REVISTA INGENIERÍA UC. Vol. 11, Nº 2, 39-47, 2004

Control predictivo por modo deslizante para robots manipuladores

Winston García-Gabín, Darine Zambrano
Postgrado en Automatización e Instrumentación, Escuela de Ingeniería Eléctrica,
Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela
Email: winstong@ula.ve, darine@ula.ve

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un nuevo controlador predictivo basado en modelo. El controlador predictivo por modo deslizante propuesto combina la técnica de control predictivo con el control por modo deslizante. Éste esquema presenta las ventajas del control predictivo en cuanto a desempeño y las de robustez debidas al control por modo deslizante. La robustez del controlador propuesto es evaluada por medio del gráfico de robustez y es comparada con la de un controlador predictivo clásico. El desempeño es mostrado por la simulación de un modelo no lineal de un brazo manipulador con fricción, y ha sido comparado con el control predictivo y el control por modo deslizante.

Palabras clave: Control predictivo, control por modos deslizantes, robot manipulador, fricción.

Sliding mode predictive control for manipulator robots

Abstract

This article shows the synthesis of a new model based predictive controller. The proposed sliding mode predictive controller combines predictive control with sliding mode control. The sliding mode predictive control shows has the good performance of model predictive control model and the robustness of sliding mode control. The robustness is evaluated using a robustness graphic, and compared a classic predictive control. The performance is shown by simulation of a nonlinear manipulator robot model with friction, and compared with the model predictive control and the sliding mode control.

Keywords: Predictive control, sliding mode control, manipulator robot, friction

1. INTRODUCCIÓN

El Control Predictivo (Model Predictive Control, MPC) se desarrolló a finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces. El término Control Predictivo no designa a una estrategia de control particular sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control minimizando una función objetivo. Estos métodos de control conllevan a controladores que tienen básicamente la misma estructura y los mismos elementos [1]. El MPC es una técnica bastante popular tanto en el ámbito académico como industrial, donde ha sido implementado en numerosas aplicaciones mostrando buen desempeño; se pueden encontrar aplicaciones en la industria de cemento, desecadoras, brazos robóticos [2, 3]. Entre las ventajas que presenta el control predictivo basado en modelos se puede destacar [1]: ajuste intuitivo y simple, puede ser utilizado para el control de sistemas con dinámicas complejas, el caso multivariable puede tratarse fácilmente, compensación interna del retardo del sistema, permite la compensación de las perturbaciones medibles, la incorporación de restricciones es conceptualmente simple durante el proceso de diseño del controlador, permite la utilización de las referencias futuras cuando son conocidas, que es de especial utilidad en el área de robótica. Es una metodología abierta basada en ciertos principios que permite futuras extensiones. Los distintos algoritmos de control predictivo difieren en el tipo de modelo utilizado para representar al proceso y a las perturbaciones, y la

función objetivo considerada.

La idea básica de un MPC es calcular una secuencia de futuras señales de control de tal manera que minimice una función de costo sobre un horizonte de predicción. El índice a minimizar es el valor esperado de una función del error cuadrático entre la salida futura de la planta y la secuencia de valores de la referencia futura, más una función cuadrática que pondera el esfuerzo de control. Con el objetivo de implementar el MPC, se utiliza un modelo del sistema para predecir las salidas futuras de la planta, sobre la base de los valores pasados de las entradas y salidas del sistema. Es por ello que el modelo del sistema constituye un elemento fundamental en el desempeño del controlador, y es conveniente seleccionar un modelo lo más representativo posible del sistema real con el objeto de lograr una estimación exacta de las salidas futuras del sistema.

La formulación convencional del MPC emplea un modelo lineal para realizar la estimación de las salidas futuras de la planta, es por ello que las no linealidades constituyen un serio obstáculo para el buen rendimiento del controlador, puesto que el modelo lineal deja de producir estimaciones exactas de la dinámica futura del sistema al alejarse del punto de operación donde se obtuvo el modelo lineal.

El Control por Modo Deslizante (Sliding Mode Control (SMC)) es un caso especial de Control por Estructura Variable (Variable Structure Control Control (VSC)), desarrollado en la Unión Soviética en la década de los 60, [4]. Las técnicas de SMC han sido empleadas en diversos sistemas, por las ventajas desde el punto de vista de robustez que presenta en su aplicación para el control de sistemas no lineales, variantes en el tiempo y sistemas con incertidumbre.

La metodología de diseño de un controlador por modos deslizantes [4], implica dividir el problema en dos subproblemas de menor dimensión: Primero establecer la dinámica de la superficie de deslizamiento, que debe de ser estable y puede ser lineal, diseñando entonces, la superficie que es la encargada de regir el comportamiento del sistema cuando se encuentra en el modo de deslizamiento. Luego se diseña una ley de control que garantice que las trayectorias cerca de la superficie de deslizamiento conduzcan hacia la superficie.

Una vez que el sistema es atrapado en la superficie, donde la estructura y los parámetros han sido establecidos por el diseñador, la dinámica a lazo cerrado viene determinada completamente por las ecuaciones que la definen, y es independiente de las perturbaciones en los parámetros del sistema, de esta manera se logra una excelente robustez.

En la Figura 1, se presenta la interpretación gráfica del control por modo deslizante, partiendo de un punto inicial la ley de control lo conduce a la superficie de deslizamiento (modo de alcanzabilidad), una vez allí se desliza atrapado por la superficie hasta el valor deseado (modo deslizamiento).

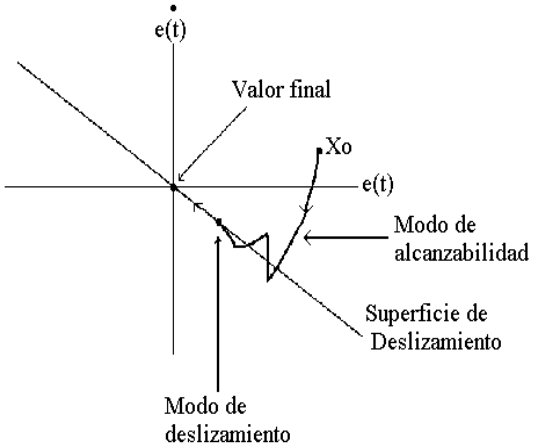

Figura 1. Superficie de deslizamiento.

En el control de brazos manipuladores dos de las dificultades más relevantes son las no linealidades y la fricción [5]. La fricción aparece por la interfase física entre dos superficies en contacto. En el control de brazos manipuladores los errores en estado estacionario y errores en el seguimiento de trayectoria son causados principalmente por la fricción entre los eslabones del brazo [6]. La fricción es comúnmente modelada como una combinación de fricción Coulomb donde el par producido es de valor constante cambiando el signo en función del signo de la velocidad y fricción viscosa donde el par producido es proporcional a la velocidad del eslabón en movimiento [5]. El modelado de la fricción ha sido estudiado por varios autores entre otros [7, 8]. La fricción es altamente no lineal y produce ciclos límites y mal desempeño en los controladores. Al aplicar controladores PD a sistemas con fricción se presentan errores de estado estacionario, este se puede mejorar al aumentar la ganancia pero esto tiende a producir

inestabilidad en el sistema a lazo cerrado. Con la acción integral, el PID puede mejorar el error en estado estacionario pero produce un ciclo límite [9].

En vista de las ventajas destacadas en ambos métodos, resulta atractivo realizar una combinación entre la técnica de control predictivo y el control por modo deslizante, de manera de desarrollar un controlador con las ventajas en cuanto a desempeño dadas por el controlador predictivo y la robustez del control por modo deslizante, para ser aplicado a brazos manipuladores con fricción. Esta combinación ha presentado buenos resultados para sistemas de fase no mínima [10]. Ha sido aplicado a modelos de procesos químicos con características no lineales y de fase no mínima [11].

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el desarrollo del controlador predictivo por modo deslizante (Sliding Mode Predictive Control , SMPC). En la sección 3 se presenta la prueba de robustez para el controlador propuesto. En la sección 4 se muestran las pruebas de desempeño de los controladores por medio de la simulación de un modelo no lineal de un brazo manipulador con fricción Coulomb y viscosa. Finalmente son presentadas las conclusiones.

2. CONTROL PREDICTIVO POR MODO DESLIZANTE

A la mayoría de los sistemas es posible aproximarlos, luego de una linealización sobre un punto de operación, por medio de:

$$A\left(q^{-1}\right)y_t = B\left(q^{-1}\right)u_{t-1} + \frac{C\left(q^{-1}\right)}{\Delta}\xi_t \qquad (1)$$

Donde:
y_t : Variable controlada
u_t : Variable manipulada
ξ_t : Ruido blanco de media cero
$A(q^{-1})$: Polinomio moníco
$B(q^{-1})$: Polinomio que contiene los ceros del modelo
$C(q^{-1})$: Polinomio moníco
D: $1-q^{-1}$

Este modelo es conocido como modelo CARIMA (Controller Auto-Regressive Integrated Moving-Average); varios autores [1] sostienen que diversas aplicaciones industriales pueden ser representadas de forma más apropiada por medio del modelo CARIMA.

Para el desarrollo del controlador es considerada la siguiente superficie deslizante

$$S_{t+j} = P\left(q^{-1}\right)\left(y_{t+j} - w_{t+j}\right) + Q\left(q^{-1}\right)\Delta u_{t+j-1} \qquad (2)$$

El algoritmo de control predictivo consiste en obtener una secuencia que minimiza la función de costo (3) [10]. Esta minimización produce Δu_t, Δu_{t+1}, ..., Δu_{t+Nu}, pero solamente Δu_t es aplicado como cambio en la señal de control. En el instante de tiempo $t+1$ es calculada una nueva secuencia, esta metodología es llamada horizonte deslizante.

$$J(u,t) = \sum_{j=N_1}^{N_2}\left[S_{t+j}\right]^2 + \sum_{j=1}^{N_u}\lambda\left[\Delta u_{t+j-1}\right]^2 \qquad (3)$$

Donde,
N_1 : Inicio del horizonte de predicción
N_2 : Final del horizonte de predicción
N_u : Horizonte de control
λ : Factor de ponderación del esfuerzo de control

Con el objetivo de resolver el problema de la minimización de (3), y_{t+j} se calcula como la *j-ésima* salida predicha para $j= N_1, ..., N_2$ basado en la información conocida en el instante t y los valores futuros de los incrementos de control, la siguiente ecuación diofántica es considerada

$$C\left(q^{-1}\right) = E_j\left(q^{-1}\right)A\left(q^{-1}\right)\Delta + q^{-1}F\left(q^{-1}\right) \qquad (4)$$

Combinando el modelo de la planta (1), y la ecuación diofántica (4), es obtenida la siguiente ecuación de predicción,

$$\hat{y}_{t+j} = \frac{F_j}{C}y_t + \frac{E_j B}{C}u_{t+j-1} \qquad (5)$$

En esta expresión, $\hat{y}_{t+j}$ es una función de los valores conocidos en el instante de tiempo t y de las futuras señales de entrada de control que aún no han sido calculadas. Empleando una segunda ecuación diofántica para distinguir el pasado y el futuro de las señales de control se tiene,

$$E_j\left(q^{-1}\right)B\left(q^{-1}\right) = G_j\left(q^{-1}\right)C\left(q^{-1}\right) + q^{-j}\Gamma_j\left(q^{-1}\right) \qquad (6)$$

La siguiente expresión de la predicción de la salida es obtenida,

$$\hat{y}_{t+j} = G_j \Delta u_{t+j-1} + \Gamma_j u_{t-1}^f + F_j y_t^f \tag{7}$$

Donde Δu_t^f y y_t^f son los valores filtrados de y, Δu_t

$$u_t^f = C^{-1}\left(q^{-1}\right)\Delta u_t \tag{8}$$

$$y_t^f = C^{-1}\left(q^{-1}\right) y_t \tag{9}$$

Finalmente, (7) puede ser escrita como,

$$\hat{y}_{t+j} = G_j\left(q^{-1}\right)\Delta u_{t+j-1} + \hat{y}_{t+j|t} \tag{10}$$

Donde $\hat{y}_{t+j|t}$ es la respuesta libre predicha de $\hat{y}_{t+j}$ asumiendo que los futuros incrementos de control luego del tiempo *t-1* serán cero,

$$\hat{y}_{t+j|t} = \Gamma_j\left(q^{-1}\right)u_{t-1}^f + F_j\left(q^{-1}\right)y_t^f \tag{11}$$

Sustituyendo Ej de (4) en (6), produce

$$B(A\Delta)^{-1} = G_j + q^{-j}\Gamma_j C^{-1} + q^{-j} B F_j (A\Delta C)^{-1} \tag{12}$$

Definiendo el vector f, como las predicciones de la respuesta libre,

$$f = \left[\hat{y}_{t+1|t}, \hat{y}_{t+2|t}, \ldots, \hat{y}_{t+N_2|t}\right]^T \tag{13}$$

el vector de los futuros incrementos de control,

$$\tilde{u} = \left[\Delta u_t, \Delta u_{t+1}, \cdots, \Delta u_{t+N_u-1}\right]^T \tag{14}$$

y el vector de salidas predichas del sistema,

$$\hat{y} = \left[\hat{y}_{t+1}, \hat{y}_{t+2}, \cdots, \hat{y}_{t+N_2}\right]^T \tag{15}$$

A partir de la predicción (11) la relación entrada-salida de la planta puede ser escrita como la ecuación vectorial,

$$\hat{y} = G\tilde{u} + f \tag{16}$$

Donde la matriz G esta compuesta por los parámetros de la respuesta escalón gi del modelo de la planta.

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_u-1} & g_{N_u-2} & \cdots & g_0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \cdots & g_{N_2-N_u} \end{bmatrix} \tag{17}$$

Sustituyendo (16) en (2) se tiene

$$J(u,t) = \sum_{j=N_1}^{N_2}\left[P\left(q^{-1}\right)\left(Gu + f - w\right) + Q(q^{-1})u\right]^2 + \sum_{j=1}^{N_u}\lambda\left[\Delta u_{t+j-1}\right]^2 \tag{18}$$

Reagrupando los términos de la respuesta libre

$$J(u,t) = \sum_{j=N_1}^{N_2}[PGu + P(f + P^* y + Q^* u) - Pw + Q(q^{-1})u]^2 + \sum_{j=1}^{N_u}\lambda\left[\Delta u_{t+j-1}\right]^2 \tag{19}$$

Donde:

$$P = \begin{bmatrix} p_0 & 0 & \cdots & 0 \\ p_1 & p_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \mathrm{p}_{Nc} & \cdots & p_0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$P^* = \begin{bmatrix} p_1 & \cdots & p_{Nc-1} & p_{Nc} & 0 & 0 \\ p_2 & \cdots & p_{Nc} & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_0 & 0 & \cdots & 0 \\ q_1 & q_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \mathrm{q}_{Nc} & \cdots & q_0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$Q^* = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & q_{Nc-1} & q_{Nc} & 0 & 0 \\ q_2 & \cdots & q_{Nc} & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{bmatrix} \tag{24}$$

Cuando no hay restricciones en la señal de control, la minimización de la ecuación cuadrática (2) puede ser resuelta como un problema de álgebra lineal:

$$\Delta u = K\left(w - f\right) \tag{25}$$

$$K = \left[\left(PG+Q\right)^T\left(PG+Q\right)+\lambda\right]^{-1}\left(PG+Q\right)^T P \tag{26}$$

3. PRUEBA DE ROBUSTEZ

En está sección se compara la robustez del SMPC contra un MPC clásico. La robustez es evaluada utilizando el gráfico de robustez [12]. En el gráfico de robustez el límite de estabilidad para el sistema en lazo cerrado es dibujado en coordenadas logarítmicas cuando la constante de tiempo del proceso y la ganancia cambian. Los ejes de la gráfica son la relación de ganancia (ganancia del proceso dividido entre la ganancia con la cual fue sintonizado el controlador inicialmente) con respecto a la relación de la frecuencia del polo del sistema (frecuencia del polo del proceso dividido entre frecuencia del polo del modelo con el cual fue sintonizado el controlador inicialmente).

La construcción del gráfico de robustez de esta forma, constituye una modificación a la propuesta de Shinskey [12] en la cual se representa la relación de ganancia versus relación retardo.

El gráfico tiene una región de estabilidad y otra de inestabilidad. Para encontrar el límite de la región de estabilidad, el controlador es sintonizado inicialmente en base a un grupo de parámetros del modelo del proceso representados en el punto central (1,1) de las coordenadas. La ganancia del sistema es aumentada hasta que el sistema en lazo cerrado presente una oscilación sostenida al margen de la inestabilidad, ese valor de la relación entre la ganancia respecto a la ganancia inicial origina un punto en la gráfica. De igual forma la constante de tiempo del modelo del sistema es cambiada respecto al valor inicial. Realizando en forma simultanea variaciones de ambos parámetros se encuentra la frontera de la región de estabilidad.

En la gráfica mostrada en la Figura 3 se encuentra dibujada una ventana delimitada por los puntos (2, 0), que se corresponde con un aumento del doble de la ganancia, (0.5, 0) que se corresponde con una disminución a la mitad de la ganancia, y (0, 0.5), (0, 2) para variaciones de la relación de la frecuencia del polo. Todas las combinaciones de relación de ganancia y relación de constante de tiempo con un factor de dos son acotadas dentro de la ventana de robustez. Si el límite de estabilidad del controlador se encuentra fuera de la ventana, el controlador se considera robusto.

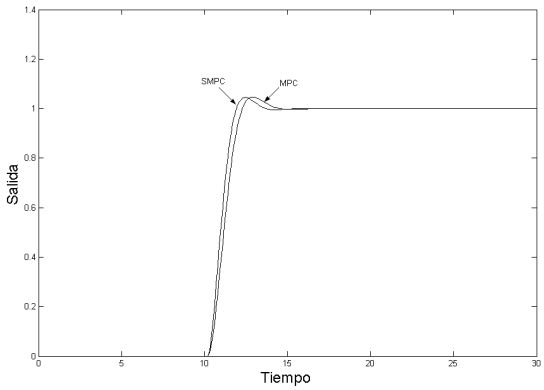

Figura 2. Ajuste inicial de los controladores.

La gráfica de robustez se construyó ajustando inicialmente los controladores para el modelo de la ecuación (27) de manera tal que tuviesen el mismo sobrepaso como se observa en la Figura 2. Se observa como con el mismo sobrepasó el tiempo de asentamiento del SMPC es menor que el del MPC.

$$G_s = \frac{1}{s\left(s+1\right)} \tag{27}$$

Utilizando el gráfico de la Figura 3 se obtienen los siguientes valores del Índice de Robustez (IR) (MPC = 0,9 y SMPC = 2,7). Los resultados de esta sección muestran como el SMPC propuesto presenta una mayor robustez que el MPC convencional, tanto para cambios en la ganancia como para cambios en la frecuencia del polo del modelo.

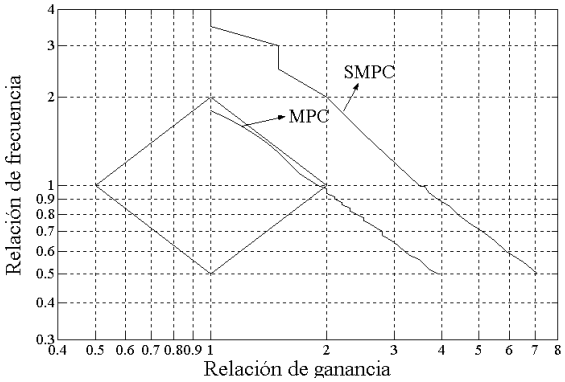

Figura 3. Gráfico de robustez.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el objetivo de estudiar el desempeño del controlador, se utilizó el modelo no lineal de brazo manipulador con fricción Coulomb y fricción viscosa, la ecuación que rige su dinámica viene determina por:

$$\tau = m\,l^2\ddot{\theta} + v\theta + c \quad \mathrm{sgn}\left(\dot{\theta}\right) + m\,l\,g\,Cos\left(\theta\right) \qquad (28)$$

Donde,
τ : Par aplicado al sistema
θ : Posición del brazo
m: Masa del sistema (3 kg)
l: Longitud del brazo (0,3 m)
v: Coeficiente de fricción (0,6 kg m^2/s)
c: Coeficiente de fricción viscosa (0,3 kg m^2/s)
g: Aceleración de gravedad (9,81 m/s^2)

Sustituyendo los valores se tiene:

$$\tau = 0{,}27\ddot{\theta} + 0{,}60\dot{\theta} + 0{,}30\,\mathrm{sgn}\left(\dot{\theta}\right) + 8.83Cos\left(\theta\right) \qquad (29)$$

donde se observa el carácter no lineal del sistema.

En la Figura 4, se observa el comportamiento del brazo manipulador aplicando cambios de posición entre 0° y 90°, para diferentes velocidades de cambio de posición.

Se puede observar como el controlador mantiene sin oscilaciones la posición del brazo manipulador, en la referencia para diferentes posiciones y velocidades de cambio de posición, en todo el rango de operación del sistema.

La Figura 5, presenta la señal de control para los cambios de posición, de la Figura 4.

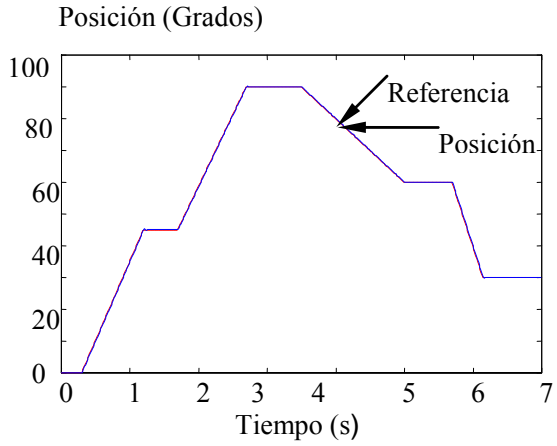

Figura 4. Trayectoria de posición del brazo manipulador.

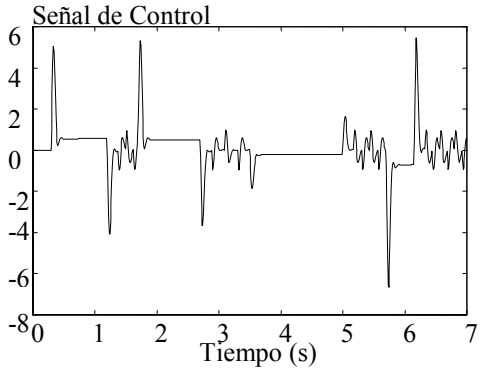

Figura 5. Señal de control para la trayectoria de posición.

4.1 Pruebas de desempeño

En esta sección se muestra un estudio del comportamiento del sistema a lazo cerrado, para el que se lleva el modelo dinámico no lineal a puntos de operación donde se observa un comportamiento bastante oscilatorio en los controladores, siendo el objetivo principal contrastar el comportamiento de los controladores ante cambios en el sistema una vez que los controladores han sido ajustados. Se presentan comparaciones entre el controlador predictivo por modo deslizante propuesto contra un MPC, en una formulación convencional [2, 3], y contra un SMC que puede ser aplicado a sistemas integrantes[13, 14].

En la Figura 6 se muestra el desempeño de SMPC vs. MPC ajustados con los mismos parámetros de sintonización, para un cambio de referencia en la posición del brazo manipulador, se observa como el

SMPC presenta un menor tiempo de respuesta y un mayor amortiguamiento del efecto producido por la fricción en el brazo manipulador.

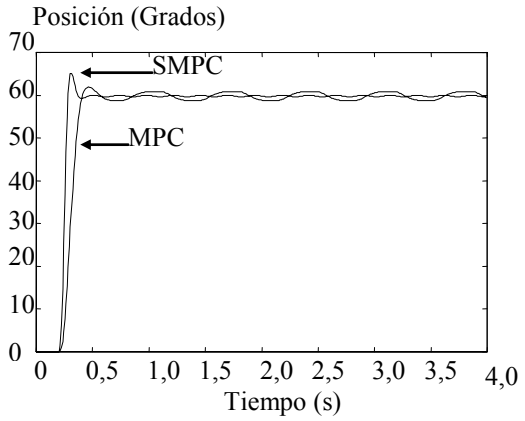

Figura 6. Cambio de referencia SMPC vs. MPC (igual ajuste).

Ajustando con los mismos parámetros el SMPC y SMC se muestra el desempeño para un cambio de referencia en la posición del brazo manipulador. En la Figura 7 se observa cómo el control predictivo por modo deslizante presenta un menor tiempo de respuesta, menor sobreoscilación, y similar amortiguamiento del efecto producido por la fricción en el brazo manipulador en estado estacionario.

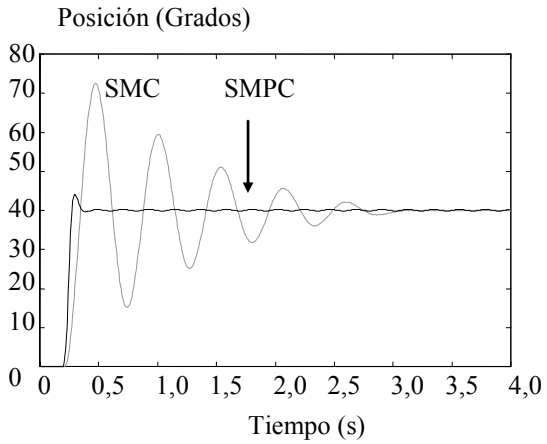

Figura 7. Cambio de referencia SMPC vs. SMC

Para realizar una mejor comparación entre el desempeño de los controladores, se realizaron diferentes ajustes en los mismo, de manera de lograr en condiciones nominales la misma dinámica en la posición del brazo manipulador para un cambio de referencia. Luego con el objetivo de estudiar la robustez del controlador ante cambios en el brazo manipulador se cambio la masa del sistema de 3 kg a 9 kg, dejando los valores de sintonización del controlador con el valor de ajuste inicial.

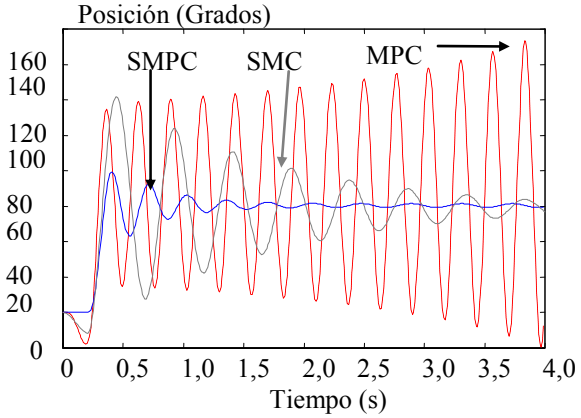

Figura 8. Cambio de referencia SMPC vs. MPC, SMC

Observando en la Figura 8, la posición del brazo manipulador se encuentra que el MPC es inestable para el cambio de masa realizado (3 kg a 9 kg). El SMPC y SMC logran estabilizar la posición en su valor de referencia, pero el SMPC presenta un comportamiento menos oscilatorio y con un menor tiempo de estabilización.

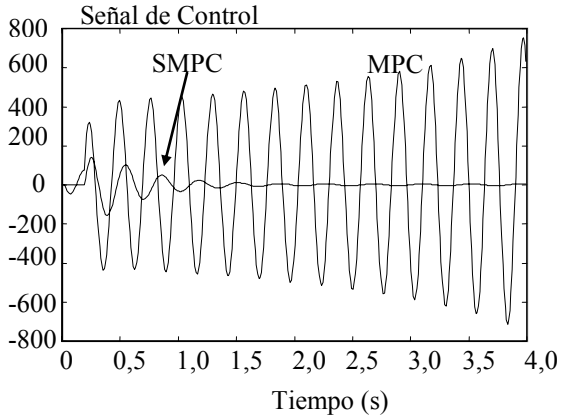

Figura 9. Señal de control SMPC vs. MPC

La Figura 9 muestra la señal de control SMPC vs. MPC, se ve como el MPC presenta un comportamiento inestable y el SMPC estabiliza el sistema.

En la Figura 10 se observa cómo la señal de control producida por el SMC, presenta oscilación de alta frecuencia y una mayor amplitud en comparación con la señal de control producida por el SMPC.

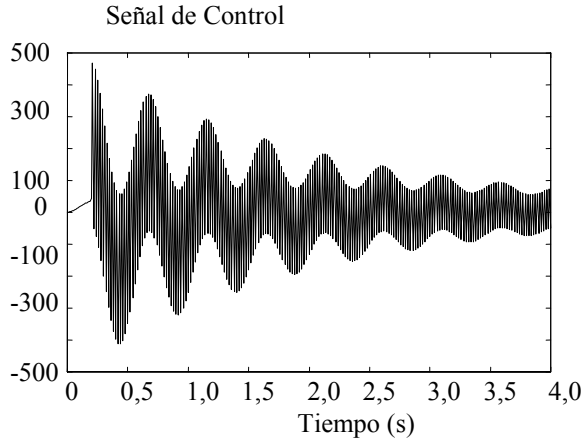

Figura 10. Señal de control SMC

Como segunda prueba para estudiar la robustez del controlador, se cambiaron los coeficientes de fricción del brazo manipulador aumentándolo en un 40 %. La Figura 11 muestra la posición del brazo manipulador para estas nuevas condiciones, con los controladores ajustados con los valores nominales.

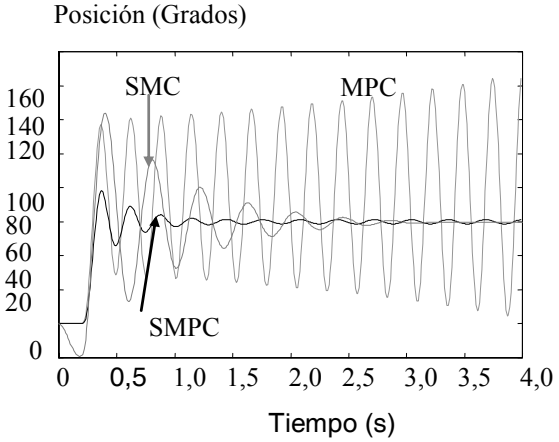

Figura 11. Cambio de referencia SMPC vs. MPC, SMC

Se observa como el MPC presenta un comportamiento inestable a diferencia del SMPC y el SMC que logran estabilizar el sistema, sin embargo el SMC produce una sobreoscilación un 60 % mayor que el SMPC.

La Figura 12 presenta la señal de controla para MPC y SMPC, se observa como el MPC presenta un comportamiento inestable.

La Figura 13 muestra la señal de control del SMC donde se puede observar el efecto de oscilaciones de alta frecuencia y una mayor amplitud de la señal de control respecto al SMPC.

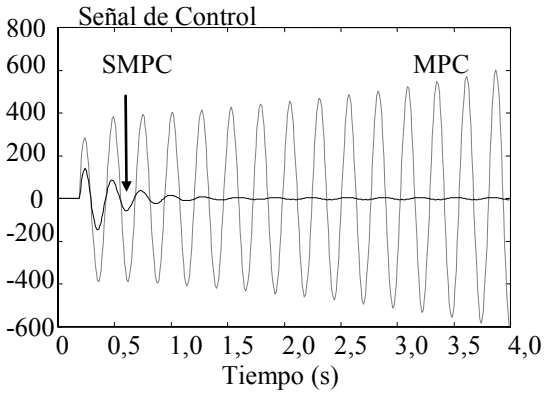

Figura 12. Señal de control SMPC vs. MPC

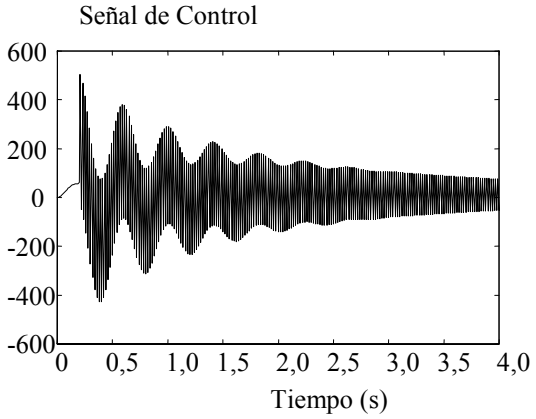

Figura 13. Señal de control SMC

5. CONCLUSIONES

Se presentó el desarrollo de un controlador basado en la combinación de las técnicas de control predictivo y control por modo deslizante. El controlador propuesto presenta la robustez característica del control por modo deslizante y el buen desempeño de los controladores predictivos.

La robustez del controlador ha sido valorada por medio de la técnica del gráfico de robustez, al que se le ha realizado una modificación a la versión original de manera de estudiar las variaciones de ganancia y cambios en, la frecuencia del polo del modelo. Se ha observado como según esta evaluación el controlador propuesto es considerado robusto, y se ha mostrado la poca robustez del MPC convencional. El desempeño de SMPC se probó por medio de un modelo no lineal de un brazo manipulador con fricción Coulomb y viscosa, ha presentado un buen desempeño con el controlador ajustado en condiciones nominales.

El comportamiento de los controladores se ha comparado para cambios de referencia, cambios en la masa del brazo manipulador y en la fricción del sistema. Se observó que el SMPC presenta un mejor comportamiento en cuanto a tiempo de estabilización y sobreoscilación. Se encontró que el SMPC presenta una mejor robustez que la propuesta convencional de MPC. Las señales de control del SMPC son más suaves, eliminando los cambios bruscos en la señal de control del SMC.

REFERENCIAS

[1] Camacho, E.F., Bordons, C. (1999). "Model Predictive Control". Springer-Verlag. London.

[2] Clarke, D., C. Mohtadi and P. Tuffs (1987a). "Generalized predictive Control-Part I. Basic Algorithm". Automatica. Vol. 23, pp.137-148.

[3] Clarke, D., C. Mohtadi and P. Tuffs (1987b). "Generalized predictive Control-Part II. Extensions and Interpretations". Automatica. Vol. 23, pp. 149-160.

[4] Utkin, V. Sliding (1992). "Sliding Modes in Control Optimization". Springer-Verlag. Moscow.

[5] Craig J. (1989). "Introduction to robotics". Addison-Wesley. New York.

[6] Jee-Hwan Ryu, Jinil Song, Dong-Soo Kwon. (2001). "A nonlinear friction compensation method using adaptive control and its practical application to an in-parallel actuated 6-DOF manipulator". Control Engineering Practice (9), pp. 159-167.

[7] Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P. E., & Canudas de Wit, C. (1994). "A survey of analysis tools and compensation methods for control of machines with friction". Automatica, 30(7), pp. 1198-1203.

[8] Canudas de Wit, C., Astrom, K. J., & Lischinsky, P. (1995). "A new model for control of systems with friction". IEEE Transactions on Automatic Control, 40(3), pp. 419-425.

[9] Radclittle, C., & Southward, S. (1990). "A property of stick-slip friction models which promotes limit cycle generation". Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California, USA, pp. 1198-1203.

[10] García-Gabín, W., E.F. Camacho (2003) "Sliding mode model based predictive control for non minimum phase systems". European Control Conference. Cambridge, UK.

[11] García-Gabín, W. (2003) "Control predictivo por modo deslizante aplicado a un reactor no lineal con respuesta inversa". IV Congreso de Automatización y Control. Mérida, Venezuela.

[12] Shinskey, F. G. (1990) "How good are our controller in absolute performance and robustness?". Measurement and Control, Vol. 23, pp. 114-121.

[13] Camacho, O. E., García-Gabín, W., and Rojas, R. D., (1998), "Sliding Mode Control: A Robust Approach to Integrating Systems with Deadtime", Proceedings of IEEE-ICCDCS, Margarita, Venezuela, pp. 401–406.

[14] Camacho O.; Rojas R. "A General Sliding Mode Controller For Nonlinear Chemical Processes". ASME J. of Dynamic Systems, Measurements and Control. (2000), 122, pp. 650-655.