

A fault tolerant approach to anti-windup gain implementation

Wilber Acuña-Bravo¹ y Addison Ríos-Bolívar²

¹CEMISID, Tel. +58 274.240.29.14. wilber@ula.ve.

²Departamento de Sistemas de Control. Tel. +58 274.240.28.47. ilych@ula.ve
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida 5101, Venezuela. Fax 274.240.28.11

Abstract

A new approach to anti-windup gain implementation is shown. To this aim, a fault detection and isolation system is used. Actuators saturation is taken as a failure in the control system, which is detected and isolated by means of a fault detection filter bank (multifiltering), whose residuals are used to carry out the saturation compensation. Under this framework, a fault tolerant control system to this particular fault is achieved, which presents robustness proprieties with respect to changes in the actuators performance. Fault detection filters design is done, by means of robust optimal control in $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ techniques, based on linear matrix inequalities. Some numerical examples are shown in order to verify the proposed approach properties.

Key words: Fault tolerant control, anti-windup compensation, fault detection filters, linear matrix inequalities.

Implementación de compensación Anti-windup basada en tolerancia a fallas

Resumen

En esta contribución, se presenta un esquema para la implementación práctica de la ganancia de compensación *anti-windup*, tomando como base un sistema de diagnóstico y detección de fallas. Para ello, la saturación en los actuadores es considerada como una falla en el sistema de control, la cual es detectada y aislada mediante un banco de filtros de diagnóstico de fallas, cuyos residuos son utilizados para efectuar la compensación de la saturación, proporcionando un esquema de control tolerante a esta falla particular, el cual exhibe propiedades de robustez frente a cambios en el funcionamiento de los actuadores. Para la síntesis de los filtros de detección de fallas, se propone un método derivado de las técnicas de control óptimo robusto en $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ basado en desigualdades lineales matriciales. Para verificar las propiedades del esquema propuesto, se presentan algunos ejemplos numéricos.

Palabras clave: Control tolerante a fallas, compensación *anti-windup*, filtros de detección de fallas, desigualdades lineales matriciales.

Introducción

Con el paso de los años, los requisitos impuestos a los sistemas de control se han hecho cada vez más exigentes. En general se buscan sistemas seguros y eficientes, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de análisis y

síntesis con miras a satisfacer tales requerimientos. Uno de los retos más frecuentes con que se encuentra la ingeniería de control, es el de mantener condiciones de estabilidad y desempeño ante daños en los elementos del sistema, asociado a los *sistemas de control tolerantes a fallas* (FTC) [1], [2]; o a las limitaciones en la instrumen-

tación del sistema de control, en este caso asociado a técnicas de control acotado. Dentro de este último grupo se encuentran las estrategias *anti-windup* (AW) que buscan compensar los efectos adversos debido a la saturación de los actuadores o del cambio de controladores inherente a diferentes escenarios de operación.

Por cuenta de las limitaciones físicas presentes en los actuadores y de los cambios de puntos de operación del sistema de control, según los regímenes de producción, es común que en la práctica las entradas de control a los procesos y las salidas de los controladores sean diferentes. Esta característica del lazo de control implica una diferencia entre la señal que es entregada por el controlador y la que es recibida a la entrada de la planta, como consecuencia se produce una actualización incorrecta de los estados del controlador, pues los estados de la planta evolucionan de un modo diferente al considerado por el controlador, debido a la diferencia de la señal de control. Este efecto es conocido como *controller windup* (CW).

La actualización forzada de los estados del controlador genera un conjunto de efectos no deseables en el lazo de control, tales como sobre-disparo, el cual adiciona aún más saturación en los actuadores, aumento del tiempo de respuesta, llegando en casos extremos a producir inestabilidad en el lazo [3].

Por otro lado, los sistemas de FTC están conformados principalmente por elementos de *detección y aislamiento de fallas* (FDI), los cuales determinan cuándo y dónde una falla ocurre, tomando como base la información contenida en un conjunto de residuos [4, 5]. La forma como se generan estos residuos varía según la aplicación [6]. En general, si se satisfacen condiciones de detectabilidad y de separabilidad de fallas, se buscan mecanismos de diseño de un único filtro

FDI para el diagnóstico, lo cual resulta muy restrictivo [7]. Otro enfoque es utilizar el filtrado múltiple en el cual se construye un banco de filtros que genere residuos para fallas particulares [8]. En esta contribución se abordará mediante el diseño de un banco de filtros de detección (*multi-filtrado*), orientado a la implantación práctica de mecanismos de compensación AW, a los fines de minimizar los efectos nocivos de la saturación de los actuadores.

Los mecanismos AW son, en general, abordados mediante un enfoque de dos pasos:

1. Diseñar un controlador asumiendo que no hay condiciones anómalas.
2. Diseñar una compensación (dinámica o estática) que mantenga las condiciones de operación en presencia de alguna condición como *windup* o sobresaltos debido a cambios de régimen operación del controlador [3].

La literatura sobre el estudio de los problemas de restricciones en los actuadores es amplia, puede verse [9] para un resumen bibliográfico hasta esa época. La noción del diseño de la compensación se puede enfocar desde las perspectivas presentadas por Gomes da Silva [10].

Formulación del problema

En todos los casos, la señal utilizada para implementar la compensación AW debe ser medida directamente del proceso, establecida por la diferencia entre la señal de salida del controlador y la entregada por los actuadores a la planta, tal como muestra la Figura 1.

Es conocido que, en muchos casos, la posibilidad de realizar esta medición es nula, por limitaciones físicas propias del proceso, por la inexistencia de la tecnología apropiada, o que no sería económicamente viable adicionar más instru-

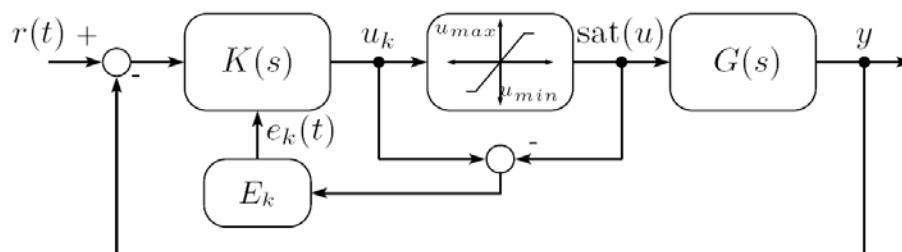


Figura 1. Compensación anti-windup.

mentación al proceso. El problema radica en que hay situaciones en donde es necesario hacer la compensación, pues se sabe que la saturación está presente y no se desea perder características de desempeño o mucho menos que se presente inestabilidad; pero, no se cuenta con la señal mencionada para hacer la compensación del controlador requerido.

Un mecanismo utilizado para efectuar la implementación consiste en el uso de modelos de los actuadores [11], los cuales deberían reproducir el comportamiento ordinario de los mismos. El problema de este enfoque, como el de cualquier otro que use modelos, es que su validez es limitada; en el tiempo, debido a cambios en los actuadores por su propio funcionamiento, o en su fiabilidad, debido a un modelo con exactitud insuficiente, que a su vez no se actualiza dinámicamente en el tiempo.

La solución aquí planteada, consiste en reemplazar la medición de esta señal, por un equivalente estimado a partir de filtros FDI, de tal manera que la señal residual de estos sea utilizada para hacer la compensación AW [12]. La Figura 2 presenta este enfoque.

Así, este trabajo trata del diseño de mecanismos para la implementación de la compensación a partir del diagnóstico de fallas.

Filtros de diagnóstico de fallas

Los filtros de detección de fallas, son sistemas que permiten detectar los comportamientos anómalos dentro de un sistema de control. Están compuestos por tres elementos fundamentales: mecanismos de *generación de resi-*

duos, evaluación de los residuos y la toma de decisiones lógicas.

El componente fundamental de estos sistemas es el de *generación de residuos*, que se construye a partir de filtros de detección y diagnóstico.

2.1. Filtros FDI basados en observadores

Para la generación de los residuos se empleará un esquema basado en observadores. Así, sea un sistema dado por

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) + \sum_{i=1}^k L_i v_i(t), \quad x(0) = x_0 \\ z(t) &= C_1 x(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) + \sum_{i=1}^k M_i v_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $x \in \mathfrak{R}^n$ son los estados, $w \in \mathfrak{R}^q$ las señales de perturbación externa, $u \in \mathfrak{R}^m$ las señales de control, $z \in \mathfrak{R}^p$ las salidas controladas y $y \in \mathfrak{R}^s$ las salidas medidas. Las señales $v_i \in \mathfrak{R}^f$ representan los *modos de falla*, una función arbitraria y desconocida igual a cero en tiempo t_0 ; k es el número de fallas. Las matrices L_i , M_i , son las *direcciones de falla* en los subespacios de entrada y salida respectivamente, las cuales son conocidas y se asumen linealmente independientes. Las matrices restantes, son conocidas de dimensiones apropiadas. Para la generación de residuos, se asume que se cuenta con un estimador de tipo Luenberger

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + B_2 u(t) + D(y(t) - C_2 \hat{x}(t)) \\ \hat{z}(t) &= C_1 \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

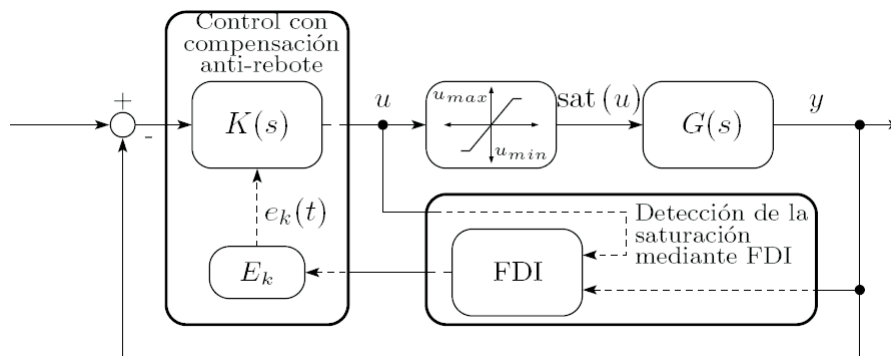


Figura 2. Compensación AW utilizando FDI.

donde $\hat{x} \in \mathfrak{R}^n$ y $\hat{y} \in \mathfrak{R}^q$ son los estados y las salidas estimados, respectivamente, y \mathcal{D} es la ganancia del observador. Los errores de estimación del observador y de predicción de la salida vienen dados por

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ e_z(t) &= z(t) - \hat{z}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

de forma respectiva, con lo que la dinámica del error es (si $M_i = 0$)

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (A - \mathcal{D}C_2)e(t) + B_1w(t) + \sum_{i=1}^k L_i v_i(t) \\ e_z(t) &= C_1 e(t) \end{aligned} \quad (4)$$

de la cual, se desprenden los requisitos que debe satisfacer el filtro: En primer lugar, $(A - \mathcal{D}C_2)$ debe ser asintóticamente estable. En segundo término, se debe minimizar el efecto de las perturbaciones $w(t)$ sobre $e_z(t)$, asignando alguna norma $(2, \infty)$.

Adicional a estos requerimientos, se presenta un problema aún mayor: toda la información de las fallas, se encuentra concentrada en una única señal $e_z(t)$, y ante la presencia de varias fallas es necesario diferenciar cada una de ellas. Para dar solución a este problema, pueden ser empleados varios enfoques, por ejemplo, seleccionar \mathcal{D} de tal forma que se obtenga una matriz dinámica diagonal con los residuos y usar un postfiltro para que los autovalores de $(A - \mathcal{D}C_2)$ tengan parte real negativa [6, 13]; emplear, como se mostrará a continuación, un banco de filtros (multi-filtraje) que asigne a cada uno una falla diferente [14]. De igual manera, para el diseño del filtro, existen condiciones para la detectabilidad y separabilidad de las fallas que deben ser satisfechas [6, 15].

Para el multi-filtraje, asúmase que se cuenta con un banco de filtros dado por

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t) + B_2u(t) + \mathcal{D}_i(y(t) - C_2\hat{x}_i(t)), \\ \hat{z}_i(t) &= C_1\hat{x}_i(t) \\ i &= 1, \dots, k \end{aligned} \quad (5)$$

donde cada $\hat{z}_i(t)$ constituye un estimado de la salida controlada, cada uno obtenido con la ganancia \mathcal{D}_i . Cada filtro es diseñado de tal manera que sea inmune a perturbaciones externas y detecte

sólo una falla. Ahora, los errores de estimación y predicción para el banco de filtros son

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= (A - \mathcal{D}_i C_2)e_i(t) + \mathcal{B}_i \tilde{w}_i(t) + L_i v_i(t), \\ e_{z_i}(t) &= C_1 e_i(t) \end{aligned}, \quad i = 1, \dots, k \quad (6)$$

donde

$$\mathcal{B}_i = [B_1 \quad L_k] \quad \text{y} \quad \tilde{w}_i(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ v_k(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

L_i y $v_i(t)$ constituyen la dirección y el modo de la falla para la cual se diseña el i -ésimo filtro. L_k y $v_k(t)$ contienen las direcciones y los modos restantes. Con estas consideraciones, la síntesis de los filtros FDI viene dada por el siguiente resultado, el cual garantiza filtros estables y la satisfacción de condiciones de desempeño sobre la función

$$G_{z_i \rightarrow e_{\tilde{w}_i}}(s) = C_1 (sI - (A - \mathcal{D}_i C_2))^{-1} \mathcal{B}_i. \quad (8)$$

Proposición 1

Existe un filtro de detección para la i -ésima falla, tal que $(A - \mathcal{D}C_2)$ es asintóticamente estable y $\|G_{z_i \rightarrow e_{\tilde{w}_i}}(s)\|_{\infty} < \gamma$ si y sólo si, existen matrices $P_i = P_i^T > 0 \in \mathfrak{R}^n$ y $W_i \in \mathfrak{R}^{n \times s}$, $v_i(t)$, tal que

$$\begin{bmatrix} A^T P_i - C_2^T W_i^T & P_i \mathcal{B}_i & C_1^T \\ \mathcal{B}_i^T P_i & -\gamma I & 0 \\ C_1 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

En ese caso, la ganancia del estimador está dada por $W_i = P_i \mathcal{D}_i$.

Demostración. Asúmase que (9) es factible y existe solución para la LMI, con el cambio de variable $W_i = P_i \mathcal{D}_i$ se obtiene

$$\begin{bmatrix} (A - \mathcal{D}_i C_2)^T P_i + P_i (A - \mathcal{D}_i C_2) & P_i \mathcal{B}_i & C_1^T \\ \mathcal{B}_i^T P_i & -\gamma I & 0 \\ C_1 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

Entonces, del Lema Real Acotado [16] se tiene que $(A - \mathcal{D}C_2)$ es estable y $\|G_{z_i \rightarrow e_{\tilde{w}_i}}(s)\|_{\infty} < \gamma$, si y sólo si la desigualdad anterior es satisfecha. ■

Aunque los esquemas basados en bancos de filtros son comunes dentro de la literatura del

área, la solución planteada aquí representa una nueva aproximación al problema utilizando nuevos criterios de diseño y mayor flexibilidad en las soluciones obtenidas, evitándose el conservatismo, aunque la solución se obtiene mediante una formulación LMI. La ventaja del método de multi-filtraje es que se diseña un filtro para cada falla en particular, generándose soluciones propias para cada filtro.

Por otro lado, en los procesos técnicos con naturaleza incierta pueden generarse falsas alarmas debido a la presencia de residuos por efecto de incertidumbres y perturbaciones. Para evitar, en lo posible, estos inconvenientes se recurren a la detección robusta fijando umbrales, que en caso que hemos tratado se pueden describir a través de los índices de desempeño en $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ que han sido utilizados [13].

Control Anti-windup

En la literatura existen diferentes técnicas para el diseño de la ganancia de compensación AW, (ver [16, 17] y sus referencias para algunos ejemplos). Todos esos métodos suponen que la salida del actuador es medida, a los fines de la implementación. Además, muchos de los métodos asumen que se conocen los niveles de saturación de los actuadores, lo cual restringe la robustez de la compensación. En este trabajo, para la síntesis de compensación AW, se ha utilizado un método basado en LMI, que exhibe un cierto nivel de robustez, y cuyos detalles pueden ser consultados en [10]. Nótese que, a los efectos de los resultados en este trabajo se busca, además, una implementación de la ganancia de compensación con características de robustez, según el desempeño de los actuadores.

Filtros de detección de saturación

Los filtros de detección de saturación (SDI) son un subconjunto de los presentados en §2, con la diferencia que la falla detectada corresponde a la saturación de los actuadores. Asíma-se que se cuenta con un sistema con saturación, es decir,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 \text{sat}(u(t)), \quad x(0) = x_0 \\ z(t) &= C_1 x(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) \end{aligned} \quad (10)$$

haciendo

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 \text{sat}(u(t)) + B_2 u(t) - B_2 u(t), \\ \text{y con la función } \psi(z) &= \text{sat}(z(t)) - z(t), \quad (16) \text{ se reescribe como} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) + B_2 \psi(u(t)), \quad x(0) = x_0 \\ z(t) &= C_1 x(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Es evidente que (17) constituye un modelo de diagnóstico, en donde los modos de falla es la diferencia entre las señales de control saturadas y sus versiones no saturadas, es decir, la señal necesaria para hacer la compensación AW. Por otro lado, las direcciones de fallas están representadas por la matriz de control B_2 .

Al igual que en los filtros de detección de detección de fallas, el banco de filtros SDI viene dado por

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t) + B_2 u(t) + \mathcal{D}_i (y(t) - C_2 \hat{x}_i(t)), \\ \hat{z}_i(t) &= C_1 \hat{x}_i(t) \\ i &= 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (12)$$

Cuyas dinámicas de error son

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= \mathcal{A}e_i(t) + \mathcal{B}_i \tilde{w}_i(t) + B_2 \psi_i(t), \quad i = 1, \dots, k \\ e_{zi}(t) &= C_1 e_i(t) \end{aligned} \quad (13)$$

con

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_i &= [B_1 \quad B_{20}] \quad \text{y} \quad \tilde{w}_i(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ \psi_0(t) \end{bmatrix}, \\ \mathcal{A} &= A - \mathcal{D}_i C_2 \end{aligned} \quad (14)$$

B_{2i} y $\psi_i(t)$ constituyen la dirección y el modo de la falla para la cual se diseña el i -ésimo filtro. B_{20} y $\psi_0(t)$ contienen las direcciones y los modos restantes. A continuación se presenta el resultado fundamental de esta sección, para obtener las ganancias para lo filtros SDI.

Proposición 2

Existe un filtro de detección para la i -ésima saturación tal que $(A - \mathcal{D}C_2)$ es asintóticamente estable, $\|G_{\tilde{w}_i \rightarrow e_{zi}}(s)\|_\infty < \gamma_i$, con autovalores ubica-

dos a la izquierda de α_i , y sólo si, existe $P_i = P_i^T > 0 \in \mathfrak{R}^n$ y $W_i \in \mathfrak{R}^{n \times s}$, tal que

$$\begin{bmatrix} A^T P_i + P_i A - W_i C_2 - C_2^T W_i^T & P_i \mathcal{B}_i & C_1^T \\ \mathcal{B}_i^T P_i & -y_i I & 0 \\ C_1 & 0 & -y_i I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$A^T P_i + P_i A - W_i C_2 - C_2^T W_i^T + 2\alpha_i P_i < 0, \quad \alpha_i > 0 \quad (16)$$

En ese caso, la ganancia del estimador está dada por $W_i = P_i \mathcal{D}_i$.

Demostración. Asúmase que (21)-(22) es factible y se cuenta con una solución para las LMI, con el cambio de variable $W_i = P_i \mathcal{D}_i$ se obtienen

$$\begin{bmatrix} (A - DC_2)^T P_i + P_i (A - DC_2) & P_i \mathcal{B}_i & C_1^T \\ \mathcal{B}_i^T P_i & -y_i I & 0 \\ C_1 & 0 & -y_i I \end{bmatrix} < 0,$$

$$(A - DC_2)^T P_i + P_i (A - DC_2) + 2\alpha_i P_i < 0, \quad \alpha_i > 0$$

entonces, del Lema Real Acotado se tiene que $(A - DC_2)$ es estable en la región LMI $\mathfrak{R}(\text{Re}(s) < -\alpha_i, \alpha_i > 0)$ y $\|G_{\tilde{w}_i \rightarrow e_{zi}}(s)\|_\infty < y_i$, si y sólo si las desigualdades anteriores son satisfechas [18]. ■

Comentario 1. La adición de la LMI (16) es importante ya que la misma permite garantizar la ubicación de los autovalores de $(A - DC_2)$ a la derecha de un valor determinado, a los fines de dotar al filtro estimador de una velocidad de respuesta superior a la del sistema en lazo cerrado (sistema controlado). Esto se debe a que los residuos de estos filtros van a ser utilizados para hacer una realimentación del controlador mediante la compensación, sus autovalores deben ser lo suficientemente rápidos como para que el estimado de $\psi(t)$ sea apropiado.

Ejemplo numérico

Para el conjunto de ecuaciones, correspondiente al modelo linealizado del plano vertical de un avión [20]:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1132 & 0 & -1 \\ 0 & -0.0538 & -0.1712 & 0 & 0.0705 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.0485 & 0 & -0.8556 & -1.013 \\ 0 & -0.2909 & 0 & 1.0532 & -0.6859 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.12 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4.419 & 0 & -1.665 \\ 1.575 & 0 & -0.0732 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + [0]u(t)$$

Se desea diseñar e implementar una ganancia de compensación AW. En primer lugar, se sintetiza un controlador, sin compensación. Acá se ha diseñado un controlador óptimo robusto en \mathcal{H}_∞ basado en LMI. La Figura 3 presenta los resultados de la simulación del sistema en lazo cerrado con el controlador obtenido, donde claramente se observa la estabilidad del sistema. En adición se están logrando propiedades de seguimiento de trayectorias.

Para la saturación, se asume que dos de los actuadores (1 y 3) tienen límite, es decir, entran en saturación en $U_0 = \pm[5 \ 35]$. La Figura 4 presenta los resultados de la simulación, bajo condiciones de saturación de los actuadores. Claramente se evidencia que el sistema al introducir los cambios de referencia se hace inestable, esto se debe a que éstos últimos son lo suficientemente altos, como para llevar los actuadores a su límite físico. Para este problema se hace evidente, que es necesario aplicar algún esquema de corrección cuando los actuadores entran en saturación.

Demostrada la necesidad de utilizar la compensación AW, se procede con el diseño de la misma. Para ello, se define el conjunto inicial [10]:

$$E_o = \left\{ \begin{bmatrix} 40 \\ 27.778 \\ 5 \\ 2 \\ 2.778 \\ 0_{(11 \times 1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 70 \\ 30 \\ 8 \\ 4 \\ 3 \\ 0_{(11 \times 1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 120 \\ 35 \\ 12 \\ 8 \\ 3.5 \\ 0_{(11 \times 1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 150 \\ 50 \\ 15 \\ 15 \\ 4 \\ 0_{(11 \times 1)} \end{bmatrix} \right\}$$

Entonces, la ganancia de compensación es

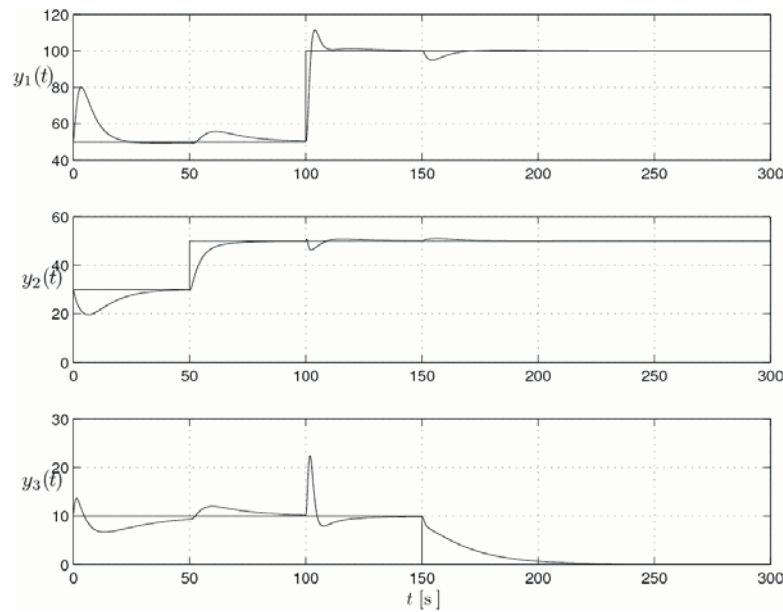


Figura 3. Salidas del sistema en lazo cerrado.

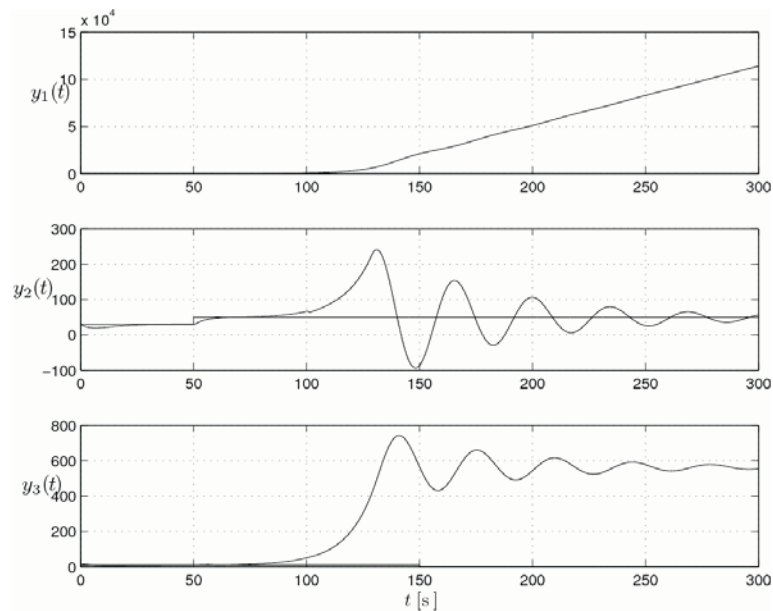


Figura 4. Salidas del sistema, saturado sin compensación.

$$E_c = \begin{bmatrix} -71509 & -0.55025 & 92366 \\ -3.1085 & 21338 & 52673 \\ 80.074 & 8.4381 & 33.759 \\ -11081 & -12156 & -33.187 \\ -87.937 & -0.13526 & -11873 \\ -88.407 & 12082 & -7.8538 \\ 129.32 & 38.671 & 30.198 \\ -59224 & -1956 & -6.5699 \end{bmatrix},$$

la cual garantiza un factor de escala $\beta = 19439$ para el conjunto de condiciones iniciales Ξ_0 .

Ahora, para hacer la implementación de la ganancia obtenida, se procede a calcular los filtros SDI. Las matrices de perturbación extendida y de direcciones de falla son:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.001 & -16650 \\ 0 & -0.0732 \end{bmatrix}, \quad B_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.12 \\ 0 \\ 4.419 \\ 15750 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & -0.12 \\ 0 & 0 \\ -0.001 & 4.419 \\ 0 & 1575 \end{bmatrix}, \quad B_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1650 \\ -0.0732 \end{bmatrix}$$

De la Proposición 2, haciendo $\gamma_i = \gamma_2 = 1 \times 10^{-3}$ y $\alpha \approx 230$, las ganancias para los filtros SDI son:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 15609 \times 10^3 & -23257 \times 10^2 & -83200 \times 10^2 \\ -5.0825 \times 10^1 & 8.6848 \times 10^2 & -3.5510 \times 10^2 \\ -6.2811 \times 10^1 & 1.1119 \times 10^2 & 12488 \times 10^4 \\ -2.3035 \times 10^5 & 4.1712 \times 10^5 & 4.6486 \times 10^7 \\ -4.5851 \times 10^5 & 5.0482 \times 10^5 & 1.9559 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 13572 \times 10^3 & -3.3534 \times 10^1 & 9.4477 \times 10^2 \\ 6.0861 \times 10^3 & 8.9207 \times 10^4 & -9.6164 \times 10^3 \\ -6.7052 \times 10^3 & 3.1076 \times 10^2 & 1.5134 \times 10^4 \\ -3.1658 \times 10^6 & -3.1402 \times 10^6 & 6.9324 \times 10^6 \\ -6.1354 \times 10^6 & -8.8353 \times 10^5 & 1.2369 \times 10^7 \end{bmatrix}$$

La Figura 5, presenta las salidas del sistema, el cual cuenta con un mecanismo de compensación. En este caso, el sistema a pesar de la

existencia de la saturación de sus actuadores, se mantiene estable, con una ligera degradación en el desempeño.

Los resultados presentados se han logrado a través de la estimación de las señales necesarias para hacer la compensación. En consecuencia, este método de implementación permite variabilidad, dentro de un cierto rango, en los límites de acción de los actuadores, debido a que los filtros pueden detectar esos cambios.

Conclusiones

En esta contribución, se ha presentado un nuevo esquema para hacer la implementación de la compensación *anti-windup*. La técnica está basada en el uso de un banco de filtros de diagnóstico de fallas (multifiltrado), para obtener un estimado de la señal residual, que es la diferencia entre la salida del control y la entrada a la planta. Esta técnica resuelve el problema en los casos donde se tiene alguna dificultad para efectuar la medición real de la salida de los actuadores, o el uso de modelos aproximados. El banco de filtros ha sido obtenido por medio de la solución de un problema de optimización convexa en términos de desigualdades lineales matriciales. El esquema de implementación presentado muestra grandes ventajas, pues es robusto frente a cam-

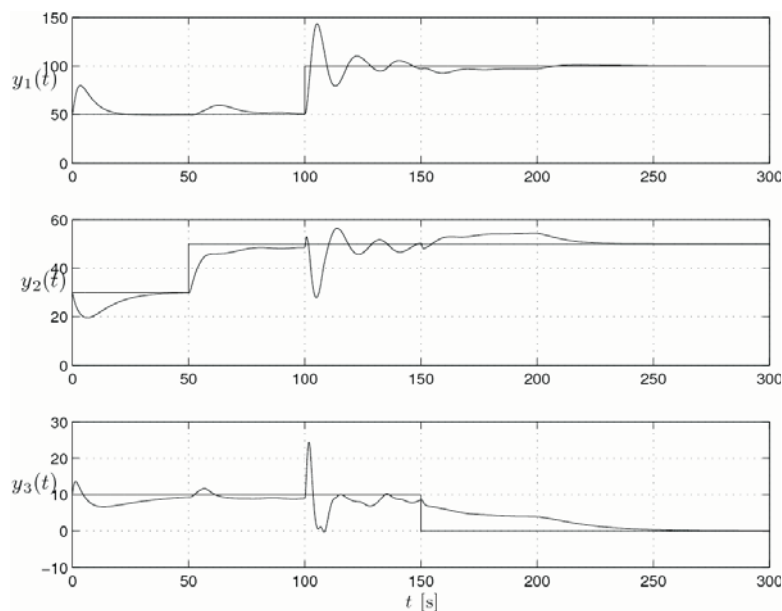


Figura 5. Salidas del sistema, saturado con compensación vía SDI.

bios de los elementos de actuación. La construcción del banco de filtros permite reducir la conservatividad en las soluciones, pues al tener condiciones de diseño diferentes para cada filtro, se está aumentando el grado de libertad del problema.

El uso de las LMI permite suficiente flexibilidad en el diseño, ya que es posible adicionar tantas restricciones como sea necesario, incluso permitiendo aplicar criterios de diseño multiobjetivos; esto es, diferentes normas en diferentes canales del diseño.

La verificación del método se ha presentado mediante un ejemplo numérico completo, que incluye el diseño del controlador, la síntesis de la ganancia de compensación y, finalmente, la síntesis de los filtros para el diagnóstico y separación de las saturaciones. Los resultados han sido evaluados mediante simulaciones.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al FONACIT bajo contrato 2005000170, y al CDCHT-ULA bajo contrato I-1103-08-02-A, por su colaboración y financiamiento de esta investigación.

Referencias Bibliográficas

- Patton, R.J. (1997). Fault-tolerant control systems: The 1997 situation. In: Proc. of The 3th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'97). Hull University. pp. 1033-1054.
- Blanke, M., M. Staroswiecki y N.E. Wu (2001). Concepts and methods in fault-tolerant control. In: Proc. of the American Control Conference. Vol. 4. Arlington, VA, USA. pp. 2606-2620.
- Kothare, M.V., P.J. Campo, M. Morari y C.N. Nett (1994). A unified framework for the study of anti-windup designs. Automatica 30(12), 1869-1883.
- Beard, R.V. (1971). Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Jones, H.L. (1973). Failure detection in linear systems. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Ríos-Bolívar, A. (2001). Sur la Synthèse de Filtres de Detection de Défaillances. PhD thesis. Université Paul Sabatier. Toulouse.
- Ríos-Bolívar, A. y G. García (2001). Robust Filters for fault detection and diagnosis: An \mathcal{H}_∞ optimization approach. In: 6th European Control Conference. Porto, Portugal. pp. 132-137.
- Niemann, H.H. y J. Stoustrup (1998). Multiobjective design techniques applied to fault detection and isolation. In: Proc. of the 1998 American control Conference. Philadelphia. pp. 2022-2026.
- Bernstein, D.S. y A.N. Michel (1995). A chronological bibliography on saturating actuators. Int. Journ. of Robust and Nonlinear Control?5(5), 375-380.
- Gomes da Silva Jr., J.M. y S. Tarbouriech (2005). Anti-windup design with guaranteed regions of stability: An LMI approach. IEEE Tran. on Autom. Control 50(1), 106-111.
- Åström, K.J. y L. Rundqwist (1989). Integrator windup and how to avoid it. In: Proc. of the American Control Conference. pp. 1693-1698.
- Ríos-Bolívar, A. y W. Acuña (2006). FTC usando FDI robusta y compensación AW. In: Proc. of the XII Latin-American Congress on Automatic Control. Vol. 1. Salvador, Brazil. pp. 192-197.
- Ríos-Bolívar, A. y G. García (2005). Robust filters for fault detection: An LMI control setting Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia 28(3). pp. 189-199.
- Ríos-Bolívar, A y W. Acuña (2007). Implementation of AW Compensation Based-on Multifiltering for Fault Diagnosis. In: 15th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation.
- Massoumnia, M.A. (1986). A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. IEEE Trans. On Autom. Control 31(9), 839-846.

16. Grimm, G., I. Postlethwaite, A.R. Teel, M.C. Turner y L. Zaccarian (2003). Anti windup for Stable Linear Systems With Input Saturation: An LMI-Based Synthesis. IEEE Tran. on Autom. Control 48(9), 1509-1525.
17. Wu, F. y B. Lu (2004). Anti-windup control design for exponentially unstable LTI systems with actuator saturation. Systems & Control Letters, 52, 305-322.
18. Chilali, M. y P. Gahinet (1996). \mathcal{H}_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach. IEEE Tran. Aut. Control 41(3), 358-367.
19. He, Y., Wu, M. and She, J., Improved Bounded-Real-Lemma Representation and H_∞ Control of Systems With Polytopic Uncertainties, IEEE Trans. on Autom. Control, Vol. 52, No. 7, pp. 380-383, 2005.
20. Maciejowski, J.M. (1989). Multivariable Feedback Design. Addison Wesley.

Recibido el 14 de Mayo de 2007

En forma revisada el 21 de Julio de 2008