

CONTROL ADAPTATIVO EN TIEMPO REAL

Carolina Godoy, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

RESUMEN.-En este trabajo se analiza y prueba el diseño de un Controlador Adaptativo Self-tuning (Autosintonizable) para sistemas de segundo orden tanto en simulación como en tiempo real. Para realizar el diseño de un Controlador de este tipo se debe primero realizar la Identificación de Parámetros de la Planta, para lo que se ha utilizado varios métodos, todos éstos desarrollados en el programa computacional Matlab 2009a. Una vez obtenidos los parámetros de la planta se procede al cálculo del Controlador Adaptativo Self-tuning por el método de Asignación de Polos. Para el Control en Tiempo Real, se ha contado con dos plantas, la primera un circuito RC y la segunda un circuito basado en Amplificadores Operacionales. La interfaz gráfica se la realizó en el GUI de Matlab y para la adquisición de datos se ha utilizado la Tarjeta Ni-Daq 6008.

Índices- *Adaptativo, Controlador, GUI Identificación, Matlab, Mínimos Cuadrados, Recursividad, Regulador, Selftuning, Tiempo Real.*

I. INTRODUCCIÓN

El Control Adaptativo es un tipo de control en el cual los parámetros de su controlador pueden cambiar de acuerdo a la dinámica del proceso, logrando así que el comportamiento del sistema en lazo cerrado conserve las características de diseño requeridas.

Como se puede observar en la figura 1, el control adaptativo está formado por dos lazos, el lazo de realimentación compuesto por el proceso y un controlador; y el lazo de ajuste de parámetros, el cual es más lento que el lazo normal de realimentación.

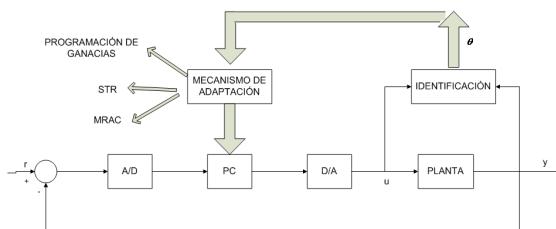


Figura 1. Esquema de Control Adaptativo

El self-tuning regulator es un esquema de Control Adaptativo en donde los parámetros de la planta son actualizados y los parámetros del regulador se obtienen de la solución del diseño del problema.

Para utilizar el Control Autosintonizado se debe conocer el modelo del sistema; las variaciones en el mismo se logran controlar simplemente acoplando un método de diseño de reguladores con un procedimiento de identificación en línea. Sin olvidar que tanto la parte de

identificación como la de control deben de estar separadas.

Debido a que en el Control Adaptativo los datos son obtenidos secuencialmente en tiempo real, resulta conveniente hacer cálculos de manera recursiva para guardar los datos obtenidos en recursiones anteriores, por lo que se utiliza el método de Mínimos Cuadrados Recursivo (MCR). Una vez obtenidos los parámetros correctamente identificados de la planta se procede a realizar el diseño del Controlador Adaptativo Selftuning por el método de Asignación de Polos.

II. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Para un sistema de segundo orden representado con la siguiente función de transferencia, se procede a realizar la Identificación Paramétrica:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 1}$$

(1)

Discretizada con un periodo de muestreo de 1 seg.

$$G(z) = \frac{0.2134z + 0.08097}{z^2 - 0.7555z + 0.04979}$$

(2)

Entonces los parámetros reales de G(z) son:

$$\begin{aligned} a1 &= -0.7555; a2 = 0.04979; b1 = 0.2134; \\ b2 &= 0.08097 \end{aligned}$$

La salida se verá representada por:

$$y = \frac{b1z^{-1} + b2z^{-2}}{1 + a1z^{-1} + a2z^{-2}} u$$

(3)

Utilizando el conjunto de fórmulas de MCR que se describen a continuación, se obtiene la matriz THETA_MCR de parámetros a y b, los cuales representan los parámetros identificados de la planta G(s).

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1) \cdot \varepsilon(k+1) \quad (4)$$

$$\varepsilon(k+1) = [y(k+1) - \varphi(k+1) \cdot \hat{\theta}(k)] \quad (5)$$

$$(6) \quad K(k+1) = \frac{P(k) \cdot \varphi^T(k+1)}{1 + \varphi(k+1) \cdot P(k) \cdot \varphi^T(k+1)}$$

$$(7) \quad P(k+1) = ([I - K(k+1) \cdot \varphi(k+1)]P(k)) / \lambda$$

$$\text{THETA_MCR} = \begin{bmatrix} 0.7541 \\ -0.0487 \\ 0.2133 \\ 0.0813 \end{bmatrix}$$

Donde $a_1 = -0.7541$, $a_2 = 0.0487$, $b_1 = 0.2133$, $b_2 = 0.0813$. Los mismos que se aproximan bastante a los valores de a y b discretizados y mostrados en $G(z)$.

En la figura 2 se aprecia la convergencia de parámetros a y b .

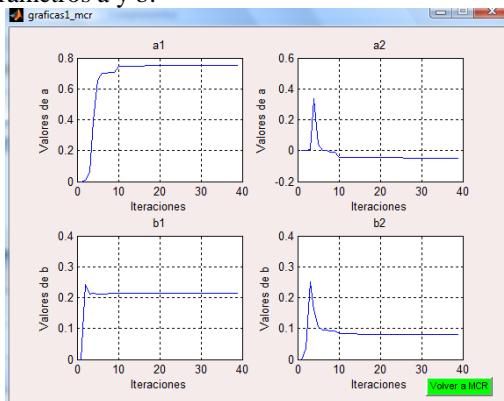


Figura 2. Convergencia de Parámetros a y b

Un segundo ejemplo con presencia de ruido se realiza a continuación dada la función de transferencia:

$$(8) \quad G = \frac{1}{25s^2 + 15s + 1}$$

Discretizada con un periodo de muestreo igual a 1 seg.

$$(9) \quad G(z) = \frac{0.01648z + 0.0135}{z^2 - 1.519z + 0.5488}$$

Esta vez, se debe ingresar un parámetro c para identificarlo. En este ejercicio se utilizará $c=0.6$.

Entonces los parámetros reales de $G(z)$ son:

$$a_1 = -1.519; a_2 = 0.5488; b_1 = 0.01648; b_2 = 0.0135; c_1 = 0.6$$

A diferencia de la Identificación sin ruido, esta vez para generar los datos de salida se representa:

$$(10) \quad y = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} u + \frac{1 + c_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} e$$

Donde:

$u(t)$ = Es representado por una entrada paso
 $e(t)$ = Es ruido blanco

Utilizando comandos de Matlab se procede a realizar la Identificación de Parámetros. Se usan los comandos iddata y armax

```
dato=iddata(yt,u,1);
th=armax([yt x],[2 2 1 1])
Se obtiene en el Workspace de Matlab
```

$$A(q) = 1 - 1.486 q^{-1} + 0.5146 q^{-2}$$

$$B(q) = 0.024 q^{-1} + 0.005234 q^{-2}$$

$$C(q) = 1 + 0.5378 q^{-1}$$

Entonces los parámetros identificados de la planta son:

$$a_1 = -1.486; a_2 = 0.5146; b_1 = 0.024; b_2 = 0.005334; c_1 = 0.5378$$

Se puede concluir que los parámetros identificados son parecidos a los parámetros reales.

En la figura 3 se aprecia como el Error de Predicción representado por el color celeste, le sigue al ruido representado por el color rojo.

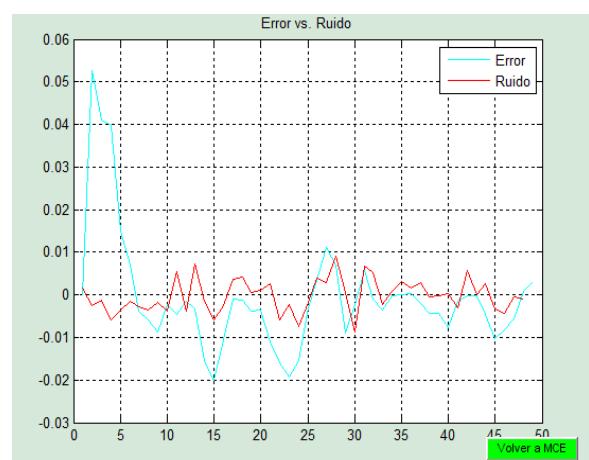


Figura 3. Gráfica de Error de Predicción vs. Ruido Generado

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO SELFTUNING

Se realiza el análisis de la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{8}{s^2 + s + 9.25} \quad (11)$$

Discretizándola con $T=0.2$ seg.

$$G(z) = \frac{0.1453z + 0.1359}{z^2 - 1.494z + 0.8187} \quad (12)$$

La figura 4 muestra un tiempo de establecimiento igual a 7.55 seg y un sobrepico igual al 58.6%.

La figura 5 muestra la respuesta en lazo cerrado de la planta $G(z)$ en donde se aprecia una planta con un tiempo de establecimiento de 7.68 seg y un sobrepico de 67.5%, por lo que se realiza el diseño de un Controlador Adaptativo Self-tuning con el método de Asignación de Polos para mejorar esta respuesta.

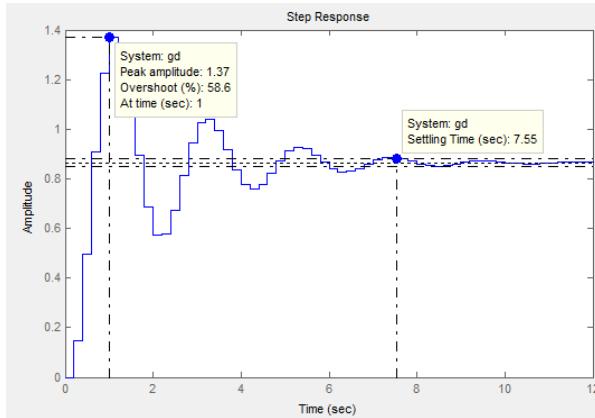


Figura 4. Respuesta de $G(z)$ en Lazo Abierto frente a una Entrada Paso

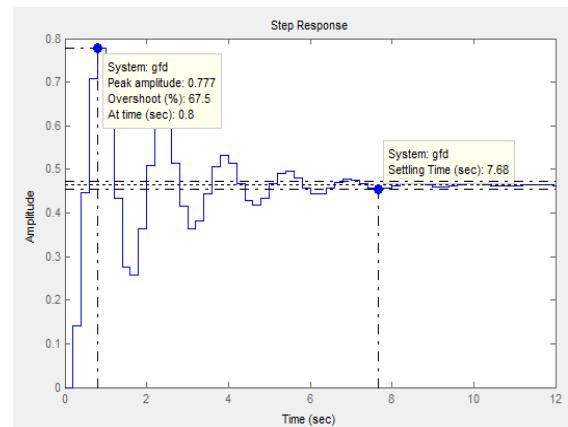


Figura 5. Respuesta de $G(z)$ en Lazo Cerrado frente a una Entrada Paso

Al ser el método a utilizar el método de Asignación de Polos, se diseña un Controlador con 2 Polos Reales $= (z - 0.8)(z - 0.9)$.

$$T(z^{-1}) = 1 - 1.7z^{-1} + 0.72z^{-2} \quad (13)$$

Al ser un sistema de segundo orden se debe calcular: f_1, g_0, g_1, g_2 .

Para obtener los valores de los Polinomios F y G, se debe resolver el sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.1453 & 0 & 0 \\ -2.4935 & 0.1359 & 0.1453 & 0 \\ 2.3121 & 0 & 0.1359 & 0.1453 \\ -0.8186 & 0 & 0 & 0.1359 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_1 \\ g_0 \\ g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.7 + 2.4935 \\ 0.72 - 2.3121 \\ 0 + 0.81862 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = 0.4694; g_0 = 2.2303; g_1 = -4.9870; g_2 = 2.8279$$

Como se puede apreciar en la figura 6 la respuesta del sistema con Controlador Adaptativo es más rápida que el sistema original, ya que el sobrepico disminuyó a 0.6%

aunque se sacrificó el tiempo de establecimiento al incrementarlo a 8.42 seg.

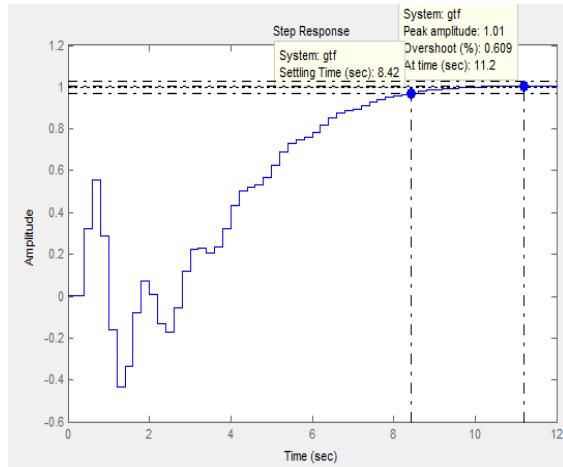


Figura 6. Respuesta de la Planta con Controlador y Polos Reales
 $(z - 0.8)(z - 0.9)$

A continuación se procede a realizar el diseño del Controlador Adaptativo con tres Polos Reales=

$$(z - 0.7)(z - 0.8)(z - 0.9)$$

$$T(z^{-1}) = 1 - 2.4z^{-1} + 1.91z^{-2} - 0.504z^{-3} \quad (14)$$

Para obtener los valores de los Polinomios F y G, se debe resolver el sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.1453 & 0 & 0 \\ -2.4935 & 0.1359 & 0.1453 & 0 \\ 2.3121 & 0 & 0.1359 & 0.1453 \\ -0.8186 & 0 & 0 & 0.1359 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_1 \\ g_0 \\ g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.4 + 2.4935 \\ 1.91 - 2.3121 \\ -0.504 + 0.8186 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = 0.1208; g_0 = -0.1878; g_1 = -0.5186; g_2 = 0.7278$$

La figura 7 muestra un tiempo de establecimiento de 15.5 seg, es decir es una respuesta más lenta que la respuesta obtenida con el controlador diseñado con 2 polos reales.

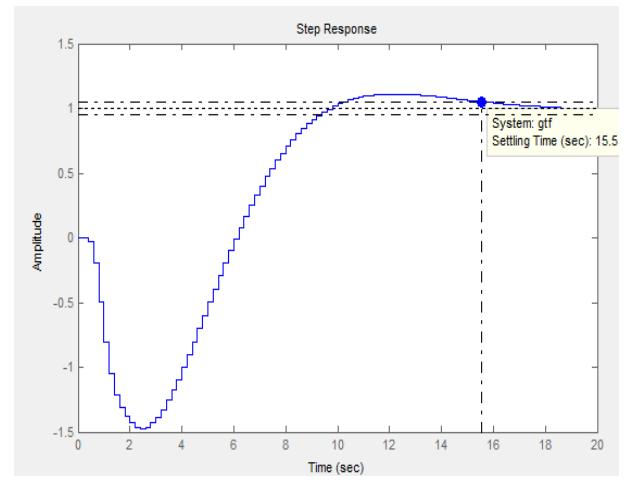


Figura 7. Respuesta de la Planta con Controlador y Polos Reales
 $(z - 0.7)(z - 0.8)(z - 0.9)$

IV. RESULTADOS EN TIEMPO REAL

Para las pruebas en tiempo real se implementaron dos circuitos, un circuito RC representado en la figura 8 y un circuito basado en amplificadores operacionales representado en la figura 9.

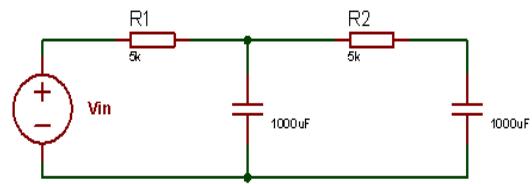


Figura 8. Esquema del Circuito RC

La figura 10 muestra la respuesta del circuito RC en lazo abierto. Es un sistema lento con un tiempo de establecimiento de 48 seg.

En Tiempo Real se procedió a diseñar un Controlador Adaptativo Self-tuning con el método de Asignación de Polos.

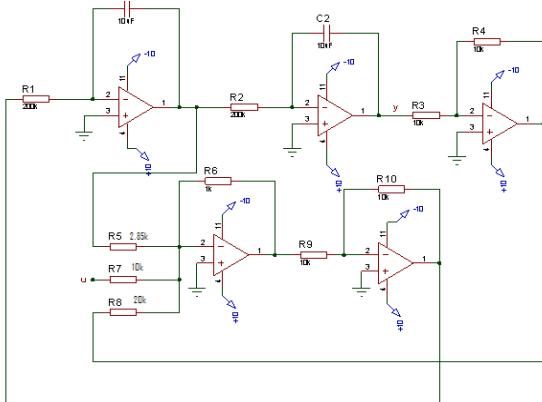


Figura 9. Esquema del Circuito de Amplificadores Operacionales

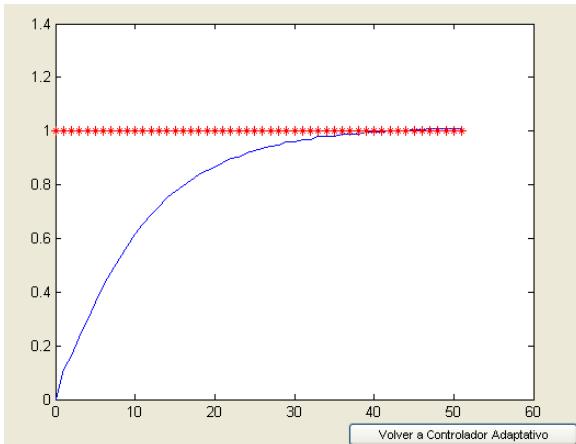


Figura 10. Respuesta de la Planta RC en Lazo Abierto

La respuesta de la figura 11 muestra la salida de la planta RC con un Controlador Adaptativo diseñado con ubicación de dos polos reales ($z-0.1(z-0.2)$), siendo esta respuesta más rápida que la original ya que presenta un tiempo de establecimiento de 16 seg.

Para el sistema RC se procedió a realizar un cambio en la planta una vez que ésta se haya estabilizado. Dicho cambio, se lo hizo al variar una de las resistencias de $5\text{k}\Omega$ del sistema por una resistencia de $10\text{k}\Omega$.

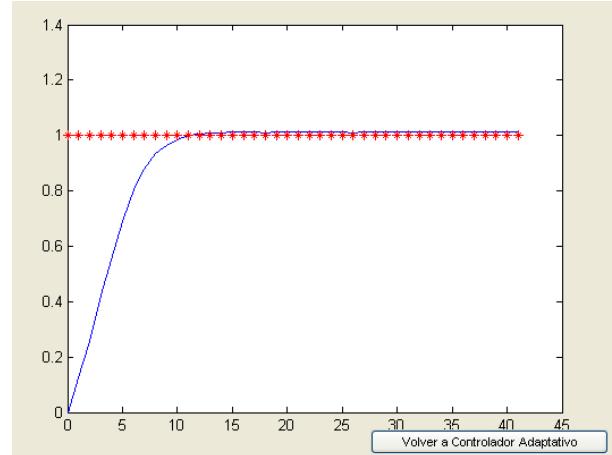


Figura 11. Respuesta de la Planta RC con Controlador Adaptativo con Polos Reales ($z-0.1(z-0.2)$)

El cambio se lo puede apreciar en la figura 12 aproximadamente a los 21 seg como una variación en la salida, esto se debe a que el algoritmo debe identificar los nuevos parámetros de la planta, los cuales convergen después de pocas iteraciones.

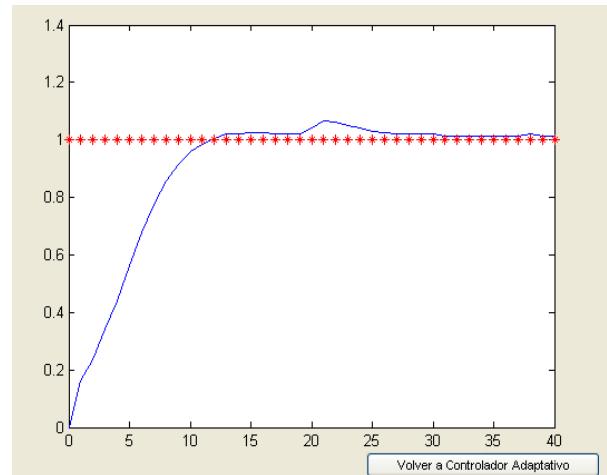


Figura 12. . Respuesta de la Planta RC con Controlador Adaptativo con Polos Reales ($z-0.1(z-0.2)$) y cambio en la Planta.

Otra prueba en tiempo real, se la realizó con el circuito de amplificadores operacionales, su respuesta en lazo abierto esta vez se la observó en Simulink en la figura 13.

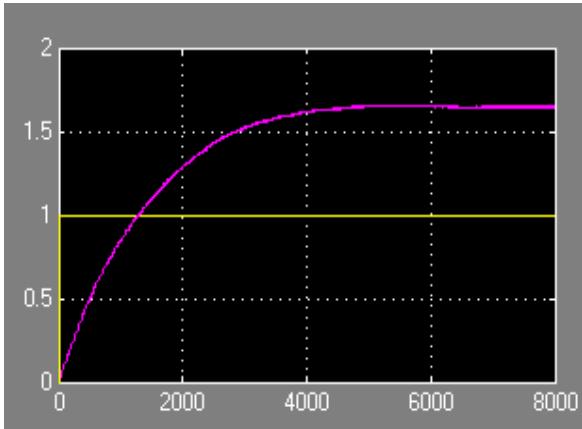


Figura 13. Respuesta de la Planta de Amplificadores Operacionales en Lazo Abierto

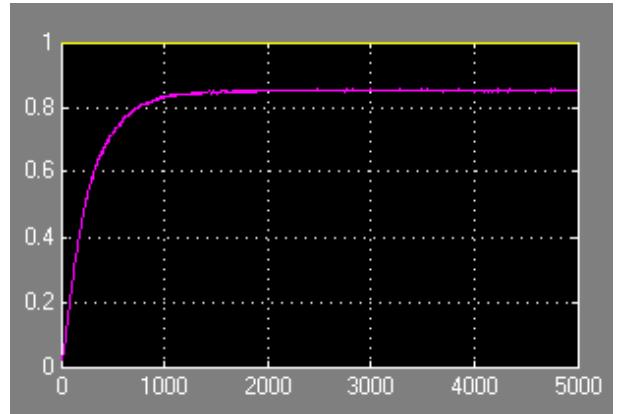


Figura 15. Respuesta de la Planta de Amplificadores Operacionales con Controlador Adaptativo con Polos $(z-0.1)(z-0.2)$

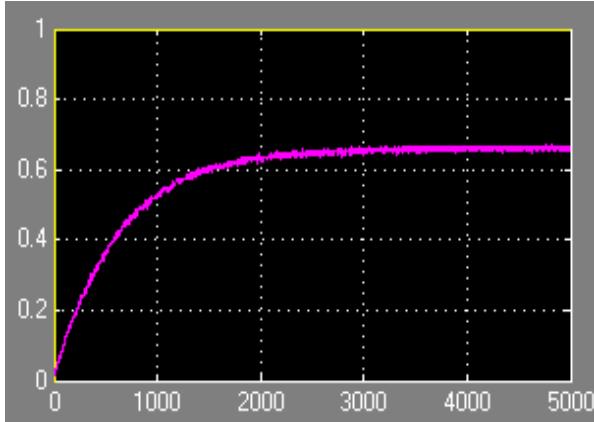


Figura 14. Respuesta de la Planta de Amplificadores Operacionales en Lazo Cerrado

La respuesta de la figura 14 muestra la salida del circuito de amplificadores operacionales en lazo cerrado, que es una planta de respuesta lenta que tiene un tiempo de establecimiento de aproximadamente 33 seg. y con error de posición ya que se estabiliza a 0.6V. El tiempo de simulación para la figura 14 es de 5000 que aproximadamente es igual a 46 seg.

Se diseñó un Controlador Adaptativo variando la ubicación de los polos.

La respuesta de la figura 15 muestra una respuesta más rápida ya que el sistema presenta un tiempo de establecimiento de aproximadamente igual a 11 seg.

En la figura 16 se observa la Ley de Control aplicada al sistema original para obtener la respuesta de la figura 15.

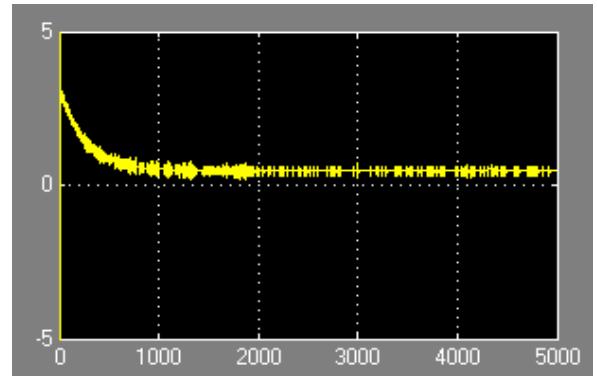


Figura 16. Ley de Control

V. CONCLUSIONES

Para el proceso de identificación en el presente proyecto se ha utilizado el método de mínimos cuadrados recursivo debido a que la estimación de parámetros se realiza de manera recursiva, es decir, existe una actualización de parámetros después de cada periodo de muestreo, para actualizar la ley de control.

Se debe tener en cuenta que tanto para la simulación como para tiempo real, en este proyecto específico no se ha utilizado Simulink, debido a que no contiene una librería para Control Adaptativo, es decir, el diseño del

Controlador Adaptativo Self-Tuning por el método de Asignación de Polos, se lo realizó mediante programación en archivos.m, además al no poder combinar los procesos realizados en Workspace como en Simulink, todo el proceso desde Identificación de Parámetros hasta Diseño del Controlador se realizó en programación.

El método de Identificación de mínimos cuadrados es suficiente para aplicaciones de Control Digital, ya que incluso entrega resultados satisfactorios aún con la presencia de ruido blanco, aproximación que se puede realizar en la mayoría de procesos industriales.

En cuanto al algoritmo de control, éste entrega resultados satisfactorios para el caso de regulación, sin embargo se puede extender al caso de seguimiento añadiendo un integrador.

La bondad del algoritmo se puede apreciar cuando se realiza una modificación de la planta, y tanto la identificación como el control permiten detectar aquella variación y realizar la regulación para regresar a la salida deseada.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEE CONTROL ENGINEERING SERIES 21; BENNETT,S; LINKENS D.A. Computer Control of Industrial Processes. Peter Peregrinus Ltd. New York.1982.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David. Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley Publishing Company. Primera Edición. 1980.

ASTROM, Johan Karl.; WITTENMARK, Bjorn. Adapatative Control. Addison-Wesley Publishing Company. Primera Edición. 1989.

IEE CONTROL ENGINEERING SERIES 15; HARRIS, C.J.; BILLINGS, S.A.; Self-Tuning and Adaptative Control. Peter Peregrinus Ltd. Primera Edición.1981.

LASAC`95. Second Latin American Seminar on Advanced Control, Fourth Seminar on System Identification, Parameter Estimation and Adaptative Control. Chile. Septiembre 1995.

<http://www.monografias.com/trabajos22/aplicaciones-matlab/aplicaciones-matlab.shtml>

http://www.dea.icai.upco.es/ramon/Control_Avanzado/Adaptativo/Estima_Adapta.pdf

<http://roboticslab.uc3m.es/publications/SGarridoPhD.pdf>

<http://www.edutecne.utn.edu.ar/tutoriales/identificacion-sistemas-segundo-orden.pdf>

<http://www.epsem.upc.edu/~esaii/assign/ident/Tema%201.pdf>

<http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co/recursos/glosario/r.html>

http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria_moderna_de_control.htm

http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co/recursos/historia/1940_1960.html

http://www.dea.icai.upco.es/ramon/Control_Avanzado/Material2.html#adaptativo

<http://instruments.hao.ucar.edu/spinor/htdocs/NI-DAQ.pdf>

http://www.slideshare.net/ptah_enki/asignacion-de-polos-y-predictor-de-smith

<http://math.bu.edu/misc/DOCSERVER/raw/ident.pdf>

<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ident/exempleindex.html>

<http://www.profesaulosuna.com/data/files/TELECOMUNICACIONES/AM/CIRCUITOS%20AM/ruido.pdf>

<http://www.monografias.com/trabajos-pdf3/glosario-terminos-control/glosario-terminos-control.pdf>

<http://www.uv.es/gcamps/materialea/ch06.pdf>

<http://books.google.com.ec/books>. MORENO, Luis. "Ingeniería de Control: modelado, análisis y control de sistemas dinámicos"

VII. BIOGRAFÍA



Autora. Carolina Godoy, nació en la ciudad de Ambato el 6 de Noviembre de 1985. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Nacional "Ambato". En Marzo del 2011 obtuvo su título de Ingeniera en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se encuentra cursando la Maestría en Gobernanza Energética en FLACSO Sede Ecuador. Sus áreas de interés son los Sistemas de Control, Estudio de Energías Renovables, Políticas Públicas, entre otros.
(godoycarolina621@yahoo.com)

Director. Patricio Burbano, nació el 9 de Octubre de 1951. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional en 1974. Sus estudios de Cuarto Nivel los realizó en The University of Manchester Institute of Science and Technology, obteniendo en 1984 el título de M.Sc in Systems and Control. Sus áreas de interés son la Dinámica de Sistemas, Identificación de Sistemas, Control Automático de Procesos Industriales, el Control Moderno y el Control Inteligente.
(pburbano@fie200.epn.edu.ec)