

Diseño integrado de sistemas utilizando controladores PID robustos vía desigualdades lineales matriciales

Integrated systems design with robust PID controllers by linear matrix inequalities

O. Pérez*, W. Colmenares y E. Granado
Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar,
Caracas, Venezuela.
*operez@usb.ve

Resumen

El diseño integrado se fundamenta en la idea de diseñar procesos con criterios de optimización, incorporando en las primeras etapas condiciones que garanticen un buen desempeño dinámico del sistema, o estrategias de control de forma que se obtengan simultáneamente, tanto los parámetros de la planta como los parámetros del controlador. En este trabajo se propone una metodología de diseño integrado que permite realizar el diseño optimizado de una planta no lineal con restricciones de operación no lineales, diseñando simultáneamente un controlador PID para el sistema linealizado, de forma que la respuesta a lazo cerrado garantice un comportamiento dinámico impuesto por condiciones basadas en desigualdades lineales matriciales LMI. Igualmente se presenta el diseño incorporando en la etapa de cálculo del controlador PID, incertidumbre estructurada alrededor del punto de operación calculado en la optimización, de forma de garantizar cierta robustez que permita asegurar un resultado menos conservador (robusto) a la hora de implementarse el PID sobre el sistema no lineal, compensando las condiciones que se sacrifican al realizar la linealización para resolver el problema basado en las desigualdades lineales matriciales LMI.

Palabras claves: Diseño de sistemas, control PID, optimización, desigualdades lineales matriciales, robustez.

Abstract

Integrated design is based on the idea obtaining systems that satisfy the steady state specifications and at the same time, dynamic performance requirements, that is, computing the systems parameters and the same time, the controller parameters. In this work we present a method of integrated design that allows to compute an optimal nonlinear plant with nonlinear constraints, and at the same time, a stabilizing PID controller using linear matrix inequalities conditions. Also a robust controller design is proposed when structure uncertainty around the operating point is included in the problem.

Key words: Integrated design, PID control, optimization, linear matrix inequalities, robustness.

1 Introducción

El diseño clásico de procesos, en general, persigue la determinación de las condiciones de operación de cada una de las unidades de proceso y de las dimensiones que se requieren para lograr un objetivo de producción. Los ingenieros de procesos determinan las estructuras necesarias, las condiciones de operación y calculan los parámetros físicos de la planta. El objetivo general en esta etapa se asocia a la optimización económica, evaluando las diferentes alternativas posibles. En esta etapa no se le

brinda mucha atención a lo que será la dinámica del proceso, y condiciones como la de controlabilidad son ignoradas.

El concepto de controlabilidad no es nuevo y su influencia sobre la operación de los procesos ha pasado a ser un elemento cada vez más relevante. Las primeras ideas sobre introducir la controlabilidad en el diseño fueron planteadas por Nishida e Ichikawa. La evaluación sobre la controlabilidad en modelos en estado estacionario fue presentada en (Fisher y col., 1988), donde se describe un procedimiento sistemático para evaluar la controlabilidad

del proceso en las etapas de diseño. En los últimos años se ha potenciado la incorporación de condiciones de controlabilidad en el diseño de procesos, extendiéndose hasta el concepto de diseño integrado (Narraway y Perkins, 1994), (Luyben y Floudas, 1994), técnica en la cual se persigue la obtención de los parámetros de la planta y de su sistema de control, en las primeras etapas de diseño. Este problema se traduce en la resolución de un problema de optimización no-lineal multiobjetivo, con restricciones y consideraciones económicas y de control.

2 Controlador PID basado en LMI

2.1 Consideraciones iniciales

El controlador del tipo Proporcional-Integral-Derivativo PID, es ampliamente utilizado en el mundo de los sistemas de control. Existen múltiples técnicas para realizar su sintonización y en general los sistemas controlados con los PID funcionan adecuadamente.

Dentro de las posibilidades de sintonización de controladores PID, se han desarrollado condiciones basadas en desigualdades lineales matriciales LMI, que han demostrado ser poderosas a la hora de imponer criterios de desempeño sobre el sistema a controlarse. Además, por la naturaleza del problema planteado con las LMI, es posible imponer condiciones múltiples (problema multiobjetivo) sobre las respuestas del sistema a lazo cerrado (estabilidad, ubicación de polos, rechazo a perturbaciones) e igualmente incorporar incertidumbre de forma de obtener resultados robustos.

A continuación se presentan las condiciones para obtener la sintonización de un controlador PID basados en la estabilidad del sistema lineal a lazo cerrado, considerando adicionalmente incertidumbre en el modelo del proceso, basados en desigualdades lineales matriciales.

2.2 Condición de estabilidad asintótica

Dado un sistema lineal:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

en el que x (en \mathfrak{R}^n) es el estado, u (en \mathfrak{R}^m) el control y (en \mathfrak{R}^p) la salida. Las matrices A , B y C son matrices constantes de dimensiones apropiadas. Sea un controlador PID definido por la expresión:

$$u = F_1 y + F_2 \int_0^t y dt + F_3 \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

Es posible construir un nuevo sistema aumentado equivalente a (1), que incorpora al controlador PID, de la forma (6):

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \bar{A}z + \bar{B}u, \\ \bar{y} &= \bar{C}z \\ u &= \bar{F}\bar{y} \end{aligned} \quad (3)$$

definiendo las siguientes matrices:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}; \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; \bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \\ CA & 0 \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} x \\ \int_0^t y dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{F} &= [\bar{F}_1 \quad \bar{F}_2 \quad \bar{F}_3] \\ \bar{F}_1 &= (I - F_3 CB)^{-1} F_1 \\ \bar{F}_2 &= (I - F_3 CB)^{-1} F_2 \\ \bar{F}_3 &= (I - F_3 CB)^{-1} F_3 \end{aligned}$$

Observe que el sistema (3) incorpora la integral de la salida a los estados del sistema y que en el sistema aumentado, se busca un controlador PID estabilizante, que utilice la realimentación estática de la salida. El sistema a lazo cerrado (sistema con controlador PID) queda dado por la siguiente ecuación dinámica [6]:

$$\dot{z} = (\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{C})z \quad (5)$$

El sistema (5) será estable si y sólo si, existe una matriz P positiva definida, y una realimentación estática de la salida \bar{F} , tal que:

$$\begin{aligned} (\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{C})^T P + P(\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{C}) &< 0 \\ P &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 Diseño robusto del controlador PID

La solución al problema de cálculo del controlador PID (que debe interpretarse con un problema de cálculo de matrices P y \bar{F}), requiere de un modelo lineal de la planta o proceso de forma de utilizarlo en las matrices ampliadas \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} que definen el sistema extendido o a lazo cerrado. El modelo lineal se obtiene al linealizar el sistema en un punto de operación.

Esta operación de linealización representa una pérdida de información de un sistema que originalmente sea no lineal, pero permite incorporar condiciones de diseño poderosas, que no se podrían utilizar en el problema no-lineal.

La linealización es un procedimiento común en algunos cálculos de controladores de sistemas no-lineales. En algunos trabajos (Pérez y col., 1997, Colmenares y col., 1998 y Tadeo y col., 2000) se utiliza la incertidumbre como elemento para compensar la pérdida de la información que

se deriva de la linealización del modelo. Con esta idea se puede calcular un controlador para un conjunto de modelos lineales del proceso considerando incertidumbre, esperando que el controlador obtenido garantice un mejor comportamiento del sistema no lineal a lazo cerrado. Este sería un controlador robusto para el sistema lineal y podría considerarse un controlador más apropiado para el sistema no-lineal.

Para obtener el conjunto de modelos que se utilizan en el cálculo del controlador PID, se linealiza el sistema no lineal alrededor de los puntos de operación extremos que se consideren en cada caso, tomando en cuenta los valores extremos de los parámetros inciertos del modelo. Estos puntos se obtienen haciendo todas las combinaciones posibles de los valores extremos de cada parámetro incierto. Entonces, si hay L parámetros inciertos, cuyos valores extremos de cada uno son conocidos, esto es:

$$\begin{aligned} \min D_1 < D_1 < \max D_1 \\ \min D_2 < D_2 < \max D_2 \\ \min D_3 < D_3 < \max D_3 \\ \vdots \\ \min D_L < D_L < \max D_L \end{aligned}$$

por lo que se generan 2^L sistemas lineales vértices de la región que va a ser poliédrica y que acota la incertidumbre del modelo.

Entonces, para hallar el controlador PID, se deben encontrar matrices P y \bar{F} , únicas que resuelvan simultáneamente en todos los vértices, la siguiente condición:

$$\begin{aligned} (\bar{A}_i + \bar{B}\bar{F}\bar{C}_i)^T P + P(\bar{A}_i + \bar{B}\bar{F}\bar{C}_i) < 0 \\ P > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

con $i=1, 2, 3, \dots, L$

En la condición (7) se observa que se considera incertidumbre en las matrices \bar{A} y \bar{C} , para garantizar que cualquier combinación convexa de los vértices genera la región de incertidumbre completa. Igualmente con la misma idea, podría considerarse incertidumbre en las matrices \bar{A} y \bar{B} .

Al resolver la condición (7) se obtienen los parámetros del controlador PID que mantiene los requerimientos de diseño para todos los vértices que definen la región de incertidumbre poliédrica. Como cualquier punto dentro de dicha región puede representarse como una combinación lineal de dichos vértices, entonces cualquier punto de operación dentro de la región mantiene las características definidas en el problema LMI para los vértices.

3 Procedimiento de diseño integrado

El procedimiento que se describe a continuación permite realizar el diseño optimizado de una planta no

lineal con restricciones de operación no lineales, diseñando simultáneamente un controlador PID para el sistema linealizado en los puntos de operación óptimos, utilizando desigualdades lineales matriciales (LMI), de forma que el sistema a lazo cerrado presente ciertas condiciones en su comportamiento dinámico.

Para lograr la unión del diseño no-lineal de la planta, con las condiciones tipo LMI para el PID, se plantea el siguiente procedimiento:

- Definir el problema de optimización del diseño de la planta, considerando su modelo no-lineal, considerando un punto de operación, las cotas de los valores del sistema y las restricciones del proceso, lineales y no lineales.
- Luego de cada iteración del problema de optimización no-lineal, se toman los últimos valores óptimos calculados para la planta y se realiza la linealización del modelo alrededor del punto de operación (también óptimo).
- Con el sistema linealizado (A, B, C), se generan las matrices del sistema aumentado $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ y se resuelve el problema basado en las desigualdades lineales matriciales que permite calcular los parámetros del controlador PID según ciertos criterios. La solución del problema de cálculo del PID se transmite al optimizador no-lineal del diseño de la planta, para que en función de lo ocurrido tome las acciones correspondientes para seguir buscando un resultado óptimo. La información transmitida indica la existencia o no de un controlador PID, así como el valor que señala lo buena que es la solución (si existe) o lo alejado que está de ella (si no existe).
- Este proceso se realiza repetidamente hasta obtener un diseño óptimo x_{opt} , donde se cumplan las restricciones lineales y no lineales del proceso y se encuentre un controlador PID que cumpla las condiciones LMI impuestas para el modelo linealizado alrededor del punto de operación óptimo.

Es importante señalar que en la expresión (6) se observa la existencia de dos incógnitas, lo que imposibilita la búsqueda de una solución como un problema lineal o de optimización convexa. Para resolver esta situación se propone la búsqueda de una matriz candidata $P > 0$, tal como aparece en [10], que tenga información relacionada con el sistema, la cual se fundamenta en la expresión de estabilidad para la realimentación de estados para un sistema lineal. Esta matriz se calcula resolviendo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P\bar{A}^T + \bar{A}P - \bar{B}\bar{B}^T < 0 \\ P > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Con esta matriz P (si existe), se intenta resolver el problema planteado por la expresión (6) fijando la P y buscando los valores \bar{F} que definen el controlador PID. La

búsqueda del controlador de realimentación estática de la salida de (3) y que parte de la condición de existencia de un controlador de realimentación de estados (matriz P dada por (8)), se realiza sobre la desigualdad lineal matricial:

$$(\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{C})^T P + P(\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{C}) - \alpha P < 0$$

$$P > 0$$
(9)

en ella, se ha incluido la variable escalar adicional α , para asegurar siempre una solución a la desigualdad lineal matricial (9). La desigualdad es bilineal en P y \bar{F} , y el controlador se obtiene al iterar entre ambas variables, con una estrategia similar a la presentada en [6].

4 Sistema para prueba del diseño

4.1 Descripción del proceso

Para probar el diseño tal como se ha planteado, se utiliza un sistema dinámico constituido por dos depósitos tal como se muestra en la Fig. 1, que se desea dimensionar.

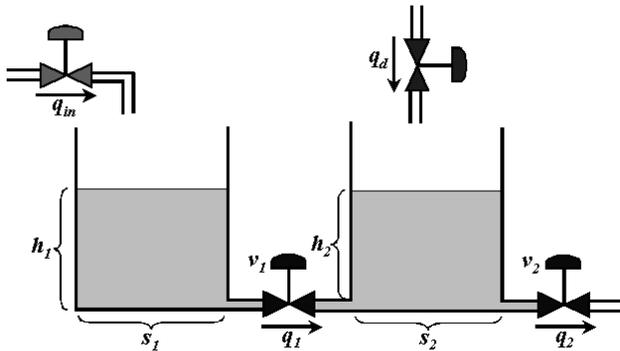


Fig. 1. Esquema del sistema hidráulico

Los depósitos están conectados entre si a través de sus bases, existiendo un flujo de alimentación en el depósito 1 que es considerado como la señal de control u y otro flujo sobre el depósito 2, que es considerado como una perturbación f_d . Las válvulas v_1 y v_2 son de apertura variable. El objetivo final del sistema es controlar el nivel del depósito 2, manipulando el flujo de entrada q_{in} .

4.2 Modelo matemático del proceso

Para este proceso, haciendo un balance de masas se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$S_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{in} - q_1$$
(10)

$$S_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 + q_d - q_2$$
(11)

donde

$$q_1 = k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad q_2 = k_2 a_2 \sqrt{h_2}$$

$$q_d = f_d / 8, \quad q_{in} = u(t)$$

k_1, k_2 son las constantes de las válvulas y a_1, a_2 son sus aperturas. f_d es el flujo de la perturbación y q_d es la forma como esta influye sobre el nivel del segundo depósito. S_1 y S_2 son las superficies de los depósitos. h_1 y h_2 son los respectivos niveles. Sustituyendo se obtiene:

$$S_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{in} - k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2}$$
(12)

$$S_2 \frac{dh_2}{dt} = k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2} + \frac{f_d}{8} - k_2 a_2 \sqrt{h_2}$$
(13)

La salida y que se considera en este sistema está dada por la altura del segundo depósito h_2 .

4.3 Restricciones de operación

En algunos procesos de almacenamiento es necesario garantizar una cantidad de producto o la permanencia del mismo un tiempo determinado para que se cumplan ciertas condiciones, tales como suministro mínimo a otras etapas de la planta, reacciones, etc. Para este sistema se imponen restricciones sobre el tiempo de residencia del líquido dentro de cada depósito dados por:

Depósito 1:

$$\frac{V_1}{q_1} = \frac{S_1 h_1}{k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2}} \geq Tr_1 \Rightarrow Tr_1 k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2} - s_1 h_1 \leq 0$$

Depósito 2:

$$\frac{V_2}{q_2} = \frac{S_2 h_2}{k_2 a_2 \sqrt{h_2}} \geq Tr_2 \Rightarrow Tr_2 k_2 a_2 - s_2 \sqrt{h_2} \leq 0$$

donde Tr_1 y Tr_2 son los tiempos de residencia.

4.4 Optimización del sistema

Para el sistema se deben cumplir las siguientes condiciones en el problema de optimización.

Para el optimizador no-lineal:

- El modelo no-lineal debe cumplirse en estado estacionario, así como las restricciones de operación. El estado estacionario cambia en cada iteración del optimizador, debido a los cambios en las variables que se calculan. Para esto se hace:

$$\text{Residuo 1} = R_1 = q_{in} - k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2}$$

$$\text{Residuo } 2 = R_2 = k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2} + \frac{f_d}{8} - k_2 a_2 \sqrt{h_2}$$

por lo que se debe cumplir que:

$$R_1 \rightarrow 0$$

$$R_2 \rightarrow 0$$

- Las alturas de los depósitos deben ser lo más pequeñas posibles, por lo que h_1 y h_2 deben ser minimizados. Desde el punto de vista de la estructura del tanque, se podría imponer que la altura de cada depósito esta dada por $1,5h_i$ $i=1,2$, de forma de garantizar un rango de trabajo sobre el punto de operación óptimo a calcularse.

$$H_1 = 1,5h_1$$

$$H_2 = 1,5h_2$$

- Las superficies de cada depósito deben ser minimizadas:
 $S_1 \rightarrow S_{1opt}$
 $S_2 \rightarrow S_{2opt}$
- Las aperturas de las válvulas están acotadas entre 0% y 100%:
 $0\% < a_1 < 100\%$,
 $0\% < a_2 < 100\%$

Para el problema lineal LMI:

Para el problema lineal de cálculo del controlador PID bajo las condiciones de estabilidad dadas en (6), se aplica el procedimiento de diseño con dicha condición de estabilidad y, adicionalmente, con la condición de ubicación de polos que se define al desplazar el eje imaginario hacia la izquierda, que queda definida por la siguiente condición:

$$(\bar{A} + \bar{BFC})^T P + P(\bar{A} + \bar{BFC}) + 2\alpha_0 P < 0 \quad (14)$$

$$P > 0$$

donde $\alpha_0/2$ corresponde al valor de desplazamiento del eje ya que la expresión (14) considera el valor de α mostrado en (9). Con esta idea se busca que el sistema a lazo cerrado presente una velocidad de respuesta mayor que en el caso de estabilidad simple.

5 Resultados

5.1 Diseño con estabilidad asintótica

Para el primer diseño se impuso para la condición LMI que el sistema a lazo cerrado fuese asintóticamente estable, por lo que después de realizarse el procedimiento de cálculo presentado anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados:

Residuos de las Ecuaciones No Lineales:

$$R_1 = 0.0003$$

$$R_2 = -0.0002$$

Alturas de los Tanques:

$$h_1 = 13.2153$$

$$h_2 = 7.6765$$

Apertura de las Válvulas:

$$a_1 = 42.49\%$$

$$a_2 = 36.10\%$$

Área de los Tanques:

$$S_1 = 0.3713$$

$$S_2 = 1.9230$$

Parámetros del PID:

$$K_p = -2.3417$$

$$K_i = -0.1969$$

$$K_D = -5.3211$$

En la Fig. 2 se presenta la respuesta temporal del sistema no lineal a lazo cerrado ante un cambio en la señal de referencia tipo salto. La Fig. 3 presenta la señal de control obtenida para la respuesta presentada en la Fig. 2.

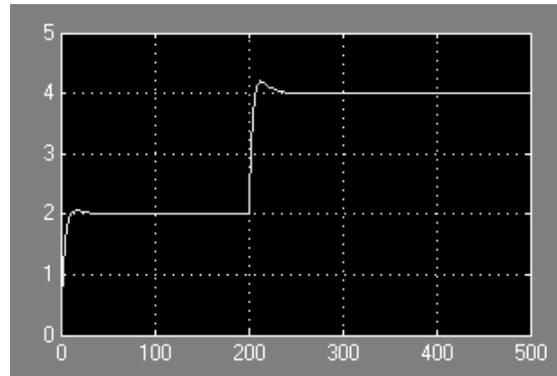


Fig. 2. Respuesta del sistema no lineal a lazo cerrado ante un escalón en la señal de referencia.

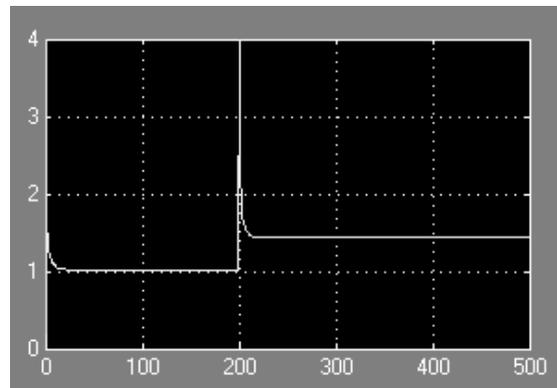


Fig.3. Señal de control u obtenida para la respuesta de presentada en la Fig. 2.

5.2 Diseño con eje imaginario desplazado

Para este caso se utiliza en el problema lineal LMI la condición dada en (14), con el valor de $\alpha_0 = 0.007$, buscando que el sistema a lazo cerrado presente una mayor velocidad en su respuesta temporal. Los resultados del proceso de optimización son los siguientes:

Residuos de las ecuaciones no lineales:

$$R_1 = 0.00001$$

$$R_2 = 0.00001$$

Alturas de los tanques:

$$h_1=7.0368$$

$$h_2=5.8523$$

Apertura de las válvulas:

$$a_1=91.88\%$$

$$a_2=41.34\%$$

Área de los tanques:

$$S_1=0.5684$$

$$S_2=1.4971$$

Parámetros del PID:

$$K_p = -2.2911$$

$$K_i = -0.3097$$

$$K_D = -0.5200$$

Con estos resultados, se simula la respuesta temporal del sistema no lineal con el controlador PID mostrado. En la Fig. 4 se presenta la respuesta ante cambios en la señal de referencia tipo salto y en la Fig. 5 se presenta la señal de control obtenida para las condiciones consideradas en este caso.

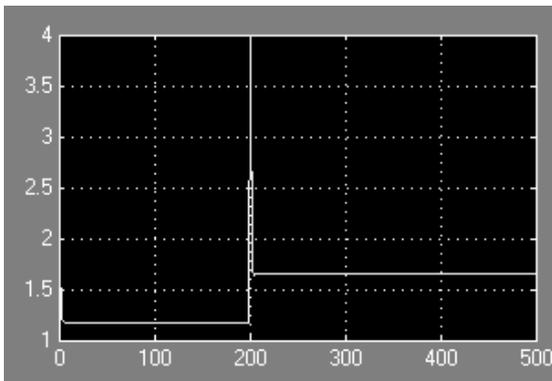


Fig. 4. Respuesta del sistema no lineal a lazo cerrado con la condición de eje desplazado.

5.3 Diseño con incertidumbre

Para realizar el cálculo de los parámetros de la planta y del controlador PID robusto, utilizando el procedimiento señalado, se considera incertidumbre sobre el punto de operación calculado en cada operación del optimizador no lineal, dado por $\pm 10\%$ sobre la altura del depósito 1 (h_1) y de $\pm 25\%$ sobre la altura del depósito 2 (h_2). Queda claro que bajo estas consideraciones, el problema genera 4 puntos extremos (4 modelos lineales de la planta) sobre los cuales se calculan las matrices de interés, resolviendo simultáneamente las 4 condiciones de estabilidad dadas por (6), tal como aparece en (7). Es importante recordar que para la solución numérica se utiliza la expresión definida por (9).

De las ecuaciones del proceso y por las variables consideradas inciertas, se puede asegurar que al linealizar el sistema se presenta incertidumbre solamente en la matriz A, lo que genera incertidumbre en las matrices

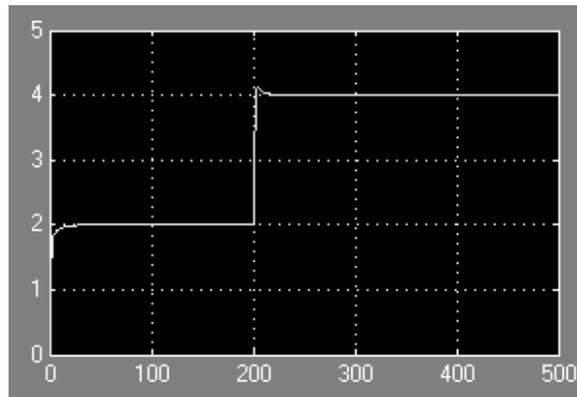


Fig. 5. Señal de control u que genera la respuesta de la Fig. 4.

\bar{A} y \bar{C} del sistema extendido (sistema con controlador PID), tal como se observa en las definiciones de dichas matrices.

Los resultados que se obtienen al aplicar el algoritmo se presentan a continuación:

Residuos de las ecuaciones no lineales:

$$R_1=-0.0030$$

$$R_2=0.0005$$

Alturas de los tanques:

$$h_1=7.1286$$

$$h_2=1.4082$$

Apertura de las válvulas:

$$a_1=41.83\%$$

$$a_2=83.95\%$$

Área de los tanques:

$$S_1=0.9755$$

$$S_2=2.8130$$

Parámetros del PID:

$$K_p = -100.3512$$

$$K_i = -5.5361$$

$$K_D = -241.2434$$

En este caso, la respuesta temporal del sistema no lineal controlado por el PID fue simulada en diferentes regiones de operación, observándose un comportamiento similar al impuesto por el problema LMI en todos los casos.

En las Figs. 6 y 7 se muestran la respuesta temporal y la señal de control que se obtienen del sistema no lineal a lazo cerrado, con la planta y el PID obtenidos.

6 Conclusiones

El enfoque de diseño integrado presentado permite tomar en cuenta las características reales del sistema (modelo y restricciones no lineales) e incorporar condiciones dinámicas importantes sobre el sistema linealizado, de forma de obtener un proceso que cumpla simultáneamente condiciones estáticas y dinámicas.

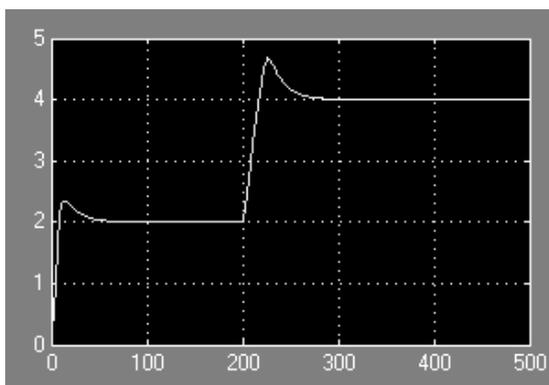


Fig. 6. Respuesta temporal del sistema no lineal obtenida en el diseño con incertidumbre.

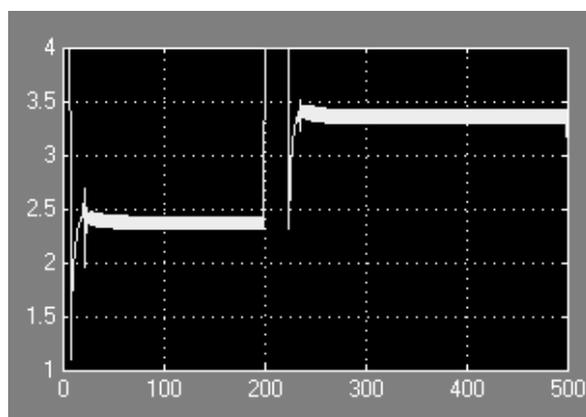


Fig. 7. Señal de control que genera la respuesta mostrada en la Fig. 6.

En el ejemplo mostrado, se ha permitido verificar la influencia de condiciones dinámicas (estabilidad y velocidad de respuesta) en el diseño del sistema, tomando en cuenta una estructura de control a lazo cerrado con un control PID, el cual se calcula simultáneamente con el procedimiento de diseño de la planta.

La posibilidad de tomar en cuenta la incertidumbre del tipo paramétrica estructurada, permite compensar los efectos de la linealización para el cálculo del controlador PID bajo el enfoque de las LMI, de forma de obtener un controlador menos conservador que pueda funcionar igual para regiones de operación diferentes a las utilizadas en los problemas donde se tiene un solo modelo lineal.

Este procedimiento puede ser extendido utilizando adicionalmente condiciones de rechazo a perturbación e incertidumbre, tomando en cuenta la forma natural de extender las condiciones LMI a un problema multiobjetivo.

7 Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos del CICYT DPI2003-09392-C02-02, por el DID-USB y FONACIT, proyecto S1-2001000708.

Referencias

- Nishida N, Liu YA y Ichikawa A, 1976, Studies in chemical process design and synthesis II. optimal synthesis of dynamic process systems with uncertainty, *AIChE J.*, 22, pp. 539-549.
- Nishida N y Ichikawa A, 1975, Synthesis of optimal dynamic process systems by a gradient method, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 13, pp.236-242.
- Fisher WR, Doherty MF y Douglas JM, 1988, The interface between design and control. 1. process controllability, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 27, pp. 597-605.
- Narraway L y Perkins JD, 1994, Selection of process control structure based on economics, *Computers Chem. Engng.*, 18, pp s511-s515.
- Luyben ML y Floudas CA, 1994, Analyzing the interaction of design and control-1. a multiobjective framework and application to binary distillation synthesis, *Comp. Chem. Eng.*, 18, pp. 933-969.
- Cao YY, Lam J y Sun YX, 1998, Static output feedback stabilization: an lmi approach, *Automatica*, 34, 1641-1645.
- Pérez O, Colmenares W, Granado E y Garrido K, 1997, Robust multimodel control of a neutralization process, *Proceedings of the 4th. IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Cairo, Egipto.
- Colmenares W, Granado E, Pérez O y Tadeo F, 1998, Robust multimodel control of a pH process, *Proceedings of the II World Automation Congress*, Anchorage, Alaska.
- Tadeo F, Pérez O y Álvarez T, 2000, Control of neutralization processes by robust loopshaping, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 08, Number 02, pp. 236-246.
- Garcia G, Arzelier D y Bernussou J, 1992, Stabilization of uncertain linear dynamic system by state and output feedback, *Rapport Interne du LAAS*, Toulouse, France.

