

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO MULTIVARIABLE BUMPLESS BASADO EN MODO DESLIZANTE

Gustavo D. Garbati¹, Fabricio Garelli²

¹ Centro de Tecnología Aplicada CTA, YPF. *gustavodg@gmail.com*

² Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI),

Departamento de Electrotecnia, FI-UNLP. *fabricio@ing.unlp.edu.ar*

1. INTRODUCCIÓN

Una práctica común en el control automático, especialmente en las industrias que involucran procesos químicos, es llevar la planta de forma manual a su punto de operación para luego conectar los controladores, con el objetivo de que el sistema comience a funcionar automáticamente. Es bien conocido que si no se toman medidas adecuadas, la conexión directa de los controladores puede causar perturbaciones en las entradas de la planta y un considerable deterioro de la respuesta del sistema.

Las estrategias que evitan los “saltos” en las acciones de control para reducir sus efectos transitorios asociados al cerrar el lazo de realimentación se denominan estrategias o algoritmos *bumpless*.

En la actualidad, existen aún una gran cantidad de controladores que están implementados analógicamente, en particular en ambientes industriales. Estos tipos de controladores son muy sensibles a las conmutaciones en la entrada a la planta (efecto *bump*), por la dificultad que presentan para fijar las condiciones ideales de conexión y evitar las discrepancias en las acciones de control.

Debido a la importancia práctica del problema, se han reportado una gran cantidad de trabajos que abordan el estudio y desarrollo de estrategias *bumpless*. Una de las primeras publicaciones fue la propuesta por Hanus *et al.* (1987), la cual se basa en el concepto de “referencia realizable”, que ha sido aplicado a muchos proyectos de la vida real. Numerosos artículos que han sido reportados en la literatura, (Turner y Walker, 2000; Mulder *et al.*, 2001; Zaccarian, 2005; Wu, 2002; Zheng *et al.*, 2006; Edwards y Postlethwaite, 1998) han sido aprovechados para ser aplicados como estrategias *bumpless*.

Este trabajo pretende mostrar la validez, con resultados experimentales, de una estrategia *bumpless* basada en acondicionamiento de referencia por modo deslizante (Garelli *et al.*, 2008), aplicada a una planta de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). El trabajo propuesto en (Garelli *et al.*, 2008) presenta conceptos teóricos de sistemas de estructura variable y de modos deslizante para resolver problemas que surgen en la conexión del lazo abierto al lazo cerrado en sistemas MIMO. También, las mismas ideas son aplicadas para realizar la conmutación entre distintos controladores sintonizados para diferentes puntos de operación de un sistema bajo control. Una de las principales ventajas que presenta es que se puede aplicar a controladores para los cuales los algoritmos *bumpless* convencionales no fueron pensados, e incluso con mínimos requerimientos de diseño y poco esfuerzo de implementación. A su vez, presenta propiedades de robustez propias de los modos deslizantes. El fenómeno conocido por la palabra inglesa *chattering*, se produce cuando el estado del sistema no se desliza sobre la variedad de deslizamiento, degradando la respuesta de los controles de estructura variable. El *chattering* no afecta la presente aplicación, que a diferencia de otras estrategias no requiere del modelo de la planta para su aplicación.

La experiencia práctica se realizó sobre una planta piloto multivariable conocida como “tanque cuádruple”, propuesta por Johansson (2000), y que fue construida en el laboratorio LEICI. Cabe destacar que esta planta ha sido una de las más utilizadas en los últimos años para evaluar estrategias de control multivariables (Aström *et al.*, 2002; Garelli *et al.*, 2006; Bianchi *et al.*, 2008; Gündes *et al.*, 2009). Su éxito radica en que la misma posee características que permiten representar numerosas problemáticas existentes en los sistemas MIMO a escala industrial.

2. ESTRATEGIA BUMPLESS BASADA EN MODO DESLIZANTE

La figura 1 muestra un diagrama esquemático del sistema de control con la estrategia *bumpless* manual-automático propuesta por Garelli *et al.* (2008). El objetivo del lazo de estructura variable, indicado por el recuadro punteado en la figura 1 y sumado a la entrada del controlador original $C(s)$, es el establecimiento de un régimen deslizante, de tal manera que las salidas del controlador \mathbf{u} sean forzadas a coincidir con las entradas de la planta $\hat{\mathbf{u}}$, evitando así saltos en las entradas de la planta cuando el lazo de control principal es cerrado.

Aunque el método propuesto considera procesos multivariables, las mismas ideas pueden ser obviamente aplicadas a sistema de una entrada – una salida como un caso particular.

$P(s) \in R^{m \times m}$ representa la planta que será controlada, mientras que $C(s) \in R^{m \times m}$ es un controlador multivariable (centralizado o descentralizado) diseñado para trabajar a lazo cerrado en un punto de operación P_0 . Se considera que este controlador es bipropio; en consecuencia, tiene la siguiente realización,

$$C(s) : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{e}_c \\ \mathbf{u} = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{e}_c \end{cases} \quad (1)$$

con \mathbf{D}_c siendo una matriz no singular.

El filtro $F(s)$ tiene le objetivo de suavizar la señal \mathbf{w}_s sumada a la entrada del controlador y garantizar la condición necesaria (Utkin, 2009), para el establecimiento del régimen deslizante, es decir, que la función de conmutación $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ tenga grado relativo uno con respecto a la acción discontinua \mathbf{w} . Este filtro puede ser representado en el espacio de estados como,

$$F(s) : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_f = \mathbf{A}_f \mathbf{x}_f + \mathbf{B}_f \mathbf{w} \\ \mathbf{w}_s = \mathbf{C}_f \mathbf{x}_f \end{cases} \quad (2)$$

con $\mathbf{A}_f = -\mathbf{C}_f = \lambda_f \mathbf{I}_m$ y $\mathbf{B}_f = \mathbf{I}_m$.

La señal discontinua $\mathbf{w} \in R^m$ está dada por

$$\mathbf{w}(\mathbf{x}) = \mathbf{M}(\mathbf{x}) \text{sign}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) \quad (3)$$

donde $\mathbf{x} = [x_c \ x_f]^T$, $\mathbf{M}(\mathbf{x})$ es una matriz de ganancia diagonal, y

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = [s_1(\mathbf{x}) \ s_1(\mathbf{x}) \ \dots \ s_m(\mathbf{x})]^T = \hat{\mathbf{u}} - \mathbf{u}(x_c, e_c) \quad (4)$$

es la función de conmutación, con $\mathbf{u} \in R^m$ y $\hat{\mathbf{u}} \in R^m$ siendo los vectores que contienen las salidas del controlador y las entradas a la planta respectivamente.

En (Garelli *et al.*, 2008) se analiza la existencia de un régimen deslizante colectivo en términos de la teoría de estabilidad dada por las funciones de Lyapunov. Particularmente se demuestra que, si la derivada de la función de conmutación $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ es expresada como

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{d}(\mathbf{x}) - \mathbf{D}(\mathbf{x}) \text{sign}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) \quad (5)$$

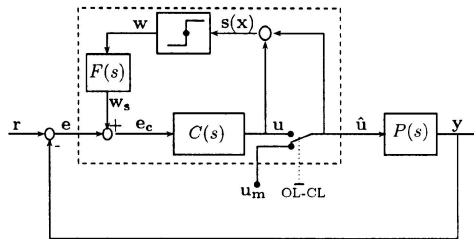


Fig. 1: Estrategia bumpless por MD para sistemas multivariables

entonces una condición suficiente para la existencia del MD (con convergencia a la superficie S en tiempo finito) es que para $\mathbf{x} \in S_d \subset S$, con S_d siendo del dominio de interés sobre la superficie $S = \{\mathbf{x} : \mathbf{s}(\mathbf{x}) = 0\}$,

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) \text{ sea definida positiva, } \mathbf{D}(\mathbf{x}) + \mathbf{D}^T(\mathbf{x}) > 0 \quad (6)$$

$$\|\mathbf{d}(\mathbf{x})\| < d_0 < \frac{\lambda_0}{\sqrt{m}} \text{ con } \lambda_{\min}(\mathbf{x}) > \lambda_0 > 0 \quad (7)$$

donde λ_{\min} es el menor autovalor de $\frac{1}{2} (\mathbf{D}(\mathbf{x}) + \mathbf{D}^T(\mathbf{x}))$.

Luego, de (1), (2) y (4) se obtiene fácilmente

$$\begin{aligned} \mathbf{d}(\mathbf{x}) &= \hat{\mathbf{u}} - \mathbf{C}_c \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c - \mathbf{C}_c \mathbf{B}_c \mathbf{e}_c - \mathbf{D}_c \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{D}_c \mathbf{C}_f \mathbf{A}_f \mathbf{x}_f \quad (8) \\ &= \hat{\mathbf{u}} - \mathbf{C}_c \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c - \mathbf{C}_c \mathbf{B}_c \mathbf{e}_c - \mathbf{D}_c \dot{\mathbf{e}} - \lambda_f \mathbf{D}_c \mathbf{w}_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{x}) &= \mathbf{D}_c \mathbf{C}_f \mathbf{B}_f \mathbf{M} \\ &= -\lambda_f \mathbf{D}_c \mathbf{M} \end{aligned} \quad (9)$$

Por lo tanto, el establecimiento del MD se garantizará siempre y cuando $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ y $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ satisfagan las condiciones (6) y (7). Claramente, la matriz $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ depende de la ley control (3), y en consecuencia la condición (6) puede ser satisfecha por la elección de los signos de los elementos de la diagonal en \mathbf{M} .

Para sistemas multivariables de gran dimensión, seleccionar por inspección cada signo de los elementos de \mathbf{M} puede resultar bastante tedioso. Un procedimiento alternativo para este tipo de sistemas es tomar

$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{D}_c^{-1}, \quad \boldsymbol{\eta} \in R^+ \quad (10)$$

de modo que

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) = -\lambda_f \cdot \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{I}_m \quad (11)$$

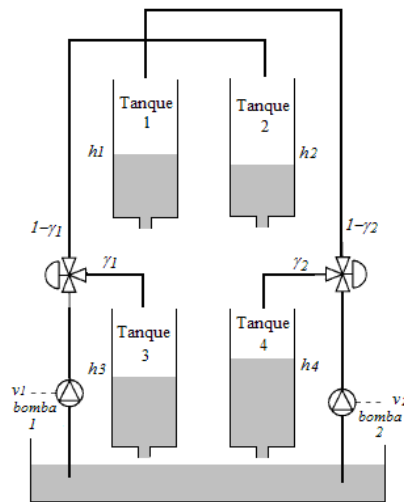


Fig. 2: Esquema de la planta “tanque cuádruple”

sea siempre definida positiva, y luego elegir η para satisfacer (7).

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA UTILIZADA PARA LA VALIDACIÓN

Para la validación experimental del método bumpless de la sección 2 se utilizó una de las plantas de laboratorio más representativas en cuanto a evaluación de estrategias de control multivariable, conocida como “tanque cuádruple”. Su esquema se puede observar en la figura 2. Uno de los principales atributos que la vuelven atractiva para utilizarla como banco de pruebas, es que puede presentar tanto características de fase mínima como de fase no mínima, dependiendo de cómo se ajustan dos válvulas divisoras de caudal.

La misma consiste en cuatro tanques dispuestos en dos niveles diferentes e interconectados de una manera particular. La planta tiene dos señales de control v_1 y v_2 (tensiones de entrada a las bombas de agua) y las señales de salida los niveles de los tanques inferiores h_3 y h_4 .

Considerando el esquema de la figura 2 y aplicando balance de masas y la ley de Bernoulli, se obtiene el siguiente modelo matemático,

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} + \frac{K_2 \cdot v_2}{A_1} \cdot (1 - \gamma_2) \\ \dot{h}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} + \frac{K_1 \cdot v_1}{A_2} \cdot (1 - \gamma_1) \\ \dot{h}_3 = \frac{a_1}{A_3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} - \frac{a_3}{A_3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3} + \frac{K_1 \cdot v_1}{A_3} \cdot \gamma_1 \\ \dot{h}_4 = \frac{a_2}{A_4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} - \frac{a_4}{A_4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_4} + \frac{K_2 \cdot v_2}{A_4} \cdot \gamma_2 \end{cases} \quad (12)$$

donde \dot{h}_i es la variación de la altura del nivel de líquido del tanque i , a_i es el área del orificio de descarga del tanque i , A_i es el área de la sección de tanque, K_i es la constante de proporcionalidad entre la tensión de entrada y el caudal de la bomba de agua i , g la aceleración de la gravedad, γ_i es el porcentaje de caudal que fluye a los tanques inferiores y v_i es la tensión de entrada a la bomba i . Se demuestra en (Johansson, 2000) que cuando $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ el sistema presenta características de fase no mínima, es decir, que el sistema tiene ceros multivariables en el semiplano derecho, mientras que si $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ el sistema resulta de fase mínima, posee ceros multivariables en el semiplano izquierdo.

El sistema (12) puede linealizarse en torno a un punto de operación determinado por \bar{h}_i y \bar{v}_i . En efecto, agregando las ganancias de los sensores de nivel K_c se obtiene el siguiente modelo lineal,

$$\dot{\hat{\mathbf{h}}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_5} & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_6} & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{h}} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_2 \cdot (1-\gamma_2)}{A_1} \\ \frac{K_1 \cdot (1-\gamma_1)}{A_2} & 0 \\ \frac{K_1 \cdot \gamma_1}{A_3} & 0 \\ 0 & \frac{K_2 \cdot \gamma_2}{A_4} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{v}} \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_c \end{bmatrix} \hat{\mathbf{h}}$$

siendo $\hat{h}_i = h_i - \bar{h}_i$ y $\hat{v}_i = v_i - \bar{v}_i$, y donde las constantes de tiempo T_i son:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_1} &= \frac{a_1}{A_1} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_1}} & \frac{1}{T_5} &= \frac{a_1}{A_3} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_1}} \\ \frac{1}{T_2} &= \frac{a_2}{A_2} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_2}} & \frac{1}{T_6} &= \frac{a_2}{A_4} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_2}} \\ \frac{1}{T_3} &= \frac{a_3}{A_3} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_3}} \\ \frac{1}{T_4} &= \frac{a_4}{A_4} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h_4}} \end{aligned} \quad (14)$$

En el diseño del controlador, fue necesario utilizar el modelo matemático ajustado a los datos experimentales obtenidos de la planta piloto construida (figura 3). Para tal fin, se consideraron aspectos prácticos derivados de la implementación experimental (Garbati *et al.*, 2009). Uno de estos fue la diferencia obtenida entre los ensayos experimentales y las simulaciones con el modelo no-lineal comúnmente utilizado para la planta. Para explicar estas divergencias, se propuso la introducción de un coeficiente de descarga C_d , el cual

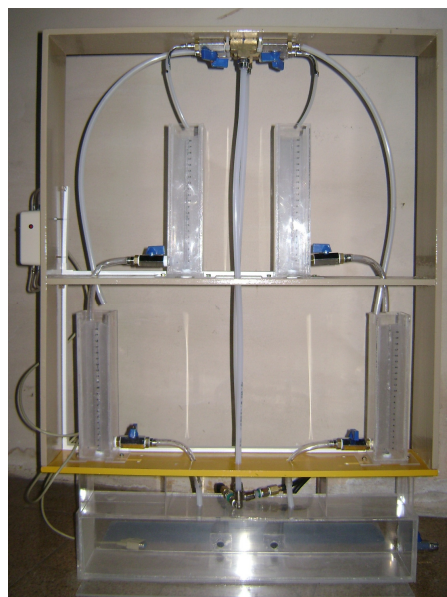


Fig. 3: Planta de tanque cuádruple construida en el LEICI.

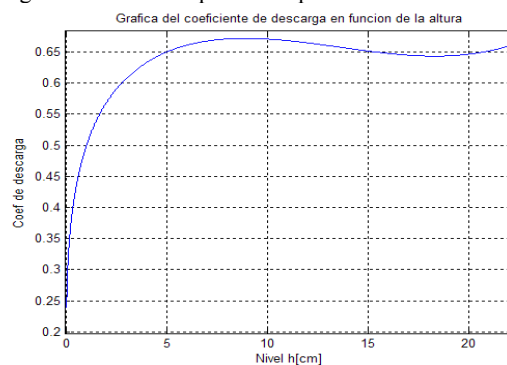


Fig. 4: Coeficiente de descarga C_d en función del nivel del tanque

fue obtenido para cada tanque. En la figura 4 se puede observar una curva de ajuste de C_d en función del nivel para un tanque particular. Luego, con el fin de considerar las pérdidas del sistema y ajustar el modelo a los datos experimentales, en Garbati *et al.* (2009) se concluyó que es suficiente afectar al modelo matemático (12), tanto estática como dinámicamente, por el valor del coeficiente de descarga $C_d(h)$ en el punto de operación. A continuación se puede observar como C_d afecta a la expresión de estado estacionario de un tanque, ecuación (15), y también a las constantes de tiempo del sistema linealizado, ecuación (16).

$$\bar{h} = \left(\frac{\bar{Q}_e}{C_d(\bar{h}) \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \quad (15)$$

$$\frac{1}{T} = C_d(\bar{h}) \cdot \frac{a}{A} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \bar{h}}} \quad (16)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A fin de evaluar la validez del desarrollo descripto, se conectó a la planta un controlador PI descentralizado en su configuración de mínima fase.

4.1 Descripción de la experiencia

La planta se configuró en su condición de mínima fase con $\gamma_1=0.7$ y $\gamma_2=0.6$, ya que se cumple $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$. Para el desarrollo del controlador se consideró el punto de operación $\bar{\mathbf{y}} = (\bar{h}_3; \bar{h}_4) = (12; 14)$ cm, $\hat{\mathbf{u}} = (\bar{v}_1; \bar{v}_2) = (2.7; 3.4)$ V y las especificaciones de la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones para sintonizar el controlador:

	Lazo de h_3	Lazo de h_4
Sobrepaso máx. [%]	10	15
Tiempo establecimiento [s]	50	80

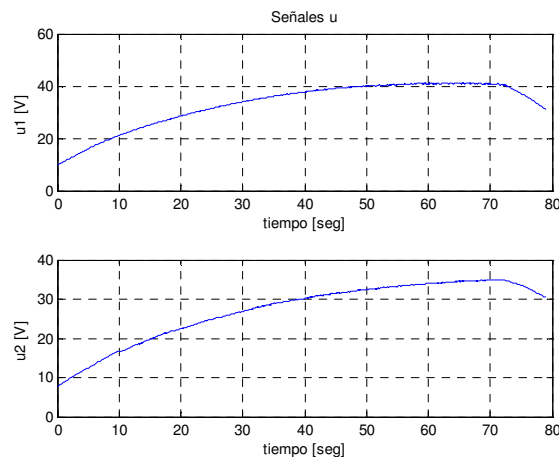


Fig. 5: Gráficas señales de salida del controlador sin estrategia bumpless MD

Cerrando el lazo con el controlador descentralizado PI, y utilizando el modelo linealizado de la planta (13) modificado por el factor de descarga según (15) y (16), resultan dinámicas de segundo orden por cada lazo. Utilizando las ecuaciones de respuesta transitoria de segundo grado y considerando las especificaciones de la tabla 1, se obtuvo el siguiente controlador,

$$c_{11}(s) = \frac{0.822 \cdot (s + 0.127)}{s} \quad (17)$$

$$c_{12}(s) = c_{21}(s) = 0 \quad (18)$$

$$c_{22}(s) = \frac{0.55 \cdot (s + 0.125)}{s} \quad (19)$$

La experiencia consistió en llevar la planta en forma manual con un vector de entrada constante al punto de operación P_0 es decir $\mathbf{u}_m = (\bar{v}_1; \bar{v}_2) = (2.7; 3.4)$ V, y luego mediante un bloque de conmutación realizar la conexión del modo manual al automático cuando ambos niveles de salida hayan sobrepasado el 90%

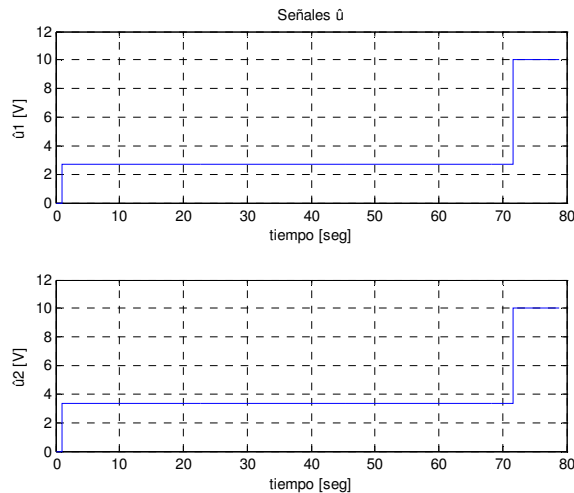


Fig. 6: Gráficas señales de entrada a la planta sin estrategia bumpless MD

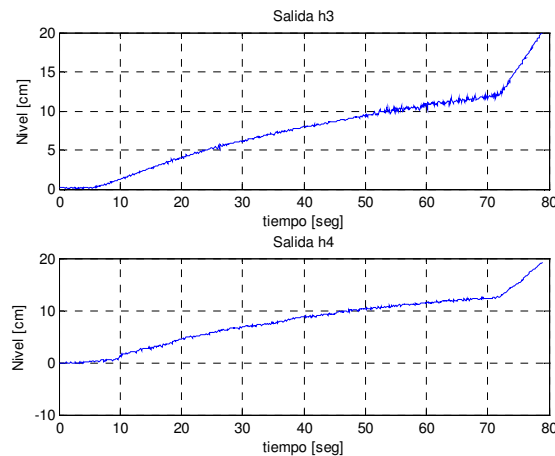


Fig. 7: Gráficas niveles tanques inferiores sin estrategia bumpless MD

del valor correspondiente al punto de operación. De esta manera, para la señal de entrada inyectada y el controlador (17)-(19), en $t_s = 76$ seg. se produce la conmutación de lazo abierto a lazo cerrado.

4.2 Conmutación manual-automático sin estrategia bumpless

La figura 5 muestra las señales de salida del controlador descentralizado $C(s)$, en la misma se puede observar que toman valores hasta de 40 Volts instantes antes de ser conectados a la planta, las inconsistencias existentes entre las salidas del controlador \mathbf{u} y las entradas a la planta \mathbf{u}_m generan una saturación en la señal de control de los actuadores, en el momento de conmutación manual-automático, como muestra la figura 6, siendo en este caso limitadas por la placa adquisidora de datos en 10 Volts. Estos saltos en la acción de control provocan a su vez un rápido incremento en los niveles de los tanques inferiores (salidas del sistema), como muestra la figura 7, dando como resultado el desborde de los mismos, y debiendo por tanto interrumpirse la operación de la planta antes de $t = 80$ seg.

4.3 Implementación estrategia de control bumpless

Con el fin de mejorar la respuesta del sistema, se introdujo el lazo bumpless propuesto como se muestra en la figura 1.

Para el filtro de 1^{er} orden $F(s)$ se utilizó $\lambda_f = -0.05$, que se corresponde a una constante de tiempo mucho más rápida que la de lazo abierto de la planta. Por otro lado, tomando $\hat{\mathbf{u}} = cte$ y considerando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) y el esquema de la figura 1 se obtiene que,

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = -\hat{\mathbf{u}}(x_e, e_c) = \mathbf{d}(\mathbf{x}) - \mathbf{D}(\mathbf{x}) \cdot \text{sign}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) \quad (20)$$

$$\mathbf{d}(\mathbf{x}) = -\mathbf{C}_c \cdot (\mathbf{A}_c \cdot \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{e}_c) - \mathbf{D}_c \cdot (-\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_f \cdot \mathbf{A}_f \cdot \mathbf{x}_f) \quad (21)$$

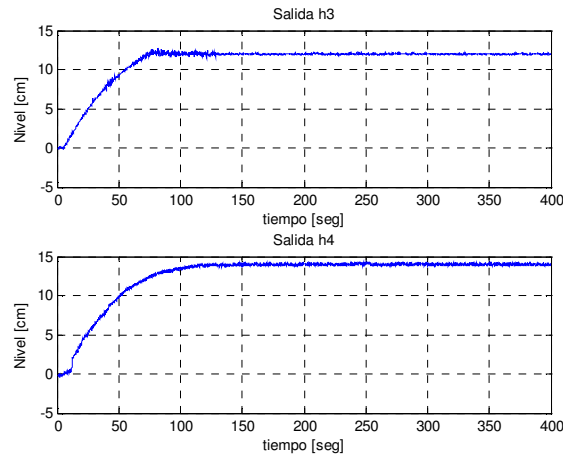


Fig. 8: Gráficas niveles tanques inferiores con estrategia bumpless MD

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) = -\mathbf{D}_c \cdot \mathbf{C}_f \cdot \mathbf{B}_f \cdot \mathbf{M} \cdot \text{sign}(s(\mathbf{x})) \quad (22)$$

Por lo tanto, para los valores esperados en \mathbf{x}_c , \mathbf{e}_c y \mathbf{x}_f en función de las señales aplicadas \mathbf{u}_m y para cotas razonables en $\dot{\mathbf{y}}$, encontramos que $\mathbf{M}=20\mathbf{I}_2$ satisface (7), es decir que el término (22) “domina” al (21).

A su vez, considerando $\mathbf{M}=20\mathbf{I}_2$, de (9), (17) y (19) se obtiene:

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) = \mathbf{D}_c = \begin{bmatrix} 0.822 & 0 \\ 0 & 0.55 \end{bmatrix} \quad (23)$$

la cual es claramente definida positiva, cumpliendo la condición (6) de Lyapunov.

Se puede observar, figura 8, que las variables controladas alcanzan el punto de operación sin sobrepasos ni transitorios indeseados después de la conmutación al modo automático. Esto se debe a que como puede observarse en la figura 9, la salida del controlador \mathbf{u} es aproximadamente igual a \mathbf{u}_m para el momento de la conmutación manual – automático.

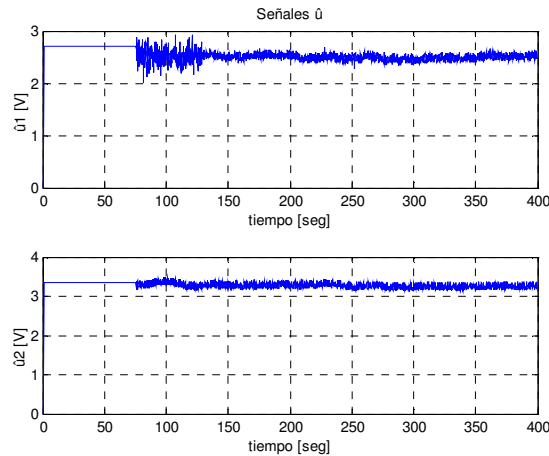


Fig. 9: Gráficas señales de entrada a la planta con estrategia bumpless MD

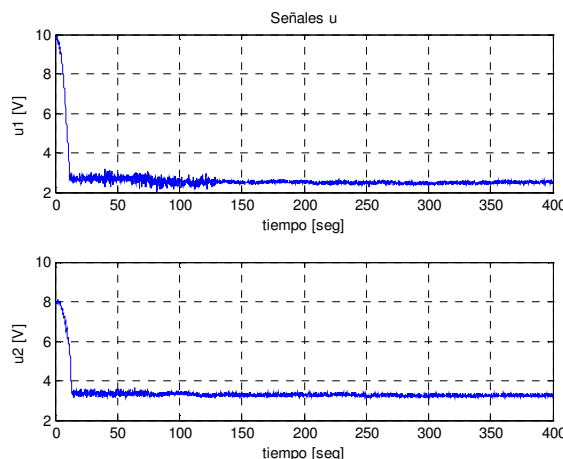


Fig. 10: Gráficas señales de salida del controlador con estrategia bumpless MD

La estrategia por modo deslizante propuesta logra que las señales de salida \mathbf{u} del controlador sean aproximadamente iguales a las señales de entrada \mathbf{u}_m , la figura 10 muestra como evolucionan temporalmente las señales de salida \mathbf{u} del controlador, hasta alcanzar los valores fijados por \mathbf{u}_m . La figura 11 muestra la función discontinua \mathbf{w} generada por la estrategia de control. Se puede observar en la figura 12 como las señales \mathbf{w}_s decrecen hasta encontrar máximos negativos, siendo éstos donde logra, la estrategia propuesta, igualar las señales de la salida \mathbf{u} del controlador con las señales \mathbf{u}_m luego señales \mathbf{w}_s tenderán a cero ya que los niveles de los tanques inferiores (señales de salida) tienden al punto de funcionamiento.

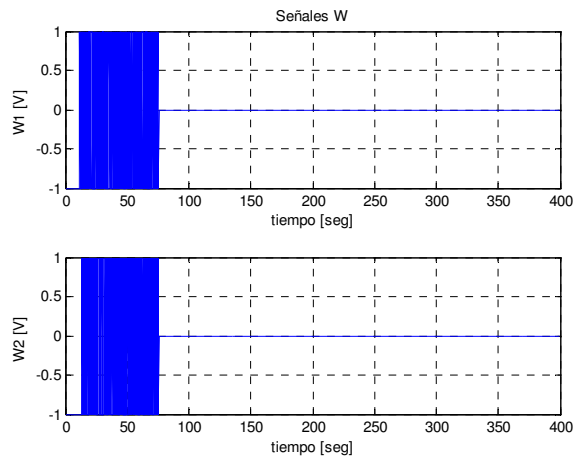


Fig. 11: Gráficas señales discontinua \mathbf{w}

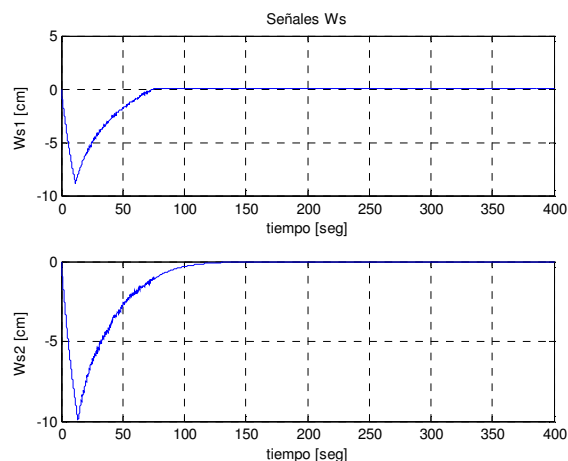


Fig. 12: Gráficas señales \mathbf{w}_s

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió y validó experimentalmente una estrategia de control bumpless por modo deslizante, que sumada a un controlador (centralizado o descentralizado) reduce el efecto producido por la conmutación del modo manual al automático en una planta multivariable.

La estrategia desarrollada fue validada experimentalmente sobre una planta piloto de tanques acoplados, con un controlador principal descentralizado similar a los controladores multi-lazo extensamente utilizados en aplicaciones industriales. Los resultados obtenidos muestran la potencialidad de la estrategia propuesta, como técnica bumpless, para solucionar problemas de conmutación a la entrada de la planta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado mediante los proyectos de investigación ANPCyT PICT-2011-0888, CONICET PIP 112-2011-00361 y UNLP I164.

REFERENCIAS

Aström, K.; Johansson, K.; Wang, Q. (2002) Design of decoupled PID controllers for two-by-two systems. *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 149:74–81.

- Bianchi, F.; Mantz, R.; Christiansen, C. (2008) Multivariable PID control with set-point weighting via BMI optimisation. *Automatica*, 44(2):472-478.
- Edwards, C.; Postlethwaite, I. (1998) Anti-windup and bumpless transfer schemes. *Automatica*, 34, 199-210.
- Garbati, G.; Aguerre, E.; Garelli, F. (2009) Aspectos prácticos para la implementación y el modelado de una planta piloto de control multivariable. *RPIC*, 787-792.
- Garelli, F.; Mantz, R.; De Battista, H. (2008) Collective Sliding-Mode Technique for Multivariable Bumpless Transfer. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 2721-2727.
- Garelli, F.; Mantz, R.; De Battista, H. (2006) Limiting interactions in decentralized control of MIMO systems. *Journal of Process Control*, 16(5):473-483.
- Günder, A.; Mete, A.; Palazoglu, A. (2009) Reliable decentralized PID controller synthesis for two-channel MIMO processes. *Automatica*, 45(2), 353-363.
- Hanus, R.; Kinnaert, M.; Henrotte, J. (1987) Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method. *Automatica*, 23, 729-739.
- Johansson, K. (2000) The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(3):456-465.
- Mulder, E.; Kothare, M.; Morari, M. (2001) Multivariable anti-windup controller synthesis using LMI. *Automatica*, 41, 1407-1416.
- Turner, M.; Walker, D. (2000) Linear quadratic bumpless transf. *Automatica*, 36, 1089-1101.
- Utkin, V.; Guldner, J. (2009) Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, Second ed., Taylor & Francis, London.
- Wu, W. (2002) Anti-windup schemes for a constrained continuous stirred tank reactor process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 1796-1804.
- Zaccarian, L.; Teel, A. (2005) The L_2 (l) bumpless transfer problem for linear plants: Its definition and solution. *Automatica*, 41, 1273-1280.
- Zheng, K.; Lee, A.; Bentsman, J.; Taft, C. (2006) Steady-state bumpless transfer under controller uncertainty using the state/output feedback topology. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 14, 3-17.