

# SISTEMA DE CONTROL EN RED (SCR) BASADO EN PREDICTOR-OBSERVADOR. ESTUDIO COMPARATIVO CON OTRAS PROPUESTAS DE SCR

A. Cuenca, P. García, P. Albertos  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial,  
Universitat Politècnica de València  
{acuena, pggil, pedro}@isa.upv.es

## Resumen

*Este trabajo trata de mostrar los beneficios que aporta la consideración de una estructura de control basada en el uso de Predictor-Observador (PO) para un Sistema de Control en Red (SCR) cuando en éste aparecen problemas típicos como retardos variantes en el tiempo, pérdida de paquetes e incluso desorden de paquetes. Para ello se compara con otras propuestas similares de SCR publicadas en revistas de alto impacto.*

**Palabras Clave:** Sistemas de Control en Red, Predictor-Observador, Sistemas Multifrecuencia.

## 1 INTRODUCCIÓN

En sistemas de control convencional [1] el controlador recibe una señal de entrada uniforme y no retrasada. A partir de esta señal, y teniendo en cuenta fundamentalmente requerimientos de control, el controlador genera una señal de control uniforme. Sin embargo, en SCR o en Redes de Sensores (RS) [2] aparecen ciertos problemas que se deben considerar adicionalmente al diseñar el controlador como, por ejemplo, retardos variantes en el tiempo, pérdida de datos y desorden de paquetes. Estos problemas pueden surgir como consecuencia de la compartición del medio de comunicación entre los diferentes dispositivos del SCR (sensor, controlador, actuador). En este contexto, el controlador recibe una señal no uniforme y retrasada que, si no es tratada, puede degradar la calidad de la señal de control y, por tanto, el rendimiento del sistema. Por todo ello, para diseñar el SCR no solo se ha de afrontar requerimientos de control (caso convencional) sino también los problemas anteriormente enumerados. En esta línea, algunas propuestas de los últimos años giran en torno a enfoques  $H_\infty$  [3-7], metodologías fuzzy [8], planificación de ganancia [9, 10], incorporando también predictores adaptativos [11], estrategias multifrecuencia [12], transmisión basada

en paquetes incluyendo varias señales de control [13, 14], controladores de realimentación con retraso [15], etc.

Por su parte, en este artículo se plantea un enfoque basado en el uso de PO (previamente presentado en [16]) y, lo que es más novedoso, se compara a otras propuestas similares expuestas en revistas de alto impacto en aras de mostrar los beneficios que aporta a nivel de rendimiento de control e incluso de robustez.

En este trabajo se considera una red con posibilidad de pérdida de datos, por lo que para construir la señal de control se necesita estimaciones de la planta remota. Esto se puede hacer de diferentes maneras [17-22], siendo bastante habitual el uso de filtros de Kalman. El problema de estos filtros es la cantidad de cálculos complejos (matriciales) que incorpora, incrementando la carga computacional del sistema. Sin embargo, la propuesta del SCR basado en PO, haciendo uso de operaciones de cálculo básicas, es capaz de diseñar el controlador considerando un muestreo uniforme (gracias a la inclusión del observador) y de mantener el retardo inducido por la red fuera de la etapa de diseño (gracias al uso de la etapa de predicción).

Cuando el retardo de red variante en el tiempo es mucho más largo que el periodo de muestreo puede surgir el fenómeno del desorden de paquetes. Ello suele implicar cierta degradación de las prestaciones del sistema, ya que para generar la señal de control es probable que se use información no actualizada. Algunos autores le han dado solución desde el control robusto [23] y el predictivo [24]. En la propuesta del SCR basado en PO, gracias a la consideración del observador, se adopta una solución muy sencilla a este problema basada en una simple comparación realizada en la etapa de Selección de Medidas (SM). Así, cuando una medida llega, ésta se toma si es la más nueva de las ya recibidas. De lo contrario se descarta y debe ser observada (dándole un tratamiento similar al de pérdida de dato).

Este trabajo se organiza como sigue: en la sección 2 se resume la propuesta de SCR basada en PO. Después, en las secciones 3, 4 y 5 se compara respectivamente con tres trabajos distintos mostrando que siempre la propuesta basada en PO obtiene beneficios a nivel de respuesta de control e incluso robustez. Finalmente la sección 6 enumera las conclusiones más relevantes del trabajo.

## 2 PROPUESTA DE SCR BASADA EN PO

### 2.1 ESCENARIO

Se parte de la configuración de SCR mostrada en la Figura 1, donde aparece el canal de realimentación a través de la red y el controlador colocado junto al actuador. Todos los dispositivos de red son guiados por tiempos. El controlador tiene cuatro etapas: selección de medidas (SM) (para tratar el desorden de paquetes), estimación del estado (para tratar las pérdidas de datos), predicción del estado (para tratar los retardos de red) y generación de la señal de control (en este caso, por realimentación del estado). La planta es modelada según el siguiente sistema discreto lineal

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad (1)$$

$$y_k = Cx_{k-d_k^{sc}}, \quad (2)$$

donde  $x_k \in \mathfrak{R}^n$  es el vector de estado,  $u_k \in \mathfrak{R}^p$  es la entrada de control,  $y_k \in \mathfrak{R}^q$  es la salida.  $A, B, C$ , son matrices con dimensiones apropiadas, y  $d_k^{sc} \in \mathbb{N}$  es el retardo inducido por la red desde sensor a controlador, siendo variante en el tiempo. El retardo de cómputo, de existir, se suma al anterior.  $T$  se asume como el periodo de muestreo uniforme de tal manera que  $t_k = kT$  (donde  $k \in \mathbb{N}$  y  $T > 0$ ).

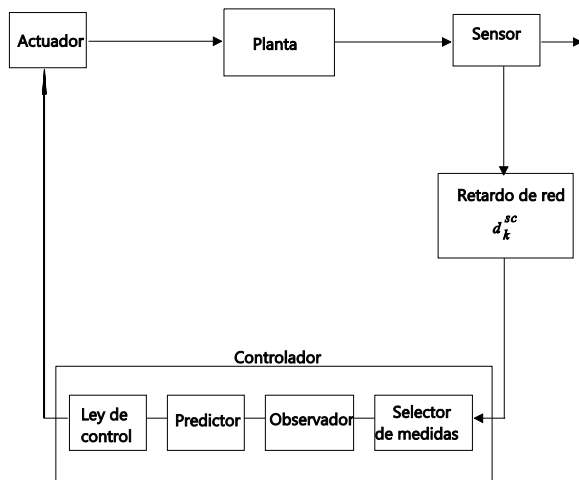


Figura 1: Configuración de SCR.

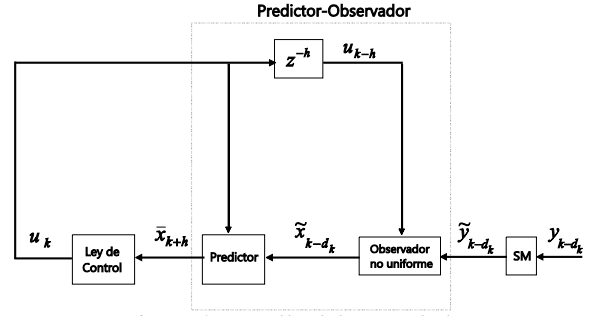


Figura 2: Detalle del controlador.

El valor actual de  $d_k^{sc}$  se puede obtener a partir del uso de protocolos de sincronización o técnicas de time-stamping. Conocer este valor es determinante para llevar a cabo las etapas de selección de medidas y estimación. Sin embargo, para la etapa de predicción, puesto que considera  $h$  pasos adelante en la predicción (siendo  $h \in \mathbb{N}^+$  un valor invariante en el tiempo), es más interesante conocer cierta información probabilística acerca  $d_k^{sc}$  (y no tanto el valor actual) con el fin de poder establecer cotas inferior  $d_1$  y superior  $d_2$  para dicho retardo (esto es,  $d_1 \leq d_k^{sc} \leq d_2$ ) dentro de las que se defina  $h$ .

Si no surge confusión, en adelante  $d_k^{sc}$  se denotará de manera abreviada como  $d_k$ .

A continuación se resume cada una de las partes integrantes del controlador, las cuales quedan detalladas en Figura 2. Para más detalles consúltese [16].

### 2.2 LEY DE CONTROL POR REALIMENTACIÓN DEL ESTADO

Como se comentó anteriormente, se considerará un controlador por realimentación del estado, siendo su ley de control

$$u_k = -Kx_{k+d_k}, \quad (3)$$

que proporciona el comportamiento requerido para el sistema en bucle cerrado (1)-(3), caracterizado por la matriz del sistema  $(A-BK)$ . No obstante, surgen varios problemas cuando se vaya a general esta señal de control:

- Debido al retraso de red, el estado  $x_{k+d_k}$  no se conocerá al generar  $u_k$ . Por ello, necesitaremos un predictor.
- Debido a la pérdida de paquetes y retrasos variantes en el tiempo, la salida  $\tilde{y}_k$  (véase nomenclatura de Figura 2) no estará disponible

en cada  $k$  instante de muestreo. Por tanto, incluiremos un observador no uniforme.

- Además, como los retardos pueden ser mayores que el periodo de muestreo  $T$ , los paquetes pueden quedar desordenados. Este problema se resolverá utilizando un Selector de Medidas (SM) que, gracias al posterior uso del observador, ordenará los paquetes recibidos por el controlador basándose en sencillas comparaciones.

### 2.3 SELECTOR DE MEDIDAS

Partiendo del uso de información de time-stamping, el modo de funcionamiento de SM queda como sigue:

- El sensor añade una marca de tiempo al paquete enviado, digamos  $ts(y_k)$ .
- Cuando la medida disponible  $\tilde{y}_k$  (nomenclatura a definir en (4)) llega a SM (en el instante  $k$ ), ésta se tomará por el controlador si es más nueva que la que se tomó anteriormente (en el instante  $k_{prev}$ ), esto es,  $ts(y_k) \equiv ts(\tilde{y}_k) > ts(\tilde{y}_{k_{prev}})$ .
- De lo contrario, la medida recibida se descarta y se trata como un paquete perdido (se deberá estimar).

### 2.4 OBSERVADOR NO UNIFORME

Para modelar la pérdida de paquetes en este trabajo se utiliza la siguiente expresión

$$\tilde{y}_k = \theta_k y_k, \quad (4)$$

donde  $\theta_k$  toma valores  $\{0,1\}$  en función de si se considera ( $\theta_k=1$ ) o no ( $\theta_k=0$ ) la muestra. Como se ha comentado, debido a los retrasos variantes y la pérdida de paquetes, el observador recibe una señal no uniforme (escasa)  $\tilde{y}_k$  que ha de reconstruir en otra uniforme (a periodo  $T$ ). Implementando técnicas de time-stamping, el número de periodos a  $T$  entre dos medidas consecutivas disponibles (la previa, tomada en el instante  $k_{prev}$ , y la actual, tomada en  $k$ ) se puede determinar y definir como  $N_k$

$$1 \leq N_k \leq \bar{N}, \quad (5)$$

donde  $\bar{N} = \bar{N} - 1$  es la cota superior de paquetes no disponibles consecutivos.

A partir de esta cota  $N_k$  y de dos señales retrasadas (la de salida no uniforme  $\tilde{y}_{k-d_k}$  y la de control  $u_{k-h}$ ; véase Figura 2), el observador generará una estimación del estado de manera uniforme a periodo  $T$ . Para ello se usará la siguiente ley de estimación perteneciente a un observador no uniforme

(concretamente, multifrecuencia)

$$\tilde{x}_{k-d_k+1} = A\tilde{x}_{k-d_k} + Bu_{k-h} + \tilde{L}(\tilde{y}_{k-d_k} - C\tilde{x}_{k-d_k}), \quad (6)$$

donde  $\tilde{L}$  es elegido tal que

$$A^{N_k} - \tilde{L}CA^{N_k-1}, \quad (7)$$

es Schur. Nota que  $\tilde{L}$  será nulo si no hay medida de la salida.

### 2.5 ETAPA DE PREDICCIÓN: CONDICIÓN DE ESTABILIDAD DEPENDIENTE DEL RETRASO VARIANTE EN EL TIEMPO

Considerando el modelo del proceso (1)-(2), la ley de control de realimentación del estado queda

$$u_k = -K\bar{x}_{k+h}, \quad (8)$$

donde  $K \in \mathfrak{R}^{m \times n}$  y  $\bar{x}_{k+h}$  es la siguiente ley de predicción del estado con  $h$  pasos hacia delante

$$\bar{x}_{k+h} = A^h \tilde{x}_{k-d_k} + A^{h-1}Bu_{k-h} + \dots + Bu_{k-1}, \quad (9)$$

siendo  $\tilde{x}_{k-d_k}$  la estimación del estado retrasado y  $u_{k-i}$  ( $i=1, \dots, h$ ) las acciones de control pasadas.

Tratando  $\Delta h = |h - d_k|$  como una incertidumbre del retraso, se puede proponer una condición de estabilidad suficiente para asegurar un máximo  $\Delta h$ . Así, partiendo de (1)-(2), (8)-(9), el estado del sistema en bucle cerrado queda

$$x_{k+1} = (A - BK)x_k - BKA^h \tilde{x}_{k-d_k} + BKA^h x_{k-h}, \quad (10)$$

entonces, (10) es asintóticamente estable para cualquier  $d_1 \leq d_k \leq d_2$ , si existe matrices definidas positivas  $P$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Z_1$  y  $Z_2$ , y matrices  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$  y  $Y_2$ , tal que la siguiente LMI es factible

$$\left( \begin{array}{cccccc} \Gamma & -Y_1 & -Y_2 & M^T P & d_2(M-I)^T Z_1 & h(M-I)^T Z_2 \\ * & -Q_1 & 0 & A_1^T P & d_2 A_1^T Z_1 & h A_1^T Z_2 \\ * & * & -Q_2 & -A_1^T P & -d_2 A_1^T Z_1 & -h A_1^T Z_2 \\ * & * & * & -P & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -d_2 Z_1 & 0 \\ * & * & * & * & * & -h Z_2 \end{array} \right) < 0, \quad (11)$$

$$\left( \begin{array}{cc} X_1 & Y_1 \\ Y_1^T & Z_1 \end{array} \right) \geq 0, \quad \left( \begin{array}{cc} X_2 & Y_2 \\ Y_2^T & Z_2 \end{array} \right) \geq 0,$$

donde  $M := (A - BK)$ ,  $A_1 := BKA^h$  y  $\Gamma := -P + d_2 X_1 + hX_2 + Y_1 + Y_1^T + Y_2 + Y_2^T + (d_2 - d_1 + 1)Q_1 + Q_2$ . Como es conocido en las expresiones LMI, "\*" representa un término inducido por simetría. El superíndice "T" denota matriz transpuesta.

### 3 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN PLANIFICADOR DE GANANCIA

Esta comparativa se hace para el trabajo presentado en [10] donde se propone un enfoque de planificación de ganancia para afrontar los retardos variantes en el tiempo inducidos por la red. En este trabajo el controlador es un PID multifrecuencia y no se contempla pérdida de datos.

Haciendo uso del ejemplo expuesto en [10] donde en una de las simulaciones se utiliza una multiplicidad (relación de periodos de medida y control)  $N=2$ , un periodo de control  $T=0.625s$  (por lo que el periodo de medida es  $NT=1.25s$ ) y un retardo fijo  $d_k=1.24s$  (es decir, casi  $NT$ ); este enfoque no permite retardos mayores de  $NT$ , se compara con el enfoque de SCR basado en PO descrito en la sección 2 considerando el mismo retardo. Los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5, observándose que en el caso del SCR basado en PO aparece una clara reducción del tiempo de establecimiento (de aprox. el 70%), aunque a costa de un mínimo aumento de la sobreoscilación (de aprox. el 2%). Todo ello teniendo en cuenta una señal de control que, aunque es un poco más enérgica en las primeras iteraciones, luego tiende a ser muy similar.

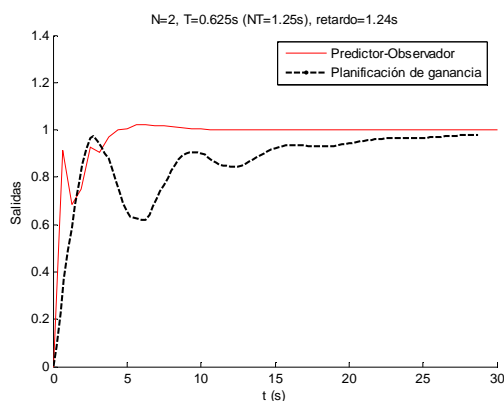


Figura 4: Salidas comparativa rendimiento.

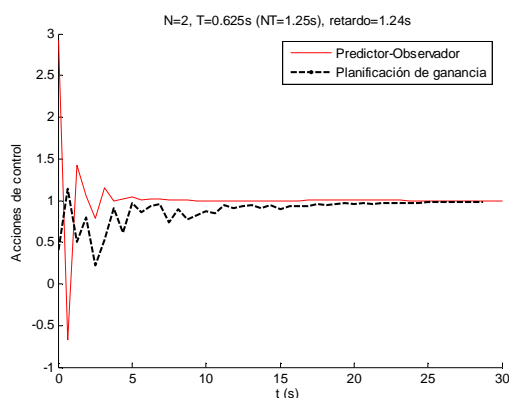


Figura 5: Acc. de control comparativa rendimiento.

Por otro lado, para ver la robustez de las propuestas a nivel de simulación, se varía exageradamente la ganancia del proceso real. Así, siendo el proceso real  $G_p(s)$ , el modelo del mismo queda como  $G_m(s)$ :

$$G_p(s) = \frac{7}{(s+1)(s+4)}; G_m(s) = \frac{4}{(s+1)(s+4)} \quad (12)$$

Las salidas y acciones de control se representan en las Figuras 6 y 7, observándose que la propuesta de [10] es menos robusta que la basada en PO, ya que la salida de la primera se hace inestable mientras que la de la segunda es capaz de seguir la referencia escalón unitario, aunque experimenta un aumento importante de la sobreoscilación (pasa del 2% al 60%) y del tiempo de establecimiento (pasa de 10s a 15s) con respecto a lo obtenido en la salida de la Figura 4.

A parte de la comparativa expuesta, este enfoque basado en PO supone ciertas mejoras con respecto al presentado en [10] ya que permite la consideración de cualquier tipo de retraso (en concreto, mayores a  $NT$ ) y de patrones irregulares de medida (por pérdida de datos).

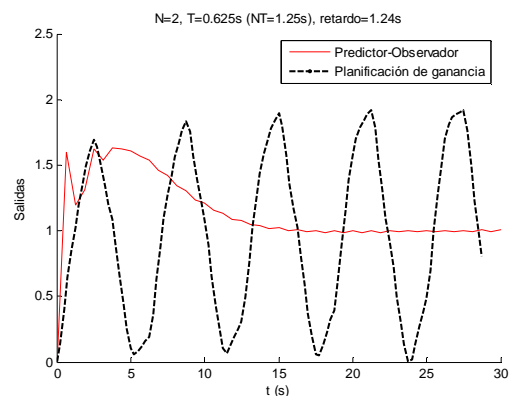


Figura 6: Salidas comparativa robustez.

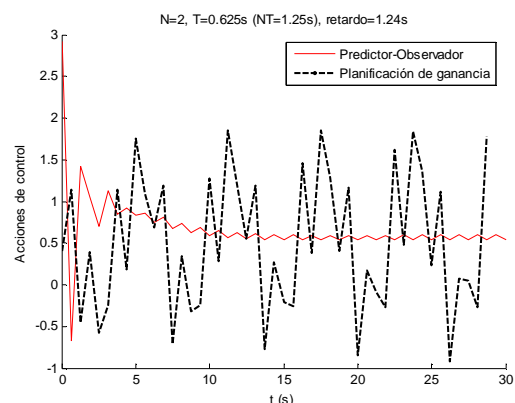


Figura 7: Acciones de control comparativa robustez.

#### 4 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN CONTROLADOR ESTABILIZANTE ANTE PÉRDIDAS ACOTADAS

En esta sección se compara la propuesta de SCR basada en PO con la expuesta en [25] donde se propone un controlador de realimentación del estado diseñado para ser estable ante pérdida acotada de paquetes y retardos fijos en el SCR. Por tanto, podemos compararlo con la propuesta de SCR basado en PO ya que ésta incluye retardos que pueden incluso ser variantes.

La comparación se hará a partir de un ejemplo que aparece en [25] y permitirá mostrar que la propuesta basada en PO obtiene mejor rendimiento de control (partiendo de una señal de control de magnitud similar) cuando se considera retardos fijos inducidos por la red (pudiendo ser iguales o mayores al periodo de muestreo) y pérdida arbitraria pero acotada de paquetes. Además, se mostrará la versatilidad del diseño basado en PO ya que se verá cómo éste es robusto ante eventuales cambios en el retardo de red. Sin embargo en [25], si el retardo cambia, se necesita rediseñar la  $K$  del controlador de realimentación.

El ejemplo considera el siguiente sistema continuo:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -0.5 \\ 1 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (13)$$

Se escoge un periodo de muestreo  $T=0.5s$  y una cota máxima de pérdidas  $\bar{N} = 2$  (usaremos la nomenclatura de nuestro trabajo). El retardo de red será constante y unitario ( $d_k=1$ ). La propuesta de [25] obtiene para este caso esta ley de control de realimentación del estado:

$$u = [-0.0109 \quad -0.0074 \quad -0.7176]x \quad (14)$$

Para nuestra propuesta, situando los polos continuos en  $s=[-1.1 \quad -1.0 \quad -0.9]$ , elegimos la siguiente ganancia de realimentación:

$$K = [-0.2549 \quad -0.1274 \quad 1.465] \quad (15)$$

y, situando los polos discretos en  $z=[0.501 \quad 0.502 \quad 0.503]$ , elegimos la siguiente ganancia del observador monofrecuencia (que es similar al descrito en (6) pero considerando muestreo uniforme)

$$L = [0.6888 \quad 0.4745 \quad -2.0958] \quad (16)$$

La ganancia del observador no uniforme  $\tilde{L}$  se obtendrá en función de la multiplicidad  $N_k$  (número

de pérdidas entre dos muestras efectivas) tras ubicar los polos en  $z^{N_k} = [0.501^{N_k} \quad 0.502^{N_k} \quad 0.503^{N_k}]$ .

La simulación del sistema de control en lazo cerrado para ambas propuestas se muestra en la Figura 8, donde los círculos en el eje temporal marcan las muestras que no se pierden. Se observa claramente una mayor rapidez en alcanzar el permanente para la propuesta de SCR basada en PO (tiempo de establecimiento de hasta un 50% menor). La Figura 9 muestra que la mejora en el rendimiento del sistema se logra pese a generar unas acciones de control de magnitud similar a las de la propuesta de [25], si bien son un poco más enérgicas en las primeras iteraciones. Obsérvese en esta figura la ventaja de incluir un PO en el SCR, ya que la señal de control dispone de un valor no nulo ya desde el primer instante de tiempo.

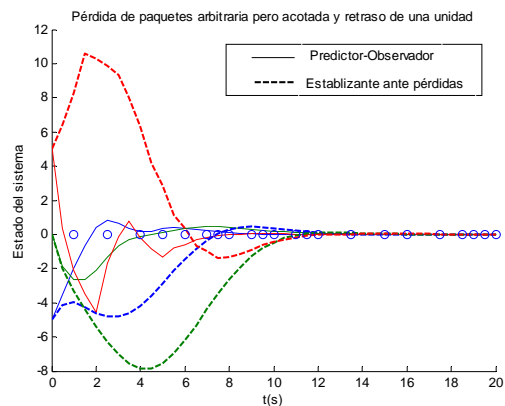


Figura 8: Estado comparativa rendimiento.

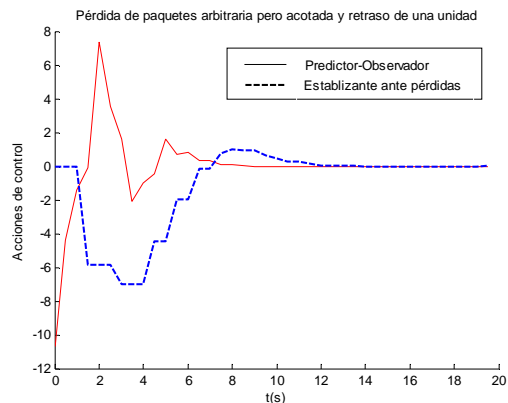


Figura 9: Acc. de control comparativa rendimiento.

Por último, si por algún motivo el SCR incrementara eventualmente el retardo, pasando por ejemplo a ser de dos unidades del periodo de muestreo ( $d_k=2$ ), la propuesta basada en PO permite mantener la estabilidad del sistema, mientras que la propuesta de [25] hace que la salida se haga inestable (ver Figura 10). Esto se debe a que la propuesta de [25] necesita recalcular una nueva ley de control teniendo en

cuenta este nuevo valor del retardo, lo que la hace menos versátil y robusta frente a la nuestra.

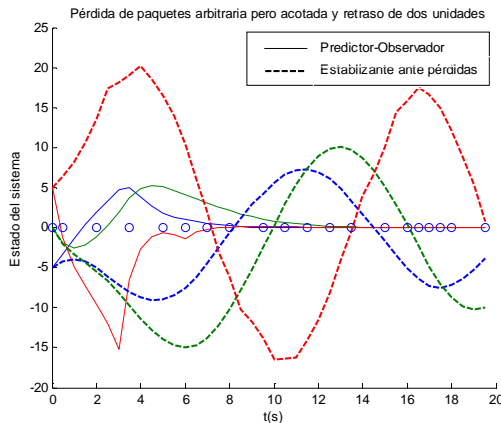


Figura 10: Estado comparativa robustez.

## 5 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN PAQUETES

La última comparativa es con un trabajo presentado en [14] en el que se diseña un controlador con una gama de subcontroladores a utilizar de manera conmutada en función del retardo existente en el SCR. Estos subcontroladores se diseñan teniendo en cuenta las pérdidas aleatorias pero acotadas y el máximo retardo que se producirá en el SCR, y se envían en un único paquete hacia el actuador.

En la comparativa se mostrará que nuestra propuesta basada en PO permite mejorar sensiblemente el rendimiento de control cuando se considera retardos variantes (pudiendo ser iguales o mayores al periodo de muestreo) y pérdida arbitraria pero acotada de paquetes. Es necesario hacer hincapié en que uno de los aspectos que destaca el trabajo desarrollado en [14] es que se trata de una propuesta basada en paquetes (es decir, se aprovecha cada envío del controlador hacia el actuador para pasar un vector de acciones de control a partir de las que posteriormente realizar la conmutación adecuada) y que eso mejora las propuestas publicadas anteriormente por otros autores (por ejemplo, se cita el trabajo de [25]) en las que no se implementa esa estrategia de control, si no que se usa controladores fijos ante cualquier condición de red. Pues bien, nuestra propuesta basada en PO considera también un esquema fijo y, sin embargo, puede llegar a obtener prestaciones ligeramente mejores que las logradas en [14].

El ejemplo a utilizar es el mismo que en la sección anterior pero ahora  $T=0.1s$ ,  $\bar{N}=3$  (máximo 3 pérdidas consecutivas),  $d_k=6$  (retardo máximo de red es 0.6s). Es interesante hacer notar que con esta selección de retrasos y periodo de muestreo se puede dar el efecto del desorden de paquetes. Por tanto, se

necesita previamente de una ordenación de las muestras para descartar las que llegan desordenadas al controlador (aspecto recogido en nuestra propuesta). Por tanto, aquí para definir el patrón de muestras perdidas lo que realmente se hace es llevar a cabo esta ordenación y luego ver que efectivamente nunca hay más de 3 paquetes perdidos consecutivos. Esto ha sucedido en la gran mayoría de las simulaciones realizadas dados los parámetros del ejemplo. Las simulaciones que no lo cumplían se han desechado.

En [14] el retardo total inducido por la red se mide sumando las pérdidas acumuladas y esto hace considerar hasta 6 niveles de retardo (de 0s a 0.9s, en tramos de 0.15s). Así, las  $K$  diseñadas son:

$$\begin{aligned} K(0) &= [-0.0046 \ 0.0171 \ -1.7087]; \\ K(1) &= [-0.0833 \ -0.0320 \ -1.4323]; \\ K(2) &= [0.1689 \ 0.0245 \ -1.3254]; \\ K(3) &= [0.0054 \ 0.0020 \ -1.0724]; \\ K(4) &= [-0.0003 \ -0.0001 \ -1.0098]; \\ K(5) &= [-0.0002 \ -0.0001 \ -1.0127]; \end{aligned} \quad (17)$$

Para nuestra propuesta, tras situar los polos continuos en  $s=[-0.91 \ -0.89 \ -0.88]$ , elegimos la siguiente ganancia de realimentación fija

$$K = [-0.222 \ -0.108 \ 1.591] \quad (18)$$

y, tras situar los polos discretos en  $z=[0.89 \ 0.895 \ 0.9]$ , elegimos la siguiente ganancia del observador monofrecuencia (que es similar al descrito en (6) pero considerando muestreo uniforme)

$$L = [0.13 \ 0.092 \ -0.39] \quad (19)$$

La ganancia del observador no uniforme  $\tilde{L}$  se obtendrá en función de la multiplicidad  $N_k$  (número de pérdidas entre dos muestras efectivas) tras ubicar los polos en  $z^{N_k} = [0.89^{N_k} \ 0.895^{N_k} \ 0.9^{N_k}]$ .

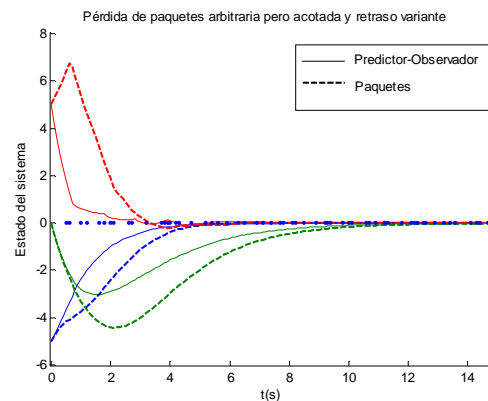


Figura 11: Estado comparativa rendimiento.

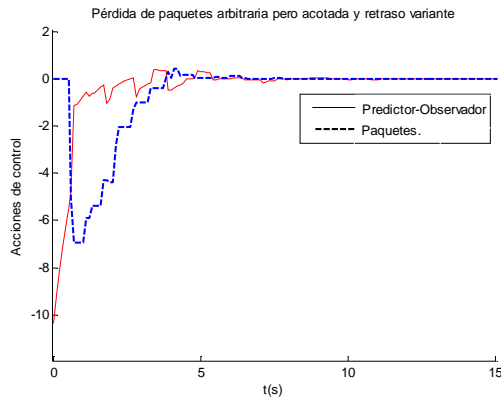


Figura 12: Acc. de control comparativa rendimiento.

La Figura 11 muestra la simulación del sistema de control en lazo cerrado. Como en la sección anterior, los círculos en el eje temporal son las muestras que no se pierden. En esta simulación se observa una ligera mejora (de hasta un 20% de reducción del tiempo de establecimiento) para la propuesta basada en PO frente a la de [14], pese a utilizar un controlador fijo y unas acciones de control de magnitud similar (ver Figura 12). Nuevamente, la primera acción de control muestra un valor mayor, el cual, gracias al uso de PO, es no nulo.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un enfoque de SCR basado en PO en el que se da solución a tres problemas típicos de los SCR, como son retardos variantes en el tiempo, pérdida de datos y desorden de paquetes. Las ventajas fundamentales de este enfoque son su sencillez de implementación y su bajo coste computacional. Además, mediante tres estudios comparativos, se observa los beneficios de la propuesta a nivel de mejora en el rendimiento de control e incluso mayor robustez.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto DPI2011-28507-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

### Referencias

[1] K. Ogata, *Discrete-time control systems*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1987.

[2] Y. Tipsuwan and M. Chow, "Control methodologies in networked control systems," *Control Eng. Practice*, vol. 11, no. 10, pp. 1099–1111, 2003.

[3] T. Jia, Y. Niu, and X. Wang, " $H^\infty$  control for networked systems with data packet dropout," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 2,

pp. 198–203, 2010.

[4] Y. Wang and G. Yang, "Robust  $H^\infty$  model reference tracking control for networked control systems with communication constraints," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 7, no. 6, pp. 992–1000, 2009.

[5] H. Gao and T. Chen, "Network-based  $H^\infty$  output tracking control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 655–667, 2008.

[6] H. Karimi, "Robust  $H^\infty$  filter design for uncertain linear systems over network with network-induced delays and output quantization," *Modeling, Identification and Control*, vol. 30, no. 1, pp. 27–37, 2009.

[7] —, "Delay-range-dependent linear matrix inequality approach to quantized  $H^\infty$  control of linear systems with network-induced delays and norm-bounded uncertainties," *Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part I: J. of Syst. and Control Eng.*, vol. 224, no. 6, pp. 689–700, 2010.

[8] K. Lee, S. Lee, and M. Lee, "Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 784–792, 2003.

[9] Y. Tipsuwan and M-Y. Chow, "Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation- Part I: Networked Control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1218–1227, December 2004.

[10] A. Sala, A. Cuenca, and J. Salt, "A retunable PID multi-rate controller for a networked control system," *Inform. Sci.*, vol. 179, no. 14, pp. 2390–2402, June 2009.

[11] A. Cuenca, J. Salt, V. Casanova, and R. Pizá, "An approach based on an adaptive multi-rate Smith predictor and gain scheduling for a networked control system: implementation over Profibus-DP," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 473–481, April 2010.

[12] A. Cuenca, J. Salt, A. Sala, and R. Pizá, "A delay-dependent dual-rate PID controller over an Ethernet network," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, no. 1, pp. 18–29, Feb. 2011.

[13] Y. Tian and D. Levy, "Compensation for control packet dropout in networked control systems," *Inform. Sci.*, vol. 178, no. 5, pp. 1263–1278, 2008.

[14] Y. Zhao, G. Liu, and D. Rees, "Modeling and stabilization of continuous-time packet-based networked control systems," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B*, vol. 39, no. 6, pp. 1646–1652, Dec. 2009.

[15] X. Zhao, S. Fei, and C. Sun, "Impulsive controller design for singular networked control systems with packet dropouts," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 7, no. 6, pp. 1020–1025, 2009.



- [16] A. Cuenca, P. García, P. Albertos, and J. Salt, “A Non-Uniform Predictor-Observer for a Networked Control System”, *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 9, no. 6, pp. 1194–1202, 2011.
- [17] H. Gao and T. Chen, “ $H^\infty$  estimation for uncertain systems with limited communication capacity,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 11, pp. 2070–2084, 2007.
- [18] S. Oh, L. Schenato, P. Chen, and S. Sastry, “Tracking and coordination of multiple agents using sensor networks: System design, algorithms and experiments,” *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 234–254, 2007.
- [19] M. Moayedi, Y. Foo, and Y. Soh, “Optimal and suboptimal minimum-variance filtering in networked systems with mixed uncertainties of random sensor delays, packet dropouts and missing measurements,” *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 6, pp. 1179–1188, 2010.
- [20] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, “Stability of networked control systems,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 84–99, 2001.
- [21] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, “A survey of recent results in networked control systems,” *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, 2007.
- [22] J. Baillieul and P. Antsaklis, “Control and communication challenges in networked real-time systems,” *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 9–28, 2007.
- [23] J. Li, Q. Zhang, Y. Wang, and M. Cai, “ $H^\infty$  control of networked control systems with packet disordering,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 3, no. 11, pp. 1463–1475, March 2009.
- [24] Y. Zhao, G. Liu, and D. Rees, “Improved predictive control approach to networked control systems,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 2, no. 8, pp. 675–681, Aug. 2008.
- [25] J. Xiong, J. Lam, “Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss”, *Automatica* 43 (2007) 80 – 87.

- [20] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, “Stability of networked control systems,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 84–99,