

PREVENCIÓN DE WINDUP EN PROCESOS INESTABLES ¹R. Mantz² H. De Battista³ F. Bianchi³ F. Garelli³*LEICI, Fac. de Ingeniería, Univ. Nacional de La Plata,
CC 91, 1900 La Plata, Argentina. mantz@ing.unlp.edu.ar*

Resumen: Se presenta un método de prevención de windup para procesos inestables basado en conceptos de regímenes deslizantes. El mismo presenta total independencia entre el lazo principal de control y el lazo de prevención. Se garantiza que el lazo principal opera siempre a lazo cerrado, lo cual evita cálculos adicionales de estabilidad. Se analiza el efecto de no mínima fase y de la dinámica de los ceros en el lazo de prevención.

WINDUP PREVENTION FOR UNSTABLE PLANTS

Abstract: A windup prevention method for unstable plants is presented. It is based on a sliding conditioning of the reference and presents complete independence between the main loop and the prevention loop. The method guarantees the closed loop operation of the process, avoiding additional stability analysis. Non minimum phase behavior, and the corresponding zero dynamics, in the sliding mode prevention loop are discussed.

Palabras claves: Modo deslizante, procesos inestables, restricciones en el control

1. INTRODUCCIÓN

La saturación de las variables de control pueden degradar seriamente la performance de lazo cerrado. Esta degradación puede alcanzar a ciclos límites en el caso de procesos estables, e incluso a la inestabilidad, en el caso de plantas exponencialmente inestables (Seron et al., 1995). Efectivamente, en este último caso, al manifestarse una restricción, las variables de la planta pueden tomar valores que no son manejables con la energía finita de los actuadores. Por supuesto, siempre pueden diseñarse controladores que, en forma conservativa y a costa de pérdida de performance, eviten la manifestación del citado problema.

Numerosas soluciones han sido propuestas para plantas estables. No sucede lo mismo para el caso de plantas exponencialmente inestables a la-

zo abierto. Uno de los primeros aportes es el de Kapasouris y Stein (1990) quienes, empleando el concepto de ‘reference governor’, condicionan la referencia vía un operador variante en el tiempo. Seron et al. (1995) consideran una configuración basada en control por modelo interno y proponen reglas que permiten obtener cotas sobre las respuestas en frecuencia y temporales al seguimiento, asegurando la operación estable del filtro no lineal empleado en la referencia. Turner, Postlethwaite y Walker (2000) investigan regiones de operación que garantizan, en modo tracking, el comportamiento estable. Hippe y Deutscher (2001) proponen un método basado en una región segura de la variable de salida. El problema de regulación de procesos inestables con restricciones es discutido en Saberi et al. (1996), Lin et al. (1997). En recientes aportes (Teel (1999); Hippe (2003)) se discute el problema simultáneo de tracking y regulación. En particular, Hippe obtiene condiciones de operación seguras a partir de fraccionar la acción de control en las componentes necesarias para

¹ Este trabajo fue financiado por ANPCyT, CICpBA, CONICET y UNLP

² UNLP-CICpBA

³ UNLP-CONICET

que el sistema evite toda saturación. Se obtiene así un máximo rango de referencias, compatibles con las perturbaciones esperables. Si bien esta estrategia resulta efectiva, también puede resultar excesivamente conservadora para pares de perturbaciones y referencias que no se correspondan con el peor caso.

A continuación, se propone un método para la prevención de windup en procesos inestables basado en conceptos de modos deslizantes (MD). En la sección 2 se presenta el nuevo método, mientras que en la sección 3 se resaltan sus principales características. Posteriormente, se presentan un ejemplo y las conclusiones.

2. PREVENCIÓN DE WINDUP EN PROCESOS INESTABLES VÍA MD

En la Fig. 1 se representa un sistema de control de un proceso (P) inestable. C es el compensador que garantiza la performance buscada en ausencia de restricciones (a los efectos del presente trabajo es indistinto el procedimiento de su diseño), obviamente todos sus estados son accesibles. K_a representa un actuador de potencia con al menos una restricción sobre la acción de control u .

En líneas de puntos, se delimita el sistema de prevención de windup propuesto. El bloque F o bien es propio del controlador del lazo principal (controlador de dos grados de libertad¹), o bien es intencionalmente incluido al lazo de condicionamiento, al igual que se lo hace en otros esquemas de prevención de windup (Kapasouris y Stein, 1990; Walgama, 1992; Seron et al., 1995). De ser necesaria la incorporación del bloque F , es suficiente considerar un filtro lineal, de primer orden y con dinámica más rápida que la de lazo cerrado, asegurándose así que no se introduce degradación apreciable cuando el sistema opera sin restricciones². por último, r es la referencia y r_f es la referencia condicionada.

El condicionamiento de la referencia es gobernado por medio de regímenes deslizantes sobre distintas superficies definidas en el espacio de estados de F y C . La llave L esquematiza gráficamente el hecho de que el MD sólo se activa ante el riesgo de que una variable alcance una restricción. La señal discontinua w actúa sobre la derivada del primer estado de F , es decir, sobre la derivada de la referencia del lazo principal (r_f).

¹Es importante observar que, a los efectos de poder cumplir especificaciones de performance, muchos de los métodos de control de procesos inestables se basan en estructuras de dos grados de libertad.

²No debe interpretarse este nuevo estado como un filtro que evite, en sí mismo, los problemas de restricciones en el control. Esto daría lugar a controladores excesivamente conservadores para setpoint chicos.

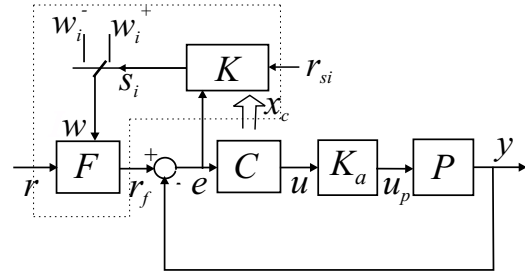


Fig. 1: Sistema de control con prevención de windup por MD

Se consideran los siguientes modelos

- modelo del proceso:

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= A_p x_p + B_P u_p \\ y &= C_p x_p.\end{aligned}\quad (1)$$

- modelo de C :

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= A_c x_c + B_c e \\ u &= C_c x_c + D_c e.\end{aligned}\quad (2)$$

- modelo de F . En términos generales, (incluyendo el caso en que F forma parte de un controlador de dos grados de libertad) se considera:

$$\begin{aligned}\dot{x}_f &= A_f x_f + B_f r + B_w w \\ r_f &= C_f x_f \\ C_f &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \\ B_w &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T.\end{aligned}\quad (3)$$

En el caso en que F es un filtro incluido como parte del lazo de condicionamiento de la referencia, es suficiente considerar una dinámica de primer orden. En este caso, F resulta:

$$\begin{aligned}\dot{x}_f &= \lambda_f x_f + \lambda_f r + w \\ r_f &= x_f.\end{aligned}\quad (4)$$

En principio, puede considerarse una superficie deslizante para cada restricción. El objetivo de cada superficie es, que ante el riesgo de que una variable pueda exceder un valor límite, conformar la señal r_f para que dicha variable evolucione en forma controlada sin exceder dicho valor límite. Cada una de estas superficies se obtiene de la combinación ponderada de los estados del controlador C , del error e , y de la señal r_s (propia de cada restricción):

$$s_i(x_c, e, r_s) = r_{s_i} - k_{e_i} e - k_{c_i} x_c = 0, \quad (5)$$

es decir, a los efectos del lazo de acondicionamiento, se consideran los estados $x_s^T = \begin{bmatrix} x_c^T & e \end{bmatrix}$. La información del estado de F se encuentra implícita en la señal e . Luego, la inclusión del error en la superficie de control garantiza el grado relativo 1 de s_i con respecto a la señal discontinua w .

Los regímenes deslizantes de protección se producen sobre superficies individuales dependientes de cada restricción, es decir corresponden a distintos regímenes deslizantes. Luego, a los efectos de simplificar la notación, se considera una superficie genérica:

$$s(x_c, e, r_s) = r_s - k_e e - k_c x_c = 0. \quad (6)$$

La señal discontinua w toma dos valores

$$\begin{aligned} w &= w^+ & \text{si } s > 0 \\ w &= w^- & \text{si } s < 0. \end{aligned} \quad (7)$$

En los regímenes deslizantes convencionales los valores de w cambian permanentemente la dirección de la trayectoria del sistema para forzarlo a evolucionar sobre la superficie hasta el equilibrio. En la presente propuesta, uno de los límites de w es nulo. Este hecho hace que de un lado de la superficie (cuando $w = 0$) las trayectorias evolucionen con la dirección propia del sistema, mientras que del otro lado de la superficie las trayectorias sean forzadas a un cambio de dirección. En estas condiciones el régimen deslizante sólo se establece si las trayectorias propias del sistema persisten en incursionar en regiones donde una variable corre el riesgo de tomar un valor límite.

Si bien en la superficie (6) se consideran todos los estados de C , a los efectos de establecer el régimen deslizante que limite la salida del controlador, sólo es necesario incluir (además de e) los primeros r_c estados de C en la superficie, siendo r_c su grado relativo. Es decir, el número de estados que intervienen en la superficie puede reducirse a $r_c + 1$.

Por otra parte, como durante el MD se verifica:

$$\begin{aligned} s(x_c, e, r_s) &= 0 \\ \dot{s}(x_c, e, r_s) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

el control continuo equivalente w_{eq} que se requiere para mantener la operación sobre la superficie $s(x_c, e, r_s)$ puede calcularse a partir de:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x_c, e, r_s) &= -k_e (C_f (A_f x_f + B_f r + B_w w_{eq})) \\ &\quad - k_c (A_c x_c + B_c (r_f - y)) + \dot{r}_s + k_e \dot{y} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Luego, como $C_f B_w = 1$, w_{eq} resulta:

$$\begin{aligned} w_{eq} &= k_e^{-1} \dot{r}_s - k_e^{-1} k_c (A_c x_c + B_c e) \\ &\quad - (C_f A_f x_f + C_f B_f r - \dot{y}). \end{aligned} \quad (10)$$

Se observa que el control equivalente w_{eq} está bien definido si $k_e \neq 0$. Luego, con la ecuación (10), y teniendo presente la condición necesaria para establecer el MD (Utkin et al, 1999):

$$w^- \leq w_{eq} \leq w^+ \quad (11)$$

puede calcularse el valor de w^+ o w^- (el otro es nulo) que asegura que al intentar la trayectoria cruzar la superficie, se establece el MD.

Reemplazando (10) en la ecuación de lazo abierto del sistema de prevención:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ e \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ C_f A_f x_f + C_f B_f r - \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_f B_w w \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

se obtiene la ecuación dinámica del régimen deslizante que acondiciona la entrada al lazo principal

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ -k_e^{-1} k_c A_c & -k_e^{-1} k_c B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ e \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ k_e^{-1} \dot{r}_s \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

En (13), se observa una redundancia en la última fila de la matriz de dinámica, la cual pone de manifiesto la reducción del orden introducida por el MD. La dinámica reducida en MD se obtiene reemplazando el error e de la ecuación (13) por el calculado a partir de forzar $s(x_c, e, r_s) = 0$, resultando:

$$[\dot{x}_c] = [A_c - B_c k_e^{-1} k_c] x_c + B_c k_e^{-1} r_s. \quad (14)$$

Luego, con la elección de k_e y k_c , puede asignarse la dinámica del régimen deslizante que asegura una aproximación controlada al valor de saturación (o de otra restricción) sin sobrepasarlo.

3. PROPIEDADES

Invarianza fuerte del régimen condicionante con respecto al lazo principal.

La expresión (12) indica que el segundo y tercer término del segundo miembro (interpretados como de perturbación y control del lazo acondicionante) representan vectores colineales, es decir:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ C_f A_f x_f + C_f B_f r - \dot{y} \end{bmatrix} \in \text{span} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ C_f B_w w \end{bmatrix} \right], \quad (15)$$

luego, el MD presenta *invarianza fuerte* (Sira-Ramirez, 1988) a la referencia r , a la (derivada de) variable controlada \dot{y} y a los estados de F (en caso de más de un estado).

La dinámica del lazo de acondicionamiento está dada por los autovalores de $[A_c - B_c k_e^{-1} k_c]$. Luego el diseño del controlador C (o FC para controladores de dos grados de libertad) del lazo principal no impone restricciones en la asignación de los autovalores del lazo condicionante, es decir, la misma asignación puede hacerse para cualquier C (o FC) a partir del correspondiente cálculo de $[k_e \quad k_c]^T$.

Independencia de los autovalores del lazo principal con respecto al lazo de acondicionamiento de r_f . En los párrafos previos se

demostró que la señal y no afecta la dinámica del lazo de acondicionamiento. Veamos que, a su vez, también los autovalores del lazo principal son independientes del circuito de acondicionamiento (esté o no activo). Con este fin, puede plantearse la relación entre la variable controlada y y la referencia acondicionada r_f

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_p - B_p D_c C_p & B_p C_c \\ -B_c C_p & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_c \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} B_p D_c \\ B_c \end{bmatrix} r_f \\ y &= [C_p \quad 0] \begin{bmatrix} x_p \\ x_c \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

Se observa que los autovalores del lazo principal, obtenidos a partir de

$$\left| sI - \begin{bmatrix} A_p - B_p D_c C_p & B_p C_c \\ -B_c C_p & A_c \end{bmatrix} \right| = 0 \quad (17)$$

son independientes de los del régimen deslizante encargado del acondicionamiento de r_f . Luego, la independencia de lazos demuestra que la activación del sistema condicionante no afecta ni la estabilidad del lazo principal ni su dinámica.

Dinámica de los ceros en r_f . Resulta particularmente interesante analizar la transferencia $Q(s)$ entre la salida del controlador y la referencia del lazo principal r_f :

$$Q(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)P(s)}. \quad (18)$$

Se observa que el numerador de $Q(s)$ presenta raíces en los autovalores de la planta, en particular en los inestables. Es decir, $Q(s)$ es de no mínima fase, lo cual da lugar a una dinámica de los ceros inestable en el MD. Esto implica que, a los efectos de asegurar la operación del lazo principal en zona sin restricciones, la inestabilidad de la planta se ‘traslada’ a la referencia. Este hecho, en otro contexto ha sido marcado en Seron et al. (1995).

En términos genéricos, el control por modos deslizantes de sistemas de no mínima fase encuentra serias restricciones. Sin embargo, no sucede lo mismo en la presente aplicación. Esto se debe a que, en el lazo de acondicionamiento propuesto, el régimen deslizante es sólo transitorio (es decir, el MD perdura hasta que el sistema entra francamente en la región sin restricciones). Por consiguiente, la precaución a tener presente consiste en satisfacer (11) durante el lapso en que es requerida la acción del lazo condicionante.

Cuando un cambio de setpoint activa el MD de prevención de windup, sólo una fracción r_f de r , que impide la saturación, es aplicada al lazo principal. A partir de este valor, r_f crece hacia r con

la dinámica de los ceros. Si la dinámica del lazo principal, el cual sigue cerrado, es rápida frente a la dinámica de los ceros, el error e disminuye rápidamente con respecto a la velocidad de evolución de r_f . Luego, cuando r_f se aproxime a r , el lazo principal estará en condiciones de operar en región segura en forma permanente, desactivándose el régimen deslizante (luego, cesando la evolución de r_f con la dinámica de los ceros).

Características en presencia de perturbaciones. Trabajos recientes (ver Hippe, 2003) consideran un ‘fraccionamiento’ de la acción de control, el cual, sobre la base de la máxima perturbación previsible, permite calcular el rango de setpoints que evitan el windup. Este proceder, si bien es efectivo, se basa en un diseño del peor caso y puede ser excesivamente conservador. La presente propuesta ofrece la ventaja que la acción correctora, que evita la saturación, se produce en el nivel más bajo de potencia del sistema. Esto permite mayor flexibilidad al elegir el rango dinámico para la corrección, evitando así un diseño excesivamente conservador.

Carencia de modo alcance ante cambios del setpoint. Debe notarse que no existe modo alcance, ya que el sistema de estructura variable que condiciona la referencia se activa cuando $s(x) = 0^-$. Es decir con condiciones iniciales en la superficie. Este es un hecho significativo ya que, en general, el modo alcance puede degradar la respuesta global de un sistema de estructura variable. Luego, en todo el transitorio $u = u_p$, es decir el lazo principal opera siempre a lazo cerrado y el fenómeno de windup no se produce.

4. EJEMPLO

Considérese el proceso inestable:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= 10x_p + 10u_p \\ y_p &= x_p, \end{aligned} \quad (19)$$

estabilizado a lazo cerrado con el controlador

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= \begin{bmatrix} 0 & -148,58 \\ 0 & -156,2 \end{bmatrix} x_c + \begin{bmatrix} 1300 \\ 1300 \end{bmatrix} e. \\ u &= [1 \quad 0] x_c, \end{aligned} \quad (20)$$

Con la finalidad de evaluar el método propuesto, se incluye un bloque de dinámica rápida en la referencia:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= -100x_f + 100r + w \\ r_f &= x_f. \end{aligned} \quad (21)$$

En la figura 2a puede observarse la evolución de la variable controlada ante un cambio de referencia cuando no se incluye la protección propuesta. El trazo fino corresponde al caso ideal sin saturación

del actuador. A su vez, el trazo grueso muestra la misma variable pero cuando el actuador satura en $\pm 1,55$. Se observa que la degradación es significativa. En particular, puede distinguirse la dinámica inestable del proceso cuando la salida del controlador satura. Cabe mencionar que leves incrementos en las restricciones del actuador o en la amplitud del setpoint dan lugar a la inestabilidad del sistema. En la parte b) de la figura se representan, con líneas continuas, las salidas del controlador en correspondencia con la parte a). También, en línea de trazos se muestra la entrada u_p al proceso, pudiendo observarse la falta de correspondencia entre esta señal y la salida del controlador.

Se considera ahora el mismo sistema pero con la inclusión del lazo de condicionamiento propuesto. Obsérvese que, si bien C es de segundo orden, su grado relativo es 1, luego sólo es necesario realimentar uno de sus estados (su salida) y el estado de F (a través de e) para asegurar el MD, y por consiguiente el correcto condicionamiento de r_f . Así, la superficie puede elegirse,

$$s(x_c, e, r_s) = r_s - k_e e - k_c x_c = 0, \quad (22)$$

la cual puede ser escrita en términos de las primeras $(r_c + 1)$ variables canónicas de la serie FC

$$s(x_c, e, r_s) = r_s - k_{c_1} x_{c_1} - k_{c_2} \dot{x}_{c_1} = 0. \quad (23)$$

El hecho de que las variables canónicas aparezcan en forma explícita en la superficie facilita la asignación de la dinámica del lazo de conformación de r_f . Para este fin, sólo hay que calcular las ganancias k_{c_i} para que el polinomio Hurwitz que resulta de (23) tenga las raíces en concordancia con la dinámica deseada. Siguiendo este procedimiento, se elige $\frac{k_{c_1}}{k_{c_2}} = 200$ que asegura una dinámica de MD con constante de tiempo de 5mseg. r_s toma los valores límites $u^- = -1,55$ y $u^+ = 1,55$. Así, en realidad, debe hablarse de dos superficies

$$s^+(x_c, e, r_s) = u^+ - k_{c_1} x_{c_1} - k_{c_2} \dot{x}_{c_1} = 0, \quad (24)$$

$$s^-(x_c, e, r_s) = u^- - k_{c_1} x_{c_1} - k_{c_2} \dot{x}_{c_1} = 0. \quad (25)$$

En la Fig. 3a se observan (en trazo grueso) los efectos de la corrección propuesta sobre la variable controlada ante el mismo cambio del setpoint que el de la Fig. 2. En trazo fino se repite la evolución de la variable controlada cuando no hay restricciones. La parte b) de la Fig. 3 muestra la salida del controlador en ambos casos. Se observa que debido a la dosificación del setpoint, el actuador no satura, luego el lazo opera siempre con la dinámica de lazo cerrado, garantizando máxima performance.

Resulta interesante analizar el efecto del lazo de corrección en el plano de fase $[u, du/dt]$ (Fig. 4). En trazo fino se representa la trayectoria del sistema sin corrección, mientras que el trazo grueso

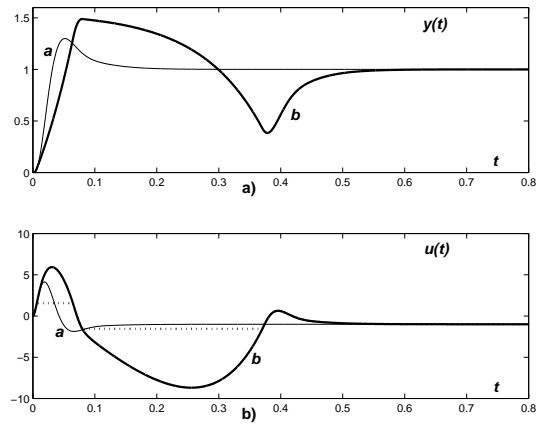


Fig. 2: **a)** Variable controlada (Trazo fino: caso sin restricciones. Trazo grueso: caso con restricciones, sin compensación). **b)** salida del controlador en correspondencia con la parte **a)**. Línea de puntos: entrada al proceso.

corresponde a la corrección propuesta. Las líneas punteadas limitan las regiones con/sin restricciones. Se observa que: 1) en el sistema sin corrección, la salida del controlador excede ampliamente los límites de saturación, dando lugar a la degradación observada en la Fig. 2a; 2) la corrección propuesta evita por completo la saturación. Ante el cambio de setpoint (punto A), u evoluciona con la dinámica del lazo principal y alcanza la superficie de protección (punto B), a partir de este punto la referencia del lazo principal es acondicionada asegurando la convergencia de u al valor $u^+ = 1,55$ (punto C) con la dinámica rápida ($\tau = 5mseg$) de la superficie. La superficie es abandonada cuando se reducen las exigencias sobre u para mantener el sistema en zona lineal (como ya se comentó, el régimen deslizante propuesto, a diferencia del caso tradicional, es sólo transitorio). Justamente este hecho es el que hace que los problemas de dinámica de los ceros (característicos de los regímenes deslizantes en sistemas de no mínima fase) no sean excluyentes. La trayectoria nuevamente activa la protección propuesta en el punto D, conformando r_f para dosificar la salida del controlador, evitando que caiga por debajo del límite $u^- = -1,55$.

La Fig. 5a muestra el condicionamiento de r_f cuando se alcanza la superficie. Particularmente se observa que r_f evoluciona con una exponencial creciente para evitar que u supere el límite u^+ . Se observa que esta dinámica en r_f no compromete la estabilidad del sistema, regida por el lazo cerrado principal, ya que en la medida que r_f se aproxima a r el lazo de corrección deja de operar y la dinámica de los ceros carece de sentido. La Fig. 5b muestra las señales $s^- = 0$ y $s^+ = 0$ que fuerzan el condicionamiento de r_f sólo cuando existe el riesgo de superar los límites de saturación.

5. CONCLUSIONES

El problema del windup en procesos exponencialmente inestables es sustancialmente más crítico que para el caso de procesos estables. Se ha propuesto un método para su prevención en el contexto de los sistemas de estructura variable. El mismo evita por completo las restricciones, y garantiza la total independencia de los lazos principal y de prevención. Se muestra que una de las principales restricciones de los regímenes deslizantes genéricos, su aplicación a sistemas de no mínima fase, tiene un efecto acotado en la presente aplicación. La ausencia del modo alcance, ante cambios de referencia, también garantiza máxima efectividad del método propuesto. El método es también aplicable al problema de regulación, presentando características sustancialmente menos conservadoras que otros métodos propuestos recientemente.

REFERENCES

- Hippe P. (2003). Windup prevention for unstable plants. *Automatica*, 39, 1967-1973.
- Hippe P. and Deutscher J. (2001). A windup prevention scheme for exponentially unstable plants. Proc. of the 6th European Control Conf. Porto.
- Kapasouris, M.A. and Stein G. (1990). Design of feedback control systems for unstable plants with saturating actuators. Proceedings of the IFAC Symposium on nonlinear control systems design.
- Lin, Z., Saberi, A. and Teel, A.R. (1996). The almost disturbance decoupling with internal stability for linear systems subject to input saturation. State feedback case. *Automatica*, 32, 619-624.
- Saberi, A., Lin, Z. and Teel, A.R. (1996). Control of linear systems with saturating actuators. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 41, 368-378.
- Seron, M.M., Goodwin, G.C., and Graebe, S.F. (1995). Control system design issues for unstable systems with saturated inputs. *IEE Proceedings of Control Theory and Applications*, 142, 335-344.
- Sira-Ramirez H., “Differential geometric methods in variable structure control”, *Int. J. Control*, 48, 4, 1359-1390 (1988).
- Teel, A.R. (1999). Anti-windup for exponentially unstable systems. *International Journal on Robust and Nonlinear Control*, 9, 701-716.
- Teel, A.R. and Kapoor, N. (1997). The L_2 anti-windup problem: Its definition and solution. Proc. of the 4th European Contr. Conf. Brussels.
- Turner M., Postlethwaite, I. and Walker D. J. (2000). Nonlinear tracking control for multivariable constrained input linear systems. *Int. J. of Control*, 73, 1160-1172.
- Utkin V.Y., *Sliding Mode Control in Electr. Systems*, Taylor and Francis; London (1999).
- Walgama K., S. Ronnback and J. Sternby, “Generalization of CT for anti-windup compensators”, *IEE Proceedings D*, 139, 109-118 (1992).

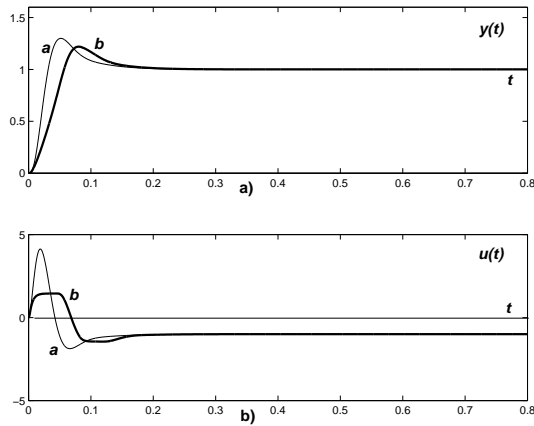


Fig. 3: **a)** Variable controlada (Trazo fino: caso sin restricciones. Trazo grueso: caso con restricciones, con compensación por MD). **b)** salida del controlador en correspondencia con la parte **a)**.

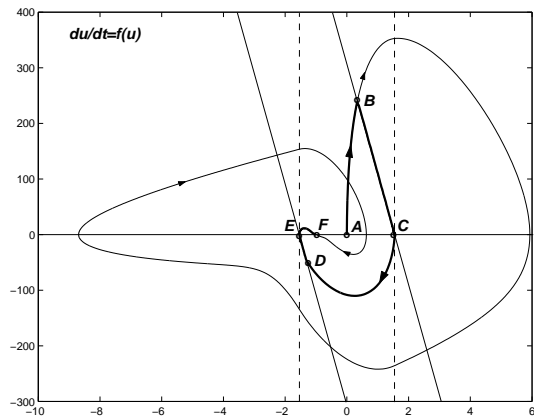


Fig. 4: Trayectorias en el plano $[u, du/dt]$ (Trazo fino: caso con restricciones, sin compensación por MD. Trazo grueso: caso con restricciones, con compensación por MD).

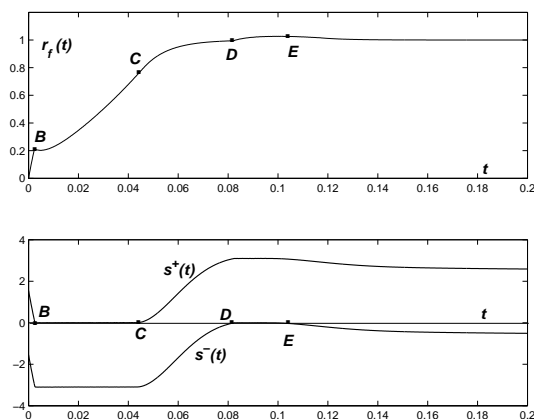


Fig. 5: **a)** Referencia condicionada r_f . **b)** Señales $s^-(t)$ y $s^+(t)$.