

## Experimental study of suppression and blocking in internal model control

*Luis C. Abud C., Javier I. Bastidas O. and Carlos D. Vinante*

*Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Apartado Postal 10523 Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Venezuela.*

### Abstract

One of most popular tuning methods currently used for tuning controllers based on convolution models is the suppression of the variation of the control action after a certain sampling time in the predictive horizon. In this paper an alternative tuning method is studied. This method is based on keeping the control action constant over blocks of sampling times in the predictive horizon. Experimental results are presented on the performance of both tuning methods. These results show that the IMC controller with blocking action compares favorably with the suppression method, and that the combination of penalizing variations of the control action and blocking is the most convenient tuning alternative.

**Key words:** Internal model control, digital control.

## Estudio experimental de supresión y bloqueo en controladores de modelo interno

### Resumen

En la actualidad uno de los métodos más usados para el entonamiento de controladores basados en modelos de convolución es el de supresión de los cambios de la variable manipulada a partir de un cierto instante de muestreo en el horizonte de predicción. En el presente trabajo se estudia un método alternativo de entonamiento basado en mantener las acciones de control constantes en bloques de periodos de muestreo sobre el mismo horizonte. Además se presenta un estudio comparativo de ambos métodos implementados en un controlador digital de modelo interno (IMC) para el control de caudal en un banco de prueba de válvulas de control. En base a este estudio se determinó que el controlador IMC con bloqueo en las acciones de control compara favorablemente con el método de supresión y que la combinación de penalización apropiada de los cambios en las acciones de control y bloqueo es la alternativa más conveniente de entonamiento.

**Palabras claves:** Control de modelo interno, control digital.

### Introducción

Los controladores de Modelo Interno (IMC) han sido ampliamente estudiados en la literatura de controles en [1-2]. La estrategia del diseño de los controladores IMC esta basada en usar como controlador una aproximación estable de la inversa del modelo de la planta sin considerar

retardos y diseñar un filtro para garantizar estabilidad frente a discrepancias entre el modelo y la planta. La necesidad de una inversa aproximada estable de la planta se debe a que la inversa exacta puede ser inestable o aún siendo estable, el controlador IMC resultante requiera de acciones de control excesivas que conducen

a respuestas oscilatorias entre tiempos de muestreo.

Una forma de resolver simultáneamente el problema de hallar la Inversa aproximada y desensibilizar el controlador obtenido, es formulando y resolviendo un problema general de control predictivo usando un modelo de convolución del proceso [1-4]. Dependiendo de la formulación de este problema de control predictivo se obtienen diferentes algoritmos de control IMC. A pesar de que existen diferencias sutiles entre los algoritmos obtenidos, las características que tienen en común son más importantes que sus diferencias [2].

La ventaja principal de usar modelos de convolución discretos para estos controladores es que no es necesario suponer una estructura de los mismos. Además los coeficientes del modelo se pueden obtener experimentalmente con mínimo error usando muestras de entrada y salida del proceso. Esto es particularmente útil para sistemas donde especificar la estructura de un modelo paramétrico resultaría difícil. Teóricamente esta forma de modelar es aplicable a procesos asintóticamente estables como son la mayoría de los encontrados en la Ingeniería Química, y que puedan ser descritos por un conjunto de ecuaciones diferenciales linealizadas alrededor del punto de operación estacionario.

La mayoría de estos algoritmos usan un modelo lineal del proceso dinámico para desarrollar la optimización en tiempo real de las acciones de control presente y futuras. Todos los algoritmos obtenidos con esta optimización presentan varios parámetros para su entonamiento tales como duración del horizonte de predicción, orden del modelo de la planta, penalización de las acciones de control o de su desviación y penalización de los errores en la función objetivo. Además si la implementación se hace en forma digital, el período de muestreo también se puede utilizar para cambiar el comportamiento del lazo de control.

Un gran número de trabajos que estudian la influencia de todos estos parámetros han aparecido en la literatura [1]; [5]. La mayoría de estos estudios están basados en simulaciones

digitales. A nivel experimental se han reportado muy pocos trabajos. Entre ellos se puede mencionar a Arkun [6], que estudió algoritmos IMC usando un tanque de mezcla y un intercambiador de calor, y Levien [7] que los aplicó al control de una columna de destilación de mezclas ternarias.

En la actualidad también se utiliza, para el entonamiento del controlador IMC, la estrategia de mantener la acción de control constante a partir de un tiempo en el horizonte de predicción. Es decir suprimiendo, en la optimización, su variación después de M periodos de muestreo. Esta estrategia conocida como "Método de Supresión" ha sido ampliamente estudiada [1], [2], [5]. Se ha encontrado que utilizar valores de M bajos con respecto al horizonte de predicción tiende a estabilizar al sistema, además de reducir las dimensiones del problema a resolverse en cada iteración.

Una estrategia de entonamiento alternativa consiste en mantener constante las acciones de control en bloques de periodos de muestreo en la optimización sobre el horizonte de predicción, aplicar la acción de control correspondiente al primer bloque y repetir el proceso en la siguiente iteración. Ricker [4] menciona este método de entonamiento pero no lo desarrolla como alternativa al método de supresión. Desde el punto de vista computacional el método de bloqueo también presenta la ventaja de reducir el tamaño de las matrices involucradas en la optimización.

En el presente trabajo se estudian experimentalmente estas dos estrategias de entonamiento, desarrollando un método matricial para su implementación digital y comparando su comportamiento en el control de caudal en un banco de prueba para calibración de válvulas de control. Este estudio se realizó para distintas condiciones de operación y distintos valores deseados de caudal.

La importancia de realizar estos estudios experimentales es que en ellos se reflejan fielmente las condiciones de operación reales. La mayoría de las simulaciones digitales no toman en cuenta los problemas de ruidos en las señales, histeresis de válvulas, no linealidades, etc.

Todos estos problemas influyen en la determinación experimental de los modelos de convolución, produciendo discrepancias entre estos y los procesos reales, lo cual conlleva a la necesidad de usar filtros en los lazos de control [3] y [6]. Estos filtros se han utilizado en el presente trabajo para la determinación de los modelos de convolución usados en el diseño de los controladores IMC.

En la sección 2 de este trabajo se presenta un breve desarrollo de los controladores de modelo interno basados en modelos de convolución y las modificaciones que se introducen en este controlador básico para lograr supresión o bloqueo en las acciones de control. Una descripción más completa de este desarrollo se presenta en [1]; [3]. La sección 3 presenta una descripción del equipo experimental utilizado para realizar este estudio y la implementación digital de los algoritmos de control. Los resultados obtenidos son significativos, pues fueron realizados repetidas veces bajo condiciones de operación controladas, y permitieron comparar experimentalmente el efecto de la supresión y bloqueo. La sección 4 presenta los resultados experimentales obtenidos utilizando estos algoritmos de control para diferentes condiciones de operación del equipo y diferentes parámetros de entonación. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados experimentales.

**Algoritmos de control de modelo interno usando modelos de convolución**

En esta sección se presentará la idea básica del controlador IMC. Una presentación más detallada se da en [3], [5].

La salida  $y(k)$  de un sistema lineal, asintóticamente estable e invariante en el tiempo puede ser descrita mediante una suma finita de respuestas a un impulso:

$$y_m(k + \tau) = \sum_{j=1}^P h_j u(k - j) \tag{1}$$

Donde :

$y_m(k)$  es la salida del modelo para un tiempo  $k$

- $u(k)$  es la entrada al modelo para un tiempo  $k$
- $h_j$  son los coeficientes de la respuesta impulsiva
- $P$  es el horizonte de predicción
- $N$  es el orden del modelo de convolución ( $h_j = 0$  para  $j > N$ ).
- $\tau$  Tiempo muerto o tiempo de retardo.

En cada instante  $k$  las salidas futuras del modelo predichas  $y_m(k+\tau+i)$ ,  $1 \leq i \leq P$ , sobre un horizonte de  $P$  periodos de muestreo se obtienen como una función de la acción de control  $u(k)$ ,  $u(k+1)$  .....  $u(k+P-1)$ .

Utilizando una estrategia de control apropiada de tal manera que la salida  $y(k+\tau+i)$  siga en forma óptima la trayectoria deseada  $y_d(k+\tau+i)$  en el horizonte de  $P$  periodos de muestreo en el futuro se calcula esta secuencia de acciones de control.

Cuando el modelo de la planta utilizado es incorrecto, la respuesta de esta ley de control en lazo abierto podría desviarse significativamente de la trayectoria deseada. Por lo tanto es preferible implementar solamente la acción de control presente  $u(k)$ , y resolver nuevamente el problema en el tiempo  $k+1$  usando la medición de la salida en  $k+1$  como nuevo punto de partida.

Para la formulación del IMC considerada en este trabajo, la estrategia utilizada es resolver los siguientes problemas:

$$\text{MIN}_u \left[ e^T \Gamma e + u^T \beta^2 I u \right] \tag{P1}$$

o

$$\text{MIN}_{\Delta u} \left[ e^T \Gamma e + \Delta u^T \beta^2 I \Delta u \right] \tag{P2}$$

Dependiendo si se penaliza  $u$  o  $\Delta u$ .

Donde  $\Gamma$  y  $\beta$  son matrices de penalización y  $u = [ u(k), u(k+1) \dots \dots \dots u(k+p-1) ]$  y  $\Delta u = [ \Delta u(k), \Delta u(k+1) \dots \dots \Delta u(k+p-1) ]$  son las acciones de control presente y futuras o sus diferencias con respecto a la última acción de control aplicada.

En ambos problemas el vector  $e = [ e(k), e(k+1), \dots, e(k+p-1) ]$  representa la diferencia entre la trayectoria de referencia  $y_d = [ y_d(k+\tau), y_d(k+1+\tau), \dots, y_d(k+p+\tau-1) ]$  y la salida predecida por la ecuación (1) ajustada por las perturbaciones del proceso. La mejor predicción de las perturbaciones futuras, es fijarlas, igual a la perturbación del instante presente:

$$d(k+i) = d(k) = y(k) - y_m(k) \quad k < i < P \quad (2)$$

y se obtiene de la medición presente de la salida del proceso y la salida del modelo, por lo tanto la única señal retroalimentada usada por el sistema de control.

Utilizando las siguientes representaciones matriciales de las salidas predichas, ajustadas por las perturbaciones, esto es:

Para [P1] :

$$y_{mc} = d + Hu + H_1 u_1 \quad (3)$$

y para [P2] :

$$y_{mc} = d + H\Delta u + H_2 u_1 \quad (4)$$

como restricciones, en los problemas [P1] y [P2], las soluciones de estos están dadas por [1]; [2]; [3]:

$$u = [ H^T T^2 H + \beta^2 I ]^{-1} H^T [ y_d - H_1 u_1 - d ] \quad (5)$$

[P1],

y

$$\Delta u = [ H^T T^2 H + \beta^2 I ]^{-1} H^T [ y_d - H_2 u_1 - d ] \quad (6)$$

[P2],

Donde

$u^T = [ u(k-1), \dots, u(k-N-1) ]$  es el vector de las acciones de control pasadas. La matriz dinámica  $H$  y las matrices  $H_1$  y  $H_2$  de dimensión  $(P \times (N-1))$  ( $h_i=0$  para  $i>N$ ) están dadas por:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_p & h_{p-1} & \dots & \dots & \dots & h_1 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_2 & h_3 & \dots & \dots & \dots & h_N \\ h_3 & h_4 & \dots & \dots & \dots & h_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_N & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} h_1 + h_2 & h_3 & \dots & \dots & \dots & h_N \\ h_1 + h_2 + h_3 & h_4 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{K=1}^{i+1} h_K & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{K=1}^N h_K & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

(7)

En tiempo real las ecuaciones (5) y (6) se resuelven en cada tiempo de muestreo y se aplica la primera acción de control  $u(k)$  o  $\Delta u(k)$ .

### Desarrollo de los métodos de supresión y bloqueo.

Las ecuaciones (5) y (6) usadas para calcular las acciones de control, tienen varios parámetros que permiten entonar al controlador para lograr buen comportamiento con un adecuado grado de robustez. Estos parámetros son: la selección de un tiempo adecuado de muestreo, matrices de penalización  $\beta^2$  y  $T$ , horizonte de predicción  $P$ , y supresión o bloqueo de entrada.

Cuando se usa la supresión de entrada, la optimización en el tiempo de muestreo  $k$ , es realizada permitiendo que la acción de control cambie desde el tiempo  $k$  hasta  $k+M-1$ , y a partir de  $k+M-1$  se mantiene constante.  $M$  es el parámetro de la supresión de entrada,  $M < P$  y en general  $M < N$ . Ha sido demostrado que pequeños

valores de M tienden a estabilizar el controlador para un valor dado de P.

La supresión de entrada puede ser incluida en los problemas [P1] y [P2] separando en dos, antes de realizar la optimización, al vector de las acciones de control y la matrices correspondientes, de acuerdo a si se les permite variar o no. Se puede demostrar [3], [5] que esto es equivalente a multiplicar las matrices H y  $\beta^2$  en las ecuaciones (5) y (6) por la matrices siguientes:

$$\Phi_{M1}^T = \begin{bmatrix} I_M & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

y

$$\Phi_{M2}^T = \begin{bmatrix} I_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde:  $I_M$  es la matriz identidad (MxM) y  $\Phi_{M1}^T$  y  $\Phi_{M2}^T$  son matrices de (MxP)

Para obtener :

$$u_M = \left[ \Phi_{M1}^T H^T \Gamma \Phi_{M1} H + \Phi_{M2}^T \beta^2 I \Phi_{M2} \right]^{-1} \Phi_{M1}^T H^T [y_d - H_1 u_1 - d] \quad (9)$$

$$\Delta u_M = \left[ \Phi_{M1}^T H^T \Gamma \Phi_{M1} H + \Phi_{M2}^T \beta^2 I \Phi_{M2} \right]^{-1} \Phi_{M1}^T H^T [y_d - H_2 u_1 - d] \quad (10)$$

Dando las primeras M componentes de la acción de control.

Una alternativa a la supresión de entrada, sugerida por [4], pero no estudiada exhaustivamente, es restringir las variaciones de la variable de control durante la optimización sobre P, manteniéndola constante en bloques de tiempos de muestreo, y aplicando al proceso el primer elemento del primer bloque. La duración del intervalo de bloqueo esta dado por F x T donde F es el parámetro de bloqueo. Por lo tanto para un horizonte de P instantes de muestreo la optimización en cada tiempo de muestreo calculará solamente P/F o P/F+1, diferentes acciones de control.

El bloqueo puede ser incluido en los problemas [P1] y [P2] escribiendo los vectores  $u^*$  y  $\Delta u^*$  de dimensiones P/F o P/F+1 donde sus componentes son los primeros elementos de cada bloque.

Entonces :

$$u = \Psi_{F1} u^* \quad (11)$$

o

$$\Delta u = \Psi_{F1} \Delta u^* \quad (12)$$

Donde la matriz  $\Psi_{F1}$  de dimensión (P x F) es:

$$\Psi_{F1} = \text{diagonal} [\Psi_1^*, \Psi_1^*, \dots, \Psi_1^*] \quad (13)$$

y

$$\Psi_{F2} = \text{diagonal} [\Psi_2^*, \Psi_2^*, \dots, \Psi_2^*] \quad (14)$$

con

$$\Psi_1^{*T} = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] \text{ y } \Psi_2^{*T} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$$

y cada elemento  $\Psi^*$  es un vector unitario de dimensión F.

Entonces los algoritmos para los controladores con bloqueo incluido son :

$$u^* = \left[ \Psi_{F1}^T H^T \Gamma \Psi_{F1} H + \Psi_{F2}^T \beta^2 I \Psi_{F2} \right]^{-1} \Psi_{F1} H^T [y_d - H_1 u_1 - d] \quad (15)$$

$$\Delta u^* = \left[ \Psi_{F1}^T H^T \Gamma \Psi_{F1} T H + \Psi_{F2}^T \beta^2 I \Psi_{F2} \right]^{-1} \Psi_{F1} H^T [y_d - H_2 u_1 - d] \quad (16)$$

Por lo tanto la matriz H se reduce de dimensión (P x P) a (P x P/F), en el caso de bloqueo y a dimensión (P x M) en el caso de supresión.

### Estabilidad del controlador IMC.

Una forma de comparar la estabilidad relativa de los controladores de modelo interno con supresión o bloqueo es mediante el cálculo de las raíces del denominador de sus ecuaciones de transferencia.

La acción de control a ser implementada en cada instante se obtiene seleccionando el primer elemento de los vectores dados por las ecuaciones (10) ó (16), y esto se logra multiplicando a dichas ecuaciones por vectores  $b^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$  de dimensiones apropiadas M o P/F, dando ecuaciones en tiempo real de la forma,

$$u(k) + \sum_{l=1}^{N-1} \delta_l u(k-l) = \sum_{l=1}^P v_l [y_d(+\tau+l) - d] \quad (17)$$

Donde los coeficientes  $\delta_l$  y  $v_l$  dependen de los parámetros del controlador, de los coeficientes de convolución utilizados y el método de supresión o bloqueo.

La forma general de la ley de control es por lo tanto:

$$D_c(z)u(z) = Z^{\tau+1}N_c(z)y_d(z) - N_c(1)[y(z) - y_m(z)] \quad (18)$$

Donde:

$$D_c(z) = 1 + \delta_1 Z^{-1} + \dots + \delta_{N-1} Z^{-N+1} \quad (19)$$

y

$$N_c(z) = \gamma_1 + \gamma_2 Z^{-1} + \dots + \gamma_p Z^{-p+1} \quad (20)$$

Las raíces de  $D_c(z)$  determinan la estabilidad relativa del controlador. A medida que las raíces se acercan al círculo unitario la estabilidad del sistema tiende a disminuir. En este trabajo para cada condición de los parámetros del controlador y modelo de convolución se determinó la magnitud de la raíz más grande de  $D_c(z)$ .

Mediante el estudio de estas raíces se demostró en [5] que los controladores IMC, para sistemas con una respuesta discreta monotónica son estables para el caso de  $\beta = 0$  y  $P=N$  si se

elige M suficientemente pequeño o F suficientemente grande.

En el caso de no tener una respuesta discreta monotónica en [3], [8] y [9] se demuestra que es posible garantizar, para los dos tipos de controladores estudiados en este trabajo, su estabilidad para todo M y F, eligiendo  $\beta$  suficientemente grande y el horizonte P tal que

$$\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^i h_j > 0$$

### Descripción del equipo experimental utilizado

El estudio experimental de los algoritmos IMC y la influencia de algunos de los parámetros de entonamiento se realizó utilizando el banco de prueba que se muestra en la figura 1. El sistema consiste de un tanque, bomba centrifuga, tuberías y válvulas que permiten variar y controlar presiones y caudales en diversas partes del proceso. La medición de caudal se realizó utilizando una placa orificio y un medidor de presión diferencial. Las válvulas VM1, VM2, VM3 y VM4 son válvulas manuales, mientras que las válvulas CV1 y CV2 son válvulas de control neumáticas, accionadas por aire con presión de 3-15 psig.

De la figura 1 se observa que mediante cambios de posición de la válvula manual VM2, manteniendo cerradas VM3 y CV2 y completamente abierta VM1 se puede simular distintas condiciones de operación de la planta. La figura 2 muestra las curvas instaladas de la válvula CV1 correspondientes a distintas aperturas de la válvula VM2. La ganancia del sistema varía considerablemente con la posición de la válvula manual VM2. Esto permite introducir cambios en el sistema (perturbaciones) manteniendo el punto de operación (valor deseado) constante.

Los algoritmos de control se implementaron utilizando un computador personal 80386, con co-procesador matemático. La adquisición de datos se realizó utilizando una tarjeta analógica digital (A/D) DAS-8PGA-OMEGA con 16 canales de entrada analógicas y ganancias de entradas variables programadas vía Software.

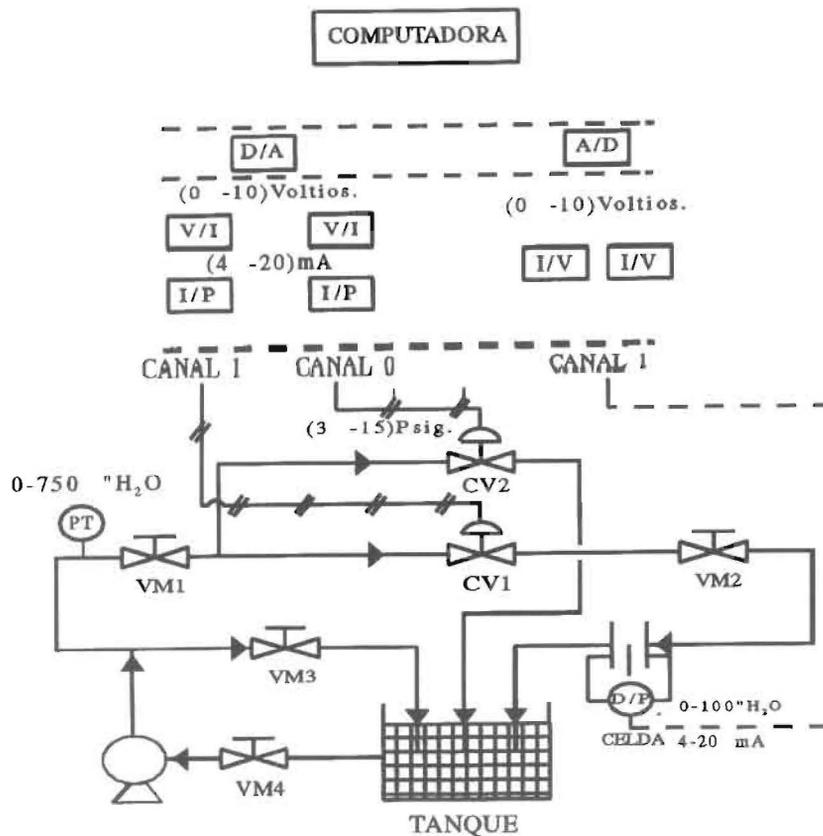


Figura 1. Equipo Experimental

Esta tarjeta tiene además capacidad de fijar los tiempos de muestreo mediante interrupciones. El manejo de las válvulas de control se realiza utilizando una tarjeta digital analógica (D/A) DDA-06-OMEGA con 6 canales independientes de conversión D/A e interfaces adecuadas.

La primera etapa en la implementación del algoritmo de control es la determinación experimental del modelo de convolución. Esto se realiza, una vez fijado el punto de operación, excitando al sistema en lazo abierto (cambios en la señal a la válvula de control CV1) con escalones positivos y negativos, esto se hace para promediar las respuestas debido a la no linealidad del sistema. Las señales de caudal, previo filtrado, se usan para la determinación de los coeficientes de convolución ( $h_i$ ) [3]. Con estos valores de  $h_i$  se forman las matrices necesarias para los controladores.

El algoritmo de control en cada instante de muestreo lee el valor del caudal, calcula mediante las ecuaciones (9), (10), (15) y (16) el vector de

acciones de control sobre el horizonte de predicción y se aplica a la válvula de control CV1 la acción correspondiente al primer elemento de este vector. Este procedimiento se repite en cada iteración.

## Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados experimentales del comportamiento del controlador IMC, utilizando solamente la formulación que penaliza los cambios en las variaciones de las acciones de control (Ec.6). Esta formulación es más conveniente cuando se utilizan penalizaciones en las acciones de control o sus variaciones.

Las pruebas experimentales se realizaron con el fin de comparar el comportamiento de los controladores IMC con supresión o bloqueo usando los siguientes parámetros en el controlador:

- Tiempo de muestreo ( $T$ ):

Se realizaron experimentos con tiempos de muestreo de 0.2 y 0.5 seg.

- Penalización de acciones de control ( $\beta$ ) :  
Se utilizaron valores de  $\beta$  de 0, 0.5 y 1.
- Horizonte de predicción (P) :  
P=24 para todos los intervalos de muestreo
- Método de entonamiento :  
Supresión (M).  
Bloqueo (F).

Estas pruebas consistieron en observar las respuestas del lazo de control sometidas a cambios en el valor deseado de 12 a 15 GPM y luego de alcanzar la estabilización de 15 a 12 GPM.

También se realizaron pruebas cambiando la posición de la válvula manual VM2 de su posición estacionaria del 50% de abertura al 75%, manteniendo el valor deseado de caudal constante en 12 GPM. Este tipo de pruebas equivale a perturbar el sistema y simultáneamente introducir cambios en el sistema principalmente en su ganancia. Al mantener el valor deseado fijo y abrir la válvula manual VM2 la válvula de control CVI pasa a una curva instalada de mayor pendiente como se observa en la figura 2. Esto introduce una discrepancia entre el modelo usado en el controlador y el proceso afectando su comportamiento. En la figura 3 se

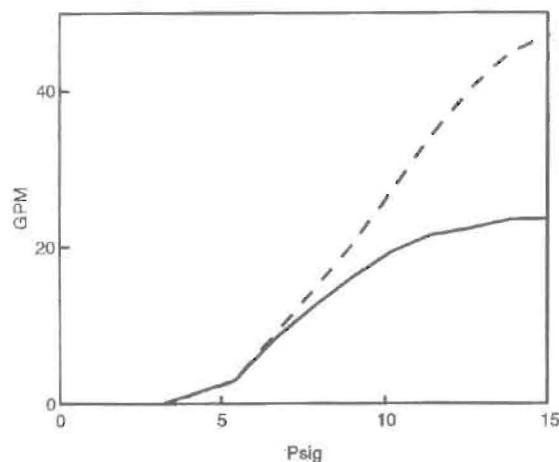


Figura 2. Curva característica de la válvula CVI  
--- VM2 75% abierta  
— VM2 50 % abierta

muestra los coeficientes de convolución experimentales determinados alrededor de un mismo punto de operación de 12 GPM y dos posiciones de la válvula VM2 con tiempo de muestreo de T=0.2 seg. En esta figura se observa la influencia de la posición de la válvula VM2 en la respuesta del sistema.

Con los coeficientes de convolución determinados experimentalmente y la ecuación (19) se determinó la magnitud de la raíz más grande del polinomio  $D_c(z)$  para distintas condiciones de operación. Esto se realizó con el objeto de tener una medida cualitativa de la estabilidad de los controladores. Estos cálculos se efectuaron para P=25, T=0.2 seg y 0.5 seg. Para el caso de T=0.5 seg se utilizó un orden del modelo de N=15 y para T=0.2 seg N=20. Se observó que para  $P > N$  los resultados prácticamente no varían con el valor de N.

Las tablas 1y 2 muestran la magnitud de la mayor raíz en función de los parámetros M, F, coeficiente de penalización  $\beta$  y tiempo de muestreo. En general para un mismo número de acciones de control calculadas sobre el horizonte de predicción (M=12, F=2 ó M=3, F=8) la magnitud de la raíz para el controlador con bloqueo tiende a ser menor que para el caso de usar supresión. Los casos de M=24, F=1 y M=1, F=24

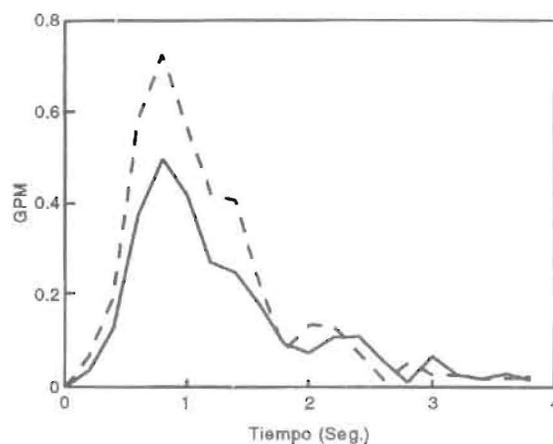


Figura 3. Respuesta impulso  
---VM2 75% abierta  
— VM2 50% abierta

Tabla 1

Magnitud de la raíz mayor del denominador de la ecuación transferencia del controlador, usando supresión o bloqueo y penalización de las variaciones de la acción de control.

$T = 0.2$  seg,  $N = 20$ ,  $P = 24$

$\beta$	M				F			
	24	12	3	1	1	2	8	24
0	2.085	0.958	0.943	0.701	2.085	0.906	0.777	0.701
0.5	0.878	0.876	0.867	0.701	0.878	0.856	0.776	0.701
1	0.835	0.835	0.835	0.700	0.835	0.837	0.774	0.700

Tabla 2

Magnitud de la raíz mayor del denominador de la ecuación transferencia del controlador, usando supresión o bloqueo y penalización de las variaciones de la acción de control.

$T = 0.5$  seg,  $N = 15$ ,  $P = 24$

$\beta$	M				F			
	24	12	3	1	1	2	8	24
0	0.95	0.948	0.953	0.732	0.950	0.879	0.793	0.732
0.5	0.922	0.921	0.924	0.732	0.922	0.874	0.793	0.732
1	0.885	0.884	0.852	0.732	0.885	0.861	0.792	0.732

son equivalentes. De las tablas se puede observar que el uso de coeficientes de penalización tiende a minimizar la influencia de los parámetros M y F siendo más pronunciado para el caso de M.

Las figuras 4 y 5 muestran las respuestas de flujo y salida del controlador IMC, para cambios en el valor deseado del flujo para un tiempo de muestreo de 0.5 seg y controladores con supresión o bloqueo. En ambos casos para el mismo número de acciones de control calculadas,  $M = 3$ ,  $F = 8$  ó  $M = 12$ ,  $F = 2$  el controlador con bloqueo da una respuesta más estable y fundamentalmente las acciones de control presentan menos oscilaciones y de menor amplitud. Esto se hace más evidente a medida que el número de acciones de control aumenta.

Las figuras 6 y 7 muestran el mismo tipo de respuesta pero con un tiempo de muestreo de  $T = 0.2$  seg. La tendencia del comportamiento es similar al caso de  $T = 0.5$ , como se observa el hecho de disminuir el tiempo de muestreo hace que la respuesta del flujo sea más estable pero

a expensas de aumentar la amplitud de las oscilaciones de la salida del controlador. Al igual que en el caso anterior las respuestas obtenidas usando controlador con bloqueo son más estables tanto en el flujo como en las acciones de control.

Con el objeto de estudiar la influencia de agregar penalización a las variaciones en las acciones de control a los controladores con acción de bloqueo o supresión se realizaron pruebas utilizando un factor  $\beta = 1$ . Los resultados para  $T = 0.5$  seg, se muestran en las figuras 8 y 9. El uso de penalización tiende a hacer que las respuestas sean más lentas pero más estables y con menos oscilaciones en las acciones de control. Además si se utiliza un controlador tipo I al penalizar las acciones de control se tiene un "offset" para excitaciones permanentes. El hecho de usar penalización en controladores con supresión o bloqueo implica la adición de un nuevo parámetro que es necesario determinar.

Finalmente las figuras 10 y 11 muestran las respuestas a cambios en la posición de la

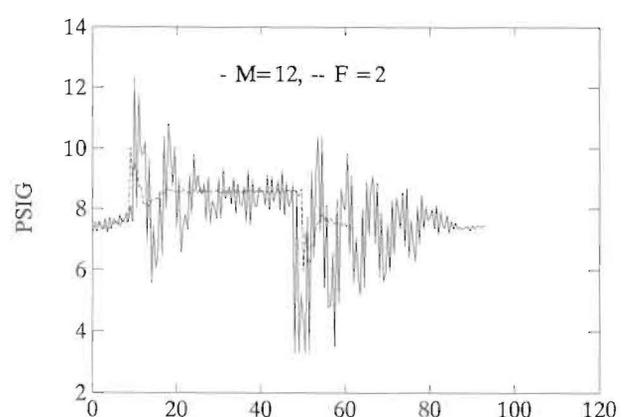
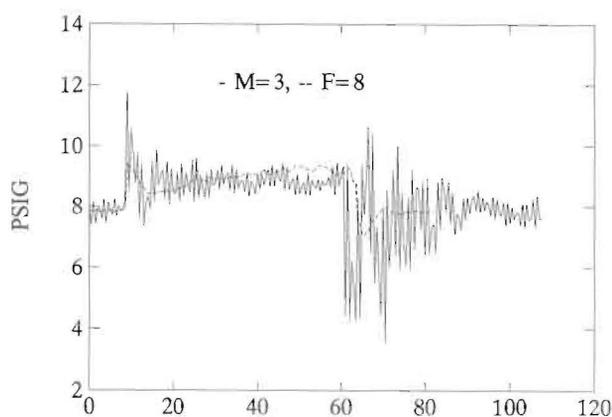
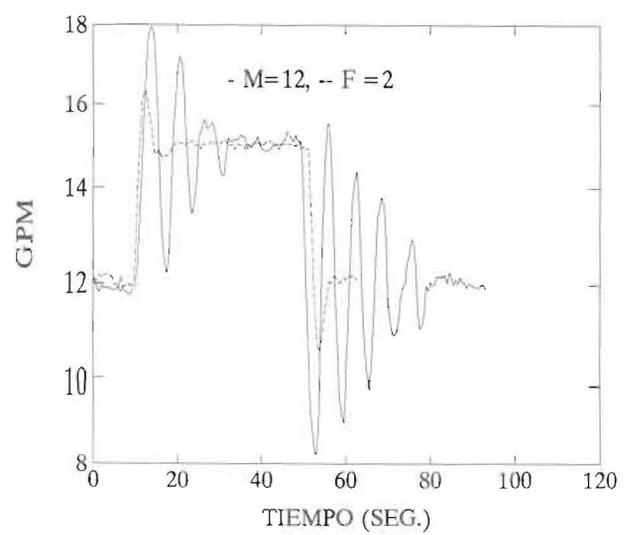
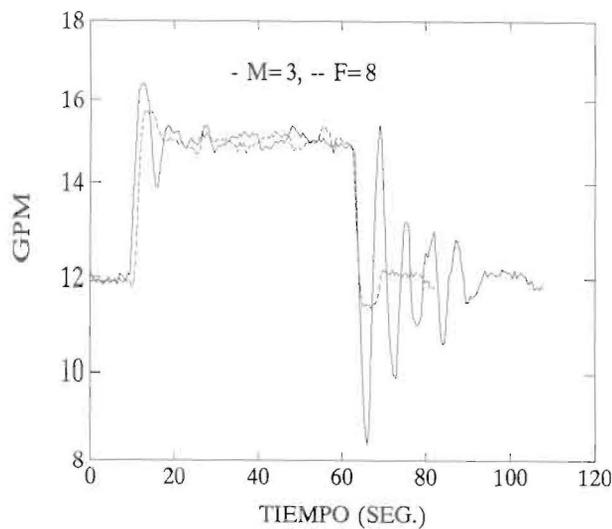


Figura 4. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado

$T=0.5$  sec.,  $\beta = 0$ ,  $N= 15$ ,  $P= 24$

Figura 5. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado

$T=0.5$  sec.,  $\beta = 0$ ,  $N= 15$ ,  $P= 24$

válvula VM2 del 50% al 75% de abertura. Estos resultados muestran que los controladores IMC con supresión o bloqueo son robustos frente a discrepancias entre el modelo y el proceso, como se observa en la figura 3 esta discrepancia es de aproximadamente entre un 50% del valor de la ganancia. Además los resultados obtenidos muestran nuevamente que el uso de supresión en el controlador IMC da como resultado respuestas más oscilatorias que en caso de usar bloqueo y esto puede conducir a la necesidad de usar penalización en la variación de las acciones de control para evitar saturación y desgaste del elemento final de control.

## Conclusiones

Los resultados sobre el comportamiento de estos controladores, observados experimentalmente en este trabajo, concuerdan en principio con los obtenidos en el estudio realizado mediante simulaciones [10] del comportamiento de los controladores IMC con supresión y bloqueo aplicados a los procesos estudiados en [5].

En el mencionado estudio también se observó que al usar supresión, para un mismo número de acciones de control calculadas, se obtienen acciones de control más oscilatorias y de mayor amplitud que para el caso en el que se

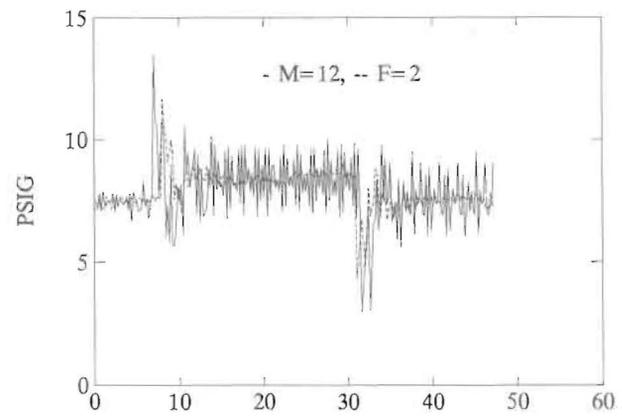
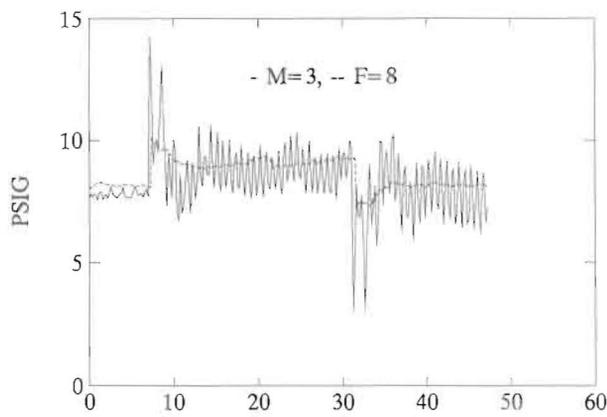
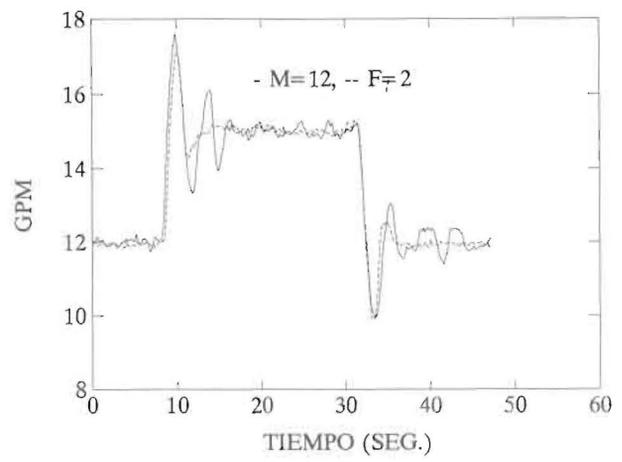
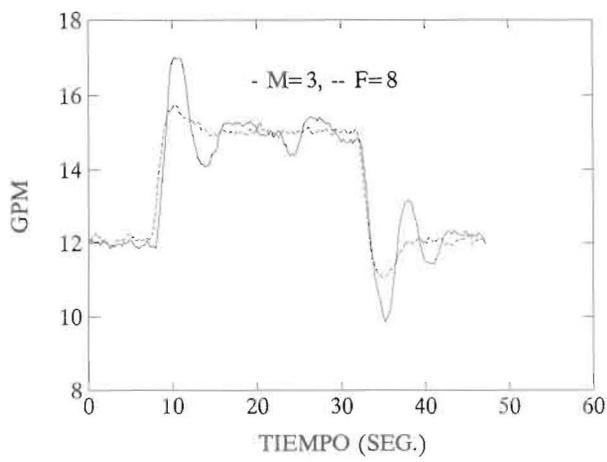


Figura 6. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado  
 $T=0.2$  sec.,  $\beta = 0$ ,  $N= 20$ ,  $P= 24$

Figura 7. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado  
 $T=0.2$  sec.,  $\beta = 0$ ,  $N= 20$ ,  $P= 24$

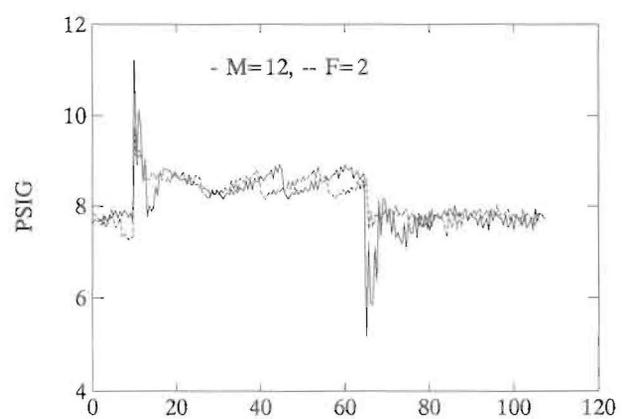
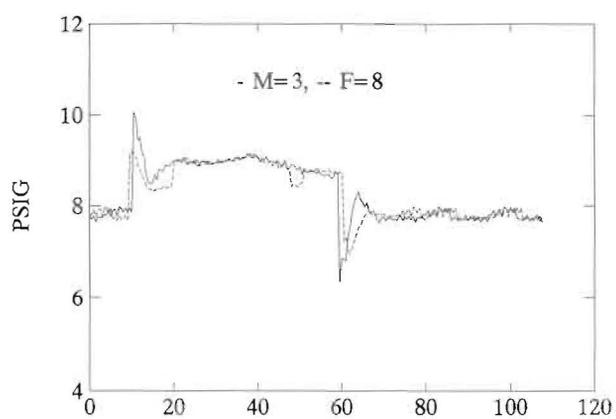
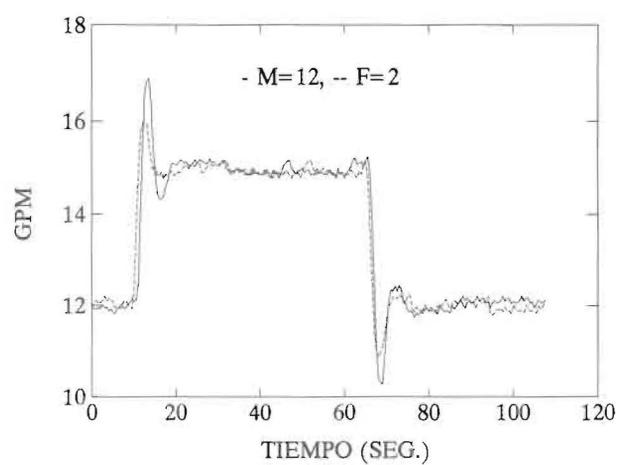
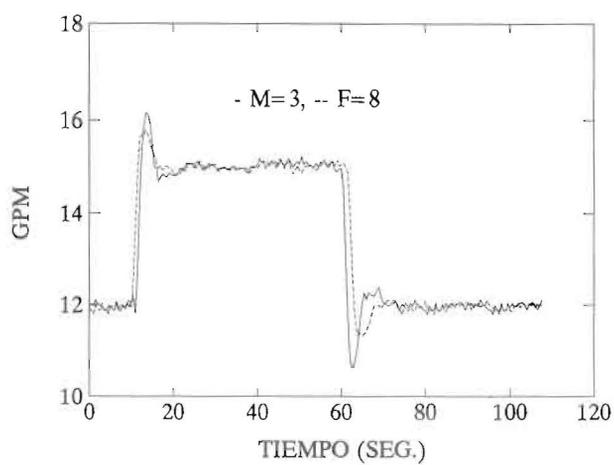


Figura 8. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado

$T=0.5$  sec.,  $\beta = 1$ ,  $N= 15$ ,  $P= 24$

Figura 9. Respuestas de flujo y acción de control para cambios en escalón del valor deseado

$T=0.5$  sec.,  $\beta = 1$ ,  $N= 15$ ,  $P= 24$

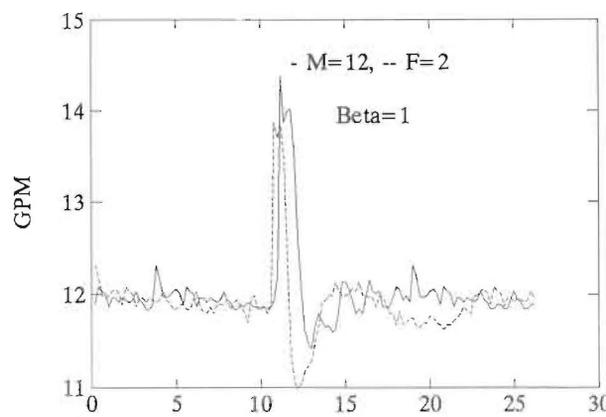
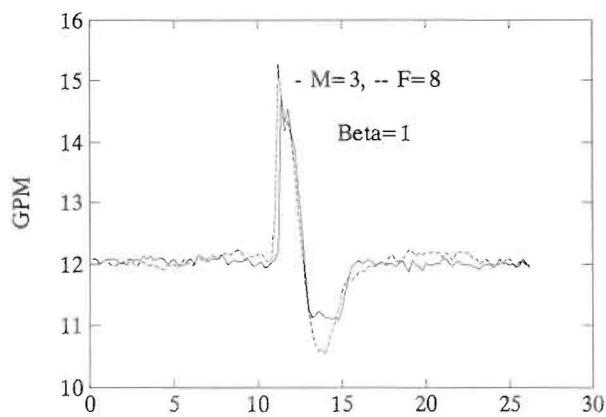
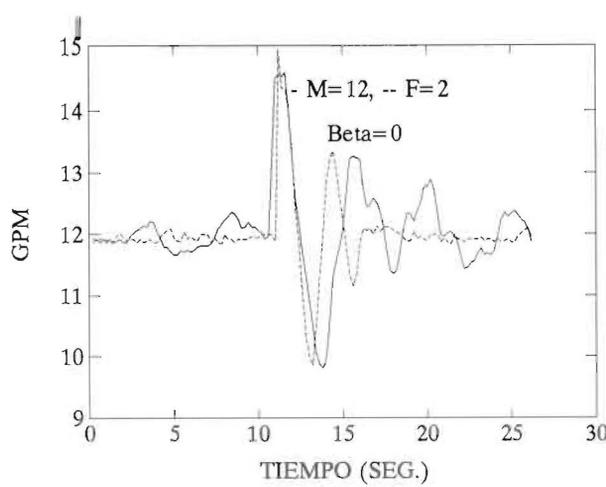
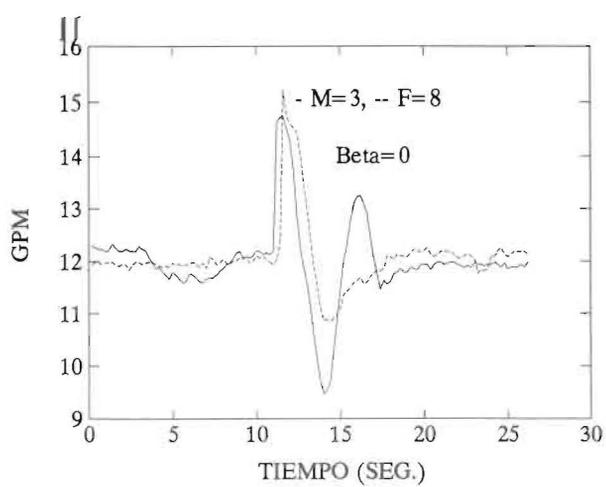


Figura 10. Respuestas de flujo a cambios en escalón en VM2 de 50% a 75% de apertura  $T= 0.2$  sec.,  $N= 20$ ,  $P= 24$

Figura 11. Respuestas de flujo a cambios en escalón en Vm2 de 50% a 75% de apertura  $T= 0.2$  sec.,  $N= 20$ ,  $P= 24$

usa bloqueo. Esta tendencia se acentúa en el caso experimental debido a la presencia de ruido y a la determinación aproximada del modelo.

Los resultados obtenidos sugieren que se puede lograr un comportamiento estable del lazo de control, sin acciones excesivas de control usando solamente bloqueo con un factor  $F=2$  ó  $4$ , sin necesidad de introducir parámetros adicionales de entonamiento.

### Referencias

1. Keyser, R. "A Comparative Study Of Self-Adaptive Long Range Predictive Control Methods" *Automática*, Vol 24, N° 2, (1988), 149-163.
2. Morari, M. "Internal Model Control: A Survey", *Automática* Vol 28, N° 3, (1991), 38 - 57.
3. Abud, L. Bastidas J. "Control De Modelo Interno Con Modelos De Convolucion Determinados Experimentalmente", Tesis de Grado, EIM. Luz. 1993.
4. Ricker, L. "Use Of Quadratic Programming For Internal Model Control", *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.*, 24, (1985), 925-936.
5. Garcia, C., Morari, M. "Internal Model Control". *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.*, 21, (1982), 308-323.
6. Arkun and Morari. "Experimental Study Of Internal Model Control", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Del.*, 25,(1986) 102-108.
7. Levien, K. L., Morari M. "Internal Model Control of coupled distillation columns". *AICHE J.*, Vol. 33, N° 1, (1987) 83 - 98.
8. Scattolini R., Bittani S. "On the Choice of the Horizon in Long-Range Predictive Control - Some Simple Criteria", *Automática* Vol 26, N° 5, (1990), 915-917, .
9. De Keyser R., Kong. F. "Criteria for Choosing the Horizon in Extended Horizon Predictive Control". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 39, N° 7, July 1994.
10. Bastidas J., Febres G., Vinante C. "Estudio Comparativo de los Parámetros de Supresión y Bloqueo en Controladores Predictivos". *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 17, N° 3, 1994.

Recibido el 12 de Mayo de 1994

En forma revisada el 30 de Enero de 1995