

Comparative study of blocking and suppression in predictive control

J. Bastidas, G. Febres y C. Vinante*

Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Zulia. Apartado 526, Maracaibo - Venezuela
e-Mail: cvinante@dino.conicit.ve

Abstract

The performance of predictive controllers based on convolution models can be modified in a number of ways to alleviate the problems of "ringing" and excessive controllers actions. At present these modifications are mainly done through the use of the so-called "Tuning Parameters", penalizing the control actions and suppressing their variations after a specified number of sampling periods. In the present work an alternative method, based on blocking the controller's actions over several sampling periods, is studied and compared to suppression method using simulations with several SISO systems. The proposed blocking method with or without penalizing factor proved to be effective, easy to implement and compared favorably with the other methods.

Key words: Internal Model Control, convolution models, blocking, suppression.

Estudio comparativo de los parámetros de supresión y bloqueo de las acciones de control en controladores predictivos

Resumen

El desempeño de los controladores predictivos basados en modelos de convolución puede modificarse mediante la selección de los llamados "Parámetros de Ajuste". Uno de los problemas fundamentales de estos controladores es la oscilación de la salida de proceso observada entre los tiempos de muestreo ("ringing") cuando no se penaliza la acción de control para reducir el trabajo del controlador.

El más estudiado de los métodos para corregir este problema, es la supresión del cambio de la acción a partir de cierto tiempo del horizonte de predicción. Una alternativa a este método se estudia en este trabajo y consiste en bloquear la señal de control durante un número determinado de periodos de muestreo.

Ambos métodos son comparados mediante simulación de controladores SISO sin penalización en la acción de control. Se evalúa también el beneficio de aplicar ambos métodos cuando se combinan con penalización en el cambio de la acción de las variaciones de la acción de control.

Palabras claves: Control de modelo interno, modelos de convolución, bloqueo, supresión de control.

Introducción

Una gran variedad de controladores basados en modelos de convolución han sido estu-

diados desde mediados de los años 70 y durante los 80. En 1976 Richalet [1] expone la versión original del MAC ("Model Algorithmic Control") que minimiza la suma de los cuadrados del error en el horizonte de predicción. Para suavizar la

* Autor a quien se debe dirigir correspondencia.

salida del controlador y la respuesta del proceso el MAC original introduce un filtro de primer orden en el setpoint. En 1980 Cutler presenta el DMC ("Dynamic Matrix Control"), un algoritmo que incluye penalización de la variación de la acción de control en la función objetivo e introduce el parámetro de supresión de cambio en la acción de control. García y Morari [2] generalizan el MAC incluyendo en su formulación el parámetro de supresión y la penalización de la magnitud de las acciones de control, lo cual ocasiona la aparición de un offset en la respuesta del sistema. Para anularlo García y Morari incorporan compensadores estáticos de offset en la señal del "set point" y en la señal de realimentación [2,3]. Una formulación ligeramente distinta del MAC es presentada por Keyser et al. [4], quien penaliza la diferencia de la acción de control con respecto al valor actual de la misma. Como resultado se obtiene una versión del MAC que, a pesar de ser penalizado en las acciones de control, no presenta offset [5]. Un método alternativo al de supresión del cambio en la acción de control, es propuesto por Reid et al. 1980. El método consiste en bloquear la señal de control por un número determinado de periodos de muestreo. En este trabajo se estudia el efecto de los parámetros de supresión y bloqueo aplicados a dos controladores:

- 1 El MAC generalizado presentado por García y Morari, y
- 2 El controlador MAC Modificado presentado por Keyser, Van De Velde y Dumortier.

Algoritmos de Control

Controlador Algorítmico de Modelo (MAC)

El Controlador Algorítmico de Modelo (MAC) fue inicialmente propuesto por Richalet *et al.* [1] en 1976. La idea básica del MAC es determinar el vector de acciones de control que aplicado al proceso, produzca una respuesta aproximada a una trayectoria de referencia. El cálculo del vector de acciones de control se realiza para un lapso de P periodos de muestreo

internados en el futuro, al cual se denomina Horizonte de Predicción. La trayectoria de referencia Y_d parte del valor actual de la variable controlada y tiende a alcanzar el "set point"; puede calcularse mediante

$$Y_d(k+1) = \alpha Y_d(k) + (1-\alpha) w \quad (1)$$

donde α es un valor que cumple con $0 \leq \alpha \leq 1$ y w el valor del setpoint

En general puede determinarse una secuencia de acciones de control $m(k)$ $m(k+1)$ $m(k+2)$ $m(k+P)$ tal, que la trayectoria resultante del proceso (predicha) coincida perfectamente con la trayectoria de referencia (coincidirá perfectamente ante los "ojos" del controlador; sólo en los instantes donde el controlador supervisa al proceso; "instantes de muestreo"). La aplicación de esta secuencia de control resultaría, sin embargo, en grandes excursiones de la salida del controlador que no son deseables y en ocasiones no pueden ser ejecutadas en la práctica así como oscilaciones pronunciadas en la respuesta del proceso entre periodos de muestreo ("ringing") que aunque no son detectadas por los equipos de supervisión del proceso, deterioran el comportamiento del mismo.

Una forma de suavizar el trabajo del controlador y la respuesta del proceso, es penalizar la magnitud de las acciones de control por medio de un factor β . El objetivo del MAC es entonces determinar el vector de acciones de control $m(k)$ que minimiza la función objetivo:

$$\sum_{i=1}^P [Y_d(k+i) - Y_{mc}(k+i)]^2 + \beta^2 m(k+i)^2 \quad (2)$$

donde Y_{mc} es la respuesta del modelo corregida por todos los efectos que provocan una salida del proceso no idéntica a la que predice el modelo no corregido. A la diferencia entre el valor de la salida del proceso y el valor que predice el modelo no corregido se le llama típicamente Perturbación. Debe aclararse, sin embargo, que en este término se incluyen no sólo los efectos de las perturbaciones propiamente dicha, sino las de representar al proceso con un modelo imperfecto

y de orden finito. La perturbación puede calcularse si se "recuerda" el vector de las acciones de control pasadas $m(k-N), m(k-N+1) \dots m(k-1)$, se calcula el valor actual del proceso según el modelo de convolución no corregido $Y_m(k)$, y finalmente se compara con el valor actual (medido) $Y(k)$ del proceso, es decir

$$d = Y(k) - Y_m(k) = Y(k) - \sum_{i=1}^p m(k+i) h(i) \quad (3)$$

Al considerar el valor determinado de la perturbación "d", el que más probablemente se mantendrá en el futuro, se puede corregir la trayectoria predicha por el modelo según

$$Y_{mc}(k+1) = d + Y_m(k+1) \quad (4)$$

Si se separan las acciones de control pasadas de las futuras y se ordenan términos, se puede escribir (4) así:

$$Y_{mc}(k+1) = \begin{bmatrix} d \\ d \\ \vdots \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ h_p & h_{p-1} & \dots & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m(k) \\ m(k+1) \\ \vdots \\ m(k+p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & m(k-1) & \dots & m(k-N-1) \\ \vdots & \vdots & m(k-1) & m(k-N-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & m(k-1) \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

Comparando (5) en matrices queda

$$Y_{mc}(k+1) = d + H m(k) + V(k) h \quad (6)$$

El término $V(k) h$ representa la influencia de las acciones de control que ocurrieron el pasado próximo sobre la salida más probable del proceso, mientras que $H m(k)$ representa la influencia del vector de acciones de control que está por determinarse. Eliminando los índices de

tiempo para facilitar la escritura, el problema de minimizar (2) se expresa matricialmente como

$$\min [c^T c + \beta^2 m^T m]$$

sujeto a:

$$Y_{mc} = Y_m + d = Hm + Vh + d \quad (7)$$

donde

$$c = Y_d - Y_{mc} \quad (8)$$

Incorporando (8) en la función objetivo (7), e igualando la derivada con respecto a m a cero se obtiene un vector m que minimiza a (7). El resultado que se obtiene es

$$m = [H^T H + \beta^2 I]^{-1} H^T [Y_d - Vh - d] \quad (9)$$

Si el modelo es perfecto (idéntico al proceso real) la trayectoria predicha del comportamiento del proceso $Y_m(k)$ diferirá del comportamiento real del proceso, sólo en un valor igual a las perturbaciones, sin embargo, cualquier diferencia entre el modelo y el proceso real, aún siendo muy pequeña, produciría una desviación cada vez mayor de la salida del proceso con respecto a la trayectoria de referencia. Con el fin de evitar esto, comúnmente se aplica sólo la primera acción de control, $m(k)$ y posteriormente, en el tiempo $k+1$, se resuelve de nuevo el problema de minimizar (7). De esta forma se corrige periódicamente la salida del proceso y se anula la acumulación de las diferencias que inevitablemente existirán entre el modelo y el proceso real.

Controlador Algorítmico de Modelo Modificado (MAC Modificado)

En 1985 Keyser, Van De Velde y Dumortier [4] presentaron una variación del MAC que penaliza la variación de la acción de control con respecto al valor presente. Para distinguirlo de MAC convencional, llamaremos a la versión de este controlador "MAC Modificado". A diferencia de MAC original, el controlador MAC Modificado penaliza el cambio de la acción de control y no

la magnitud de acción de control. El cambio de la acción de control utilizada es

$$\Delta m(k-1+i) = m(k-1+i) + m(k-1) \quad (10)$$

La función objetivo es

$$\sum_{i=1}^P [Y_d(k+i) - Y_{mc}(k+i)]^2 + \beta^2 \Delta m(k+i)^2 \quad (11)$$

La perturbación utilizada para corregir la trayectoria del proceso predicha se calcula de forma semejante al MAC convencional (ecuaciones (3) y (4)), sin embargo, al expresar el modelo del proceso en términos de Δm se obtiene

$$Y_{mc}(k+1) = \begin{bmatrix} d \\ d \\ \vdots \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ h_p & h_{p-1} & \dots & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m(k) \\ \Delta m(k+1) \\ \vdots \\ \Delta m(k+P) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} m(k-1) & m(k-1) & \dots & m(k-N-1) \\ m(k-1) & \dots & m(k-1) & m(k-N-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & m(k-1) \\ m(k-1) & m(k-1) & \dots & m(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

Expresando (12) en forma matricial queda

$$Y_{mc}(k+1) = Y_m + d = H \Delta m(k) + U(k) h \quad (13)$$

Finalmente, el problema de minimización que debe resolverse cada periodo de muestreo es

$$\min_{\Delta m} [e^T e + \beta^2 \Delta m^T \Delta m]$$

sujeto a:

$$Y_{mc} = Y_m + d = H \Delta m + U h + d \quad (14)$$

y su solución es

$$\Delta m = [H^T H + \beta^2 I]^{-1} H^T [Y_d - U h - d] \quad (15)$$

Reducción del número de acciones de control distintas

Dos formas muy estudiadas para reducir el trabajo del controlador y evitar amplias oscilaciones en la respuesta del proceso han sido propuestas en la literatura. La primera es penalizar con el factor β la salida del controlador en la función objetivo; la segunda es reducir el número de acciones de control distintas que el controlador puede emplear para predecir una respuesta del proceso aproximada a la trayectoria de referencia.

El método más común para reducir del número de acciones de control es el uso de el Parámetro de Supresión de Cambio de la Acción de Control. La incorporación de este parámetro permite además mejorar la robustez del controlador [2, 6]. Otro método para lograr el mismo objetivo fue propuesto por Reid *et al.* y Mehra *et al.* en 1980 y 1981, y es denominado Bloqueo de la Acción de Control. A continuación se incluye ambos métodos de reducción de oscilaciones a la formulación de los algoritmos del MAC y el MAC Modificado.

Parámetro de supresión de cambio de la acción de control

Mediante el Parámetro de supresión de cambio de la acción de control M se especifica el número de acciones de control distintas que el controlador puede utilizar en su modelo de optimización, para predecir una salida del proceso aproximada a la trayectoria de referencia. El controlador asumirá que puede variar la señal de control m en los M próximos periodos de muestreo y la mantendrá constante a partir de ese momento.

Supresión en el Controlador MAC

Al considerar el MAC y separar las acciones de control previas a la supresión del cambio de las posteriores, el problema de optimización de (7) queda

$$\min [\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \mathbf{m}_{1M}^T \beta_{1M}^2 \mathbf{m}_{MP}^T \beta_{MP}^2 \mathbf{m}_{MP}]$$

sujeto a:

sujeto a:

$$\mathbf{Y}_{mc} = \mathbf{d} + [\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_b \Phi] \mathbf{m}_{1M} + \mathbf{Vh} \quad (19)$$

$$\mathbf{Y}_{mc} = \mathbf{d} + \mathbf{H} \mathbf{m}_{1M} + \mathbf{H}_b \mathbf{m}_{MP} + \mathbf{Vh} \quad (16)$$

donde

$$\mathbf{m}_{1M} = \begin{bmatrix} m(k) \\ m(k+1) \\ \vdots \\ m(k+M-1) \end{bmatrix}, \mathbf{H}_a = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_p & h_{p-1} & \dots & h_{p-M+1} \end{bmatrix}$$

$$\beta_{1M}^2 = \text{diagonal} [\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_M^2] \quad (17)$$

$$\mathbf{m}_{MP} = \begin{bmatrix} m(k) \\ m(k+M+1) \\ \vdots \\ m(k+P) \end{bmatrix}, \mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_2 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & h_1 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & h_1 & \vdots \\ h_{p-M} & h_{p-M-1} & \dots & h_1 \end{bmatrix}$$

$$\beta_{MP}^2 = \text{diagonal} [\beta_{M+1}^2, \beta_{M+2}^2, \dots, \beta_P^2]$$

\mathbf{m}_{1M} representa el vector de las primeras M acciones de control y \mathbf{m}_{MP} el vector de las acciones de control cuyo cambio es suprimido por el parámetro M. Como se considera que la acción de control no cambiará a partir del tiempo $k+M$, todos los elementos de \mathbf{m}_{MP} serán igual al último elemento de \mathbf{m}_{1M} , es decir

$$\mathbf{m}_{MP} = \Phi \cdot \mathbf{m}_{1M}, \Phi [P - M \times M] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Haciendo rearrreglos en (16) se obtiene

$$\min [\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \mathbf{m}_{1M}^T (\beta_{1M}^2 + \Phi^T \beta_{MP}^2 \Phi) \mathbf{m}_{1M}]$$

El problema (19) tiene una estructura idéntica al problema (7), y por lo tanto su solución es de la misma forma:

$$\mathbf{m}_{1M} = [\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \beta^2]^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{Y}_d - \mathbf{Vh} - \mathbf{d}] \quad (20)$$

donde

$$\beta^2 = [\beta_{1M}^2 + \Phi^T \beta_{MP}^2 \Phi] \quad (21)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_b \Phi] \quad (22)$$

En síntesis, para incorporar el parámetro de supresión de cambios de la acción de control al MAC, es suficiente realizar el cálculo previo de $\beta^2 \mathbf{Y} \mathbf{H}$ a través de (21) y (22).

Si se desea evitar la aparición del offset característico del MAC se hace $\beta = 0$ y la expresión (20) queda así

$$\mathbf{m}_{1M} = [\mathbf{H}^T \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{Y}_d - \mathbf{Vh} - \mathbf{d}] \quad (23)$$

Supresión en el Controlador MAC Modificado

Partiendo del problema (14), separando las acciones de control previas a la supresión del cambio de las posteriores y haciendo rearrreglos se obtiene

$$\min [\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \Delta \mathbf{m}_{1M}^T (\beta_{1M}^2 + \Phi^T \beta_{MP}^2 \Phi) \Delta \mathbf{m}_{1M}]$$

sujeto a:

$$\mathbf{Y}_{mc} = \mathbf{d} + [\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_b \Phi] \mathbf{m}_{1M} + \mathbf{Uh} \quad (24)$$

La solución típica de este tipo de problemas es:

$$\Delta \mathbf{m}_{1M} = [\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \beta^2]^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{Y}_d - \mathbf{Uh} - \mathbf{d}] \quad (25)$$

donde

$$\beta^2 = [\beta_{1M}2 + \Phi^T \beta_{MP}^2 \Phi] \quad (26)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_a + \mathbf{H}_b \Phi] \quad (27)$$

con Φ , según lo expresado en (18).

Parámetro de Bloqueo de Cambio en la Acción de Control

Ricker [7], propuso el bloqueo de la variable manipulada por un número F de período de muestreos, es decir que para los efectos del cálculo de la secuencia óptima, se estipula un cambio en la acción de control cada F períodos de muestreo; nos referimos a "F" como Parámetro de Bloqueo de Cambio en la Acción de Control.

Bloqueo en el Controlador MAC

La determinación de la secuencia de acciones de control óptimas se consigue mediante el planteamiento del problema (7) presentado anteriormente. En este caso el vector \mathbf{m} está compuesto por P elementos, pero debido a la aplicación del parámetro de bloqueo, sólo existirán P/F (P/F + 1 si P no es múltiplo de F) valores distintos de m(k). Si se llaman \mathbf{m}^* al vector de P/F (o P/F + 1) valores distintos se tiene que

$$\mathbf{m} = \psi \mathbf{m}^* \quad (28)$$

donde

$$\Psi[\mathbf{P} - \mathbf{M}\mathbf{x}\mathbf{P} - \mathbf{M}] = \text{diag}[\Psi^*|\Psi^*| \dots |\Psi^*|], \quad \Psi^*[\mathbf{F} \times \mathbf{1}] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

El problema (7) puede expresarse así:

$$\min [\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \mathbf{m}^{*T} \Psi^T \beta^2 \Psi \mathbf{m}^*]$$

sujeto a:

$$\mathbf{Y}_{mc} = \mathbf{Y}_m + \mathbf{d} = \mathbf{H}^* \mathbf{m}^* + \mathbf{Vh} + \mathbf{d} \quad (30)$$

donde

$$\mathbf{H}^*[\mathbf{P} \times \mathbf{P}/\mathbf{F}] = \mathbf{H}\Psi \quad (31)$$

Por similitud con los casos anteriores se sabe que la solución es

$$\mathbf{m}^* = [\mathbf{H}^{*T} \mathbf{H}^* + \beta^2]^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{Y}_d - \mathbf{Vh} - \mathbf{d}] \quad (32)$$

Bloqueo en el Controlador MAC Modificado

La determinación de la secuencia de acciones de control óptimas se consigue mediante el planteamiento del problema (14) presentado anteriormente. El vector $\Delta \mathbf{m}$ estará compuesto por P elementos, pero debido a la aplicación del parámetro de bloqueo, sólo existirán P/F (P/F + 1 si P no es múltiplo de F) valores distintos de m(k). Si se llaman $\Delta \mathbf{m}^*$ al vector de P/F (o P/F + 1) valores distintos se tiene que:

$$\Delta \mathbf{m} = \Psi \Delta \mathbf{m}^* \quad (33)$$

donde

$$\Psi[\mathbf{P} - \mathbf{M}\mathbf{x}\mathbf{P} - \mathbf{M}] = \text{diag}[\Psi^*|\Psi^*| \dots |\Psi^*|], \quad \Psi^*[\mathbf{1} \times \mathbf{F}] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

El problema (14) puede expresarse así:

$$\min [\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \Delta \mathbf{m}^{*T} \Psi^T \beta^2 \Psi \Delta \mathbf{m}^*]$$

sujeto a:

$$\mathbf{Y}_{mc} = \mathbf{Y}_m + \mathbf{d} = \mathbf{H}^* \Delta \mathbf{m}^* + \mathbf{Uh} + \mathbf{d} \quad (35)$$

donde

$$\mathbf{H}^*[\mathbf{P} \times \mathbf{P}/\mathbf{F}] = \mathbf{H}\Psi \quad (36)$$

Por similitud con los casos anteriores se sabe que la solución es

$$\Delta \mathbf{m}^* = [\mathbf{H}^{*T} \mathbf{H}^* + \beta^2]^{-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{Y}_d - \mathbf{Uh} - \mathbf{d}] \quad (37)$$

Tabla 1
Descripción del experimentado

Configuración	Tipo Control	Red. Num. Acc. Cntrl.	β	Sistema
1	MAC	Supresión	0	1
2	MAC	Bloqueo	0	1
3	MAC	Supresión	0	2
4	MAC	Bloqueo	0	2
5	MAC Modificado	Supresión	0-0.1	3
6	MAC Modificado	Bloqueo	0-0.1	3

Descripción del experimento

Al aplicar un factor de penalización $\beta > 0$, al MAC, aparece un offset en la salida del proceso [3]. Para evitar esto García C. y Morari M. (1982) [2] proponen el uso de un compensador estático de offset en la señal de realimentación y en el setpoint del controlador. En este trabajo se evalúa la efectividad de utilizar sólo la reducción del número de acciones de control y evitar la necesidad de incluir compensadores de offset mediante la eliminación del factor de penalización de la acción de control ($\beta=0$). La versión modificada del MAC, que penaliza la variación de la acción de control es también utilizada para evaluar los métodos de reducción del número de acciones de control. En este caso no existe offset en la salida del proceso, por lo que pueden combinarse ambas formas de reducción de oscilaciones. Se simuló el comportamiento del proceso controlado con tres sistemas cuyas funciones de transferencia de lazo abierto estables que bien pueden representar procesos típicos industriales:

Sistema 1: primer orden $1/(1+5s)^2$

Sistema 2: tercer orden $2/(1+5s)(25s^2+10s+2)$

Sistema 3: quinto orden $1/(100s^2+12s+1)(5s+1)^2(s+1)$

El experimento se realizó con cuatro configuraciones del controlador según se presenta en la Tabla 1. En todos los casos se utilizó un orden del modelo de convolución de $N=25$, y un período de muestreo $T=5$. Se estudió la respuesta transitoria obtenida cuando se modifica la salida del proceso con una perturbación unitaria sostenida.

Resultados

Las Figuras 1, 2, 3 y 4 muestran el resultado de la simulación de las configuraciones 1, 2, 3 y 4. Se observa que si la selección de M o F es apropiada, la extensión del horizonte de predicción por encima de dos veces el orden del sistema tiene muy poca influencia en el comportamiento de proceso en términos del Error Absoluto Integrado (IAE), confirmando lo indicado por [2] y [5].

Tanto para el sistema 1 como para el 2, la utilización de variación de acciones de control

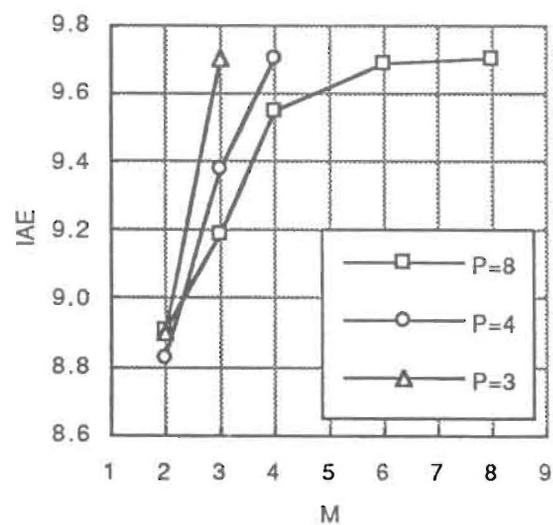


Figura 1. Efecto del parámetro de supresión M en el comportamiento del controlador 1 con el sistema 1 y una perturbación unitaria sostenida. $N=25$, $T=5$.

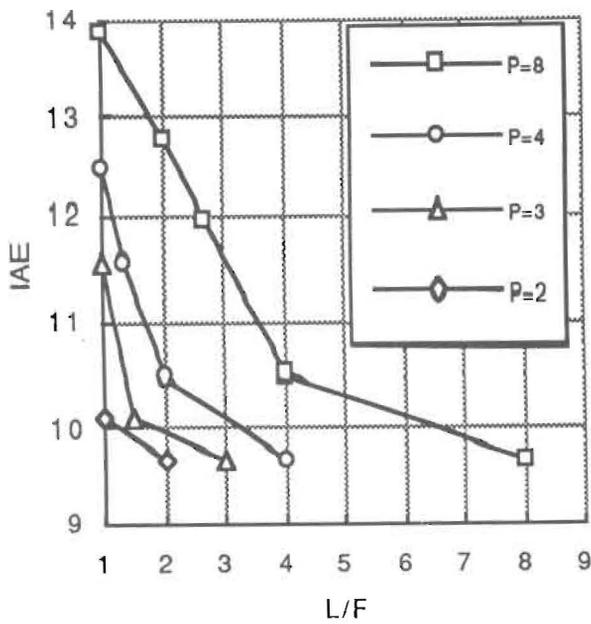


Figura 2. Efecto del parámetro de bloqueo F en el comportamiento del controlador 2 con el sistema 1 y una perturbación unitaria sostenida. N=25, T=5.

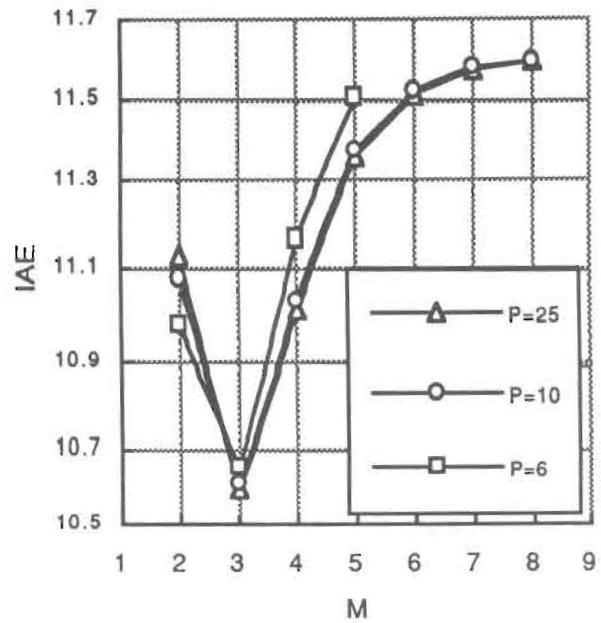


Figura 3. Efecto del parámetro de supresión M en el comportamiento del controlador 1 con el sistema 2 y una perturbación unitaria sostenida. N=25, T=5.

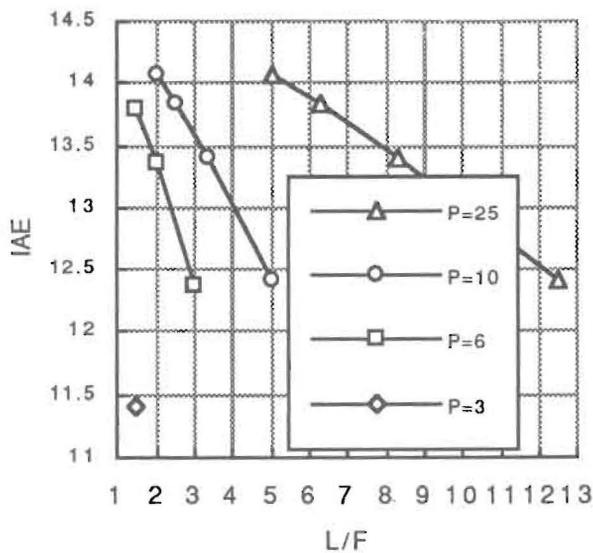


Figura 4. Efecto del parámetro de bloqueo F en el comportamiento del controlador 2 con el sistema 2 y una perturbación unitaria sostenida. N=25, T=5.

permitted better results obtained through blocking. The smallest IAE obtained through blocking occurs when $F = 1$, which means no blocking at all, and represents a special case of the use of suppression ($M = L$). This configuration is equivalent to a controller Dead beat, which experiments pronounced oscillations in the response of the process and large values of the control action, which discards it as a competitor for configurations with values of $F > 1$. With $F = 2$ an IAE of 10.1 and 12.4 were obtained for systems 1 and 2 respectively. In both cases the IAE was 15% higher than that obtained through the appropriate selection of the suppression parameter M. In fact, any value of M allows for a better performance than through blocking.

The response obtained through blocking, however, offers an advantage over those obtained through suppression. Figure 5 shows the response in the time of system 1 with suppression and with blocking. It is noticeable that the controller with blocking is able to avoid overshoots in the response. In the measurement that is

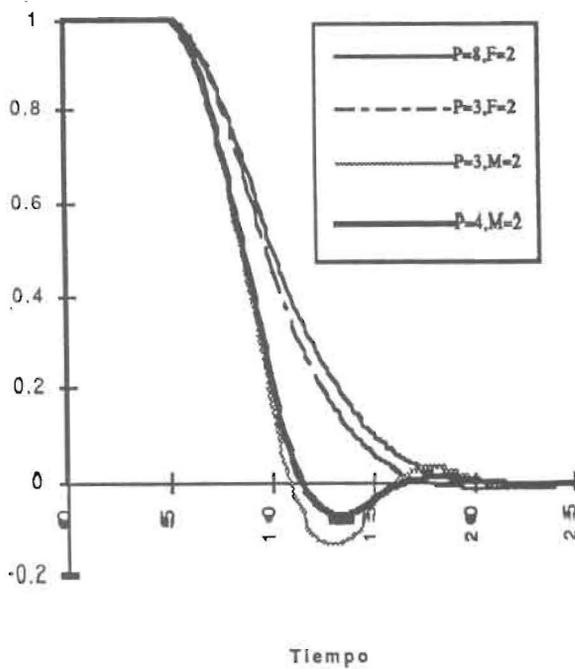


Figura 5. Respuesta del sistema 1 con el Controlador MAC y una perturbación unitaria sostenida. $N=25$, $T=5$.

incrementa el valor asignado a F (bloqueo acentuado), el controlador eligirá desde el principio una señal de control más aproximada al valor recíproco de la perturbación dividido por la ganancia del proceso. En el caso de procesos de primer orden excitados por perturbaciones sostenidas, esto significa oposición al sobrepico.

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran varios atributos del comportamiento del sistema 3 controlado MAC Modificado con supresión. Se graficó la influencia de β , M y F sobre IAE, el Tiempo de Estabilización con criterio del 2% (TE) y la Salida Máxima (SM) del controlador. El valor de $M = 3$ parece superar el comportamiento logrado con cualquier otro valor de M en los aspectos de IAE, TE y SM. Sólo con valores de β ubicados entre 0.008 y 0.02 y valores de $M \geq 4$, el controlador produjo un IAE menor, por un estrecho margen, al obtenido con $M = 3$ y $M = 5$ en todo el rango de las pruebas realizadas. Para $M = 2$, el IAE, el TE y la SM son prácticamente insensibles al valor de β por lo que no resulta justificable complicar el algoritmo del controlador con un valor de $\beta \neq 0$ si $M = 2$. Para valores de $M > 2$, sin embargo, en la medida que se incrementa β se reduce la magnitud de la SM, valor que se acerca

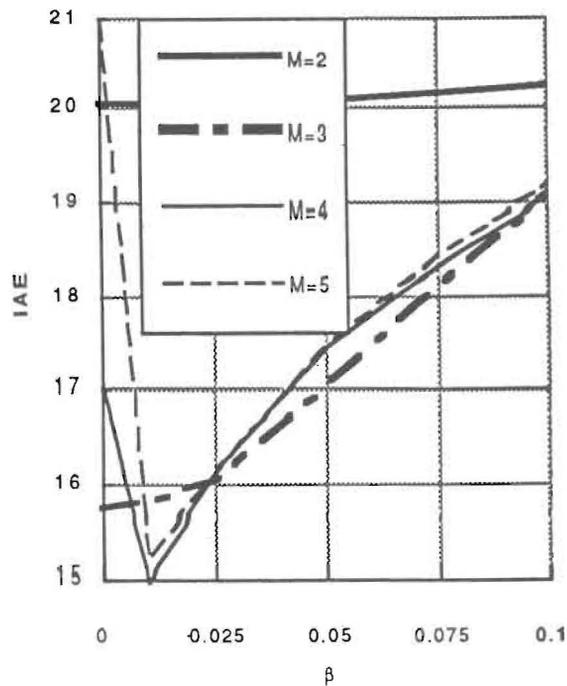


Figura 6. Efecto de la penalización β sobre el IAE del controlador 3 con penalización en Δm y Supresión M aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. $L=10$, $N=25$, $T=5$.

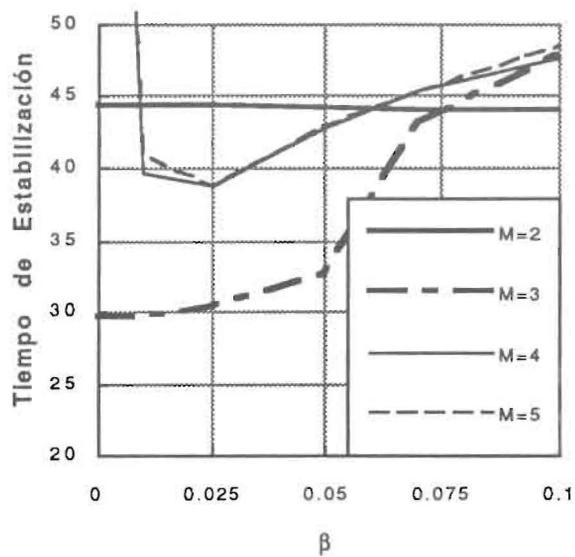


Figura 7. Efecto de la penalización β sobre el Tiempo de Estabilización del controlador 3 con penalización en Δm y Supresión M aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. $L=10$, $N=25$, $T=5$.

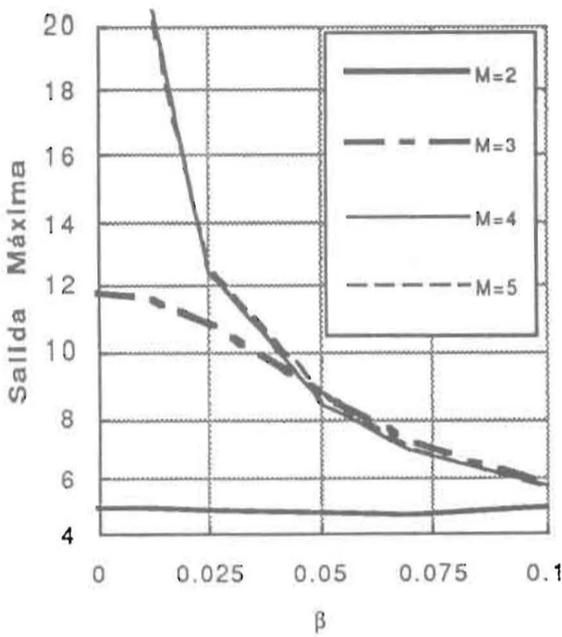


Figura 8. Efecto de la penalización β sobre Salida Máxima del controlador 3 con penalización en Δm y Supresión M aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. $L=10$, $N=25$, $T=5$.

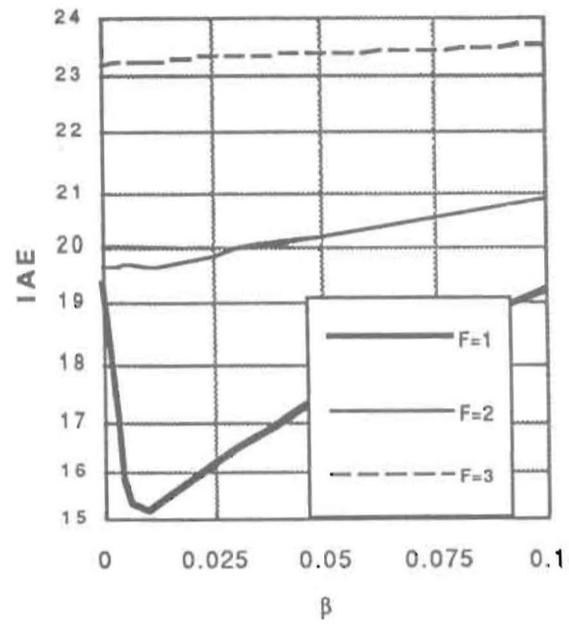


Figura 9. Efecto de la penalización β sobre el IAE del controlador 4 con penalización en Δm y Bloqueo F aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. $L=10$, $N=25$, $T=5$.

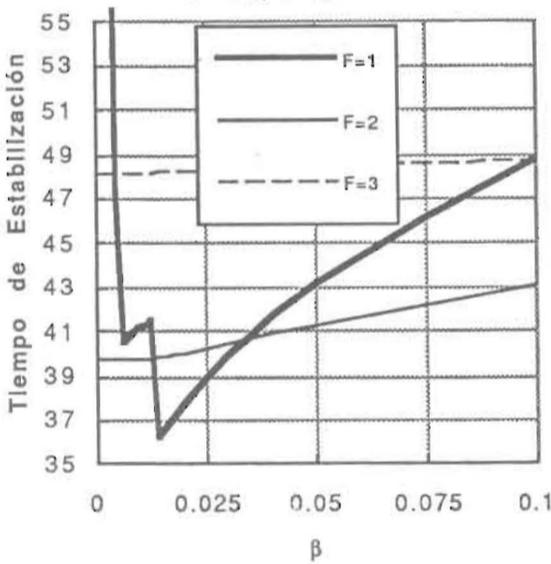


Figura 10. Efecto de la penalización β sobre el Tiempo de Estabilización del controlador 4 con penalización en Δm y Bloqueo F aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. $L=10$, $N=25$, $T=5$.

asintóticamente al que corresponde a $M = 2$, pero valores muy grandes de β producen un deterioro significativo del IAE y el TE.

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran el comportamiento obtenido al controlar el sistema 3 con el MAC Modificado y el uso de bloqueo. Al igual que en el caso del controlador MAC, el IAE obtenido mediante Bloqueo ($F > 1$) es siempre mayor al obtenido sin bloqueo ($F = 1$), pero este último caso presenta valores grandes de SM cuya reducción implica una penalización acentuada de las variaciones de la señal de control mediante (valores grandes de β). Desafortunadamente al hacer β grande se deteriora TE, lo que permite descartar el uso de $F = 1$. El bloqueo mediante $F = 2$ arroja un comportamiento que supera al de $F = 3$ en IAE y TE en todo el rango de β estudiado. La SM para $F = 3$ es considerablemente menor a la de $F = 2$. Se observa también que para valores $F > 1$ todos los atributos estudiados son poco sensibles al valor de β , por lo que resulta conveniente simplificar el

Tabla 2

Resultados relevantes del sistema 3 gobernado por el controlador MAC modificado con Supresión y Bloqueo en la señal de control, y una perturbación unitaria sostenida. T=5, N=25

Red. Num. Acc. Cntrl.	Parámetros	IAE	TE	SM	Orden de las Matrices
Supresión	M=2, $\beta=0.1$	20.23	44.1	4.44	2xP
Supresión	M=3, $\beta=0.05$	17.01	32.5	8.82	3xP
Bloqueo	F=2, $\beta=0$	19.65	39.8	4.94	5xP
Bloqueo	F=3, $\beta=0$	23.24	48.2	2.53	4xP

controlador eliminando la penalización sobre la variación de la acción de control ($\beta = 0$).

En la Tabla 2 se presenta los atributos de cuatro seleccionados por su comportamiento deseable. Se ha incluido el orden de las matrices para evaluar los requerimientos de computación de cada caso.

La Figura 12 muestra la respuesta del proceso con los controladores indicados en la Tabla 2. Con el propósito de comparar se incluye

además, la respuesta del sistema 3 con un conductor MAC con penalización en la acción de control de $\beta = 0.2$. Nótese la aparición del offset a que se hizo mención anteriormente.

Conclusiones

Se comparó el efecto de limitar el número de acciones de control distintas mediante los métodos de supresión y bloqueo de las variacio-

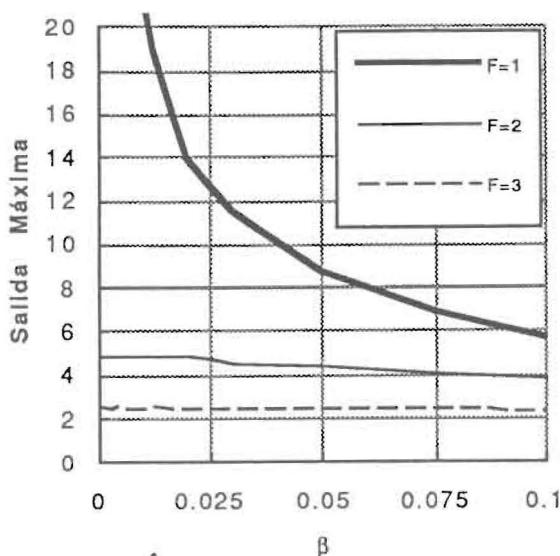


Figura 11. Efecto de la penalización β sobre Salida Máxima del controlador 4 con penalización en Δm y Bloqueo F aplicado al sistema 3 sometido a una perturbación unitaria sostenida. L=10, N=25, T=5.

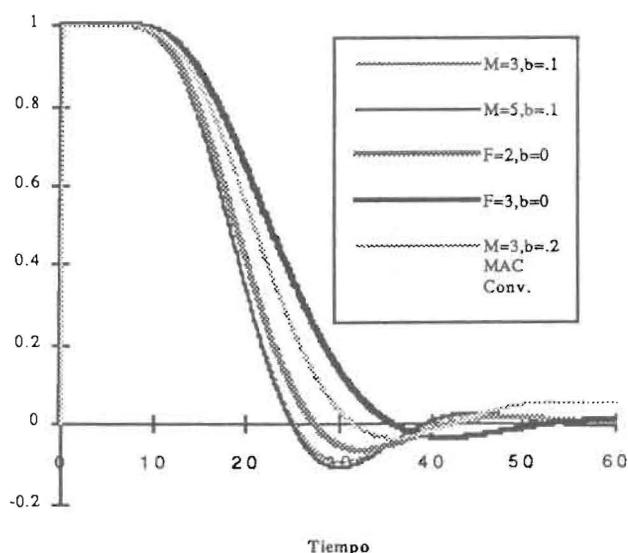


Figura 12. Comportamiento del sistema 3 con los Controladores MAC Modificado y MAC Convencional y con una perturbación unitaria sostenida. N=25, T=5.

nes de la acción de control utilizando controladores MAC y MAC Modificado. Con ambos controladores el uso de supresión permitió valores menores del IAE y el TE si se selecciona apropiadamente los parámetros de supresión M y la penalización de la acción de control β (en el caso MAC modificado). No obstante el bloqueo mostró ser más efectivo para mantener bajos los valores de la salida máxima del controlador y evitar sobrepicos pronunciados en la respuesta del controlador.

Adicionalmente el bloqueo parece ofrecer más bondades en lo referente a la entonación del controlador. Dada la relativa insensibilidad del IAE, el TE y la SM al valor de β cuando se usa bloqueo, se hace innecesaria la penalización de las acciones de control, lo que elimina el tener que utilizar el parámetro de entonación β , simplificando así el trabajo de entonación requerido y la carga de cálculos sobre el computador.

Referencias

1. J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud and J. Papon, Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial Process. *Automatica*, Vol. 24, No. 2, (1978), 149 - 163.
2. Garcia C. and Morari M, Internal Model Control-1. A Unifying Review and Some New Results. *Ind Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 21 (1982) 308-323.
3. Garcia C., Prett D. and Morari M. Model Predictive Control: Theory and Practice- a Survey. *Automatica*, Vol. 25, (1989), 335-348.
4. R. M. C. De Keyser, Ph G. A. Van de Velde and F. A. G. Dumortier, A Comparative Study of Self-adaptive Long-range Predictive Control Methods. *Automatica*, Vol. 24, No. 2, (1986) 149-163.
5. C. Vinante y G. Febres. Controladores Basados en Modelos. Notas de la División de Postgrado de Ingeniería, La Universidad del Zulia, Venezuela. 1992.
6. J. L. Marchetti, D. A. Mellichamp and D.E. Seborg. Predictive Control Based Convolution Models. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 22, (1983) 448-495.
7. Ricker, L. Use of Q-P for Internal Model Control, *Ind. Eng. Chem. Process des. Dev.*, 24 (1985), pp 925-936.

Recibido el 15 de Febrero de 1993

En forma revisada el 15 de Junio de 1994