

## CONDICIONAMIENTO DE LA REFERENCIA EN CONTROLADORES PID VÍA MODOS DESLIZANTES DE ORDEN SUPERIOR

Ricardo J. Mantz\*<sup>1</sup>, Pablo E. Troncoso\*<sup>2</sup>

\*LEICI, FI, Universidad Nacional de La Plata, CC91, 1900 La Plata, Argentina. Phone 54 221 259306.  
1-UNLP. Comisión de Investigaciones Científicas (CICpBA). [mantz@ing.unlp.edu.ar](mailto:mantz@ing.unlp.edu.ar).  
2- UNLP. CONICET. [troncosopablo08@yahoo.com.ar](mailto:troncosopablo08@yahoo.com.ar)

---

**Resumen:** El trabajo trata sobre la ponderación de la referencia en controladores PID de dos grados de libertad (2dof/PI\_D). Se propone un método de ponderación dinámico para sobrellevar las limitaciones que suelen presentar dichos controladores en procesos complejos y/o no-lineales. La propuesta se sustenta en el contexto de los algoritmos de modos deslizantes de orden superior (MDOS), en particular a partir de conceptos de algoritmos super-twisting de probada eficiencia y fácil implementación. La sintonía propuesta permite asignar una dinámica lineal al seguimiento mas allá de las características no-lineales del proceso y de la amplitud de los set points. La sintonía propuesta, potencialmente, permite preservar propiedades que estos controladores presentan en los sistemas lineales.

*Keywords:* PID, Controladores de dos grados de libertad, modos deslizantes de orden superior.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Más allá de la madurez teórica que se observa en el área del control de sistemas, los controladores PID siguen siendo preferidos en el ámbito industrial en un porcentaje superior al 90% (Vilanova y Visoli, 2012). Sin embargo, más allá de su popularidad, los pocos parámetros de ajuste del controlador PID restringen su desempeño cuando es necesario cumplir con más de una especificación en forma simultánea. En muchos problemas, esta limitación se puede sobrellevar complementando estrategias de control PID con acciones de control feedforward. Esta combinación ha dado lugar a los denominados controladores con dos grados de libertad que pueden presentar distintas arquitecturas (Araki y Taguchi, 2003). Un caso particular es el controlador PID con referencia ponderada (Araki, 1988). Este controlador, que respeta la sencillez de la estructura de los controladores PID tradicionales, incorpora grados de libertad para cumplir simultáneamente especificaciones de seguimiento y regulación. Para su sintonía se emplean, casi en forma excluyente, los métodos conocidos como “de dos pasos”: en

el primero se sintonizan las ganancias del controlador PID convencional para cumplir las especificaciones de regulación y en el segundo se ajustan los pesos de la referencia para obtener una respuesta de seguimiento adecuada (Astrom y Hagglund, 2006). A diferencia del primer paso, para el cual se han desarrollado numerosos métodos de sintonía, para el segundo paso los ajustes de los pesos suelen basarse en consideraciones empíricas. En este contexto, es una práctica aceptada forzar el peso correspondiente a la acción integral a 1 (en base a consideraciones de error estacionario) mientras que el peso de la parte derivativa se suele fijar en cero para evitar los efectos de la denominada “patada derivativa”. En este caso, el controlador resultante con un sólo peso de la referencia (correspondiente a la acción de control proporcional), es conocida como 2dof/PI\_D. En general, y dado que la sintonía suele tener un alto componente empírico, se emplean pesos constantes para la ponderación de la referencia. Sin embargo, dependiendo de la complejidad del proceso, el empleo de valores constantes puede presentar fuertes limitaciones (Visoli, 2006). Esto ha motivado a algunos autores a proponer pesos dinámicos que, a costa de

una complejidad adicional, demuestran un desempeño superior (Hung y Cao, 1996; Mudi and Dey, 2013). Son muestras de esto, entre otros, los métodos de ajuste dinámicos de Dey et al. (2006), y Visioli (1999) que emplean conceptos de lógica difusa para sistemas SISO y de Bianchi et al. (2008) que emplea conceptos de LPV para sistemas MIMO.

En esta línea, el presente trabajo presenta y evalúa un método de ponderación dinámica de la referencia de controladores 2dof/PI\_D para procesos no lineales basado en conceptos de regímenes deslizantes de orden superior (MDOS) que garantiza una dinámica lineal de orden reducido en la respuesta del seguimiento. El mismo reduce la complejidad en el análisis propia de los sistemas no lineales, permitiendo simplificar tanto el diseño como la implementación de los pesos del 2dof/PI\_D. Por otra parte, el ajuste dinámico de los pesos aporta flexibilidad para el aprovechamiento de la acción de control, hecho que potencialmente preserva las propiedades ARW que presentan estos controladores en procesos simples (Puleston y Mantz, 1993).

El trabajo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se introduce el problema, se menciona una primer aproximación basada de MD de primer orden, se presenta la estructura propuesta para el 2dof/PI\_D con pesos dinámicos y se aplican conceptos de MDOS para la sintonía de dichos pesos, garantizando así simplicidad, eliminación de chattering sobre el actuador y tiempo finito para la inmersión de la dinámica de seguimiento en la previamente especificada. En la sección 3 se evalúan las propiedades de la propuesta sobre un ejemplo no lineal y finalmente se presentan las conclusiones.

## 2. PONDERACIÓN DINÁMICA DE LA REFERENCIA EN CONTROLADORES 2DOF/PI\_D.

### 2.1 Conceptos generales de la propuesta

Considérese el sistema no lineal,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1)$$

siendo  $x \in R^n$  sus variables de estado y  $u$  la acción de control que proviene de un controlador 2dof/PI\_D

$$u = k_p \left[ (r_p - y) + \frac{k_i}{k_p} \int (r_i - y) dt - \frac{k_d}{k_p} \frac{dy}{dt} \right] \quad (2)$$

donde  $r_p=r \cdot b_p(t)$  y  $r_i=r \cdot b_i(t)$  son las referencias ponderadas para el error proporcional e integral con sus respectivos pesos  $b_p(t)$  y  $b_i(t)$ . A su vez,  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ , son las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente, las cuales se sintonizan para el adecuado rechazo de perturbaciones en la vecindad de  $y=r$ .

Es importante notar que a diferencia del proceder convencional en que se fija el peso  $b_i$  constante e igual a 1, aquí se lo ha dejado explícitamente como variable de ajuste.

Si bien los coeficientes de peso pueden ser implementados a través de ganancias variables, en este trabajo se propone hacerlo a partir de la adición de señales  $w_p(t)$  y  $w_i(t)$  sobre la referencia a ponderar,

$$u = k_p \left[ (r + w_p - y) + \frac{k_i}{k_p} \int (r - w_i - y) dt - \frac{k_d}{k_p} \frac{dy}{dt} \right] \quad (3)$$

donde por comparación de las ecuaciones (2) y (3) resulta la siguiente equivalencia entre los pesos de la referencia y las señales adicionadas  $w_p(t)$  y  $w_i(t)$

$$b_p(t) = \frac{r + w_p(t)}{r} \quad b_i(t) = \frac{r + w_i(t)}{r} \quad (4)$$

La implementación de los pesos  $b(t)$  acorde a las ecuaciones (5) guarda similitud con las técnicas de condicionamiento de la referencia que han sido utilizadas para resolver problemas de windup, acoplamiento de variables, bump, transitorios en control gain scheduling, etc. (Hanus y Kinnaert, 1989). En particular, la implementación de estas técnicas a través de regímenes deslizantes ha mostrado propiedades de performance robusta aptas para numerosas aplicaciones de control con restricciones (Gareli et al., 2011).

Como fue comentado, el objetivo del presente trabajo es obtener una sintonía dinámica de los pesos  $b_{p,i}(t)$ , que permita alcanzar una respuesta de seguimiento independiente tanto de las características no lineales del sistema como de la sintonía de las ganancias  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  que se calculan para garantizar el adecuado rechazo de las perturbaciones<sup>1</sup>. Con este fin se considera

1) una dinámica deseada para el seguimiento, por practicidad, lineal y de orden reducido

$$h^{(m)}(x) = -a_{m-1} h^{(m-1)}(x) - \dots - a_1 h^{(1)}(x) - a_0 h(x) + a_0 r \quad (5)$$

donde  $h^{(i)}(x) = \frac{d^i h(x)}{dt^i} = grad^i(h(x)) \cdot f_{ic}$  representa la derivada

$i$ ésima de la variable controlada en la dirección del campo vectorial de lazo cerrado  $f_{cl}$  y  $a_i$  son los coeficientes que definen la dinámica lineal buscada;

2) una función  $\xi(x)$  que refleje de algún modo un apartamiento entre la dinámica real del sistema y la dinámica deseada para el seguimiento. Si bien  $\xi(x)$  puede definirse de diferentes formas (de hecho puede considerarse como un grado de libertad adicional en el diseño propuesto), sin pérdida de generalidad, será elegida como

<sup>1</sup>Es importante resaltar que no es objetivo de este trabajo el ajuste de las ganancias del PID (tema extensamente tratado en la literatura).

$$\xi^{(m)}(x) = h^{(m)}(x) + a_{m-1} h^{(m-1)}(x) + \dots + a_1 h^{(1)}(x) + a_0 h(x) - a_0 r \quad (6)$$

Luego el problema consiste en ajustar los coeficientes de peso del 2dof/PI\_D para garantizar una rápida convergencia de  $\xi(x)$  a cero y así obtener la dinámica de seguimiento deseada

$$h^{(m)}(x) \rightarrow -a_{m-1} h^{(m-1)}(x) - \dots - a_1 h^{(1)}(x) - a_0 h(x) + a_0 r \quad (7)$$

es decir a la dinámica especificada en (5).

**2.2 Primer aproximación. Ajuste basado en modos deslizantes de primer orden.**

En el marco previo, puede forzarse la convergencia de  $\xi$  y sus  $\rho-1$  derivadas a cero con velocidad preestablecida a partir de un régimen deslizante sobre la superficie

$$\sigma(\xi) = k_0 \xi + k_1 \dot{\xi} + k_2 \ddot{\xi} + \dots + k_{\rho} \xi^{(\rho-1)} = 0 \quad (8)$$

y una acción discontinua para la ponderación de la referencia

$$\begin{cases} w_{p,i} = w_{p,i}^+ & \text{si } \sigma(\xi) \geq 0 \\ w_{p,i} = w_{p,i}^- & \text{si } \sigma(\xi) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

donde los coeficientes  $k_i$  definen la velocidad de convergencia (Shtessel et al., 2014),  $\rho$  es el grado relativo de  $\xi$  con respecto a la acción discontinua, el cual queda definido una vez elegida la dinámica deseada para el seguimiento. Así, la derivada de  $\sigma(\xi)$  depende de la acción discontinua cumpliendo la condición necesaria para que pueda establecerse un régimen deslizante sobre  $\sigma(\xi)=0$ .

Una interpretación, conceptualmente útil del proceder previo puede realizarse en el marco teórico conocido como I&I, e.d. una flexibilización de los conceptos tradicionales de inmersión de sistemas e invariancia de variedades, propuesta por Astolfi y Ortega (2003). Según ésta, el régimen deslizante de primer orden sobre  $\sigma(\xi)$  fuerza la ‘inmersión’ asintótica de la dinámica del sistema real en la de un sistema de orden inferior (la correspondiente a la deseada para el seguimiento) la cual es considerada ‘invariante’ en el sentido de la teoría de I&I. (Mantz, 2012)

En el proceder previo (e.d. forzando un régimen deslizante de primer orden sobre  $\sigma(\xi)$ ) es posible alcanzar la dinámica deseada sin mayores restricciones y sin chattering sobre la variable controlada  $h(t)$ . Sin embargo, en controladores PID, la acción discontinua sobre la referencia (o un filtro de la referencia) podría propagarse como chattering a través de la ganancia proporcional hacia el actuador de potencia. Esto podría ser un limitante en algunas aplicaciones con actuadores mecánicos o hidráulicos.

**2.3 Propuesta de ajuste basado en modos deslizantes de orden superior.**

A continuación se discute una simple modificación del controlador 2dof/PI\_D con pesos dinámicos que incluye en forma natural el filtrado de la acción discontinua evitando el chattering en el actuador sin necesidad de incluir un filtro ad hoc en la referencia pesada y que a su vez garantiza un tiempo finito de convergencia a la dinámica especificada para el seguimiento.

La Fig. 1 muestra la arquitectura propuesta para el 2dof/PI\_D. Como fuera comentado, a diferencia de los controladores 2dof/PID convencionales, se ha incluido una acción  $w_i$  que, de acuerdo a las ecuaciones (2)-(4), permite ponderar la referencia en la acción integral. Si bien  $b_i(t)$  resulta discontinua, su efecto sobre el control  $u$  (teniendo en cuenta la acción integral) podría asimilarse al de una  $b_{i-eq}(t)$  continua.

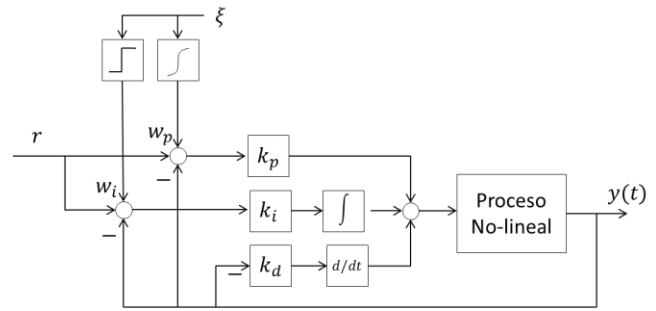


Fig.1. Controlador 2dof/PI\_D y ajuste propuesto.

Las acciones de condicionamiento propuestas para (3) son

$$w_p = \begin{cases} -\lambda |s_0|^\alpha \text{sign}(\xi) & \text{si } |\xi| > s_0 \\ -\lambda |\xi|^\alpha \text{sign}(\xi) & \text{si } |\xi| \leq s_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$w_i = -\gamma |s_0| \text{sign}(\xi)$$

siendo en esta propuesta,  $\sigma = \xi$  y  $\gamma, \lambda$  y  $s_0$  parámetros de diseño.

Note que operaciones algebraicas simples permiten plantear la arquitectura previa en el contexto de un algoritmo de modo deslizante de orden superior conocido como super twisting ST (Fridman and Levant, 2002) sobre la referencia  $r$ , hecho que podría interpretarse como un condicionamiento de la referencia a partir de un MDOS. Sin embargo, la implementación a través de la arquitectura de la Fig. 1, a mas de presentar algunas ventajas desde el punto de vista de la implementación (como evitar duplicación de componentes), es conceptualmente interesante en el sentido que rompe con la convención tácita de que el peso del setpoint integral debe ser 1. Por consiguiente abre la posibilidad a plantear otros algoritmos, que excediendo la propuesta actual, permitan

aprovechar con mayor potencialidad los grados de libertad de los controladores 2dof/PID para cumplir con más de una especificación.

De acuerdo a la equivalencia comentada con respecto a algoritmos *ST*,  $\alpha$  puede elegirse en el intervalo (0;0.5] con el fin de que las trayectorias del sistema controlado converjan al origen del plano  $(\xi, \dot{\xi})$  en tiempo finito. Sin embargo, el valor  $\alpha=0,5$  ha demostrado ser la mejor opción para el caso no ideal (Fridman y Levant, 2002). Luego, las condiciones suficientes de convergencia en tiempo finito y operación en MDOS son

$$\begin{aligned} \gamma &> \frac{C}{\Gamma_m} \\ \lambda &> \frac{\sqrt{2(\gamma \Gamma_M + C)}}{\Gamma_m} \end{aligned} \quad (11)$$

donde  $C$ ,  $\Gamma_m$  y  $\Gamma_M$  son cotas que verifican la inclusión diferencial

$$\ddot{\sigma} \in [-C, C] + [\Gamma_m, \Gamma_M] \dot{u} \quad (12)$$

Aprovechando las características de los MDOS, en particular del *ST*, puede garantizarse la inmersión de la dinámica real del sistema en la deseada en tiempo finito si ésta es elegida de grado relativo 1. Esto habilita a considerar como función restricción directamente a  $\sigma \equiv \xi$ , es decir

$$\xi(x) = h^{(m)}(x) + a_{m-1} h^{(m-1)}(x) + \dots + a_1 h^{(1)}(x) + a_0 h(x) - a_0 r \quad (13)$$

donde  $m$  es elegida para que  $\xi$  sea de grado relativo 1 con respecto a la señal condicionante  $w_p(t)$ . Así al plantear un MDOS se asegura la convergencia de  $\xi$  y su derivada a cero en tiempo finito, e.d. a la dinámica deseada sin chattering sobre el actuador.

Como en todo régimen MDOS, las incertidumbres pueden afetar las ganancias  $\gamma$  y  $\lambda$  (a través de la inclusión diferencial (12)), y por consiguiente el tiempo en de establecimiento. En este sentido la dinámica elegida debería ser dominante frente a la del modo alcance, garantizando así que el tiempo de establecimiento sea chico frente al transitorio.

### 3. EJEMPLO

Considere el modelo simplificado de un control de temperatura de un sistema de laboratorio para testear propiedades térmicas de materiales

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0,1 x_2^2 - x_1 \\ -x_2 + u \end{bmatrix}, \\ y &= [1 \quad 0] x \end{aligned} \quad (14)$$

donde  $x_1$  es la temperatura de la muestra,  $x_2 > 0$  es la tensión aplicada al calefactor eléctrico y  $u > 0$  la acción de control

aplicada sobre la fuente de potencia con salida  $x_2$ . Considere también un controlador 2dof/PI\_D, donde las ganancias  $k_i=1.31$ ,  $k_p=17.76$  y  $k_d=0.89$  han sido sintonizadas para regulación con un modelo linealizado en la vecindad del estado de equilibrio correspondiente a  $r=0,75$ . Para las ganancias citadas, la respuesta a perturbaciones presenta una característica próxima a la conocida como 'quarter decay', la cual es considerada adecuada para muchos procesos convencionales (de todas maneras, es importante tener presente que la propuesta del presente trabajo es independiente de la sintonía de las ganancias  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  del PI\_D para regulación).

En la Fig. 2 se muestra el desempeño del sistema frente a distintas excitaciones (dos cambios del setpoint (0,6 y 0,75) y una perturbación constante) cuando se emplean valores constantes para los pesos del 2dof/PI\_D. Concretamente se muestran las respuestas para coeficientes constantes  $b_i=1$  (caso convencional) y  $b_p=1, 0,75$  y  $0,5$ . La diferencia que se observa en las respuestas para los distintos valores del setpoint (a partir de  $t=0$  y  $t=55s$ ), no solo es debida a las características no lineales del proceso sino también a que en el primer cambio de setpoint interviene la restricción en el control ( $u \geq 0$ ) dando lugar a un importante windup. La parte b de la figura, muestra la correspondiente acción de control. Las curvas ponen en evidencia las restricciones del controlador 2dof/PI\_D con coeficientes de ponderación constante en sistemas no lineales como el del presente ejemplo para sobrellevar el compromiso entre las respuestas de regulación y seguimiento, efectivamente la reducción de  $b_p$  para atenuar el sobrepaso de la variable controlada conlleva una notoria degradación del tiempo de establecimiento. Las curvas también muestran que no siempre es posible preservar las habilidades que presentan los controladores de dos grados de libertad en sistemas lineales para sobrellevar problemas como windup sin emplear acciones adicionales de corrección. (Puleston y Mantz, 1993)

Considérese ahora la propuesta de ponderación variable enunciada en la sección previa. A partir de las ec. (13) y de la restricción que impone la analogía con el algoritmo *ST* (e.d. que la señal  $\xi$  sea de grado relativo uno con respecto a  $w_p$  y dos con respecto a  $w_i$ ) surge que debe seleccionarse una dinámica de primer orden para el seguimiento, e.d.  $m=1$ . Luego, se elige

$$\xi(x) = \dot{h}(x) + a_0 h(x) - a_0 r \quad (15)$$

donde  $1/a_0$  es la constante de tiempo de la dinámica deseada, que se elige en 5seg.

La Fig. 3a muestra la respuesta de seguimiento acorde a la implementación de la Fig. 1 a las mismas excitaciones que en la Fig. 2, verificándose desde el punto de vista práctico, la especificación impuesta independientemente del setpoint y de las no linealidades del proceso. En particular se observa que el ajuste dinámico permite obtener menor tiempo de establecimiento que los que se obtendrían con valores constantes. También, en la Fig. 3, se observa que el

acondicionamiento dinámico de la referencia permite aprovechar mejor los grados de libertad del 2dof/PI\_D para evitar el windup sin agregar correcciones adicionales (notar que, a los efectos de la comparación, las curvas tanto con pesos constantes como dinámicos han sido obtenidas sin incorporar algoritmos ARW adicionales). Esto es posible porque a través de la elección de la dinámica de seguimiento puede limitarse su derivada cuando se produce el cambio del set point. Así, la variable de ajuste aquí está en relación con la dinámica seleccionada para el seguimiento. Efectivamente, en la parte b de esta figura se aprecia que la acción de control es sustancialmente menor sin incursionar en las restricciones del actuador. Además se aprecia que el chattering en  $u$  es despreciable.

Las Fig. 4a y 4b muestran la evolución dinámica de los pesos de ponderación del setpoint para los errores proporcional e integral que aseguran la dinámica deseada, verificándose que el valor de estado estacionario de  $b_i(t)$  es  $b_{i,ss}=1$ , condición necesaria para evitar el error de estado estacionario. La Fig. 4c muestra la extinción de la función elegida para definir la discrepancia entre la dinámica del sistema y la dinámica de seguimiento deseada, verificándose que ésta queda inmersa en la de un sistema de orden inferior al sistema original. Esto sucede en un tiempo finito  $t=0,9$ seg. Efectivamente a partir de este tiempo la respuesta del sistema original es efectivamente la deseada.

En el caso de sufrir variaciones en los parámetros del sistema, la inclusión diferencial se vería modificada en las cotas. Por ejemplo, considerando variaciones en el rango  $[0.1;0.6]$  el parámetro que acompaña a  $x_2^2$ , la ecuación (12) se modifica de  $\sigma \in [-5;5] + [0.1;0.7]$  a  $\sigma \in [-2.5;2.5] + [0.1;0.4]$ . De este modo, las constantes  $\gamma$  y  $\lambda$  se ven afectadas. Así eligiendo la inclusión más conservadora que, en este caso, corresponde al límite inferior de la variación en el parámetro, las constantes se eligieron son:  $\gamma = 36k_i$  y  $\lambda = 1.64k_p$ .

En la parte d de la figura se observa en el plano  $(\xi, \dot{\xi})$  que simultáneamente con  $\zeta$  se anula su derivada en el tiempo finito  $t=0.9$ seg, lo cual garantiza tanto que dinámica de seguimiento converge a la deseada como que el chattering sobre  $u$  sea despreciable.

#### 4. CONCLUSIONES

Pese a la gran aceptación de los controladores 2dof/PI\_D, es relativamente escasa la información referida al ajuste de sus pesos para el control de procesos no-lineales. En términos generales, el uso de coeficientes de ponderación constantes para estos procesos suelen evidenciar restricciones para resolver compromisos entre el rechazo a perturbaciones y respuestas de seguimiento con bajos sobrepasos y/o tiempos de establecimientos reducidos.

También en el control de procesos complejos, los controladores 2dof/PI\_D con pesos fijos pierden algunas de

las propiedades que le han permitido ganar popularidad en el ambiente industrial como es la relación previsible de los pesos sobre la respuesta transitoria y por consiguiente la posibilidad de emplear métodos empíricos para la sintonía, la perdida de propiedades anti-windup, etc.. El empleo de pesos variables potencialmente permite extender las bondades de

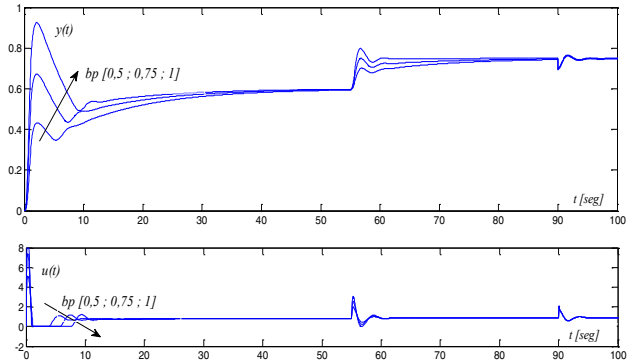


Fig. 2. Variables controlada y de control para distintos pesos constantes del 2dof/PI\_D.  $b_p=(0,5;0,75;1)$  y  $b_i=1$  de acuerdo al caso convencional.

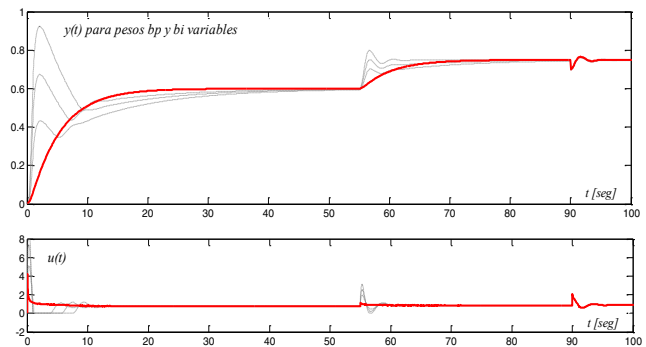


Fig. 3. Variables controlada y de control para ajuste dinámico de los pesos  $b_p$  y  $b_i$  del 2dof/PI\_D.

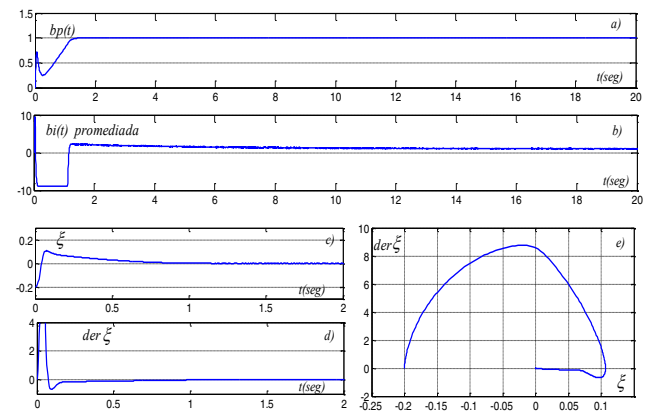


Fig. 4. a) ajuste dinámico de  $b_p(t)$ ; b) ajuste dinámico de  $b_i(t)$ ; c) evolución de la función  $\xi \equiv \sigma$ ; d) derivada de  $\xi$  y d) trayectoria en el espacio  $(\xi, \dot{\xi})$ .

estos controladores a procesos más complejos. En este marco, el trabajo ha presentado una técnica para la auto sintonía de los pesos variables que presenta una implementación simple, compatible con la arquitectura del 2dof/PI\_D, y teóricamente sustentada a partir de algoritmos MDOS ampliamente estudiados y aceptados. La propuesta, evita explícitamente la convención de considerar el peso para el *set-point* de la referencia integral igual a uno, trasladando esta restricción sólo a su valor en estado estacionario. La sintonía propuesta permite asignar una dinámica de orden reducido para el seguimiento, mas allá de las no-linealidades que presenta el proceso a controlar. Esto es posible con acciones de control más acotadas que las correspondientes al caso de peso constante utilizando especificaciones de diseño similares. Adicionalmente, la propuesta garantiza reducido chattering sobre al actuador debido a las características del algoritmo de MDOS usado en la implementación. Las propiedades son evaluadas con un ejemplo que también muestra la capacidad del algoritmo para reducir (o evitar) los riesgos de windup.

**Agradecimientos.** Este trabajo fue subsidiado por CICpBA, ANPCyT, CONICET y UNLP.

## REFERENCIAS

- Araki M. (1988), Two degree-of-freedom PID controller. *Syst., Cont. and Information.* 42, 18–25.
- Araki M., Taguchi H. (2003). Two-Degree-of-Freedom PID Controllers. *Int. J. of Control, Automation, and Systems.* 4, 401-411.
- Astolfi A., Ortega R. (2003). Immersion and invariance: a new tool for stabilization and adaptive control of nonlinear systems. *IEEE Trans. on Automatic Control.* 4, 590–606.
- Åström, K., Hagglund, T. (2006). Advanced PID control. ISA. Research Triangle Park, USA.
- Bianchi, F., Mantz, R. and Christiansen, C. (2008). Multivariable PID control with set-point weighting via BMI optimisation. *Automatica.* 44, 472– 478.
- Dey, C., Mudi, R., Lee, T. (2006). A PID controller with dynamic set-point weighting. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Ind. Tech.*, 1071–1076.
- Fridman, L., A. Levant (2002). “Higher Order Sliding Modes”. Chapter 3 in *Sliding Mode Control in Engineering*, 53–101. Marcel Dekker.
- Garelli F., Mantz R.J., De Battista H. (2011). *Advanced Control for Constrained Processes and Systems. A unified and practical approach.* IET, Control Engineering Series. London, UK.
- Hang, C., Cao, L. (1996). Improvement of transient response by means of variable set point weighting. *IEEE Trans. on Ind. Elect.* 4, 477–484.
- Hanus R.; Kinnaert M. (1989). Control of constrained multivariable systems using the conditioning technique, in: *Proc. of the American Control Conference*, Pittsburgh, 1712–1718.
- Mantz R. (2012). A PI Controller with Dynamic Set-Point Weighting for Nonlinear Processes. *IFAC Conference on Advances in PID Control.* PID'12. Brescia.
- Mudi R., Dey Ch. (2011). Performance Improvement of PI Controllers through Dynamic Setpoint Weighting. *ISA Trans.* 50, 220-230.
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI and PID controller tuning rules.* Imperial College Press. London, UK.
- Puleston P. F., Mantz R.J. (1993). Proportional plus Integral MIMO Controller for Regulation and Tracking with Anti-Wind-Up Features. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1993,32, 2647-2652.
- Vilanova R., Visioli A. (2012). *PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches.* Springer-Verlag London Limited 2012.
- Visioli A. (1999). Fuzzy logic based set-point weight tuning of PID controllers. *IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics.* 29, 587-592.
- Visioli A., Practical PID Control. Springer Verlag. London 2006.
- Shtessel Y. Edwards, Ch., Fridman L., Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation.* Springer. New York.