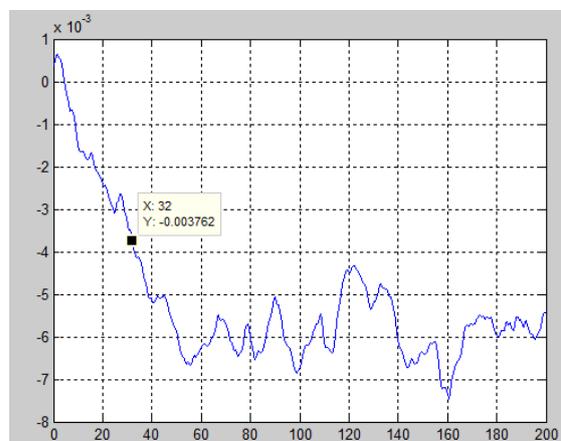


Figura 3. Respuesta al Escalón Diferenciada

De esta respuesta se obtienen los siguientes datos:

- $\tau = 24s$
- $K = 2.5$
- $T_s = 65s$

4.2. Señal de Entrada Escogida

Después de hacer varias pruebas con diferentes señales de entrada, se llegó a la conclusión que la mejor fue la PRBS (Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria), la cual es una señal de 2 niveles, periódica y determinística, generada por registros de desplazamientos. Los parámetros que se usaron para su diseño fueron:

Tabla 1. Parámetros de la señal PRBS

| Tiempo de Muestreo | Amplitud (+/-) | | Desfase de la señal | |
|--------------------|----------------|------|---------------------|----------------|
| 0.5 | 0.0068 | | 0.0012 | |
| No. De Ciclos | Alfa | Beta | τ_{Dom}^L | τ_{Dom}^H |
| 1 | 2 | 3 | 21 | 27 |

5. Análisis no Paramétrico

Este análisis se centra en una representación libre de estructura para las respuestas escalón, impulso y de frecuencia.

Con la señal de entrada escogida y su salida medida, se presenta a continuación su análisis de correlación, el cual se usa principalmente para obtener un estimado de los coeficientes de la respuesta al impulso finito (FIR) de la planta, para esto se realiza primero un preblanqueado la señal de entrada y salida.

5.1. Auto Covarianza de la Entrada

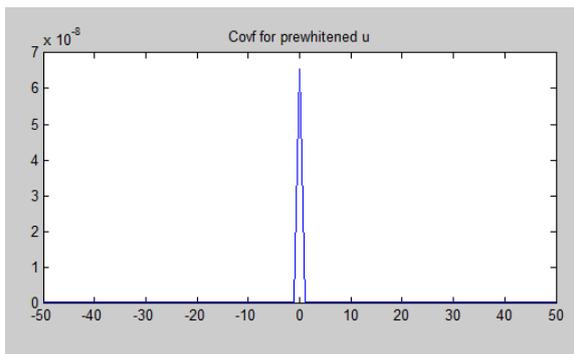


Figura 4. Auto Covarianza de la Entrada

Esta señal presenta un gran parecido con lo que se obtendría si la señal fuera directamente ruido blanco, es decir un valor pico muy alto en el periodo 0, y para el resto de LAGS se tiene valores de cero.

5.2. Auto Covarianza de la Salida

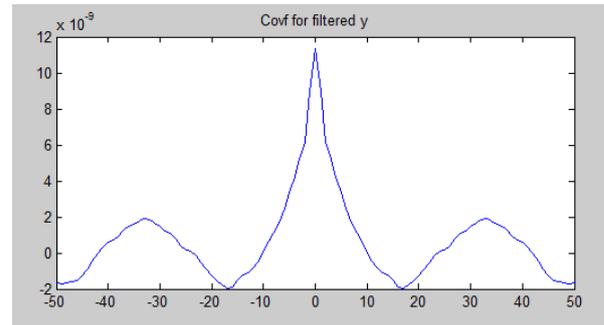


Figura 5. Auto Covarianza de la Salida

Esta trató de parecerse al ruido blanco, pero no fue lo suficientemente cercana ya que esta varía más. De todas maneras, que la salida no tenga estas características de ruido blanco no es de relevancia como lo es que la entrada las tenga, además de denotar que existe una dinámica que identificar.

5.3. Correlación Cruzada de la Entrada con la Salida

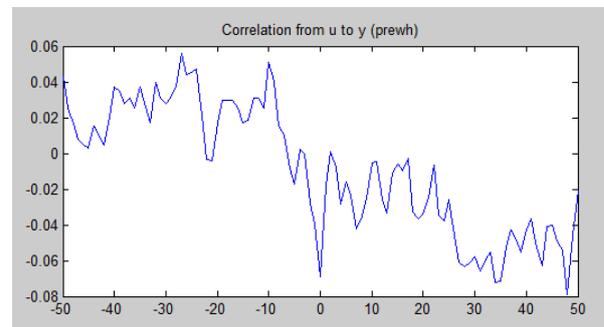


Figura 6. Correlación Cruzada de la Entrada con la Salida

Para que exista relación entre la entrada y la salida, básicamente lo que se debe tener son valores diferentes de cero, para estar seguro de esta hipótesis se fija un intervalo de confianza en el cual los valores dentro del mismo se aproximarán o se dirán que son cero, y los valores fuera de este intervalo son los que nos indicarán que si existe relación.

Para esto se puede usar también la respuesta impulso que ya contiene este intervalo y debido a que la respuesta impulso es directamente proporcional a la correlación cruzada, se puede seguir el análisis con él.

5.4. Respuesta al Impulso estimada

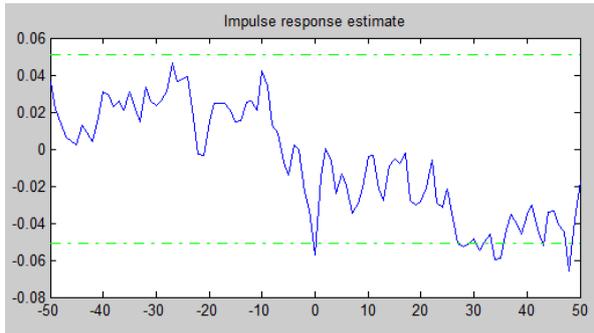


Figura 7. Respuesta al Impulso estimada

Se halló los valores de los coeficientes b de la respuesta impulso, y también al ver que existen coeficientes que salen del intervalo de confianza podemos asegurar que si existe una dinámica que se puede identificar. Otro punto que se puede recalcar es que los coeficientes son negativos, indicando que existe una relación inversa, es decir a mayor valor en la entrada la salida será más pequeña o negativa.

5.5. Respuesta al escalón de la señal escogida

Al integrar los valores de la respuesta impulso se obtiene la respuesta escalón mediante la señal escogida, al comparar las características de esta respuesta con las de la planta real se obtiene lo siguiente:

Tabla 2. Contraste entre la respuesta al Escalón de la planta real con la de la PRBS

| Planta Real | | |
|---|--------------------------------|---------------------|
| Tao (τ) | T. estabilización (T_s) | Ganancia (K) |
| 24 | 65 | 2.5 |
| Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria – PRBS | | |
| τ | T_s | K |
| 26.5 | 75 | 2.42 |

Al obtener estos resultados y ver que eran bastante parecidos a los de la planta real, fue que se optó por escoger esta señal como la mejor.

6. Análisis Paramétrico

Se procede a obtener una función de transferencia que se aproxime a la planta real, para ello se verifica con 5 de los modelos paramétricos que surgen a partir del siguiente diagrama de bloques:

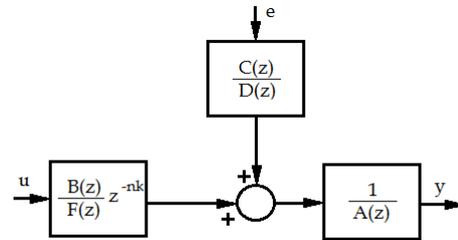


Figura 8. Diagrama de Bloques para modelos paramétricos

6.1. Modelo Paramétrico Escogido

De los modelos que se probaron, el que resulto escogido fue el modelo Box-Jenkins con coeficientes $nb=1, nc=2, nd=2, nf=2, nk=5$, el cual parametriza independientemente la planta del ruido, de la siguiente manera:

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})} u(t - nk) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})} e(t)$$

6.2. Criterios de Validación

Una vez que se escoge un modelo, se verifica si este modelo es válido para representar a la planta, para esto se utilizan los siguientes criterios:

- Validación Cruzada

Se guardará una parte de los datos de la señal de entrada con su salida para la validación en vez de su uso para la identificación, se simularán los diferentes modelos de salida obtenidos sobre estos datos y el que mejor se ajuste será el escogido.

- Análisis De Residuos

Se le aplica análisis de auto correlación y correlación cruzada a los errores de predicción, y hay que verificar que estos se asemejen al ruido blanco para asegurar de que no haya relación entre los residuos consigo mismo, o entre entrada y los residuos

- Respuesta Al Escalón

Se comparará de una manera muy sencilla la señal medida con la predicha, aquí se podrá verificar la dinámica del sistema según criterios muy sencillos como la ganancia, tiempo de estabilización y tao.

A continuación se presenta los resultados de la validación:

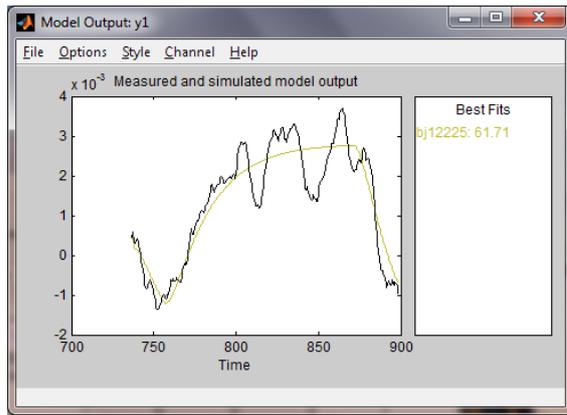


Figura 9. Validación cruzada del Modelo BJ

Se obtuvo un modelo del 61.71% cercano a la planta real, esto se debe a que el ruido es bastante grande produciendo este inconveniente, pero como se puede ver en la figura, este modelo de todas maneras sigue bastante bien la tendencia de la planta.

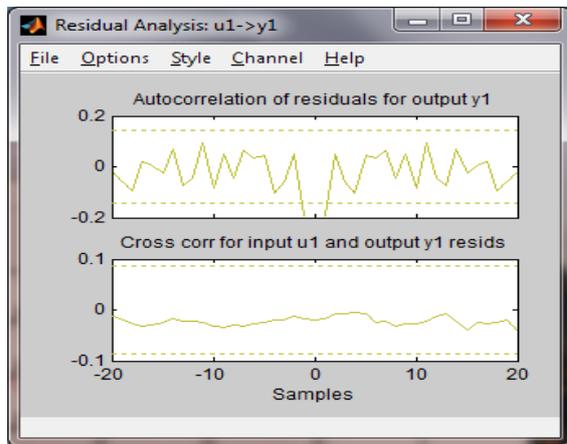


Figura 10. Análisis de Residuos del Modelo BJ

En este modelo se denota que en su análisis residual contamos con los valores dentro del intervalo de confianza.

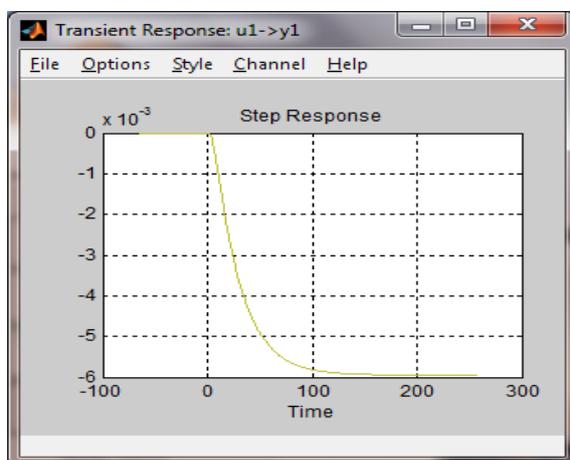


Figura 11. Respuesta al Escalon del Modelo BJ

Y al analizar su respuesta al escalón encontramos un desenvolvimiento bastante bueno en los rasgos de estabilización y rapidez parecidos al de la planta real.

6.3. Función de Transferencia de la Planta

Una vez confirmado que el modelo es adecuado, se presenta a continuación la función de transferencia que del modelo Box Jenkins:

$$\frac{-0.0053856(s + 4.088)}{(s + 0.2199)(s + 0.04037)} e^{-2s}$$

Usando la aproximación de Padé para el retardo y devolviendole el integrador removido al diferenciar los datos tenemos:

$$\frac{-0.0053856(s + 4.088)(s^2 - 3s + 3)}{s(s + 0.2199)(s + 0.04037)(s^2 + 3s + 3)}$$

7. Diseño del Controlador

7.1. Criterios

Se desea obtener error de estado estacionario cero para que la planta se estabilice en el punto de referencia, normalmente para esto se usa un controlador proporcional integral (PI), pero debido a que la planta ya posee un integrador (polo en el origen) no será necesario que el controlador también lo posea, sino que se aprovechará el propio que ya posee la planta y lo que se obtendrá será un controlador proporcional.

No se puede contar con que la respuesta posea sobre nivel porcentual, ya que al solo ingresar ácido al tanque, el valor de pH medido solo puede disminuir y por lo tanto una respuesta sub-amortiguada de pH sería inconcebible a parte de imposible. Este hecho solo introduciría una desviación en el verdadero valor que se pida estabilizar, por lo que la planta necesariamente debe tener una respuesta sobre amortiguada.

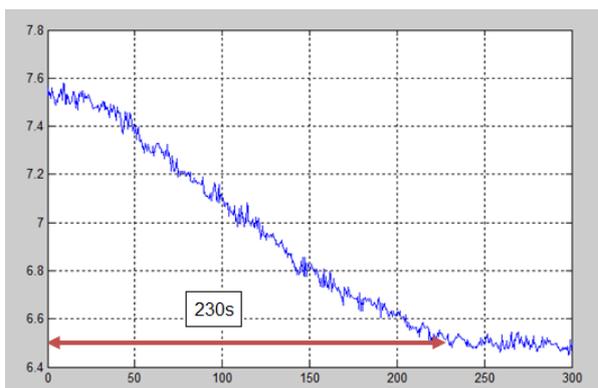
Para el tiempo de estabilización, este debe ser adecuado y acorde con que la planta sea sobre-amortiguada, esto obliga a hacer a la planta un poco lenta para garantizar el hecho de que no exista sobre nivel a la salida, y se lo establece en 210 segundos.

7.2. Obtención del Controlador

Se trabajó con la herramienta de Matlab llamada Sisotool, se colocó la especificación deseada y se usó el lugar geométrico de las raíces para obtener un controlador proporcional con el siguiente valor:

$$C = -0.0046124$$

7.3. Resultados Obtenidos



Aquí se muestra la respuesta de la planta usando el controlador proporcional diseñado en un valor de referencia de pH 6.5, esta cumple con los criterios de diseño, excepto que el tiempo de estabilización, que fue especificado en un valor de 210s, se desfasó ligeramente en unos 20s y ahora llega a 230 segundos esto es debido a un saturador que se agregó para trabajar en el punto de operación. Por todo lo demás se puede concluir que el controlador hallado trabaja óptimamente en la planta.

8. Conclusiones

1. Las técnicas de Identificación de Sistemas resultaron ser válidas y aplicables a la planta real de pH a pesar de sus diversos factores adversos, como lo fueron su comportamiento no estacionario, su alto nivel de ruido, y su no linealidad.
2. El modelo para la planta de pH obtenido mediante la Identificación de Sistemas se considera como válido con un valor de similitud de 61,71% dado que los datos de validación usados en este modelo contaban con mucho ruido.
3. Se denota que el modelo con el controlador simulado se asemeja en gran proporción al obtenido una vez probado en la planta de pH y gracias a esto ahora se podrá obtener la respuesta a una entrada dada mediante la simulación sin la necesidad de trabajar con la planta real.
4. El controlador diseñado con la ayuda de la función de transferencia de la planta, fue eficiente y simple puesto que al implementar un controlador meramente proporcional se pudo llegar a un error de estado estacionario cero.
5. Haber obtenido un controlador proporcional, trae un gran beneficio en cuestiones económicas, dado que en caso de una implementación completamente física sin el uso de algún software, este sería muy sencillo y barato de hacer.

9. Recomendaciones

1. Es necesario tener toda la información sobre la planta con la que se va a trabajar, vastos conocimientos sobre el método escogido para la Identificación de Sistemas y buenas bases teóricas para un acertado diseño del controlador.
2. Se sugiere fuertemente seguir las medidas de seguridad aquí especificados para el manejo del ácido.
 - Uso constante de los implementos de laboratorio para medidas de prevención como lo son: mandiles, guantes y en casos especiales gafas de protección.
 - Agregar siempre el ácido a la solución no la solución al ácido debido a que la reacción genera mucha energía calorífica y al tratarse de un ácido fuerte genera pequeñas cantidades no manejables.
 - Manejar de manera adecuada el ácido porque su contacto con la piel y las prendas pueden causar serios daños.

10. Agradecimientos

Al laboratorio de Control Automático de la facultad y al coordinador de la MACI por el préstamo de la planta, y a nuestros familiares y amigos por su apoyo incondicional.

11. Referencias

- [1] Ralph A. Burns, Fundamentos de Química (4ta Edición) – Pearson Prentice Hall, 2003.
- [2] Søren Sørensen, Chemical Achievers - The Human Face of the Chemical Science, Chemical Heritage Foundation, Retrieved 2011-10-14.
- [3] Robert A. Alberty; Robert J. Silbey, Physical Chemistry (second ed.). John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [4] Anita Kildebæk Nielsen, "S.P.L. Sørensen" (in Danish). Biokemisk forening. Retrieved 2007-01-09.
- [5] Isaac Feldman. "Use and Abuse of pH measurements". Analytical Chemistry 28, 1859.
- [6] McAvoy T. et al. "Dynamics of pH in controlled stirred tank reactor". Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, vol. 11, No 1, 1972. pp. 68-70
- [7] McAvoy T. "Time optimal and Ziegler-Nichols control". Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., vol. 11, No 1, 1972. pp. 71-78
- [8] Gustafsson T. y Waller K. "Dynamic modeling and control invariant control of pH". Chemical Engineering Science. Vol. 38, N13, 1983. pp. 389-398
- [9] Wright R. and Kravaris C. "Nonlinear control of pH processes using strong acid equivalent " Ind. Eng. Chemical Res. vol. 30, pp. 1561-1572, 1991.