

Control Basado en Pasividad para una Clase de Sistemas no Lineales y su Aplicación a la Regulación de Nivel de un Estanque Cónico

Juan Carlos Travieso-Torres^{a*}, Manuel A. Duarte-Mermoud^b, Senior Member, IEEE,
Antonio Gutiérrez-Osorio^a and Orlando Beytía^a

^a Departamento de Tecnologías Industriales de la Universidad de Santiago de Chile, El Belloto 3735, Santiago, Chile.

^b Departamento de Ingeniería Eléctrica Y Centro de Tecnología Avanzada para la Minería de la Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile

Resumen

En este artículo científico se proponen dos estrategias de control basado en pasividad, una adaptable y la otra no adaptable para cierta clase de sistemas no lineales. A diferencia de la estrategia de control no adaptable, la adaptable no hace uso del conocimiento de los valores de los parámetros de la planta. Ambas estrategias son luego diseñadas y aplicadas para la regulación de nivel de un estanque cónico discutiéndose los resultados experimentalmente obtenidos luego de realizar un estudio comparativo experimental para verificar el comportamiento del sistema bajo control y evidenciar las ventajas y desventajas de los controladores. Los resultados muestran que el diseño del APBC es más simple que el diseño de los controladores PBC al no requerir el conocimiento de los parámetros de la planta controlada, también es más robusto frente a variaciones de un parámetro de la planta.

Palabras Clave:

Sistemas de control no-lineal, control adaptativo, pasividad.

Passivity Based Control of a Class of Nonlinear Systems and its Application to the Level Regulation of a Conical Tank

Abstract

An adaptive passivity-based controller (APBC) and a non-adaptive passivity-based controller (PBC) are proposed in this paper. In contrast to PBC, the APBC strategy does not make use of the knowledge of the values of the plant parameters. Both strategies are also designed and applied to the level regulation of a conical tank, discussing the experimental results obtained after performing an experimental comparative study to verify the behavior of the system under control and to demonstrate the advantages and disadvantages of the controllers. The results show that the design of the APBC is simpler than the design of PBC controllers by not requiring the knowledge of the plant parameters; it is also more robust in front of variations of a plant parameter.

Keywords:

Nonlinear control systems, adaptive control, passivity.

1. Introducción

Los estanques cónicos poseen una forma que facilita el drenaje de ciertos sólidos granulados y fluidos; y se utilizan en muchas aplicaciones industriales para almacenamiento y también en varios procesos de espesamiento. El comportamiento del nivel del producto contenido en los estanques cónicos está representado por un sistema no lineal, habiéndose reportado en la literatura técnica numerosos trabajos de investigación para regular el nivel en Gireesh y

Sreenivasulu, 2014, Madhubala et al, 2004, Betancor-Martín et al, 2013, Arivalahan et al 2012, Ganesh Ram y Abraham Lincoln, 2013, Dhanalakshmi, R. y Vinodha, R., 2013, Srivignesh et al, 2012, Teena y Hepsiba, 2014, Beena et al, 2015, Chandrasekar y Ponnusamy, 2013, Chandrasekar y Ponnusamy, 2014 y Travieso et al, 2016.

En Madhubala et al, 2004, Betancor-Martín et al, 2013, Arivalahan et al 2012, Ganesh Ram y Abraham Lincoln, 2013, Dhanalakshmi, R. y Vinodha, R., 2013, Srivignesh et al, 2012, se proponen técnicas basadas en Redes Neuronales

*Autor para la correspondencia: juancarlos.travieso@usach.cl

Artificiales (ANN, por sus siglas en Inglés) y Lógica Difusa (FL, por sus siglas en Inglés) para ajustar los parámetros de un controlador Proporcional Integral (PI), en dependencia de los puntos de operación del nivel. En Madhubala et al, 2004, Betancor-Martín et al, 2013, Arivalahan et al 2012, Ganesh Ram y Abraham Lincoln, 2013, se presentan controladores del tipo PI-FL y en Dhanalakshmi, R. y Vinodha, R., 2013 y Srivignesh et al, 2012 del tipo PI-ANN.

En Teena y Hepsiba, 2014 y Beena et al, 2015 se aplica un controlador por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en Inglés) para la regulación de nivel de un tanque cónico. Este considera una ley de control que conmuta entre una parte continua y una discontinua alcanzando una respuesta ligeramente superior que la de un controlador PID. Los resultados se muestran para un único punto de operación.

Como alternativa a los controladores no lineales de Teena y Hepsiba, 2014 y Beena et al, 2015, descritos anteriormente, en Chandrasekar y Ponnusamy, 2013, Chandrasekar & Ponnusamy, 2014, se aplican técnicas de control no-adaptable basado en pasividad (PBC, por sus siglas en Inglés Passivity-Based Control) para un estanque cónico. Estos PBC son más simples que las técnicas citadas anteriormente en las referencias Gireesh y Sreenivasulu, 2014, Madhubala et al, 2004, Betancor-Martín et al, 2013, Arivalahan et al 2012, Ganesh Ram y Abraham Lincoln, 2013, Dhanalakshmi, R. y Vinodha, R., 2013, Srivignesh et al, 2012, Teena y Hepsiba, 2014, Beena et al, 2015; sin embargo, se basan en la cancelación exacta de términos entre el sistema no lineal y el controlador, por lo que no es robusto ante variaciones de los parámetros de la planta. Los controladores diseñados en Chandrasekar y Ponnusamy, 2013, Chandrasekar y Ponnusamy, 2014, se basan en una síntesis de conceptos y condiciones descritas en Byrnes et al, 1991, bajo las cuales un sistema no lineal con punto de equilibrio en el origen se puede convertir en Cr-pasivo y finalmente estabilizarse de manera simple mediante una técnica no adaptable de PBC.

También basado en Byrnes et al, 1991, pero para el caso de sistemas no lineales que presentan dependencia paramétrica lineal explícita y parámetros desconocidos, se proponen en Duarte-Mermoud et al, 2002, Castro-Linares y Duarte-Mermoud, 1998, controladores adaptables basados en pasividad (APBC, por sus siglas en inglés, Adaptive Passivity-Based Control). Las técnicas APBC de Duarte-Mermoud et al, 2002, Castro-Linares y Duarte-Mermoud, 1998, permiten la estabilización. Posteriormente técnicas PBC y APBC para permitir la regulación y el seguimiento se propusieron teóricamente en Travieso et al, 2007 como una extensión de los resultados propuestos en Byrnes et al, 1991 y en Duarte-Mermoud et al, 2002, Castro-Linares y Duarte-Mermoud, 1998. Estas técnicas son aplicables a sistemas no lineales expresados en cierta forma normal con una dinámica cero estable, definida esta como la dinámica interna presente cuando la salida es cero.

No obstante, la planta de nivel considerada es un ejemplo de sistema no lineal similar que no presenta dinámica interna. Específicamente para la planta de nivel en Travieso et al, 2017, se considera que el modelo de la planta es completamente desconocido, sólo hay acceso a la entrada y a la salida, y entonces este es representado mediante una aproximación de polinomios de Taylor (TPA) proponiéndose la técnica TPA-APBC que asegura que error de control tienda asintóticamente localmente a cero.

Para el caso en que se conoce mayor información sobre la estructura del modelo de la planta, en el presente trabajo se proponen técnicas APBC y PBC para realizar seguimiento, regulación y estabilización de cierta clase de sistemas no lineales, haciendo uso de toda la información disponible y asegurando que error de control tienda globalmente asintóticamente a cero. Luego, estas técnicas son diseñadas y aplicadas para la regulación de nivel de un estanque cónico.

Una descripción de la planta estanque cónico empleada en este estudio, incluyendo su modelación matemática, es descrita en la Sección 2. El diseño del APBC y de PBC se describe en la Sección 3, presentando los resultados experimentales comparativos en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5 se plasman las conclusiones de este trabajo.

2. Descripción y Modelación del Estanque Cónico

En este estudio se utilizó una planta de estanque cónico disponible en el Laboratorio de Automática del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, que opera con agua (Ver Figura 1). Siguiendo el desarrollo descrito en Travieso et al, 2017, se obtiene el siguiente modelo no lineal de la planta:

$$\dot{h}(t) = \frac{H^2}{\pi R^2} C_2 h(t)^{-2} - \frac{H^2}{\pi R^2} D h(t)^{-\frac{3}{2}} + \frac{H^2}{\pi R^2} h(t)^{-2} C_1 u(t) \quad (1)$$

con el nivel del agua $h(t)$ que se comporta como un sistema no lineal, siendo la variable que se desea controlar expresada en cm, medida a través de un sensor de nivel del tipo presión diferencial situado en el fondo del estanque. $u(t)$ es la entrada de control que ajusta la velocidad de la bomba a través de un variador de velocidad (VSD, por sus siglas en Inglés, Variable Speed Driver), tomando valores entre 0 y 100%. El estanque cónico es de altura H y radio máximo R (parámetros del sistema), Otros parámetros del sistema son $C_1, C_2, D \in \mathcal{R}$ que dependen de la densidad del contenido del estanque, la aceleración por gravedad, la geometría del estanque, y características de la válvula de descarga, son consideradas constantes.

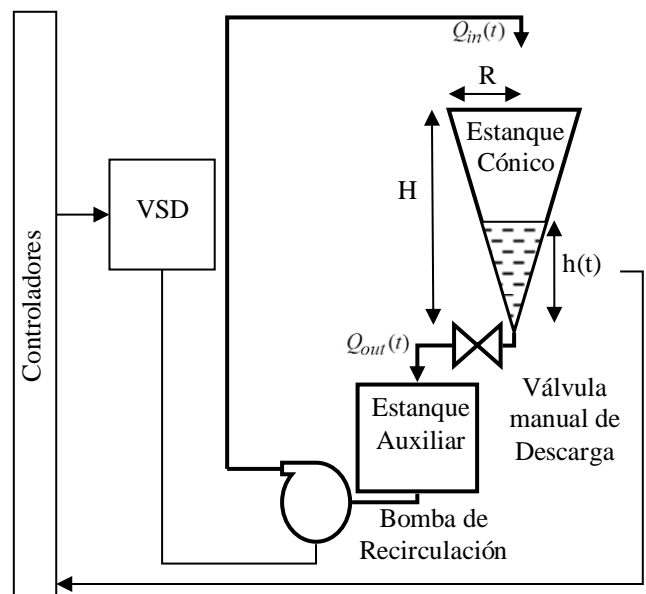


Figura 1: Diagrama de Control de la planta de estanque cónico controlada.

3. Procedimiento de Diseño de Controladores

A continuación se presenta el diseño de controladores APBC y PBC para propósitos de seguimiento, regulación y estabilización, de cierta clase de sistemas no lineales de grado relativo unitario de la forma $\dot{y}(t) = a'(A', y) + b'(B', y)u(t)$ donde $y(t) \in \mathfrak{R}^m$ es la salida del sistema, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ es la entrada de control del sistema, $a'(A', y) \in \mathfrak{R}^m$ y $b'(B', y) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ son funciones parte de la estructura del modelo que dependen de la variable de salida $y(t)$ y de los parámetros del sistema, denotados simbólicamente como A', B' . Además se supone que existe una dependencia paramétrica lineal explícita adquiriendo el sistema la forma:

$$\dot{y}(t) = Aa(y) + Bb(y)u(t) \tag{2}$$

donde $a'(A', y) = Aa(y) \in \mathfrak{R}^m$ y $b'(B', y) = Bb(y) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$, con $A, B \in \mathfrak{R}^{m \times m}$. Se supone además que las funciones $a(y) \in \mathfrak{R}^m$ y $b(y) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ son conocidas, que $b(y)$ es globalmente invertible, y aunque el análisis se puede realizar para cualquier matriz B , aquí por simplicidad supondremos que B es una matriz diagonal.

Teorema 3.1: Consideremos la clase de sistemas no lineales definido en (2), una salida deseada de la planta $y(t)^* \in \mathfrak{R}^m$ y su derivada temporal $\dot{y}(t)^* \in \mathfrak{R}^m$, que se suponen ambas acotadas y conocidas. El siguiente controlador APBC:

$$u(t) = b^{-1}(y)\hat{\theta}(t)^T \omega(t) \tag{3}$$

$\dot{\hat{\theta}}(t) = -\alpha \cdot \text{signo}(B)e(t)\omega(t)^T$ convierte al sistema (2) en un sistema pasivo, desde $u^p(t)$ hasta $e(t)$, donde $e(t) = y(t) - y(t)^* \in \mathfrak{R}^m$ es el error de control, $u(t)^p \in \mathfrak{R}^m$ es una nueva entrada externa, $\hat{\theta}(t) \in \mathfrak{R}^{m \times 2m}$ son los parámetros ajustables del controlador, $\omega(t) \in \mathfrak{R}^{2m}$ es el vector de información definido como $\omega(t) = \begin{bmatrix} a(y) \\ u(t)^p + \dot{y}(t)^* \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2m}$, $\alpha \in \mathfrak{R}^+$ es la ganancia adaptable de la ley de ajuste y la matriz $\text{signo}(B)$ denota la matriz diagonal que contiene los signos de los elementos de la diagonal de B .

Adicionalmente, (Byrnes et al, 1991), si se escoge $u(t)^p = -Ke(t)$ con $K \in \mathfrak{R}^{m \times m} > 0$, entonces el error de control $e(t)$ tiende asintóticamente a cero, i.e. la salida $y(t)$ tiende asintóticamente a la salida deseada $y^*(t)$, mientras que todas las señales del sistema adaptable permanecen acotadas.

Demostración 3.1: Reemplazando la ley de control (3) en el sistema (2) se obtiene el siguiente sistema adaptable:

$$\dot{e}(t) = u(t)^p + B\phi(t)^T \omega(t) \tag{4}$$

$\dot{\phi}(t) = -\alpha \cdot \text{signo}(B)e(t)\omega(t)^T$ donde $\phi(t) = \hat{\theta}(t) - \theta \in \mathfrak{R}^{m \times 2m}$ es el error de los parámetros ajustables del controlador con respecto a sus parámetros ideales definidos como $\theta = \begin{bmatrix} -B^{-1}A & B^{-1} \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^{m \times 2m}$. Dado

que estos últimos son constantes se tiene que $\dot{\phi}(t) = \dot{\hat{\theta}}(t)$ y por lo tanto la ley de ajuste en (4b) es la misma que en (3b).

Definamos la siguiente función de almacenamiento:

$$V(e, \phi) = \frac{1}{2} \left(e(t)^T e(t) + \text{Traza} \left(\alpha^{-1} |B| \phi(t)^T \phi(t) \right) \right) \tag{5}$$

con $V(0,0) = 0$, que es positiva globalmente definida en el espacio e, ϕ . Su derivada respecto del tiempo resulta igual a $\dot{V}(e, \phi) = e(t)^T \dot{e}(t) + \text{Traza} \left(\alpha^{-1} |B| \dot{\phi}(t)^T \phi(t) \right)$. Sustituyendo aquí las ecuaciones dadas en (4) para el error de control, el error de los parámetros y considerando $B = \text{signo}(B)|B|$, se obtiene $\dot{V}(e, \phi) = e(t)^T u(t)^p + e(t)^T B \left(\phi(t)^T \omega(t) - \phi(t)^T \omega(t) \right)$.

Cancelando términos, finalmente se obtiene $\dot{V}(e, \phi) = e(t)^T u(t)^p$, que es la primera derivada de la función de almacenamiento respecto del tiempo a lo largo del sistema bajo control, demostrando que el sistema resultante (4) es globalmente C^1 -pasivo desde $u(t)^p$ a $e(t)$. Además, si consideramos $u(t)^p = -Ke(t)$ con $K \in \mathfrak{R}^{m \times m} > 0$, el sistema (4) se transforma en

$$\dot{e}(t) = -Ke(t) + B\phi(t)^T \omega(t) \tag{6}$$

$\dot{\phi}(t) = -\alpha \cdot \text{signo}(B)e(t)\omega(t)^T$ y la derivada de función de almacenamiento llega a ser $\dot{V}(e, \phi) = -e(t)^T Ke(t) \leq 0$, lo que implica que la función de almacenamiento es una función de Lyapunov para el sistema (6) y por lo tanto el punto $(0,0)$ del sistema (6) es globalmente estable, y todas señales del sistema permanecen acotadas.

Como $V(t) > 0, \dot{V}(t) < 0 \Rightarrow e(t), \phi(t) \in L^\infty$. Como $e(t) \in L^\infty$ entonces se tiene que $u^p(t) \in L^\infty$, y como $e(t) = y(t) - y(t)^*$, con $y(t)^* \in L^\infty$, se tiene que $y(t) \in L^\infty$, implicando que $\omega(t) \in L^\infty$. De (3) se tiene que $u(t) \in L^\infty$, y como $\phi(t) \in L^\infty, \omega(t) \in L^\infty, e(t) \in L^\infty$, de (6) se tiene que $\dot{e}(t) \in L^\infty \therefore e(t)$ es continuo. Por otra parte integrando entre $t=0$ y $t=\infty$ ambos miembros de la ecuación $\dot{V}(e, \phi) = -e(t)^T Ke(t)$ se tiene que $e(t) \in L^2$. Entonces, como $e(t) \in L^2$ y $\dot{e}(t) \in L^\infty$, por el Lema de Barbalat se concluye que $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, demostrando específicamente que el error de control tiende asintóticamente a cero después de aplicar el APBC dado por (3) con $u(t)^p = -Ke(t)$. Del error de los parámetros del controlador sólo puede decirse que es acotado y no necesariamente existe convergencia paramétrica. \diamond

De este Teorema se desprende el siguiente Corolario.

Colorario 3.1: Consideremos el sistema no lineal definido en (2), bajo las mismas hipótesis del Teorema 3.1 pero suponiendo ahora conocidos los parámetros A y B del sistema, el siguiente controlador PBC (no adaptable):

$$u(t) = -b(y)^{-1} \theta^T \omega(t) \tag{7}$$

con $\theta = \begin{bmatrix} -B^{-1}A & B^{-1} \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^{m \times 2m}$ y el vector de información $\omega(t) = \begin{bmatrix} a(y) \\ u(t)^p + \dot{y}(t)^* \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2m}$, convierte a (2) en un sistema pasivo desde $u^p(t)$ hasta $e(t)$ de la forma:

$$\dot{e}(t) = u(t)^p \tag{8}$$

Si adicionalmente se escoge $u^p(t) = -Ke(t)$ (9)

con $K \in \mathfrak{R}^{m \times m} > 0$, se obtiene $\dot{e}(t) = -Ke(t)$ (10)

que es un sistema estable en el sentido de Lyapunov, y el error de control $e(t)$ tiende asintóticamente a cero, i.e. la salida $y(t)$ tiende asintóticamente a la salida deseada $y(t)^*$. Este Corolario se demuestra siguiendo un procedimiento similar al de la Demostración 3.1 considerando la función de almacenamiento $V(t) = \frac{1}{2} e(t)^T e(t)$.

Observación 3.1: Para el caso de contar con un sistema como el descrito en (2), en que sólo se tenga acceso a la entrada de control $u(t)$ y a la salida del sistema $y(t)$, desconociéndose las funciones $a(A, y)$ y $b(B, y)$, la técnica APBC definida por (3) y (5) y PBC definida por (7) y (9) no podrían ser aplicadas. Para este caso sólo podría aplicarse un controlador del tipo TPA-APBC (Travieso et al, 2017) el cual consideraría un vector $\omega(t)$ y ley de control $u(t)$ obtenidos luego de aplicar la técnica TPA con resultados locales.

3.1. Diseño del APBC para el Estanque Cónico

En esta Sección se aplican ambos controladores para controlar la planta (1) y que el nivel del agua $h(t)$ del estanque cónico tienda al punto deseado de operación del nivel h^* constante, con $e(t) = h(t) - h^*$, se considera que:

$$Aa(y) = \begin{bmatrix} \frac{H^2}{\pi R^2} C_2 & -\frac{H^2}{\pi R^2} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(t)^{-2} \\ h(t)^{-\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \text{ y } Bb(y) = \left(\frac{H^2}{\pi R^2} C_1 \right) h(t)^{-2}$$

Entonces se diseña el siguiente APBC que considera desconocidos los parámetros de la planta y que sólo se conoce $a(y) = \begin{bmatrix} h(t)^{-2} & h(t)^{-3/2} \end{bmatrix}^T$ y $b(y) = h(t)^{-2}$:

$$u(t) = h(t)^2 \hat{\theta}(t)^T \omega(t) \tag{11}$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -\alpha e(t) \omega(t)^T$$

con el vector de información

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} h(t)^{-2} & h(t)^{-\frac{3}{2}} & u(t)^p \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^3, u(t)^p = -Ke(t), \text{ donde}$$

$\hat{\theta}(t) \in \mathfrak{R}^3$ es el parámetro adaptable del controlador. Aquí $u(t), u(t)^p \in \mathfrak{R}$, y $K, \alpha \in \mathfrak{R}^+$ son parámetros constantes de ajuste del controlador. Adicionalmente la ley de adaptación considera la restricción $h(t) = 1\text{cm}$ si $h \leq 1\text{cm}$ y $h(t) = h(t)$ si $h > 1\text{cm}$, para evitar indefiniciones de la salida de control en cero.

3.2. Diseño de PBC para el Estanque Cónico

Similar al caso de diseño del APBC se identifica aquí primero el modelo de la planta (1) en función de la variable a controlar. Luego, suponiendo que todos los parámetros del modelo son conocidos, el siguiente PBC es diseñado para la regulación del nivel del agua en el estanque cónico:

$$u(t) = -h(t)^2 \theta^T \omega(t) \tag{12}$$

con el vector de información

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} h(t)^{-2} & h(t)^{-\frac{3}{2}} & u(t)^p \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^3, u(t)^p = -Ke(t), \text{ donde}$$

$\theta = \begin{bmatrix} C_2/C_1 & D/C_1 & \pi R^2/H^2 C_1 \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^3$ es el parámetro no adaptable del controlador. Aquí $u(t), u(t)^p \in \mathfrak{R}$, y $K, \alpha \in \mathfrak{R}^+$ son parámetros constantes de ajuste del controlador.

4. Resultados Experimentales y Comparaciones

Los resultados experimentales obtenidos después de aplicar al estanque cónico los controladores PBC y APBC son presentados y discutidos en esta sección. Los controladores fueron programados en Simulink, Matlab versión R2013, operando en una computadora personal conectada a un controlador programable Opto22 existente, que actúa como interfaz con el sensor de nivel y el actuador (VSD) que alimenta al estanque cónico como se describe en la Figura 1. Como método de integración se utilizó el método de cálculo de paso variable Ode23, y se establecieron como automáticos los márgenes mínimo, máximo, y las tolerancias.

4.1. Pruebas Experimentales Preliminares

En Travieso et al, 2017, se detallan las pruebas experimentales realizadas para determinar los parámetros de la planta de estanque cónico, empleados aquí para el diseño del controlador no-adaptable PBC y descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros obtenidos para la planta para dos posiciones típicas de operación de la válvula de descarga.

Posición Válvula [°]	C_1 [cm ³ /s]	C_2 [cm ³ /s]	D [cm ^{5/2} /s]	H [cm]	R [cm]
45°	3.9	-70.8	14.3	80	17
37°	3.9	-70.8	21.8	80	17

Se considera entonces que $H=80\text{ cm}$, $R=17\text{ cm}$, $C_1=3.9\text{ cm}^3/\text{s}$, $C_2=-70.8\text{ cm}^3/\text{s}$ y $D=14.3$, por lo que para el controlador (7) $\theta = [-18,2 \quad 3,7 \quad 0,0]^T \in \mathfrak{R}^3$.

Adicionalmente, los parámetros del APBC, K y α fueron ajustados experimentalmente para conseguir tiempos de establecimientos similares a los del controlador PI de (Travieso et al, 2017). Se determinó que los valores de $K=0.001$ y $\alpha=0.25$ aseguran un desempeño adecuado de la planta bajo control. De manera similar, para el caso del controlador PBC se seleccionó $K=0.001$.

4.2. Comportamiento de los Controladores frente a una Referencia tipo Escalón

Se realizó un conjunto de pruebas experimentales durante 3000 s para verificar el comportamiento de los controladores estudiados. En este ensayo, la abertura de la válvula de descarga se ajustó en 45° (es decir, el parámetro $D = 14,3$). Se aplicó una referencia que considera una secuencia de

escalones de diferentes valores, tomando amplitudes de 15, 25, 35, 45 y 55 cm (representadas por una línea punteada en las diferentes figuras), partiendo desde $t=0$ s y cambiando cada 600 s, explorando todo el rango de operación. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 2 y Figura 3 para los controladores PBC y APBC respectivamente.

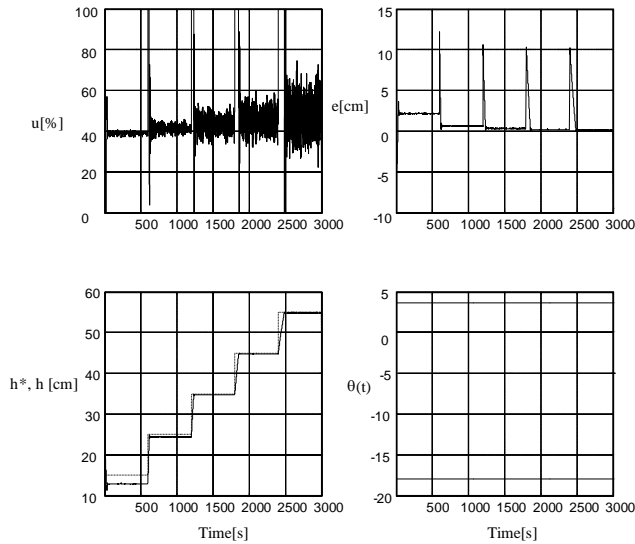


Figura 2. Resultados experimentales usando el controlador PBC con la apertura de la válvula de descarga fija en 45°.

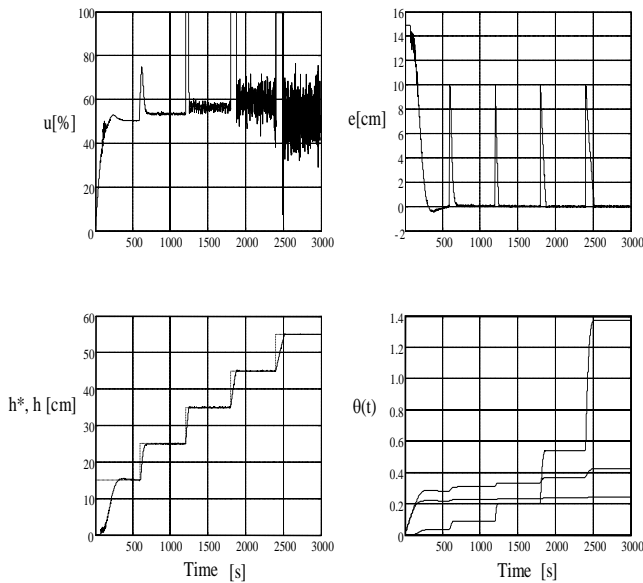


Figura 3. Resultados experimentales usando el controlador de APBC con la apertura de la válvula de descarga fija en 45°.

La Figura 2 y la Figura 3 muestran la entrada de control, el error de nivel, la referencia de nivel (representado por una línea punteada de escalones con amplitud creciente) y el nivel real, junto con los parámetros de los controladores PBC y APBC respectivamente.

Los resultados experimentales mostrados de la Figura 2 y la Figura 3 se resumen en la Tabla 2, junto con los resultados de un controlador PI y de un TPA-APBC de Travieso et al, 2017. Aquí se muestra el desempeño de cada controlador estudiado ante cambios de referencia tipo escalón, caracterizado por cuatro índices; Ts (tiempo de estabilización), MO (sobrepaso máximo), Ess (error de estado

estacionario), la Integral del valor absoluto del error (IAE, por sus siglas en Inglés Integral Absolute Error), y la Integral del valor al cuadrado de la entrada (ISI, por sus siglas en Inglés Integral Square Input). Sólo el controladores PI, ajustado en Travieso et al, 2017, mediante la ubicación del lugar geométrico de las raíces, imponiendo una respuesta a lazo cerrado de 200 s y 10% máximo de sobre paso, y TPA-APBC presentan sobrepaso. El controlador APBC muestra los mejores índices IAE, excepto para el punto de operación cercano a cero donde es más lento.

Tabla 2. Índices de desempeño de los controladores con apertura de la válvula ajustada a 45°.

Índice	Estrategia	Referencia de Nivel h^*				
		15 [cm]	25 [cm]	35 [cm]	45 [cm]	55 [cm]
MO [%]	PI	7.4	16.7	38.9	44.4	50.0
	PBC	0	0	0	0	0
	APBC	0	0	0	0	0
	TPA-APBC	0	6.2	8.5	9.2	10.3
Ts [s]	PI	26	134	147	156	168
	PBC	50	67	83	99	117
	APBC	520	122	131	144	166
	TPA-APBC	560	200	350	450	500
Ess [%]	PI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	PBC	13.3	5.7	2.9	1.4	0.6
	APBC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	TPA-APBC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
IAE (cm.s)	PI	0.08	0,15	0,55	1,00	1,63
	PBC	1,50	0,73	0,53	0,39	0,50
	APBC	2,28	0,15	0,25	0,25	0,5
	TPA-APBC	1,1	0,33	0,66	1,03	1,3
ISI ($\times 10^3$)	PI	0,98	1,14	1,35	1,48	1,69
	PBC	0,96	1,10	1,29	1,54	1,75
	APBC	1,13	1,63	2,04	2,22	1,88
	TPA-APBC	0,82	1,04	1,23	1,32	1,76

En la Figura 2 se muestra que el controlador PBC es el único que no alcanzó el error cero para los puntos de funcionamiento de nivel bajo y medio, lo que significa que no hay una cancelación exacta de términos, pudiendo deberse a inexactitud en los parámetros calculados del sistema. La señal de control $u(t)$ de los controladores TPA-APBC, APBC y PBC muestran bajo grado de saturación en comparación con la técnica PI, siendo el controlador APBC el que mayor esfuerzo de control realiza como se observa en la Tabla 2. Los parámetros del APBC cambian de una manera suave a lo largo del tiempo sin tender a los parámetros ideales del controlador $\theta = [-18,2 \ 3,7 \ 0,0]^T$. Puede verificarse que en esta aplicación el contar con mayor información de la planta influye en que el APBC muestre una convergencia más rápida del error de control $e(t)$ a cero que el TPA-APBC, y sin sobre paso.

4.3. Robustez de los Controladores frente a un Cambio Paramétrico de la Planta

Se procedió luego a repetir las pruebas de la Sección 4.2 pero cambiando la apertura de la válvula de descarga de 45° a 37°, como es usual en la operación de la planta en el laboratorio. Esto implicó una variación del parámetro D , de

14.3 cm^{5/2}/s a 21.8 cm^{5/2}/s. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 4 y Figura 5 para los dos controladores estudiados; PBC y APBC, respectivamente.

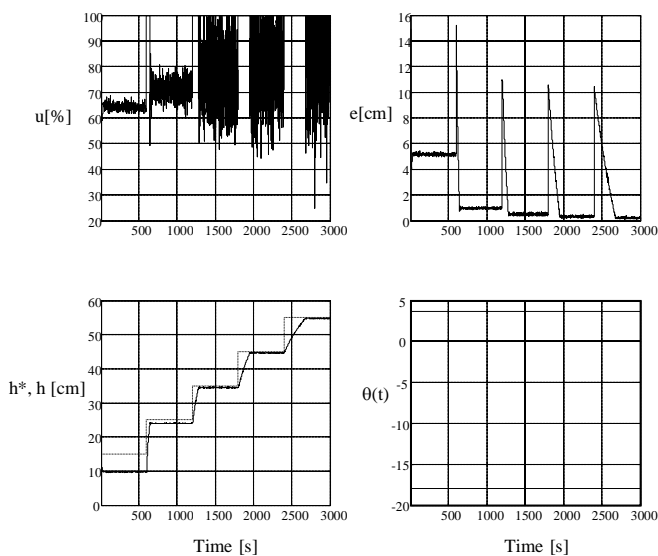


Figura 4. Resultados experimentales del PBC con la apertura de la válvula de descarga ajustada a 37°.

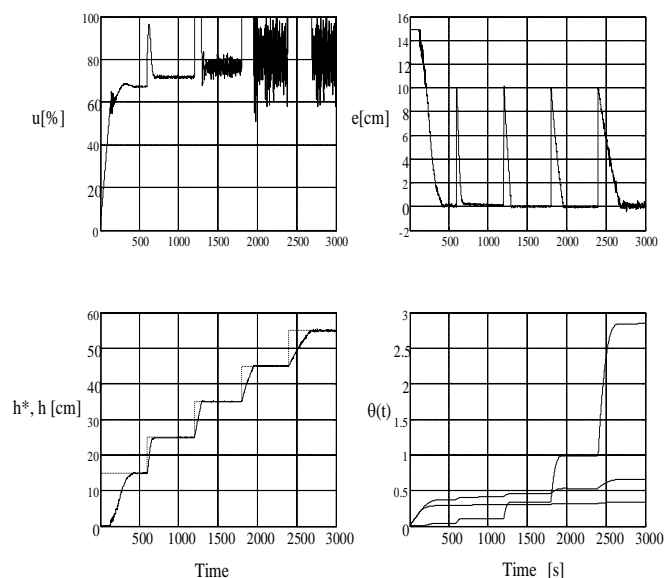


Figura 5. Resultados experimentales del APBC con la apertura de la válvula de descarga ajustada a 37°.

En esta prueba se usaron los mismos parámetros de ajuste de los controladores utilizados en la sección anterior (como es usual en aplicaciones industriales, donde los parámetros de los controladores no son re-sintonizados cuando hay variaciones paramétricas o perturbaciones externas), y se verificó el grado de robustez de los controladores frente a este cambio en la planta.

Los índices de comportamiento de los resultados experimentales para los controladores APBC, PBC, cuando se reajusta la válvula de descarga de 45° a 37°, mostrados en las Figuras 4 y Figura 5, se resumen en Tabla 3, junto con los resultados de un controlador PI y un TPA-APBC empleados en Travieso et al, 2017. Nuevamente el PBC presenta un error de estado estacionario, con un valor mayor que en la prueba experimental anterior. El controlador PI muestra un

comportamiento más lento con un MO aumentado y un IAE mayor que el del APBC. Sólo el APBC y el TPA-APBC son capaces de exhibir un buen desempeño, a pesar del 52.5% de variación en el parámetro *D* (que aumentó de 14.3 cm^{5/2}/s a 21.8 cm^{5/2}/s), comparados con los controladores no-adaptables PBC y PI. Nuevamente para esta planta en particular el APBC es más rápido que el TPA-APBC.

Tabla 3. Índices de desempeño de los controladores con la apertura de la válvula ajustada a 37°.

Índice	Estrategia	Referencia de Nivel <i>h</i> *				
		15 [cm]	25 [cm]	35 [cm]	45 [cm]	55 [cm]
MO [%]	PI	3.7	22.2	50.0	55.6	77.8
	PBC	0	0	0	0	0
	APBC	0	0	0	0	0
	TPA-APBC	0	6,6	8,8	9,4	10,4
Ts [s]	PI	177	247	335	512	119
	PBC	50	67	83	99	117
	APBC	530	134	148	169	243
	TPA-APBC	590	260	420	540	590
Ess [%]	PI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	PBC	33.3	10.0	5.70	3.60	2.10
	APBC	0	0	0	0	0
	TPA-APBC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
IAE (cm.s)	PI	0,25	0,35	1,13	2,00	2,25
	PBC	3,00	0,93	0,80	0,86	1,56
	APBC	3,00	0,25	0,50	0,75	1,25
	TPA-APBC	1,65	0,33	0,66	1,03	1,30
ISI	PI	2,61	3,25	3,76	3,95	6,00
	PBC	2,11	2,89	3,54	3,39	2,94
	APBC	1,96	2,92	3,68	3,90	4,39
	TPA-APBC	1,38	1,63	1,85	2,22	2,46

Para el punto de operación más alto, el controlador PI se saturó y el nivel de agua no alcanzó el punto de ajuste de nivel para el tiempo dado. Nuevamente el APBC se tornó más lento para el punto de operación más bajo, cercano a cero, sin existir convergencia paramétrica de los parámetros adaptables del APBC.

5. Conclusiones

Se presentó el diseño de un controlador adaptable basado en pasividad (APBC) y de uno no-adaptable (PBC) para cierta clase sistemas no lineales. Luego estos se aplicaron a la regulación de nivel de un estanque cónico y se estudiaron los resultados de su aplicación experimental evidenciando sus ventajas y desventajas. El diseño del APBC es más simple que el diseño de controladores PBC, al no requerir el conocimiento de los valores de los parámetros de la planta controlada. Además el APBC es más robusto frente a variaciones paramétricas de la planta. La señal de ambos controladores se aprecia sensible al ruido del sensor, lo cual debería mejorarse como trabajo futuro.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Santiago de Chile mediante el proyecto DICYT 2017 N° 041772TT y por CONICYT Chile mediante los proyectos Basal AMTC FB0809, FONDECYT 1150488.

Referencias

- N. Gireesh, G. Sreenivasulu, 2014, "Comparison of PI controller performances for a Conical Tank process using different tuning methods", in Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), pp. 1-4.
- T. K. Madhubala, M. Boopathy, 2004, J. Sarat Chandra, T. K. Radhakrishnan, "Development and tuning of Fuzzy controller for a conical level system", Intelligent Sensing and Information Processing, pp. 450-455. Print ISBN: 0-7803-8243-9,
- C. S. Betancor-Martín, J. A. Montiel-Nelson, A. Vega-Martínez, 2013, "Direct Inverse Control for a Conical Tank by Using Takagi-Sugeno Fuzzy Model", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol. 2, Issue 11, pp. 532-5342, November.
- R. Arivalahan, S. Hosimin Thilagar, D. Devaraj, 2012, "Investigation of Fuzzy Logic Controller for Conical Tank Process", European Journal of Scientific Research, vol. 92, No 2, pp.191-202, December.
- A. Ganesh Ram, S. Abraham Lincoln, 2013, "A model reference-based fuzzy adaptive pi controller for Nonlinear level process system", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, vol. 14, Issue 2, pp. 477-486, February.
- R. Dhanalakshmi and R. Vinodha, "Design of Control Schemes to Adapt PI Controller for Conical Tank Process", International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications, vol. 5, No. 3, pp. 1-20, November 2013.
- N. Srivignesh, P. Sowmya, K. Ramkumar, G. Balasubramanian, 2012, "Design of Neural Based PID Controller For Nonlinear Process, Proceedings of the International conference on modeling optimization and computing, Vol 38, pp. 3283-3291.
- T. Teena, D. Hepsiba, 2014, "Comparison of PID Controller with a Sliding Mode Controller for a Coupled Tank System", International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 3, Issue 2, pp.151-154, February.
- N. Beena, H. Reshma Shree, P. Sonali, K. Mohan Raj, 2015, "Performance Analysis of Sliding Mode Control method with a PID Controller for a Nonlinear System", International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering, vol. 3, Issue 5, pp. 21 - 23, May.
- P. Chandrasekar, L. Ponnusamy, 2014, "Comparative Study of Controller for a Variable Area MIMO Interacting NonLinear System", International Journal of Engineering and Technology, vol. 6, No 1, pp. 227-235.
- P. Chandrasekar, L. Ponnusamy, 2013, "Passivity based level controller desing applied to a nonlinear SISO System", Proceedings of the International Conference on Green Computing, Communication and Conservation Energy, pp. 392-396.
- C.I. Bryrnes, A. Isidori, J.C. Willems, 1991, "Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems", IEEE Transaction on Automatic Control, vol. 36, No. 11, pp. 1228-1240, November.
- M.A Duarte-Mermoud, R. Castro-Linares, A. Castillo-Facuse, "Direct passivity of a class of MIMO nonlinear systems using adaptive feedback". International Journal of Control, vol. 75, No. 1, pp. 23-33, January 2002.
- R. Castro-Linares, M.A. Duarte-Mermoud, 1998, "Passivity equivalence of a class of nonlinear systems via adaptive feedback", in Proceedings of the 8th Latin-American Congress on Automatic Control, Santiago, Chile, pp. 249-254.
- J.C. Travieso-Torres, M.A. Duarte-Mermoud, D.I. Sepúlveda, 2007, "Passivity-based control for stabilization, regulation and tracking purposes of a class of nonlinear systems". International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 21, No. 7, pp. 582-602, Septembe.
- J.C. Travieso-Torres, M.A. Duarte-Mermoud, O. Beytía, 2016, "Experimental Comparison of Passivity-Based Controllers for the Level Regulation of a Conical Tank". Proceedings of the IEEE-ICA Conference & XXII Congress of ACCA 2016, ISSN 0719-5567. Curicó, Chile. Vol. 1, pp. 515-520, 19-21 October.
- J.C. Travieso-Torres, M.A. Duarte-Mermoud, and O. Beytía, 2017, "Taylor polynomial approximation and adaptive passivitybased control applied to the level regulation of a conical tank", Asian Journal of Control, 10.1002/asjc.1496.