

Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo

De La Cruz, F.*; Camacho O.**

*Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Vicerrectorado Barquisimeto
Departamento de Ingeniería Electrónica, Barquisimeto, Venezuela
e-mail: fdlcruz@unexpo.edu.ve

** Investigador Prometeo. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Ecuador.
Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela
e-mail: camacho1959@gmail.com

Resumen: Se presenta un nuevo procedimiento para el desarrollo de un controlador de modos deslizantes basado en un Predictor de Smith para procesos con elevado tiempo muerto, a partir del modelo de segundo orden más tiempo muerto (SOMTM) de un proceso y una superficie deslizante de tipo PID. El controlador posee una estructura fija y se presenta un conjunto de ecuaciones de sintonización basado en los parámetros del modelo. Se describe el procedimiento para la obtención del modelo SOMTM que servirá de base para el desarrollo del controlador. El procedimiento de diseño se ilustra mediante dos ejemplos numéricos y la simulación de los sistemas muestra el adecuado desempeño y la robustez del controlador.

Palabras clave: Control de modos deslizantes, predictor de Smith, robustez, tiempo muerto, retardo, modelo SOMTM.

Abstract: A new approach for the development of a Smith Predictor based Sliding Mode Controller for processes with elevated dead time is presented. A PID sliding surface and a second order deadtime (SOPDT) model have been used to synthesize the controller. The approach results in a fixed controller structure with a set of tuning equations as a function of the parameters of the model. The design procedure is illustrated by two numerical examples and simulation systems shows the proper performance and robustness of the controller

Keywords: Sliding Mode Control, Smith predictor, robustness, deadtime, delay, SOPDT model.

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de controladores muchas veces se encuentran problemas relacionados con la no-exactitud del modelo de la planta, las perturbaciones externas o la existencia de no linealidades en el proceso. Una de las no-linealidades más comunes es el tiempo muerto o retardo de transporte, que afecta el comportamiento de la planta, haciendo que su análisis sea más complicado. Este retardo puede ser causado por el transporte de masa o energía de un lugar a otro, tiempos de procesamiento o acumulación de pequeños retardos en sistemas conectados en serie, entre otros [8]. Para los procesos que exhiben tiempo muerto, cada acción ejecutada en la variable manipulada del proceso sólo afectará a la variable controlada después del tiempo muerto del proceso. Debido a esto, es más difícil de analizar y diseñar controladores para sistemas de tiempo muerto.

En la actualidad se han hecho propuestas para el análisis, diseño e implementación de sistemas que permitan realizar esquemas y estrategias de control que afronten la no-linealidad del tiempo muerto y dar mejoras a las respuestas de dichos sistemas, además de darle un mejor desempeño y una mejor robustez ante perturbaciones en el proceso. Estas

estrategias son conocidas como compensadores de tiempo muerto.

El primer compensador de tiempo muerto, y quizás el más utilizado, fue creado en 1957, por O. J. Smith [14], quien presentó un esquema de control para sistemas de una sola entrada y una sola salida (SISO), el cual tiene el potencial de mejorar el control de lazo con tiempo muerto. Este esquema de control es conocido actualmente como el Predictor de Smith y es una de las técnicas más conocidas y utilizadas en la práctica para controlar sistemas de elevado retardo o tiempo muerto [10]. La manera de sintonizar el controlador en la estructura del PS influye notablemente en el comportamiento global del sistema. Si la técnica de sintonización utilizada no es la adecuada, se obtendrán respuestas muy pobres y el sistema que contiene al PS será subutilizado, es decir, varias de las propiedades o ventajas aportadas en teoría por el PS serán total o parcialmente anuladas.

Por otro lado, el control de modo deslizante (Sliding Mode Control o SMC) es un procedimiento robusto y simple para desarrollar controladores de procesos lineales y no lineales. La idea detrás del control de modo deslizante consiste en definir una superficie (superficie deslizante) a lo largo de la cual el proceso pueda deslizarse hacia su valor final deseado. Esto se logra por medio de una ley de control que forma parte del diseño de un controlador de modo deslizante (Sliding Mode Controller) o SMCr [2].

Varios autores han propuesto modificaciones o técnicas de ajuste específicas para controladores que forman parte de la

Autor para correspondencia: fdlcruz@unexpo.edu.ve, +58-416-6746583. Campus UNEXPO. Av. Corpahuaico. Barquisimeto 3002. Venezuela.

estructura tipo PS, tanto para obtener sistemas robustos como para reducir el número de parámetros de ajuste [8], [10], [11]. Una de ellas consiste en la utilización de un controlador de modo deslizante en la estructura del PS tanto para procesos integrantes [4] como no integrantes [11][3]. El SP funciona bien en la compensación del tiempo muerto y el SMCr es un controlador de comprobada robustez, por lo tanto, combinando y preservando las buenas propiedades de ambas técnicas y mejorando las deficiencias del SP, se presenta en este artículo un controlador robusto para procesos con retardo elevado: el controlador de modo deslizante basado en Predictor de Smith basado en un modelo de segundo orden más tiempo muerto SP2-SMCr.

Este trabajo se organiza como sigue: La sección 2 introduce los conceptos básicos del controlador de modo deslizante y de la arquitectura del SP. La sección 3 cubre el desarrollo del SP2-SMCr basado en un modelo de segundo orden más tiempo muerto. La sección 4 muestra resultados de simulaciones donde también se prueba la robustez. Las conclusiones se presentan en la sección 5.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1. Predictor de Smith

Según lo indicado antes, el SP es un esquema popular para la compensación del tiempo muerto. La Fig. 1 muestra la arquitectura del SP, donde $G_c(s)$ representa el controlador mientras que la función de transferencia del proceso es $G_p(s)$. En paralelo al proceso existe un modelo de dicho proceso $G_m(s)$ que consiste en una función de transferencia estable racional $G(s)$ y de un tiempo muerto, t_0 y puede expresarse según (1).

$$G_m(s) = G(s) e^{-t_0 s} \quad (1)$$

En esta estructura se realimenta la predicción de la salida del proceso calculada usando un modelo de la planta sin retardo $G(s)$ para aumentar el desempeño del sistema. La diferencia entre las salidas del proceso y del modelo, $e_m(t) = y(t) - y_m(t)$, se realimenta para corregir errores de modelado y perturbaciones de la carga. La función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G(s) + G_c(s)[G_p(s) - G_m(s)]} \quad (2)$$

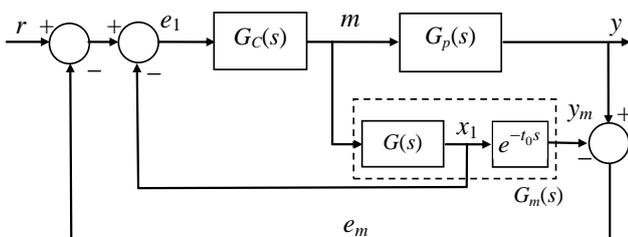


Figura 1. Predictor de Smith

Cuando existe un modelado de la planta perfecto, lo cual significa que $G_m(s) = G_p(s)$, la función de transferencia de lazo cerrado se reduce a la expresión indicada en (3).

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \cong \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (3)$$

Esto también implica que $e_m(t) = y(t) - y_m(t) = 0$ y, por tanto, la realimentación consiste sólo de la salida del modelo sin retardo. De esta manera, el tiempo muerto se aísla y se compensa [16], y así, puede ser ignorado para los propósitos del diseño del controlador, ya que el mismo no aparece en la ecuación característica del sistema. Sin embargo el PS es poco robusto y puede presentar inestabilidad debido a errores de modelado y además, en procesos integrantes, una perturbación constante en la carga da lugar a un error de estado estacionario.

2.2 Control de modos deslizantes

El Control de Modo Deslizante (SMC) es una técnica derivada del control de estructura variable (*Variable structure control*, VSC), el cual fue estudiado originalmente por Utkin [17]. Un controlador diseñado usando el método de SMC es robusto y sencillo particularmente atractivo debido a su capacidad de controlar sistemas no lineales y sistemas variantes en el tiempo [2],[13].

El diseño basado en SMC consiste en definir una superficie a lo largo de la cual el proceso pueda deslizarse hacia su valor final deseado; La Fig. 2 representa el objetivo de SMC. La estructura del lazo de control permanece fija hasta que el estado cruza $S(t) = 0$ y entonces ajustada para que el estado se deslice a lo largo de esta superficie. Por tanto, es necesario definir la superficie deslizante $S(t)$, la cual representa un comportamiento global deseado, por ejemplo, estabilidad y desempeño en el seguimiento y que usualmente se formula como una función lineal del estado del sistema. Esta superficie puede representarse como:

$$S(t) = f(r(t), x_m(t), e_m(t), \lambda, n) \quad (4)$$

Donde $r(t)$ es la señal de referencia, $x_m(t)$ es la salida del modelo, $e_m(t)$ es el error del modelado, n es el orden del modelo y λ es un parámetro de sintonización [3].

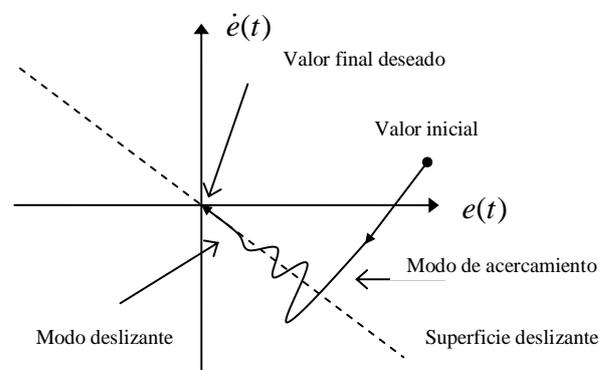


Figura 2. Interpretación gráfica de SMC.

El objetivo de control es asegurar que la variable controlada sea igual a la referencia en todo momento, es decir que el error y sus derivadas sean iguales a cero. Una vez que el valor de referencia se alcanza, $S(t)$ toma un valor constante y el problema de seguimiento de la referencia se reduce a satisfacer la condición deslizante:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \tag{5}$$

Una vez que se haya seleccionado la superficie deslizante, la atención se debe dirigir a diseñar la ley del control que conduce la variable controlada a su valor de referencia y satisface la condición deslizante. La ley del control de SMC, $M(t)$, consiste en dos porciones aditivas; una parte continua, $U_C(t)$, y una parte discontinua, $U_D(t)$. Eso es:

$$M(t) = U_C(t) + U_D(t) \tag{6}$$

La parte continua es responsable de mantener la variable sobre la superficie deslizante. La parte discontinua incorpora un elemento no lineal que incluye el elemento de conmutación de la ley del control. Esta parte del controlador es discontinuo a través de la superficie deslizante y es responsable de que la variable alcance la superficie. Para suavizar la discontinuidad, se emplea la función sigma o de saturación de la forma:

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \tag{7}$$

donde K_D es el parámetro de sintonización responsable del modo de acercamiento. δ es un parámetro de ajuste usado para reducir una indeseada oscilación de alta frecuencia alrededor del punto deseado de equilibrio conocida como *chattering* que implica elevada actividad de control que normalmente no es tolerada por los actuadores y que también puede excitar la dinámica de alta frecuencia ignorada en el modelado del sistema [2]. En resumen, la ley del control da lugar a un movimiento rápido para llevar el estado sobre la superficie deslizante, y un movimiento lento para proseguir hasta que se alcanza un estado deseado.

El diseño de un controlador de modo deslizante (SMCr) depende del modelo del proceso. Camacho y Smith [2] desarrollaron un método sencillo y práctico diseñar un SMCr basado en un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) del proceso real.

2.3 Caracterización de un proceso usando un modelo de segundo orden más tiempo muerto

Para diseñar o sintonizar controladores, es necesario contar con información del comportamiento dinámico del proceso, normalmente en forma de un modelo de orden reducido (primero o segundo orden, más tiempo muerto). La identificación de los parámetros de estos modelos (ganancia, tiempo muerto y constantes de tiempo), puede hacerse a partir de la respuesta del proceso a un cambio escalón en la entrada, denominada curva de reacción del proceso (ver Fig. 3).

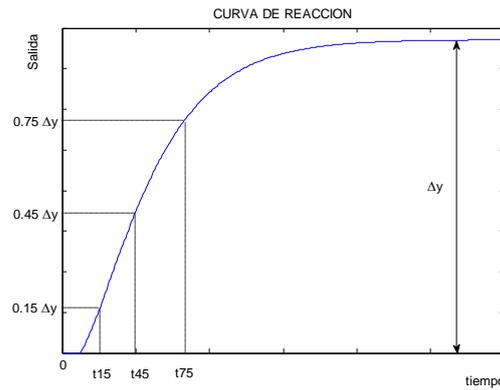


Figura 3. Curva de reacción del proceso

Existen varios métodos para la determinación de estos parámetros, y se basan en la determinación de los tiempos requeridos para alcanzar dos o tres puntos específicos en la gráfica de la respuesta del proceso. Existen métodos de dos puntos que permiten obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) o de tres puntos para conseguir un modelo de segundo orden, más tiempo muerto (SOMTM) [1]. El método de Stark considera de tres puntos, los cuales corresponden a los tiempos para que la respuesta del sistema alcance 15% (t_{15}), 45% (t_{45}) y 75% (t_{75}) del cambio en la salida del sistema (Δy) a un cambio escalón en la entrada (Δu), tal como se muestra en la figura 3, para obtener un modelo SOMTM de la forma:

$$\frac{Y(s)}{M(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-t_0 s} \tag{8}$$

En este método, las siguientes ecuaciones permiten obtener las constantes K , ζ y ω_n así como el tiempo muerto t_0 del modelo:

$$x = \frac{t_{45} - t_{15}}{t_{75} - t_{15}} \tag{9}$$

Luego

$$\zeta = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{x - 0.356} \tag{10}$$

Si $\zeta \leq 1.0$, entonces:

$$f_2(\zeta) = 0.708(2.811)^\zeta \tag{11}$$

Si $\zeta > 1.0$, entonces:

$$f_2(\zeta) = 2.6\zeta - 0.6$$

Así, se tiene que

$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_{75} - t_{15}} \tag{12}$$

Además

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^\zeta \tag{13}$$

$$t_0 = t_{45} - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n} \tag{14}$$

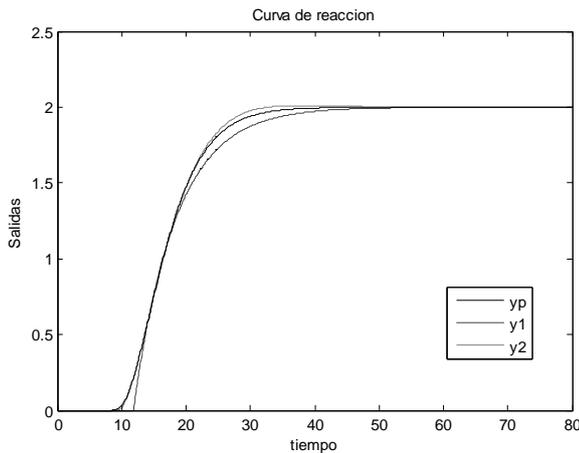


Figura 4. Curvas de reacción del proceso original (yp), del modelo POMTM (y1) y del modelo SOMTM (y2)

Finalmente, la ganancia está dada por el cambio total en la salida (Δy) dividido por el cambio en la entrada (Δu):

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (15)$$

Para ilustrar este método, considérese un proceso con la función de la transferencia $G_1(s)$, el cual ha sido estudiado en [9] y otros trabajos.

$$G_1(s) = \frac{2}{(4s+1)(3s+1)(2s+1)} e^{-8.5s} \quad (16)$$

El modelo POMTM $G_{11}(s)$ obtenido por el método de Smith de dos puntos, utilizado frecuentemente en la literatura y descrito en detalle en [1], está dado por

$$G_{11}(s) = \frac{2}{(6.6s+1)} e^{-11.8s} \quad (17)$$

El modelo SOMTM correspondiente $G_{12}(s)$, obtenido usando el método de Stark de tres puntos, es

$$G_{12}(s) = \frac{0.095}{(s^2 + 0.375s + 0.0475)} e^{-5.86s} \quad (18)$$

En la Fig. 4 se presentan las respuestas a una entrada escalón unitario de ambos modelos y se comparan con la respuesta del proceso original. Se verifica lo expresado en [1] que “un modelo de segundo orden bien identificado será siempre mejor que un modelo de primer orden aunque éste obtenga buenos resultados”.

2.4 Controlador de Modo Deslizante Basado en Predictor de Smith

El controlador de modo deslizante basado en predictor de Smith (SPSMCr) propuesto usa la arquitectura estándar del SP mientras que el controlador se basa en un controlador de modo deslizante (SMCr). Se obtiene así un controlador robusto y que compensa procesos con retardo elevado.

Varios trabajos presentan controladores de modo deslizante basado en predictor de Smith [3],[4],[6],[11] y todos ellos emplean un modelo POMTM para el desarrollo del SMCr. En

este trabajo se utiliza un modelo SOMTM para desarrollar el controlador de modo deslizante basado en Predictor de Smith o SP2-SMCr.

Para desarrollar este controlador se considera el diagrama de bloques del predictor de Smith mostrado en la figura 1, donde la función de transferencia del modelo $G_m(s)$ es

$$G_m(s) = G(s) e^{-t_0 s} = \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} e^{-t_0 s} \quad (19)$$

Si no hay diferencia entre el proceso y el modelo, se tiene que la función de transferencia sin retardo es

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{M(s)} = \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (20)$$

Y por tanto

$$X_1(s) = M(s) \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K M(s)}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (21)$$

Donde $K = K_1 \omega_n^2$, $a_1 = 2\zeta \omega_n$ y $a_2 = \omega_n^2$. Ya que el tiempo muerto t_0 ha sido aislado usando una estructura SP, se puede ignorar en el diseño del controlador. Entonces, transformando (21) en forma de ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + a_2 x_1(t) = K m(t) \quad (22)$$

y

$$\frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} = -a_1 \frac{dX_1(t)}{dt} - a_2 X_1(t) + K m(t) \quad (23)$$

Según Slotine y Li [13], la superficie deslizante puede ser de la forma

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int e(t) dt \quad (24)$$

donde $e(t)$ es el error de seguimiento y el coeficiente λ es un parámetro de sintonización. Ya que (20) es una función de transferencia de segundo orden, entonces $n = 2$ y $S(t)$ puede ser expresada como

$$S(t) = \frac{de_1(t)}{dt} + \lambda_1 e_1(t) + \lambda_0 \int_0^t e_1(t) dt \quad (25)$$

Donde $e_1(t)$ es la diferencia entre el valor de referencia o set-point, $r(t)$, y el valor de la salida de un modelo del proceso sin retardo, $x_1(t)$, cuando se considera un modelo perfecto, o sea, $e_1(t) = r(t) - x_1(t)$. La ecuación (25) representa una

superficie PID. Se desea que $\frac{dS(t)}{dt} = 0$, y por ello se tiene

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d^2 e_1(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) = 0 \quad (26)$$

Asumiendo un error de modelado igual a cero, $e_1(t) = r(t) - x_1(t)$ y

$$\frac{d^2 r(t)}{dt^2} - \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dr(t)}{dt} - \lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) = 0 \quad (27)$$

Descartando en (27) las derivadas del valor de referencia $r(t)$, de acuerdo con lo expresado en [2], se llega a

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = -\lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) \quad (28)$$

Igualando (23) y (28) se obtiene

$$-a_1 \frac{dx_1(t)}{dt} - a_2 x_1(t) + K m(t) = -\lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) \quad (29)$$

Resulta así la siguiente ecuación de control para este controlador SP2-SMCR

$$m(t) = \frac{1}{K} \left[(2\zeta\omega_n - \lambda_1) \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) + \omega_n^2 x_1(t) \right] + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (30)$$

donde

$$S(t) = \text{sign}(K) \left[-\frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_1 e_1(t) + \lambda_0 \int_0^t e_1(t) dt \right] \quad (31)$$

La función $\text{sign}(K)$ en (31), fue incluida en la ecuación de la superficie deslizante para garantizar la acción apropiada del controlador para el sistema dado.

Se debe cumplir en (30) que $\lambda_1 \leq 2\zeta\omega_n$ y $\lambda_0 \leq \lambda_1^2 / 4$ para asegurar una superficie deslizante críticamente o sobreamortiguada. Partiendo de la recomendación de [2] y con base a las simulaciones realizadas se seleccionaron

$$\lambda_1 = 2\zeta\omega_n \quad (32)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{8} \quad (33)$$

Los parámetros K_D y δ tienen relación con la velocidad del sistema, el sobrepaso y el *chattering*. Basado en procedimientos previos [2][4] donde se usó el algoritmo de búsqueda Nelder-Mead, los parámetros de ajuste de la parte discontinua del controlador son:

$$K_D = \frac{0.75}{|K|} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right)^{0.76} \quad (34)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(|K| K_D \lambda_1) \quad (35)$$

Los errores de modelado del tiempo muerto pueden llevar al SP a la inestabilidad. Una solución simple a este problema es usar un filtro $F_r(s)$ de ganancia unitaria en el lazo de realimentación de la salida [10]. Dicho filtro puede ser definido como el filtro de primer orden dado en (36) con un único parámetro T_f relacionado con t_0 .

$$F_r(s) = \frac{1}{sT_f + 1} \quad (36)$$

El valor de T_f puede ser seleccionado como $T_f = 0.5 t_0$ lo cual proporciona una buena solución para errores de tiempo muerto de hasta 30% [10].

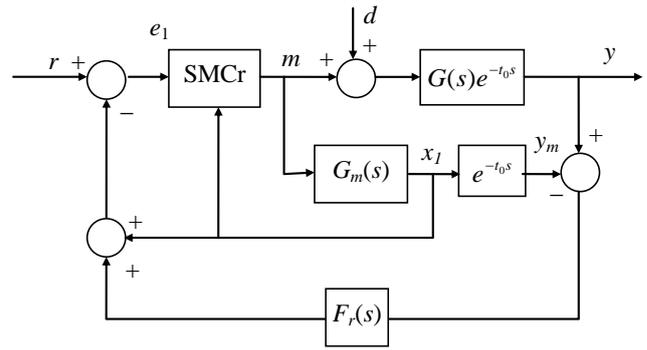


Figura 5. Controlador de modos deslizante basado en predictor de Smith y modelo de segundo orden, SP2-SMCR

Finalmente, el diagrama de bloques del SP2-SMCR corresponde al indicado en la Fig. 5.

3. EJEMPLOS Y SIMULACIONES

Para ilustrar el desempeño de SP2-SMCR, se presentan a continuación dos ejemplos. En ambos casos, un escalón unitario se aplica a la entrada del sistema en $t = 0$ y una perturbación constante de amplitud $d = 0.1$ en la entrada del proceso, se introduce en el instante $t = 100$.

3.1. Ejemplo 1

Considérese un proceso con la función de la transferencia $G_1(s)$, el cual ha sido estudiado en [9] y otros trabajos.

$$G_1(s) = \frac{2}{(4s+1)(3s+1)(2s+1)} e^{-5s} \quad (37)$$

El modelo SOMTM correspondiente, obtenido usando el método de Stark de tres puntos sobre la curva de reacción es:

$$G_{1m}(s) = \frac{0.095}{(s^2 + 0.375s + 0.0475)} e^{-5.86s} \quad (38)$$

Por tanto $K = K_1 \omega_n^2 = 0.095$, $a_1 = 2\zeta\omega_n = 0.375$ y $a_2 = \omega_n^2 = 0.0475$. Así, Los parámetros de ajuste del SP2-SMCR se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de ajuste de los controladores

	λ_1	λ_0	K_D	δ
$G_1(s)$	0.375	0.018	80.8	1.03
$G_2(s)$	4.65	2.71	0.36	1.31

La Fig. 6 muestra la salida del proceso para una entrada escalón unitario y para una perturbación constante $d=0.1$ en $t=100$, en los casos cuando el tiempo muerto del modelo es exacto (t_0 nominal) y cuando existe un error de -20% en el mismo.

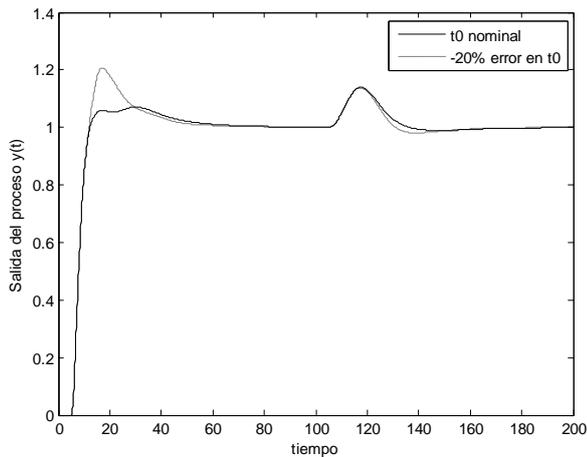


Figura 6. Respuestas del sistema para $G_1(s)$.

3.2. Ejemplo 2

Considérese un proceso con la función de la transferencia $G_2(s)$, el cual ha sido estudiado en [10] y [11].

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)(0.5s+1)(0.25s+1)(0.125s+1)} e^{-10s} \quad (39)$$

El modelo SOMTM correspondiente, obtenido usando el método de Stark es:

$$G_{2m}(s) = \frac{3.12}{(s^2 + 4.65s + 3.12)} e^{-10.5s} \quad (40)$$

Por tanto $K = K_1 \omega_n^2 = 3.12$, $a_1 = 2\zeta\omega_n = 4.65$ y $a_2 = \omega_n^2 = 3.12$. Así, Los parámetros de ajuste del controlador se muestran en la tabla 1. La Fig. 7 muestra la salida del proceso cuando no existe error en el tiempo muerto (t_0 nominal) y cuando existe un error de -20% en el mismo, para las mismas entradas del ejemplo anterior.

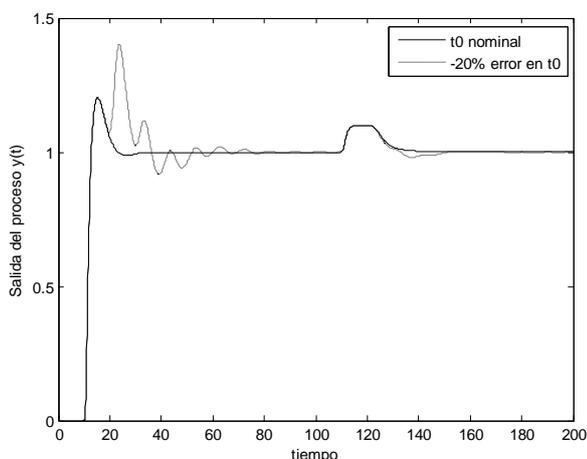


Figura 7. Respuestas del sistema para $G_2(s)$.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo y las ecuaciones de sintonización de un controlador de modos deslizantes basado en un esquema de predictor de Smith, un modelo de segundo orden más tiempo muerto del proceso a controlar y una superficie deslizante de tipo PID. Se utilizó además un filtro de primer orden en el lazo de realimentación de la salida para proporcionar robustez al controlador ante errores de modelado. El controlador posee ecuaciones de sintonización simples derivadas de los parámetros del modelo SOMTM de proceso que se obtiene mediante un procedimiento basado en la respuesta en lazo abierto debida a un escalón unitario de entrada o curva de reacción. Los ejemplos presentados ilustraron el procedimiento de diseño y mostraron el excelente desempeño de controlador, inclusive ante errores de modelado del -20% del tiempo muerto.

RECONOCIMIENTO

Oscar Camacho agradece al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] V. Alfaro. Identificación de Procesos Sobreamortiguados Utilizando Técnicas de Lazo Abierto. *Revista Ingeniería* 11(1,2) pp. 11-25, Universidad de Costa Rica. 2001.
- [2] O. Camacho, C. Smith. Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA Transactions*, 39, pp. 205-218, 2000.
- [3] O. Camacho, C. Smith, W. Moreno. Development of an Internal Model Sliding Mode Controller. *Industrial Engineering Chemical Resources*, 42, pp. 568-573. 2003.
- [4] O. Camacho, F. De la Cruz. Smith Predictor Based-Sliding Mode Controller For integrating Process with Elevated Deadtime. *ISA Transactions*. 43 (2) pp. 257-270. 2004.
- [5] O. Camacho, R. Rojas. A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes. *Transactions of the ASME*, 122, pp. 650-655, 2000.
- [6] O. Camacho, R. Rojas. An approach of sliding mode control for dead time systems. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. 4 pp. 789-793, 2004.
- [7] O. Camacho, R. Rojas, and W. García. Variable Structure Control Applied to Chemical Processes with Inverse Response. *ISA Transactions*, 38, pp. 55-72, 1999.
- [8] J. A. Herrera-Cuartas, J. Peláez-Restrepo, N. A. Correa-Rojas. Análisis del Predictor de Smith Modificado. *Tecno Lógicas*. Edición Especial, pp. 339-352. 2013
- [9] I. Kaya. Tuning Smith Predictor Using Simple Formulas Derived from Optimal Responses. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40 pp. 2654-2659. 2001.
- [10] J. E. Normey-Rico, E. F. Camacho. Control of Dead-time Processes. Springer. 2007.

- [11] J. Martínez. Estudio Comparativo de Estrategias de Control Para Sistemas Con Retardo: Desempeño, Estabilidad y Robustez. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. 2004.
- [12] B. B. Musmade, R. K. Munje, B. M. Patre. Design of Sliding Mode Controller to Chemical Processes for Improved Performance. *International Journal of Control and Automation*. 4(1) pp. 15-31, 2011.
- [13] J. J Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- [14] O. J. Smith. Closed control of loops with dead-time. *Chemical Engineering Progress*, 53 pp. 217-219, 1957.
- [15] D. M. Stark, en Mollenkamp, R.A. - *Introduction to Automatic Process Control*, Instrument Society of America, 1984.
- [16] K. K. Tan, T. H. Lee, and F. M. Leu, Predictive PI versus Smith control for dead-time compensation, *ISA Transactions*, 40, pp. 17-29. 2001.
- [17] V. I. Utkin. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Trans. Automat. Control.*, AC-22(2), pp. 212 -222 1977.
- [18] K. Watanabe, M. Ito. A process-model control for linear systems with delay. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 26(6), pp. 1261-1269. 1981.