

# Restricciones en el control. Acondicionamiento de la señal de referencia vía regímenes deslizantes.

R. J. MANTZ<sup>†</sup>, H. DE BATTISTA<sup>‡</sup>, F. D. BIANCHI<sup>‡</sup>

*LEICI, Dto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP, C.C.91 (1900) La Plata, Argentina*

*<sup>†</sup>UNLP-CICpBA, mantz@ing.unlp.edu.ar*

*<sup>‡</sup>UNLP-CONICET, deba@ing.unlp.edu.ar, fbianchi@ing.edu.ar*

**Abstract**— Se generaliza el concepto de condicionamiento de la referencia para abordar problemas de control con restricciones. Esta generalización se realiza en el contexto de los sistemas operando en regímenes deslizantes. El método de acondicionamiento propuesto es independiente del tipo de controlador y presenta como característica relevante, a diferencia de otras propuestas, propiedades de independencia entre el lazo de acondicionamiento y el lazo principal de control.

**Keywords**— modo deslizante, restricciones, acondicionamiento de la referencia.

## I. INTRODUCCIÓN

La operación de todo sistema de control está sujeta a restricciones que degradan la performance esperada. La preocupación por desarrollar estrategias que atenúen sus efectos se ve reflejada en un creciente número de publicaciones que enfocan el tema desde distintas ópticas, por ejemplo, haciendo uso de conceptos de LQR (Turner and Walker, 2000), LPV (linear parameter varyng) (Wu and Grigoriadis, 1999), LMIs (linear matrix inequalities)(Mulder et al., 2001), VSS (sistemas de estructura variable) (Mantz and De Battista, 2002), control robusto (Yoon et al., 2002), etc. En cuanto al procedimiento de diseño, claramente se distinguen dos metodologías, conocidas como de ‘uno’ y ‘dos pasos’ (Kothare et al., 1994). En el primer caso el controlador es diseñado contemplando las restricciones, mientras que en el segundo, el controlador es diseñado para el sistema ideal (sin restricciones) y posteriormente se complementa con un lazo de corrección que sólo actúa cuando se manifiesta alguna restricción. La función de este lazo secundario es asegurar mínima degradación con respecto al caso sin limitaciones.

En general, las limitaciones se manifiestan ante excitaciones externas como cambios de referencias o perturbaciones. Dado que la magnitud de los cambios de la referencia suele ser mayor que la de las perturbaciones, también sus efectos son más notorios. Tal es así, que varios autores han propuesto actuar sobre la referencia para evitar problemas debidos a saturaciones en los actuadores. Uno de los aportes más cita-

dos al respecto corresponde a la técnica condicionante para controladores PID (Hanus et al., 1987)), la cual, si bien se ejerce sobre el estado integral del controlador, es deducida a partir de conceptos de ‘referencia realizable’. También Walgama y coautores (1992) se valen de este concepto para generalizar la técnica de Hanus. Asimismo, Goodwin et al. (2001) adapta en forma no lineal el vector de referencia como una solución empírica para evitar problemas de pérdida de direccionalidad en el control en sistemas MIMO, etc.

El presente trabajo aborda el problema de acondicionamiento de la referencia desde una óptica genérica (ya que se considera que este concepto excede la solución de problemas particulares). El marco teórico propuesto para el acondicionamiento de la referencia es el de los sistemas operando en modo deslizante (MD), que permite obtener una solución con características que la diferencian de otras propuestas.

Las ideas propuestas pueden ser aplicadas a problemas tales como windup, bump, control ‘reliable’, pérdida de direccionalidad en el control, acoplamiento dinámico en sistemas MIMO, delimitación de variables en zonas de operación segura (por seguridad, por validez del modelo empleado en el diseño, etc.), etc..

El trabajo es estructurado de la siguiente manera. En la sección II se propone la generalización del concepto de acondicionamiento de la referencia en el contexto de los regímenes deslizantes y se analizan las características distintivas del método resultante. En la sección III se aplican los conceptos propuestos a tres problemas. Finalmente, en las conclusiones, se resaltan las principales propiedades.

## II. Acondicionamiento de la referencia via regímenes deslizantes

### A. Marco teórico: regímenes deslizantes

Los sistemas operando en MD consisten de un grupo de subsistemas y funciones de conmutación que determinan un conjunto de subvariedades, cuya intersección se conoce como superficie de deslizamiento. La idea básica es forzar a las variables de estado a alcanzar esta superficie donde se cumplen las especificaciones del problema y luego, mediante una adecuada conmutación, obligarlas a evolucionar sobre ella. Una vez

establecido este modo de funcionamiento, la superficie de deslizamiento impone la nueva dinámica del sistema. En términos genéricos los regímenes por MD permiten obtener sistemas robustos ante incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas. Además, las estrategias de MD reducen el orden del sistema y son de fácil implementación. (Utkin, 1999)

Las limitaciones más frecuentes que pueden restringir la aplicación de regímenes deslizantes están asociadas con: 1) el chattering que se produce cuando la frecuencia de conmutación de los actuadores no es lo suficientemente elevada en relación a la dinámica del sistema y 2) el modo de operación previo al régimen deslizante, conocido como modo alcance.

## B. Acondicionamiento de la referencia.

### Enfoque genérico

La Fig. 1 representa un sistema de control con el acondicionamiento de la señal de referencia propuesto. Se pueden distinguir dos lazos:

1- *lazo principal*, el cual es diseñado sin considerar las restricciones (el método de diseño es indistinto).  $P$  representa al proceso bajo control,  $K_a$  un actuador de potencia y el par  $C_1 - C_2$  el controlador que asegura cumplir satisfactoriamente con las especificaciones del problema sin restricciones. Al incluir la partición del controlador en dos bloques  $C_1$  y  $C_2$  el presente análisis contempla controladores de dos grados de libertad usualmente diseñados para cumplir simultáneamente especificaciones de rechazo a perturbaciones y de seguimiento. Si  $C_1$  es estrictamente propio, se asume que es expandido con un estado de dinámica mucho más rápida que la del resto de los estados del par  $C_1 - C_2$ . Esto asegura que, en funcionamiento normal, no se introduce ningún cambio apreciable en lo que se considera el comportamiento adecuado del lazo de control (según diseño)<sup>1</sup>. Por otra parte, esta expansión presenta las siguientes ventajas: 1) como posteriormente se demuestra, permite el establecimiento de un régimen deslizante, sin previo modo alcance y 2) para el caso particular en que el diseño del lazo principal condujera a un  $C_1$  sin dinámica (en particular  $C_1=1$ ), se habilita la posibilidad de condicionar la referencia a través del estado expandido. Tanto  $P$  como  $C_1$  y  $C_2$  son representados por modelos de estado:

- -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  $C_1$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{c_1} &= A_1 x_{c_1} + B_1 r + B_w w \\ r_1 &= C_1 x_{c_1} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\ B_w^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

<sup>1</sup>No debe interpretarse este nuevo estado como un filtro que evite, en sí mismo, los problemas de restricciones en el control, ya que esto daría lugar a controladores excesivamente conservadores.

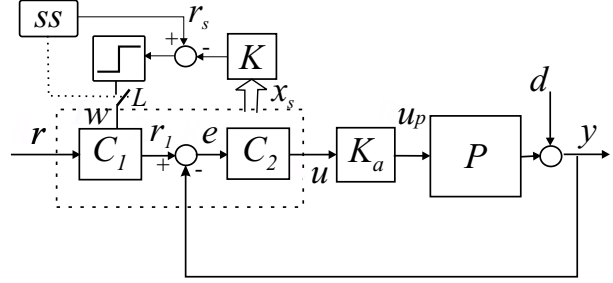


Figure 1: acondicionamiento de la referencia del lazo principal vía el regimen deslizante propuesto

- -modelo de  $C_2$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{c_2} &= A_2 x_{c_2} + B_2 e \\ u &= C_2 x_{c_2} + D_2 e. \end{aligned} \quad (3)$$

Las dimensiones de las matrices son consistentes y obviamente, los estados del controlador accesibles.

2- *lazo de acondicionamiento de la referencia* constituido, en forma genérica, de dos partes: un lazo que, operando en régimen deslizante sobre una determinada superficie, garantiza el acondicionamiento deseado, y un ‘sistema de supervisión’ ( $SS$ ) que establece una componente  $r_s$  de dicha superficie como función de al menos una restricción, y que determina la activación del acondicionamiento (esquematizada con la llave  $L$ )<sup>2</sup>. La señal discontinua  $w$  actúa sobre la derivada del primer estado de  $C_1$ , es decir, sobre la derivada de la referencia del lazo principal  $r_1$ , y así es posible acondicionar su valor para evitar problemas debidos a restricciones. La superficie de control del lazo acondicionante se obtiene de la combinación ponderada de los estados del controlador  $C_2$ , del error  $e$ , y de la señal  $r_s$ :

$$s(x_{c_2}, e, r_s) = r_s - k_e e - k_c x_{c_2} = 0, \quad (4)$$

es decir, a los efectos del lazo de acondicionamiento, se consideran los estados  $x_s^T = [x_{c_2}^T \ e]^T$ . La inclusión del error en la superficie de control garantiza el grado relativo 1 con respecto a  $w$ .

Por otra parte, como durante el MD se verifica que:

$$\begin{aligned} s(x_{c_2}, e, r_s) &= 0 \\ \dot{s}(x_{c_2}, e, r_s) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

el control continuo equivalente  $w_{eq}$  que se requiere para mantener la operación sobre la superficie  $s(x_{c_2}, e, r_s)$  puede calcularse a partir de su derivada:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x_{c_2}, e, r_s) &= -k_e (C_1 (A_1 x_{c_1} + B_1 r + B_w w_{eq}) - \dot{y}) \\ &\quad - k_c (A_2 x_{c_2} + B_2 (r_1 - y)) + \dot{r}_s = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

<sup>2</sup>El denominado sistema de supervisión puede estar integrado al lazo del régimen deslizante y ser tan simple como una zona muerta en el relé, un modelo del actuador, etc.

Luego, como  $C_1 B_w = 1$ ,  $w_{eq}$  resulta:

$$w_{eq} = k_e^{-1} \cdot (\dot{r}_s - k_c (A_2 x_{c_2} + B_2 e) - k_e (C_1 A_1 x_{c_1} + C_1 B_1 r - \dot{y})) \quad (7)$$

Se observa que el control equivalente  $w_{eq}$  está bien definido ya que  $k_e \neq 0$ . Luego, con la ec. (7), y teniendo presente la condición necesaria para establecer el MD:  $w^- \leq w_{eq} \leq w^+$  pueden calcularse los valores de  $w^\pm$  que aseguran el MD. (Utkin et al, 1999)

Reemplazando (7) en la ecuación de lazo abierto:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{c_2} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ 0 & C_1 B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c_2} \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 A_1 x_{c_1} + C_1 B_1 y - \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 B_w w \end{bmatrix}. \quad (8)$$

se obtiene la ecuación dinámica del régimen deslizante que condiciona a  $r_1$ , es decir a la entrada al lazo principal

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{c_2} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ k_e^{-1} k_c A_2 & k_e^{-1} k_c B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c_2} \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_e^{-1} \dot{r}_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

La redundancia de la última fila de la ecuación (9) pone de manifiesto la reducción de orden introducida por el MD. Esta fila puede eliminarse reemplazando el error  $e$  de la ecuación (9) por el calculado a partir de forzar a cero la superficie (4), resultando:

$$[\dot{x}_{c_2}] = [A_2 - B_2 k_e^{-1} k_c] x_{c_2}. \quad (10)$$

### **Comentarios e interpretación de las ecuaciones previas**

-La expresión (8) está indicando que el segundo y tercer término del segundo miembro (interpretados como de perturbación y control del lazo acondicionante) representan vectores colineales:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ C_1 A_1 x_{c_1} + C_1 B_1 y - \dot{y} \end{bmatrix} \in \text{span} \left[ \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 B_w w \end{bmatrix} \right], \quad (11)$$

luego el régimen deslizante presenta *invarianza fuerte* (Sira-Ramirez, 1988) a la variable controlada  $y$ , a su derivada  $\dot{y}$  y a los estados de  $C_1$ , es decir, la dinámica del régimen de acondicionamiento es completamente independiente de estas variables. En otras palabras, la señal  $r_1$  es acondicionada sólo en concordancia con la dinámica de la superficie  $s$ .

- La dinámica del lazo de acondicionamiento está dada por los autovalores de  $[A_2 - B_2 k_e^{-1} k_c]$ . Luego el diseño del controlador  $C_1 - C_2$  del lazo principal no impone restricciones en la asignación de los autovalores del lazo acondicionante, es decir, la misma asignación puede hacerse para cualquier par  $C_1 - C_2$  a partir del correspondiente cálculo de  $[k_e \ k_c]^T$  y  $w^\pm$ .

**Independencia de los autovalores del lazo cerrado principal con respecto al lazo de acondicionamiento de  $r_1$ .**

En la subsección previa se demostró que la señal  $y$  no afecta el lazo de acondicionamiento, y por consiguiente, tampoco sus autovalores. Veamos que también los autovalores del lazo principal son independientes del circuito de acondicionamiento (esté o no activo). Con este fin, basta plantear la relación entre la variable controlada  $y$  y la referencia acondicionada  $r_1$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{x}_{c_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_P - B_P C_2 D_2 C_P & B_P C_2 \\ -B_2 C_P & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P \\ x_{c_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_P C_2 D_2 \\ B_2 \end{bmatrix} r_1$$

$$y = [C_P \ 0] \begin{bmatrix} x_P \\ x_{c_2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

es decir los autovalores del lazo principal, obtenidos a partir de

$$\left| sI - \begin{bmatrix} A_P - B_P C_2 D_2 C_P & B_P C_2 \\ -B_2 C_P & A_2 \end{bmatrix} \right| = 0 \quad (13)$$

son completamente independientes de los del régimen deslizante encargado del acondicionamiento de  $r_1$ .

Luego, la independencia de lazos demuestra que la activación del sistema condicionante no afecta ni la estabilidad del lazo principal ni su dinámica.

## **III. APLICACIONES**

### **A. Acondicionamiento de la referencia vía MD como algoritmo anti-windup**

Cuando un actuador satura, la entrada del proceso pasa a ser inconsistente con los estados del controlador. Luego, la evolución de los estados de la planta resulta independiente de los del controlador, conduciendo a comportamientos transitorios indeseables con grandes sobrepasos y prolongados tiempos de establecimiento. Este fenómeno es conocido como reset windup. A continuación, se muestra cómo pueden emplearse los conceptos de acondicionamiento de la referencia vía MD para evitar este problema.

*Ejemplo 1.* Se considera el modelo de una columna de destilación binaria Wood/Berry (Wood et al, 1973):

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} U_P + \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s+1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s+1} \end{bmatrix} D.$$

y el controlador multi-lazo *PI* diseñado en (Kiong et al, 1999):

$$PI(s) = \begin{bmatrix} 0.699 \left(1 + \frac{1}{8.42s}\right) & 0 \\ 0 & -0.0895 \left(1 + \frac{1}{9.52s}\right) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

La figura 2a muestra la evolución de la variable controlada  $y_1$  ante un cambio en el correspondiente set-point. La respuesta del sistema idealizado (sin saturaciones en los actuadores) es graficada con línea llena. También se muestra (con línea de trazos) la respuesta  $y_1$  cuando el actuador correspondiente presenta una

saturación definida por  $u_{P_1} \in [-0.2, 0.2]$ . Puede observarse que, en presencia de saturación, aparece un notorio sobrepaso en la variable controlada  $y_1$ , el cual es debido al windup del integrador del primer elemento  $PI_{11}$  del controlador. La Fig.2b muestra las acciones de control para ambos casos.

Para eliminar el windup se emplea el acondicionamiento propuesto. Teniendo en cuenta que en el diseño original  $C_1 = I$ , se incluye en cada setpoint un filtro de primer orden:

$$\dot{x}_{r_i} = \lambda_i x_{r_i} + r_i + w_i \quad (15)$$

donde el valor del autovalor  $\lambda_{f1} = -10$  ha sido elegido para asegurar que no introduce, de por sí, ningún cambio apreciable con respecto al caso sin filtro. Además, se consideran los valores  $w_1^+ = -w_1^- = 1$ . Obviamente debe asegurarse que  $w = 0$  cuando el actuador se encuentra en región lineal, para que la corrección no actúe en esta zona.

A los efectos de acondicionar la señal  $r_1$  y evitar el windup se elige como superficie de control  $s(x) = u_1 - u_{P_1}$ , la cual verifica el grado relativo 1 con respecto a  $w$ . La extrema sencillez de  $s$  se debe al carácter de estrictamente propio del controlador, estando el error considerado en la superficie a través de la parte proporcional del controlador.

En la Fig. 2c y d se muestran, en trazo continuo, las variables  $y_1$ ,  $u$  y  $u_{P_1}$  para el caso con acondicionamiento de la referencia por MD. A los efectos de la comparación, se ha repetido (con línea de trazos) las mismas señales para el caso sin compensación ARW. En la Fig.2d se observa que el acondicionamiento de la referencia asegura que la salida del controlador no supera el límite de saturación del actuador y por consiguiente el windup es eliminado. En otras palabras la referencia acondicionada ( $r_1$ ) toma en todo instante el máximo valor compatible con el cambio del setpoint y con la no saturación del actuador.

*Observación.* A diferencia de otros controles de estructura variable, el objetivo de la presente compensación no es evolucionar en MD hasta el equilibrio. Efectivamente, en este caso, el régimen deslizante es un modo de operación transitorio cuyo único objetivo es condicionar la velocidad de crecimiento de la excitación para evitar que una determinada variable supere un límite preestablecido. Es decir, se busca el régimen deslizante sólo en la medida que la dinámica propia del lazo principal persista en que una determinada variable supere una cota  $x_{lim}$  (.2 en este ejemplo). Para una mejor comprensión, en la Fig. 3 se han graficado las trayectorias definidas en el plano (control  $u_1$ , estado integral  $x_{q_1}$ ) para ambos casos, con (trazo continuo) y sin (línea de trazos) la corrección propuesta, pudiéndose observar que para el caso sin corrección, la variable  $u$  incursiona en regiones donde satura el actuador. Por otra parte, en la trayectoria del sistema con la co-rección propuesta, se observa que en cierto instante (punto A) se tiende a superar el límite

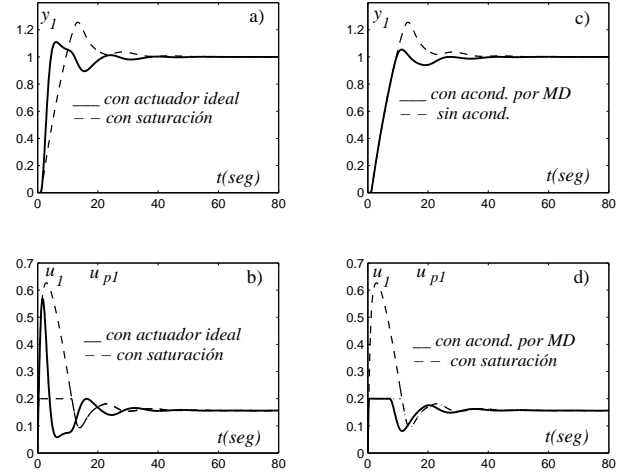


Figure 2: a) variable controlada  $y_1$  b) señales de control  $u_1$  y  $u_{P_1}$  en correspondencia con Fig.2a; c)  $y_1$ , considerando saturación en el actuador, con y sin la compensación propuesta; d) señales  $u_1$  y  $u_{P_1}$  en correspondencia con Fig.2c

$u_{P_1} = .2$  (en realidad  $u_P > u_{P_1}$ ). Recién entonces, el acondicionamiento de  $r_1$ , a través del control discontinuo  $w_1$ , produce un cambio abrupto en la dirección de la trayectoria orientándola nuevamente hacia la superficie. Esta situación se repite a alta velocidad, dando lugar a un régimen deslizante (tramo A-B) que sólo se rompe cuando las trayectorias propias del sistema (sin corrección) se escapan de la superficie (punto B) hacia la región sin restricciones restableciéndose, el comportamiento puramente lineal.

Debe notarse que no existe modo alcance, ya que el sistema de estructura variable que acondiciona 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  $u = u_{P_1}$ , es decir el lazo principal opera siempre a lazo cerrado y el fenómeno de windup no se produce. Efectivamente el windup es evitado gracias a la dosificación de la referencia, por el régimen deslizante, a la máxima velocidad compatible con la no saturación de los actuadores.

## B. Acondicionamiento de la referencia vía MD para garantizar operación segura

Consideremos ahora, el siguiente ejemplo. Las ecuaciones:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & .01 & 0 \\ -50 & -1 & 1 \\ -.001 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \\ .001 \end{bmatrix} r \quad (16)$$

corresponden a un sistema de control de lazo cerrado, los dos primeros estados corresponden al sis-

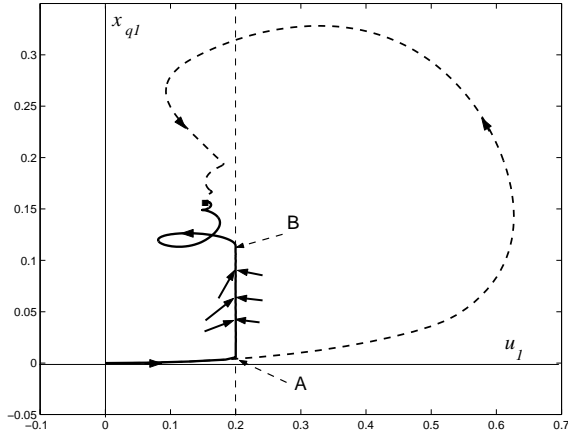


Figure 3: Trayectorias en el plano  $[u_1, x_{q1}]$  (estado integral de  $PI_{11}$ ) sin y con la corrección propuesta

tema, mientras que el tercero se debe a la acción integral de un controlador  $PI$ . Se supondrá que, por razones de seguridad, la variable del proceso  $x_2$  no debe incursionar en valores  $x_2 \geq 20$ . Como la acción de control condicionante  $w$  sólo se manifiesta en la segunda derivada de esta variable no puede proponerse una superficie de control como la propuesta en el caso previo, sino que debe incluirse, a más de  $x_2$ , alguna variable que asegure que la superficie sea de grado relativo 1. Con esta finalidad se propone una superficie  $s(x) = x_{2lim} - x_2 - k_e \cdot e = 0$ . Obsérvese, que asumiendo que  $x_2$  es accesible, las propiedades de acondicionamiento previamente discutidas son válidas, basta con analizar el sistema realimentado asumiendo un bloque  $C'_2$  consistente en el  $C_2$  original más el estado  $x_2$  y un sistema  $P'$  con sólo el estado  $x_1$ . A diferencia del caso anterior el MD de acondicionamiento de la referencia se inicia antes de que la variable  $x_2$  alcance su cota máxima, evolucionando hacia ella con una velocidad impuesta por la ganancia  $k_e$  (ec.(10)). Efectivamente, en la Fig.4a (línea llena) puede observarse la aproximación suave de  $x_2$  al valor máximo 20 con la dinámica rápida de modo deslizante. La Fig.4c muestra las correspondientes trayectorias en el plano  $(x_2, \dot{x}_2)$ . La protección por MD actúa en el tramo AB, dando lugar a la evolución exponencial de  $x_2$  desde el punto A hasta el valor límite de 20 (punto B). Obviamente la abscisa de A (al igual que la dinámica de la protección) depende de  $k_e$ . Por último, en la Fig.4b puede verse la suave degradación de la corrección sobre la variable controlada  $x_1$ . Nuevamente es importante remarcar que la protección no interrumpe el normal funcionamiento del lazo principal (los autovalores son independientes del circuito de acondicionamiento) ya que la corrección se ejerce sobre la referencia. Es decir se asegura mínima degradación de  $x_1$  sin que  $x_2$  supere  $x_{2lim}$ .

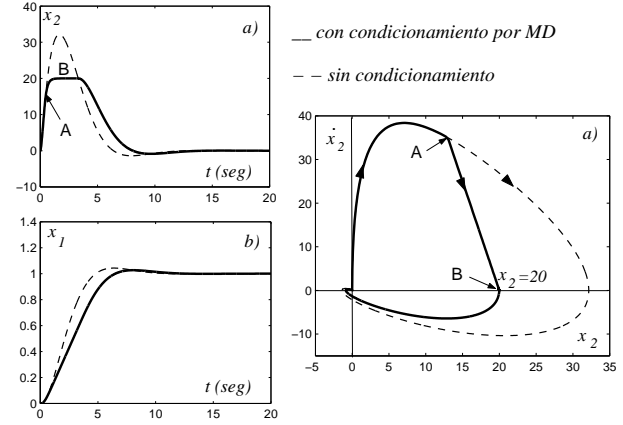


Figure 4: a) variable  $x_2$  con y sin la corrección propuesta. b) variable  $x_1$  en correspondencia con a). c) trayectorias en el plano  $[x_2, \dot{x}_2]$ .

### C. Acodicionamiento de la referencia aplicado al problema de acoplamiento de variables en sistemas MIMO

En todo sistema MIMO se busca que el cambio de una referencia sólo tenga efecto sobre la correspondiente variable controlada, no alterando las demás variables de salida. En general se distingue entre acoplamiento estático y dinámico, pudiendo presentar este último, una complejidad importante. Los ‘costos’ de desacoplar dependen de distintos factores, en particular de la existencia de ceros de no-mínima fase y de autovalores inestables. Una alternativa al problema de acoplamiento dinámico, propuesta aquí, es reducir las exigencias de diseño referidas al desacoplamiento (es decir, aceptar cierto grado de acoplamiento, lo cual permite flexibilizar el diseño) y posteriormente acondicionar, vía un MD, cada referencia para que las variables cruzadas no superen una cota absoluta preestablecida.

Para evaluar la compensación propuesta se considera un tanque de mezclado, donde se desea controlar la concentración y caudal de salida, existiendo dos variables de control, los caudales de entrada  $F_1$  y  $F_2$  con concentraciones  $c_1$  y  $c_2$ , respectivamente. El modelo dinámico linealizado en el entorno de  $V_0$  (volumen de la mezcla),  $F_0$  y  $c_0$ , resulta:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{F_0}{2V_0} & 0 \\ 0 & -\frac{F_0}{V_0} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{V_0} & \frac{1}{V_0} \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{bmatrix} u \quad (17)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -.01 & 0 \\ 0 & -.02 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -.25 & .75 \end{bmatrix} u. \quad (18)$$

Un diseño simple asignando los autovalores de lazo cerrado en  $\lambda_{1,2} = -.1025 \pm j.049$  es posible con el juego de ganancias:

$$-Kx = - \begin{bmatrix} .1 & 0 \\ 0 & .1 \end{bmatrix} x. \quad (19)$$

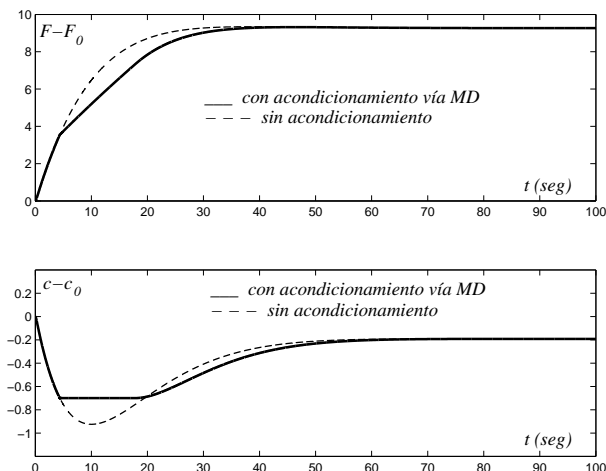


Figure 5: Variables controladas ante un cambio en el setpoint 1

La Fig.5a muestra, en línea de trazos, la evolución del caudal ante un cambio en su setpoint. Puede observarse que el acoplamiento del sistema da lugar a un cambio no deseado en la concentración. Ahora bien, el apartamiento máximo de la concentración está en relación directa con la amplitud del cambio del setpoint de caudal. Supónganse que se desea que este apartamiento no supere la cota de .7 mas allá de la amplitud del cambio del setpoint de caudal. Con esta finalidad y siguiendo los lineamientos propuestos se propone acondicionar la referencia para no superar esta cota. Se incluye un estado en  $C_1$  (ya que originalmente  $C_1 = I$ ) de dinámica rápida y se propone una superficie de protección  $s(x) = .7 - x_2 = 0$ . Esta superficie, al ser de grado relativo 1, asegura que para el valor  $w^\pm$  correctamente elegido la referencia será acondicionada para que la variable concentración no supere la cota propuesta. Esta corrección es siempre a lazo cerrado. En la Fig.5b se muestra, con línea llena, como el acondicionamiento de  $r_1$  evita que la concentración supere la cota de .7, mientras que en la parte a) de la figura puede observarse el efecto sobre la variable caudal de salida. La respuesta presenta mínima degradación compatible con el máximo apartamiento permitido para la concentración. De la figura se desprende la efectividad del método propuesto, resultando una alternativa real para atenuar los problemas de acople dinámico entre variables de sistemas MIMO, alternativa que puede simplificar significativamente el diseño del controlador.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha generalizado el concepto de acondicionamiento de la referencia. El marco teórico propuesto, los regímenes deslizantes, asegura la independencia del lazo principal del lazo de corrección. Este hecho resulta relevante, ya que puede ser aplicado aún para procesos inestables a lazo abierto. Además la

metodología propuesta (a diferencia de otras técnicas que buscan la mínima degradación ante la presencia del problema) evita problemas debidos a restricciones tales como windup. Además, debido a que el control responsable del régimen deslizante se produce en etapa de baja potencia (se acondiciona un estado del controlador) no existen problemas de chattering. También es evitado el modo alcance, lo que garantiza máxima performance del lazo de corrección. Si bien por razones de espacio se presentan sólo tres ejemplos, el tratamiento genérico propuesto ha sido exitosamente verificado en problemas de distinta complejidad de windup, bump, pérdida de direccionalidad del control, acoplamiento de variables, control ‘reliable’, y restricción de variables en regiones de operación segura.

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

#### REFERENCES

- Goodwin G., S. Graebe and M. Salgado, *Control System Design*, Prentice Hall; New Jersey (2001).
- Hanus R., M. Kinnaert, and J. Henrotte, “Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method”, *Automatica*, **23**, 6, 729-739 (1987).
- Kiong, T., W. Quing-Guo, T. Häggglund, *Advances in PID Control*; Springer-Verlag; London, (1999).
- Kothare M., P. Campo, M. Morari and K. Nett, “A unified framework for the study of anti-windup design”, *Automatica*, **30**, 12, 1869-1883 (1994).
- Mantz R. and H. DeBattista, “Sliding Mode Compensation for Windup and Direction of Control Problems in Two-Input - Two-Output PI Controllers”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 3179-3185, (2002).
- Mulder E., M. Kothare and M. Morari, “Multivariable anti-windup controller synthesis using LMIs”, *Automatica*, **37**, 5, 1407-1416, (2001).
- Sira-Ramirez H., “Differential geometric methods in variable structure control”, *Int. J. Control*, **48**, 4, 1359-1390 (1988).
- Turner M. and D. Walker, “Linear quadratic bumpless transfer”, *Automatica*, **36**, 1089-10101 (2000).
- Utkin V.Y., *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, Taylor and Francis; London (1999).
- Walgama K., S. Ronnback and J. Sternby, “Generalization of conditioning technique for anti-windup compensators”, *IEE Proceedings D*, **139**, 109-118 (1992).
- Wood R. and M. Berry, “Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column”, *Chem. Engng. Sci.* **28**, 1707-1717. (1973).
- Wu F. and K. Grigoriadis, “LPV-based control of syst. with amplitude and rate actuator sat. const.”, *Am. Control Conf.*, San Diego, 3191-3195 (1999).
- Yoon S., K. Kim, T. Yoon and J. Park, “An  $H_\infty$  dynamic AW scheme for input const. linear syst.”, *15th IFAC World Cong.*, Barcelona, 1348-1353, (2002).