

# Predictor de Smith modificado mediante un modelo interno, robusto a perturbaciones externas no medibles.

I. O. González<sup>1</sup>, R. Rivas<sup>1</sup>, V. Feliu<sup>2</sup>, F. Castillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Departamento de

Automática y Computación [novi@electronica.cujae.edu.cu](mailto:novi@electronica.cujae.edu.cu), [rivas@electronica.cujae.edu.cu](mailto:rivas@electronica.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, [Vicente.Feliu@uclm.es](mailto:Vicente.Feliu@uclm.es); [Fernando.Castillo@uclm.es](mailto:Fernando.Castillo@uclm.es)

## RESUMEN / ABSTRACT

Se propone una modificación de la estructura del predictor de Smith mediante un modelo interno que posibilita aumentar su rechazo al efecto de las perturbaciones externas no medibles en comparación con la estructura clásica del predictor de Smith. Los resultados obtenidos se aplican en el diseño de un sistema de control del proceso de variación de la temperatura del jugo en los calentadores de una fábrica de azúcar. Los resultados de la simulación del sistema diseñado mostraron su efectividad y robustez en cuanto al rechazo de perturbaciones externas no medibles.

Palabras claves: Predictor de Smith, predictor de Smith modificado, rechazo a perturbaciones externas no medibles, robustez de los sistemas de control.

*A modification of the Smith's predictor structure by means of an internal model that facilitates to increase its rejection to non-measurements external disturbance effect in comparison with the classic structure of Smith's predictor is proposed. The obtained results are applied in the control system design of juice temperature variation process in the sugar factory heaters. The simulation results of designed system showed their effectiveness and robustness in regard to non-measurements external disturbances rejection.*

*Key words: Smith predictor, modified Smith predictor, non-measurements external disturbances rejection, control system robustness.*

## INTRODUCCIÓN

El control de procesos con retardo de tiempo constituye un tema de significativo interés teórico y práctico [1,10]. Más del 60 % de los problemas detectados en la industria de procesos se deben al efecto del retardo de tiempo, así como de las perturbaciones (medibles y no medibles) sobre los sistemas de control [9].

El retardo de tiempo se encuentra presente en el comportamiento dinámico de diversos procesos industriales, biológicos, económicos, sociales, etc.[10]. La aparición de retardo de tiempo en los sistemas de control de los procesos origina efectos negativos que conllevan a la disminución de los márgenes de fase y de ganancia de estos sistemas, ocasionando en diversos casos la pérdida de su estabilidad [3,4]. Como resultado, el análisis y diseño de sistemas de control de procesos con retardo de tiempo es mucho más complicado que en el caso de procesos sin retardo de tiempo [5]. Es por ello que la problemática relacionada con el desarrollo de nuevas estrategias de control que posibiliten un control efectivo de

procesos con grandes retardos de tiempo presenta una elevada actualidad e interés científico-técnico [2,8,13].

Cuando el retardo de tiempo de los procesos a controlar es relativamente grande y se necesita obtener una respuesta rápida y efectiva del sistema de control en lazo cerrado de dichos procesos se utilizan compensadores de retardo de tiempo [2,10]. El predictor de Smith constituye el primer compensador de retardo de tiempo propuesto en la literatura y se encuentra considerado como el más conocido y utilizado en la práctica industrial para resolver problemas de control de procesos con grandes retardos de tiempo [2,8,12].

El predictor de Smith considera que no existen errores de modelado, es decir, que el proceso real a controlar y su modelo matemático son idénticos (modelado perfecto), lo cual prácticamente nunca ocurre en situaciones reales [3,5,6]. El desempeño del predictor de Smith empeora cuando crecen los errores de modelado [10].

Diferentes autores han estudiado el predictor de Smith y han propuesto diversas modificaciones y extensiones de su estructura para mejorar sus prestaciones, así como su capacidad de rechazar perturbaciones medibles y no medibles

[6,8]. Igualmente, se han propuesto modificaciones del predictor de Smith para mejorar su comportamiento frente a cambios en la señal de referencia y a perturbaciones de carga [3].

Es necesario destacar que la mayor parte de las modificaciones introducidas al predictor de Smith para mejorar su comportamiento frente a diferentes tipos de perturbaciones se caracterizan por presentar un enfoque teórico y/o aumentar la complejidad de su estructura, factores que impiden su aceptación en ambientes industriales, en donde es deseable la sencillez y efectividad de las estrategias de control a utilizar [2,9].

En este trabajo se propone una modificación del predictor de Smith mediante la incorporación de un modelo interno que posibilita mejorar la respuesta de rechazo a perturbaciones externas no medibles y medibles y de esta forma aumentar su robustez. El sistema resultante mantiene la simplicidad del predictor de Smith pero con mayor rapidez y efectividad en su respuesta a perturbaciones no medibles y medibles.

## El Predictor de Smith

### Propiedades del predictor de Smith

La estructura clásica (convencional) del predictor de Smith se muestra en la Fig. 1, la cual puede ser dividida en dos partes: el controlador ( $G_C(s)$ ) y el predictor. En este caso la planta ( $G(s)$ ) se encuentra representada por el actuador ( $G_v(s)$ ) y el proceso ( $G_p(s)$ ) y considera el efecto del retardo de tiempo ( $\tau$ ), ( $G(s) = G_v(s)G_p(s)e^{-\tau s}$ ).

El predictor está formado por un modelo de la planta sin retardo de tiempo ( $G_{m2}(s)$ ), el cual se encuentra integrado por el modelo del actuador ( $G_{mv}(s)$ ) y el modelo de la planta ( $G_{mp}(s)$ ), es decir,  $G_{m2}(s) = G_{mv}(s)G_{mp}(s)$ . Este modelo es conocido como modelo rápido, debido a que posibilita calcular la predicción de la salida de la planta ( $Y_{m2}(s)$ ). La señal  $Y_{m2}(s)$  se realimenta. Además, el predictor se encuentra conformado por un modelo completo de la planta ( $G_{m1}(s)$ ), el cual incluye el retardo de tiempo ( $\tau$ ), es decir  $G_{m1}(s) = G_{mv}(s)G_{mp}(s)e^{-\tau s}$ , y cuya salida es la señal  $Y_{m1}(s)$ .

Para que el sistema de control pueda corregir los errores de modelado, así como el efecto de las perturbaciones no medibles ( $F(s)$ ), la salida del modelo completo de la planta ( $Y_{m1}(s)$ ) se compara con la salida de la planta ( $Y(s)$ ) y la señal de error resultante ( $E_1(s)$ ) se realimenta, como se muestra en la Fig. 1.

Si no existen errores de modelado y perturbaciones, la señal de error ( $E_1(s)$ ) entre la salida de la planta ( $Y(s)$ ) y la salida del modelo completo ( $Y_{m1}(s)$ ) es cero y el controlador ( $G_C(s)$ ) puede ser ajustado utilizando el modelo de la planta sin retardo de tiempo. En este caso el modelado es perfecto ( $G_{m1}(s) = G(s)$ ).

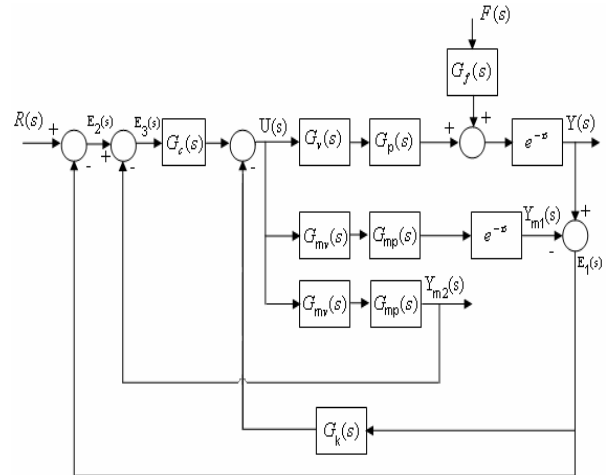


Fig. 1. Estructura clásica del Predictor de Smith.

El predictor de Smith posibilita [10]: a) eliminar de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado ( $1 + G_C(s)G_m(s) = 0$ ) el retardo de tiempo ( $\tau$ ), lo cual es muy importante para el diseño y ajuste del controlador; b) anticipar la señal generada por el modelo sin retardo de tiempo ( $Y_{m2}(s)$ ) a la señal de salida de la planta ( $Y(s)$ ) en un periodo de tiempo  $\tau$ , es decir  $Y_{m2}(t) = Y(t + \tau)$ ; c) factorizar el comportamiento dinámico de la planta de forma implícita en dos partes:  $G_m(s)$ , que es la parte invertible y  $e^{-\tau s}$ , que es la parte no invertible debido al retardo de tiempo.

Uno de los problemas que presenta ésta estructura del predictor de Smith es su baja capacidad de rechazo a perturbaciones no medibles ( $F(s)$ ), las cuales no pueden ser modeladas, en este caso  $Y_{m1}(t) \neq Y(t)$  y la efectividad del predictor disminuye.

### Predictor de Smith modificado mediante un modelo interno, robusto a perturbaciones externas no medibles

Como se señaló en el epígrafe anterior, una de las limitaciones que presenta el predictor de Smith es su baja capacidad de rechazo a las perturbaciones, y sobre todo si estas perturbaciones son no medibles [2,10]. Es por ello que se propone una modificación del Predictor de Smith mediante un

modelo interno, la cual posibilita aumentar su capacidad de rechazo a las perturbaciones no medibles y de esta forma aumentar su robustez.

En la Fig. 2 se muestra la estructura modificada del predictor de Smith mediante un modelo interno ( $G_k(s)$ ) que se propone.

Si se considera que:

$$G_{mv}(s) = G_v(s) \text{ y } G_{mp}(s) = G_p(s), \quad (1)$$

de la estructura modificada del predictor de Smith, la cual se muestra en la Fig.2 se obtienen las siguientes señales:

$$E_1(s) = Y(s) - G_v(s)G_p(s)e^{-\tau}U(s); \quad (2)$$

$$E_2(s) = R(s) - E_1(s); \quad (3)$$

$$E_3(s) = E_2(s) - G_v(s)G_p(s)U(s); \quad (4)$$

$$G_k(s) = \frac{1}{G_v(s)G_p(s)}; \quad (5)$$

$$U(s) = G_c E_3(s) - G_k(s)E_1(s); \quad (6)$$

$$Y(s) = G_v(s)G_p(s)e^{-\tau}U(s) + G_f(s)e^{-\tau}F(s). \quad (7)$$

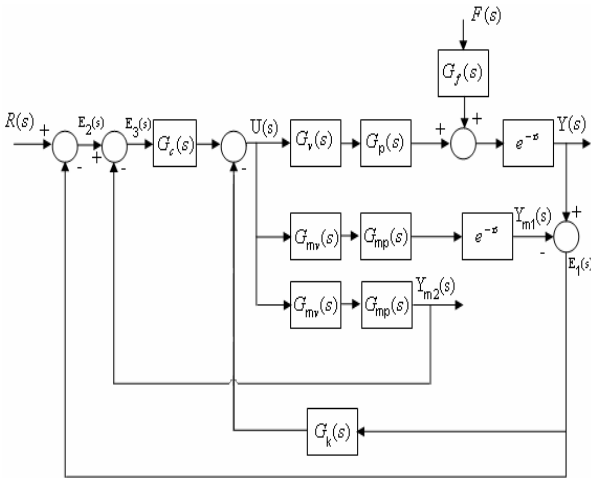


Fig. 2: Estructura modificada del predictor de Smith mediante un modelo interno.

De las expresiones (2)-(7) se obtiene la señal de salida en lazo cerrado de la estructura modificada del predictor de Smith

mediante un modelo interno, la cual se representa mediante la siguiente expresión:

$$Y(s) = \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} R(s) + \left[ 1 - \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} - \frac{e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} \right] G_f(s) e^{-\tau} F(s). \quad (8)$$

Comparativamente se muestra la señal de salida en lazo cerrado que se obtiene con la estructura clásica del predictor de Smith:

$$Y(s) = \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} R(s) + \left[ 1 - \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} \right] G_f(s) e^{-\tau} F(s). \quad (9)$$

Con el objeto de evaluar el efecto del modelo interno incorporado a la estructura del predictor de Smith frente al rechazo de perturbaciones externas no medibles se determina la señal de error que se obtiene con esta modificación, la cual se representa mediante la expresión:

$$E(s) = R(s) - Y(s). \quad (10)$$

Sustituyendo la expresión (8) en (10) se obtiene la señal de error en la forma:

$$E(s) = \left[ 1 - \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} \right] R(s) + \left[ \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau} + e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} - 1 \right] G_f(s) e^{-\tau} F(s). \quad (11)$$

De la expresión (11) se observa que la señal de error obtenida presenta dos términos, el primero debido al efecto de la señal de referencia y el segundo al efecto de las perturbaciones no medibles, es decir:

$$E(s) = E_R(s) + E_F(s). \quad (12)$$

El término de la señal de error (11) que se origina como resultado del efecto de las perturbaciones externas no medibles ( $E_F(s)$ ) se determina mediante la expresión:

$$E_F(s) = \left[ \frac{G_c G_v G_p(s) e^{-\tau} + e^{-\tau}}{1 + G_c G_v G_p(s)} - 1 \right] G_f(s) e^{-\tau} F(s). \quad (13)$$

Arreglando la expresión (13) se obtiene:

$$E_F(s) = [e^{-\tau} - 1] G_f(s) e^{-\tau} F(s). \quad (14)$$



Como resultado de la identificación del proceso de variación de la temperatura del jugo en los calentadores, se obtuvo el siguiente modelo matemático en el dominio de la frecuencia:

$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1.48}{(13.4s+1)(2s+1)} e^{-105.5s} \quad (17)$$

De la expresión (17) se observa que el proceso objeto de estudio se describe mediante un sistema de segundo orden con retardo de tiempo. El retardo de tiempo del proceso es de 105.5 s, el cual es relativamente alto, si lo comparamos con los valores de sus dos constantes de tiempo ( $T_1 = 13.4$  s y  $T_2 = 2$  s).

## Diseño del sistema de control del proceso

El diseño del sistema de control del proceso objeto de estudio se desarrolló sobre la base del modelo obtenido (17). Inicialmente se diseñó un sistema de control del proceso objeto de estudio con controlador PI, de forma similar a como se realiza actualmente el control de dicho proceso. Los parámetros de ajuste del controlador son:  $K_C = 0.5$ ,  $T_i = 10$  s. Seguidamente se diseñó un segundo sistema de control de este proceso con estructura clásica del predictor de Smith y con el mismo ajuste del controlador PI. Luego se desarrollaron trabajos de simulación de ambos sistemas de control considerando la ocurrencia de una perturbación a los 800 s. En la Fig. 4 se muestran los resultados de la simulación de ambos sistemas de control.

De la Fig. 4 se observa que ambos sistemas alcanzan la referencia de 105 °C, sólo que el sistema con predictor de Smith se demora 213 s, mientras que el sistema con controlador PI 650 s. Por otro lado, el sistema de control con PI se demora 554 s en rechazar el efecto de la perturbación externa, mientras que el sistema con predictor de Smith sólo se demora 315 s.

A continuación se diseñó el sistema de control del proceso objeto de estudio con estructura modificada del predictor de Smith con controlador PI y con el mismo ajuste que en los sistemas de control anteriores.

Los resultados de la simulación de los tres sistemas diseñados considerando la ocurrencia de una perturbación a los 800 s se muestran en la Fig. 5.

De la Fig. 5 se observa que ante un paso en la referencia ambos sistema de control con predictor de Smith se comportan de forma similar, sin embargo el tiempo que demora el sistema con predictor de Smith y estructura modificada en rechazar el efecto de la perturbación externa es de 215 s, mientras que el sistema con predictor de Smith y estructura clásica es de 315 s.

De esta forma, el sistema de control con estructura modificada del predictor de Smith rechaza el efecto de las perturbaciones externas no medibles 100 s más rápido que el sistema de control con estructura clásica del predictor de Smith.

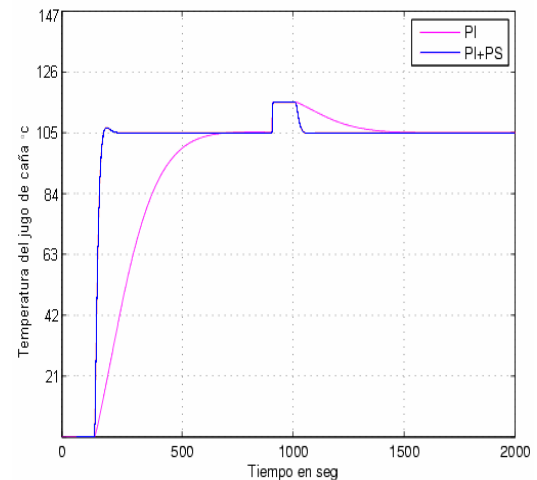


Fig. 4: Resultados de simulación de los sistemas de control con controlador PI y con estructura clásica del predictor de Smith.

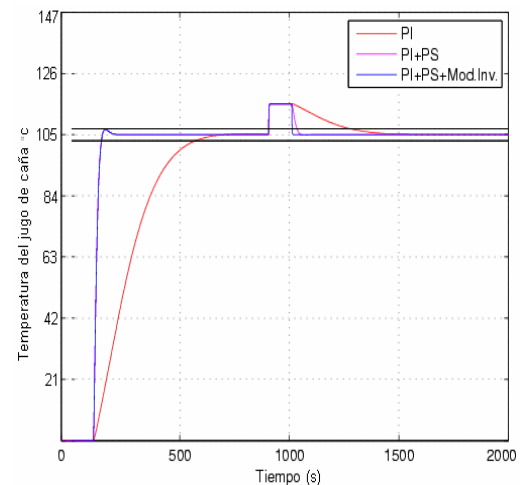


Fig. 5: Resultados de simulación de los sistemas de control con controlador PI, con estructura clásica del predictor de Smith y con estructura modificada del predictor de Smith.

En la Fig. 6 se presenta una ampliación de los resultados que se muestran en la Fig. 5, en la cual se puede observar, la efectividad en el rechazo de las perturbaciones del sistema de control con estructura modificada del predictor de Smith en comparación con el sistema de control con estructura clásica del predictor de Smith.

En la Fig. 7 se muestran los resultados de la simulación de las señales de error que se originan como resultado del efecto de las perturbaciones externas no medibles ( $E_F(s)$ ) en el sistema de control del proceso objeto de estudio con estructura clásica del predictor de Smith y en el sistema de control del mismo proceso con estructura modificada del predictor de Smith.

De la Fig. 7 se observa que en el sistema de control del proceso objeto de estudio con estructura modificada del predictor de Smith la señal de error que se origina como resultado de las perturbaciones externas no medibles se elimina más rápido que en el sistema de control con estructura

clásica del predictor de Smith. Estos resultados demuestran la efectividad en el rechazo de las perturbaciones externas no medibles de la estructura propuesta del predictor de Smith.

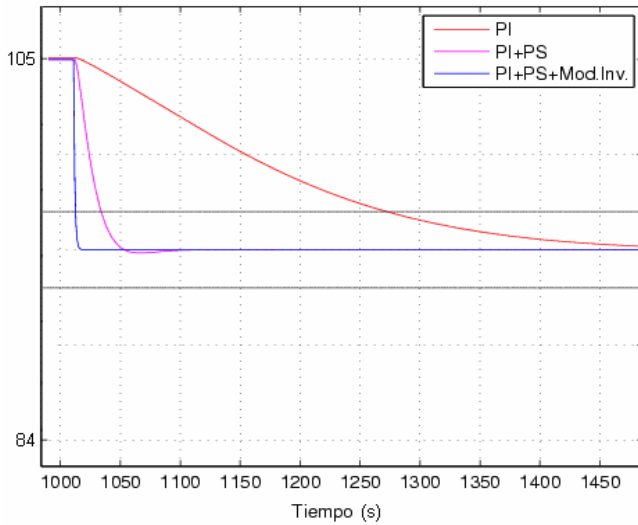


Fig. 6: Ampliación de resultados de simulación de los sistemas de control con controlador PI, con estructura clásica del predictor de Smith y con estructura modificada del predictor de Smith, que se muestran en la Fig.5.

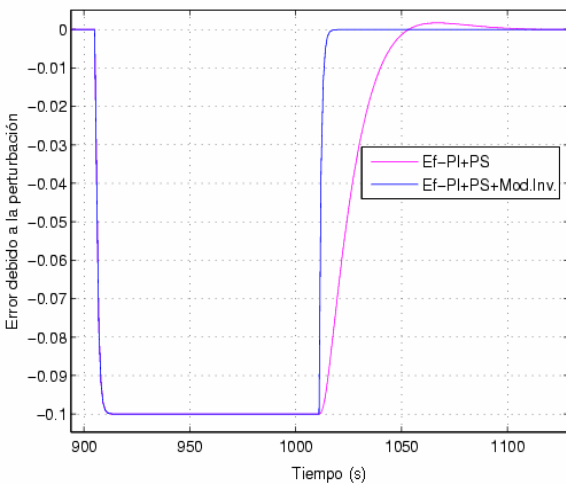


Fig. 7: Resultados de la simulación de las señales error en los sistemas de control con estructura clásica del predictor de Smith y con estructura modificada del predictor de Smith.

De esta forma se ha demostrado que la modificación que se propone de la estructura clásica del predictor de Smith mediante un modelo interno posibilita aumentar su robustez en cuanto al rechazo de perturbaciones externas no medibles.

## CONCLUSIONES

Se propuso una estructura modificada del predictor de Smith mediante un modelo interno que posibilita aumentar su rechazo al efecto de las perturbaciones externas no medibles en comparación con la estructura clásica del predictor de Smith. Estos resultados son extendibles a perturbaciones externas medibles.

Se obtuvo el modelo matemático del proceso de variación de la temperatura del jugo a la salida de los calentadores. El modelo obtenido se caracteriza por ser de segundo orden y presentar un retardo de tiempo de 105.5 s.

El modelo obtenido fue utilizado en el diseño de sistemas de control del proceso objeto de estudio con controlador PI, estructura clásica del predictor de Smith y estructura modificada del predictor de Smith.

Los resultados de la simulación de los sistemas diseñados mostraron la efectividad frente al rechazo de perturbaciones externas no medibles del sistema de control del proceso objeto de estudio con estructura modificada del predictor de Smith en comparación con los sistemas de control con controlador PI y estructura clásica del predictor de Smith.

Se demostró mediante simulación la robustez en cuanto al rechazo de perturbaciones externas no medibles de la estructura modificada del predictor de Smith.

## REFERENCIAS

- [1] Aström K. J., Hang C. C. and Lim B. C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and a long dead-time, *IEEE Transaction on Automatic Control* 39(2), 343-355, 1994.
- [2] Feliu-Battle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.G., Sanchez-Rodríguez L. Smith Predictor Based Robust Fractional Order Control: Application to Water Distribution in a Main Irrigation Canal Pool, *Journal of Process Control*, 2008.
- [3] Gu K. and Niculescu S.I. Survey on recent results in the stability and control of time-delays systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 125, 158-165, (2003).
- [4] Hagglung T. An industrial dead-time compensating PI controller, *Control Engineering Practice* 4(6), 749-756, 1996.
- [5] Huzmezan, M., Gough, W.A., Dumont, G.A. *Time delay integrating systems: A challenge for process control industries. A practical solution.* *Control Engineering Practice*, 10, 1153-1161, (2002).
- [6] Kaya I. Obtaining controllers parameters for a new a PI-PD Smith predictor using auto-tuning, *Journal of Process Control* 13, 465-472, 2003.
- [7] Ljung, L.: *System Identification Toolbox For use with Matlab®. User's Guide.* 4a ed, The MathWorks. Inc., 2008.
- [8] Normey-Rico J. E. and Camacho E. F. Robust tuning of dead-time compensators for processes with an integrator and

long dead-time, IEEE Transactions on Automatic Control 44(8) 1598-1603, 1999.

[9] Takatsu H., Itoh T. and Araki M. Future needs for the control theory in industries-reports and topics of the control technology survey in the Japanese industry, Journal of Process Control, 8(5-6):369-374, 1998.

[10] Palmor Z. J. The Control Handbook. Time Delay Compensation: Smith Predictor and its Modifications. CRC Press and IEEE Press, 1996.

[11] Rivas Pérez R, Tien Guin C, Franco Parellada C, y Protoviev B. E. Sistema de control automático de objetivos con retardo de tiempo, Control, Cibernética y Automatización 1, 24-26, 1987.

[12] Smith O. J. M. Closed control of loop with dead time, Chemical Engineering Progress 53, 217-219, 1957.

[13] Watanabe K. and Ito M. A process-model control for linear system with delay, IEEE Transactions on Automatic Control 26(6), 1261-1269, 1999.

## AUTORES

**Ivón O. Benítez González**, graduada de Ingeniera en Automática en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) en 2005. Master en Automática en la CUJAE en 2010. Profesora Asistente de la CUJAE en 2010.

**Raúl Rivas Pérez**, Doctor en Ciencias Técnicas y posteriormente Doctor en Ciencias, Miembro Titular Academia de Ciencias de Cuba. Profesor Titular de la CUJAE.

**Vicente Feliu Batlle**, Catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha, PhD.

**Fernando Castillo García**, Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha, PhD.