

Control óptimo aguas abajo de un canal de laboratorio

V. M. Ruiz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Jiutepec, Morelos, 62550 México

E. Mendes, L. Lefevre

ESISAR
Valence, Francia

O. Begovich

CINVESTAV Unidad Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

D. Georges, G. Becanson

Laboratoire d'Automatique de Grenoble, ENSIEG
Saint- Martin d'Heres, Francia

J. Bordeneuve

ENSICA
Toulouse, Francia

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al aplicar un regulador Óptimo Lineal Gaussiano en el control aguas abajo de un canal de laboratorio de dos tramos localizado en el laboratorio de la Escuela Superior de Ingenieros en Sistemas Industriales Avanzados de la región Rhone Alpes en Francia. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que es posible implementar el control aguas abajo en un canal mediante equipo electrónico. El regulador óptimo usado muestra satisfactorios resultados en el control del nivel aguas abajo al final de cada tramo.

Introducción

La red de canales abiertos es la infraestructura de conducción y distribución más usada en la agricultura. Para hacer un mejor uso del agua en la agricultura, el mayor consumidor de agua, es necesario mejorar el servicio que prestan los canales en cantidad, frecuencia, duración y oportunidad.

Para distribuir y conducir el agua dentro de una red de canales, se han usado dos conceptos de control [1]: control aguas arriba y control aguas abajo. Estos conceptos reciben su nombre por la ubicación relativa de la variable a controlar en cada tramo del canal respecto a la estructura de control usada para ello. Si la variable está ubicada en la dirección del flujo se llama aguas abajo, en caso contrario, aguas arriba (los conceptos aguas arriba y aguas abajo son muy usados para ubicar relativamente puntos en un canal).

Si bien, el concepto de control aguas abajo es el más adecuado desde el punto de vista del usuario, ya que responde a su demanda, también es el más difícil de implementar. Si el tirante a regular en cada tramo de canal para distribuir el agua es el ubicado aguas arriba del tramo (método de operación de tirante constante aguas arriba del tramo, [1]), se requiere de tramos cuyo

bordo libre se mantenga a nivel a todo lo largo del tramo de canal, aumentando el costo de construcción del canal, así como canales con gran capacidad para amortiguar los cambios en la demanda. Para diseñar la capacidad del canal y el sistema de control se recomienda probar en simulación en régimen transitorio su funcionamiento [2]. Si se regula el nivel aguas abajo al final del tramo (método de operación de tirante constante agua abajo al final del tramo [1]), se requiere de equipos electrónicos de operación y transmisión de información. En este caso se presenta una diferencia en tiempo (llamado "retardo" en la teoría del control) entre el tiempo en que se modifica el gasto en la compuerta aguas arriba del tramo y en que se observa un cambio en el nivel aguas abajo del tramo producto del cambio en gasto. Este retardo, que varía según las condiciones de funcionamiento del canal, hace más difícil el diseño de un sistema de control. Se ha observado que en el diseño de algunos controladores, la introducción del retardo reduce los márgenes de ganancia y fase del sistema en lazo cerrado [3].

Diferentes algoritmos de control han sido utilizados en la operación de canales de riego. Malaterre et al [4] hacen una revisión y clasificación de ellos. La mayoría de estos esquemas se han probado en simulación pero muy pocos trabajos se han hecho en tiempo real [5]. Los esquemas de control los podemos dividir en dos grandes grupos: los basados en modelos y los no basados en modelos. Esta clasificación indica que en el diseño del regulador se requiere o no conocer el modelo dinámico que aproxima el comportamiento entre las entradas y salidas del proceso a controlar. Entre los esquemas de control no basados en modelos, está el regulador PID que es el esquema de control más usado en el manejo de canales. Entre los esquemas de control lineal basados en modelos aplicados a canales de riego tenemos: el regulador LQG [6,7]; el control predictivo generalizado [8]; el Predictor de Smith; etc. Entre los esquemas de control no lineal tenemos los trabajos hechos por Chen y Georges [9] y Dulhoste et al



[10] basados en modelos de dimensión infinita y finita respectivamente. Debido a su complejidad muy pocos reguladores basados en modelos se han aplicado en tiempo real. Aquí se utiliza el esquema desarrollado por Begovich et al [7] para resolver el problema de control aguas abajo de un canal de dos tramos.

En este trabajo se presenta la comparación en tiempo real entre el desempeño de un regulador Proporcional Integral y el Control óptimo en el control aguas abajo de un canal de un tramo y entre el regulador óptimo centralizado y descentralizado en el control aguas abajo de un canal de dos tramos. Para ello, este artículo está organizado de la siguiente forma: como primer paso se describe el prototipo de canal utilizado en las pruebas en tiempo real; se continua con una descripción de los algoritmos de control usados y el proceso de diseño utilizado; y finalmente se dan los resultados para el caso de un tramo y dos tramos de canal.

Descripción del prototipo de canal

En el laboratorio de la Escuela Superior de Ingenieros en Sistemas Industriales Avanzados de la región Rhone Alpes (ESISAR), en Francia, se encuentra un prototipo de un canal abierto rectangular de dos tramos instrumentado (Fig. 1). Este canal se encuentra equipado con un sistema de medición y operación remota basado en una tarjeta de adquisición "Dspace" para una computadora PC. En esta computadora y haciendo uso del programa Matlab, Simulink, se generan los programas para que la tarjeta "Dspace" realice las tareas de control deseadas. Las características física e hidráulicas del canal son: base 10 cm, altura de las paredes 25 cm, longitud 8 m, pendiente 0.013. También, está equipado con sensores ultrasónicos de nivel Honeywell para medir los niveles aguas arriba y aguas abajo de las compuertas. Al inicio y al final del canal se localizan dos tanques. El nivel del tanque aguas arriba del canal es regulado por una bomba equipada con un regulador de velocidad. El nivel en el tanque aguas abajo se ajusta con una válvula neumática. Estos niveles son regulados mediante un autómatas Milenio II de Crouzet. Las estructuras de control a lo largo del canal son de tipo deslizantes de 20 cm de alto y 8 cm de ancho. Estas compuertas son operadas mediante servo-motores de corriente directa. Estos últimos ubican las compuertas en la apertura deseada en función del voltaje suministrado por los convertidores digital-analógico. El rango de operación de la compuerta es de 0 a 20 cm para un rango de voltaje de entrada al servo-motor de 0 – 10 V.

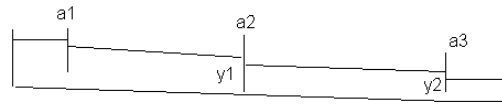


Fig. 1 Esquema del canal del ESISAR

Esquemas de control usados

Dos esquemas de control fueron usados en este trabajo, el regulador proporcional integral y el regulador óptimo gaussiano.

Regulador Proporcional Integral

Una gran cantidad de problemas de control se pueden resolver usando el regulador proporcional integral (PI). De hecho este regulador es la herramienta más usada para resolver problemas de control de procesos. El regulador proporcional integral determina los ajustes en la apertura de la compuerta en forma proporcional e integral a la diferencia existente entre la variable a controlar del sistema, en este caso el tirante aguas abajo al final del tramo de canal, y el valor deseado, referencia. La versión de base del regulador PI puede ser descrita por la ecuación [11]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1)$$

donde $e(t) = y_{ref}(t) - y(t)$ es el error entre la referencia y variable a controlar, $u(t)$ es la variable de control y en este caso la apertura de la compuerta, K_p es la constante proporcional, T_i es el tiempo de integración

Regulador Óptimo Gaussiano

El regulador óptimo gaussiano (LQG) es un esquema de control del tipo basado en Modelo ("model based"). Lo anterior quiere decir que se requiere de un modelo que aproxime el comportamiento dinámico presente entre la variable a controlar (salida) y la variable de control (entrada) para su diseño.

Para un sistema lineal descrito por una ecuación de estado influenciado por una señal de ruido sobre el estado $v(t)$ y un ruido de medición $w(t)$ descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B u(t) + v(t) \\ y(t) &= Cx(t) + w(t) \end{aligned} \quad (2)$$



donde “x” es el vector de estado, “u” el vector de entradas, “y” el vector de salidas y A, B, C son matrices de dimensión apropiada. La Ley de control LQG [12] que minimiza el siguiente índice de desempeño J:

$$J = E\{x^T(t) Q_c x(t) + u^T(t) R_c u(t)\} \quad (3)$$

está dada por:

$$u(t) = -K_c \hat{x}(t) \quad (4)$$

donde E es el operador esperanza matemática; “x” el vector de estado; “u” la señal de control, Q_c y R_c , matrices de síntesis; K_c es la ganancia LQ, \hat{x} es el estado estimado de Kalman [12]. La representación en variables de estado del controlador LQG está dado por [12]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= [A - BK_c - K_0 C] \hat{x}(t) + K_0 y(t) \\ u(t) &= -K_c \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde K_0 es la ganancia de Kalman.

Para que el diseño del controlador LQG sea consistente y permita que el lazo cerrado sea estable, las hipótesis siguientes deben satisfacerse: el sistema debe ser controlable (i.e. que el estado pueda alcanzar cualquier valor al aplicar una señal de control); también debe ser observable (i.e. el efecto de cualquier estado debe reflejarse en las salidas); la matriz de ponderación del estado Q_c es semidefinida positiva y simétrica ($Q_c = Q_c^T \geq 0$), y la matriz de ponderación del control R_c , es definida positiva y simétrica ($R_c = R_c^T > 0$). De igual manera existen hipótesis sobre las características que los ruidos deben satisfacer, para ello ver [12].

Los algoritmos para el diseño de la ganancia LQ y del filtro de Kalman pueden ser encontrados en cualquier libro de control óptimo, por ejemplo [12] y pueden ser calculados usando herramientas computacionales tales como el “Control Tool Box” de “Matlab” donde basta usar las instrucciones “lqr” o “lqe” para el cálculo de la ganancia LQ y de la ganancia de Kalman respectivamente.

Rechazo de perturbaciones

El principio del Modelo Interno [13], establece que si se desea rechazar una perturbación, el modelo interno de ésta debe estar contenido en la función de transferencia en lazo abierto del proceso a controlar. Si no es el caso, el diseño del controlador se realiza

utilizando el modelo aumentado de la planta, el cual consiste en conectar en serie el modelo de la planta con el modelo generador de las perturbaciones.

Diseño de los esquemas de control

El diseño de los reguladores se realizó considerando que se desea mantener constante los niveles aguas abajo al final de cada tramo (método de operación de tirante constante aguas abajo al final del tramo, [1]) mediante las compuertas aguas arriba de cada tramo (concepto de control aguas abajo, [1]).

Como primer paso en el diseño de cualquier controlador, se requiere conocer el comportamiento dinámico del sistema en estudio. En 2003, Sylvie Chaussinand realizó diferentes prueba para conocer el comportamiento dinámico del canal del ESISAR. A partir de la respuesta al escalón del prototipo del canal y de su aproximación en simulación Chaussinand [14], encontró que el comportamiento dinámico presente entre la apertura de la compuerta aguas arriba al inicio del canal (a1) y el tirante al final del canal (y2), alrededor de un punto de operación (a1 = 2.5 cm y2 = 12 cm), se puede aproximar por:

$$\frac{y(s)}{a(s)} = \frac{0.313 e^{-3.1s}}{(1+1.08s)^4} \quad (6)$$

Chaussinand [14] como parte de su estudio realizó distintas pruebas con el control PI y el LQG en el canal de laboratorio. Estas pruebas sirvieron de base para la selección de los parámetros de síntesis de los algoritmos de control mostrados en este trabajo.

Canal de un tramo

Mediante la abertura de la compuerta al inicio del canal (a1) se controla el nivel al final del canal (y2) y la compuerta intermedia (a2) está totalmente abierta (Fig 1). En el canal de un tramo se probó el regulador PI y el LQG.

Regulador PI: Para el caso del regulador PI los parámetros de diseño fueron seleccionados a partir de los propuestos por Chaussinand [14] por prueba y error encontrándose finalmente $K_P = 0.106$ y $T_i = 10.6$.

Regulador LQG: El diseño del regulador se basa en un modelo del sistema en representación de estados. Para obtener este modelo se parte del modelo identificado por Chaussinand [14] (6). Por otro lado, para



compensar el efecto producido por las perturbaciones consideradas en este trabajo, cambios en el flujo que sale aguas abajo al final del canal (se abre o cierra la compuerta al final del canal, a3), se determinó un “modelo generador” o “modelo interno” de dichas perturbaciones. El efecto de estas variaciones se puede aproximar por variaciones de tipo escalón sobre el nivel que se desea regular, el modelo propuesto como modelo generador es [13]: $1/s$

Finalmente la función de transferencia del modelo aumentado del sistema es:

$$\frac{y(s)}{a(s)} = \frac{0.313 e^{-3.1s}}{s(1+1.08s)^4} \quad (7)$$

Para obtener el modelo en variables de estados de la función de transferencia anterior (7), como primer paso, el retardo presente en el modelo se representa mediante una aproximación de Pade de 3 orden. En una segunda etapa, se utiliza el primer algoritmo citado en el capítulo 6 en Kailath [15], con el cual se obtiene el modelo del proceso a controlar en variables de estado.

Los parámetros de síntesis usados en el diseño del controlador LQG fueron: $Q_c = C^T C$, $R_c = 80$ y espectros de los ruidos $v(t)$ y $w(t)$: $Q_o = I$ y $R_o = 10$ donde C es la matriz de salida del modelo del proceso en variables de estado (2), I es la matriz identidad de dimensión adecuada.

Canal de dos tramos

En el canal de dos tramos se probó el regulador LQG centralizado y descentralizado.

Para el caso del regulador LQG descentralizado se diseñó el regulador para cada tramo de canal en forma independiente. En el segundo caso, centralizado, se diseñó el regulador considerando el modelo multivariable del canal de dos tramos. A partir de las pruebas realizadas por Chaussinand [14] se encontró la matriz de transferencia que aproxima el comportamiento presente entre las apertura de la compuertas y los tirante aguas abajo de los tramos alrededor de un punto de funcionamiento. El punto de funcionamiento considerado fue $a_1 = 2.5$ cm, $a_2 = 3.5$ cm, $y_1 = 13$ cm, $y_2 = 12$ cm., la matriz de transferencia es:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.4 e^{-1.5s}}{(1+1.0s)^4} & \frac{-0.2}{(1+1.0s)^4} \\ \frac{0.2 e^{-1.5s}}{(1+4.5s)^4} & \frac{0.3 e^{-1.5s}}{(1+1.0s)^4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como en el caso anterior el modelo generador de la perturbación es $1/s I$, donde I es la matriz identidad de dimensión adecuada. Este modelo fue conectado en serie con la planta para obtener el modelo aumentado del proceso el cual fue usado en la síntesis del controlador. El modelo del proceso en variables de estado usado en el diseño del controlador fue obtenido usando el procedimiento descrito para el caso del canal de un tramo.

Control descentralizado: Los parámetros de síntesis del regulador LQG descentralizado fueron: para el tramo aguas arriba $Q_c = C^T C$, $R_c = 80$, $Q_o = I$ y $R_o = 10$; para el tramo aguas abajo, $Q_c = C^T C$, $R_c = 300$, $Q_o = I$ y $R_o = 10$

Control Centralizado: Los parámetros de síntesis del regulador centralizado (modelos 2 entradas 2 salidas) fueron: $Q_c = C^T C$, $R_c = [150, 0; 0, 120]$, $Q_o = I$ y $R_o = 10 I$

Resultados en Tiempo Real

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el control del prototipo de canal ESISAR para los casos de uno y dos tramos.

Canal de un tramo

Para el caso de un tramo de canal se probó el funcionamiento del regulador PI y el LQG. En la Fig. 2 se muestra el desempeño del regulador LQG en seguimiento ante cambios en la referencia (y_2) y en regulación ante cambios en la apertura de la compuerta aguas abajo al final del canal (a_3). La Fig. 3. muestra el desempeño del regulador PI en seguimiento y en regulación ante cambios en a_3 . Si bien el desempeño de los algoritmos de control probados es similar, se observa cómo el regulador LQG estabiliza el sistema antes que el regulador PI, presentándose menos oscilaciones una vez que se alcanza el nivel deseado, referencia.

Canal de dos tramos

En la Fig. 4 se muestra el funcionamiento del LQG centralizado en regulación ante cambios en la apertura de la compuerta aguas abajo al final del canal, a_3 , y en seguimiento ante cambios en la referencia. En la Fig. 5 se presenta el desempeño del regulador LQG descentralizado en regulación ante cambios en la apertura de la compuerta aguas abajo al final del canal, a_3 . De los resultados presentados se concluye que el



regulador centralizado presenta un mejor desempeño observándose tiempos de respuesta más cortos y acciones de control con cambios más suaves. Estos resultados eran de esperarse al ser los canales de riego sistemas altamente acoplados.

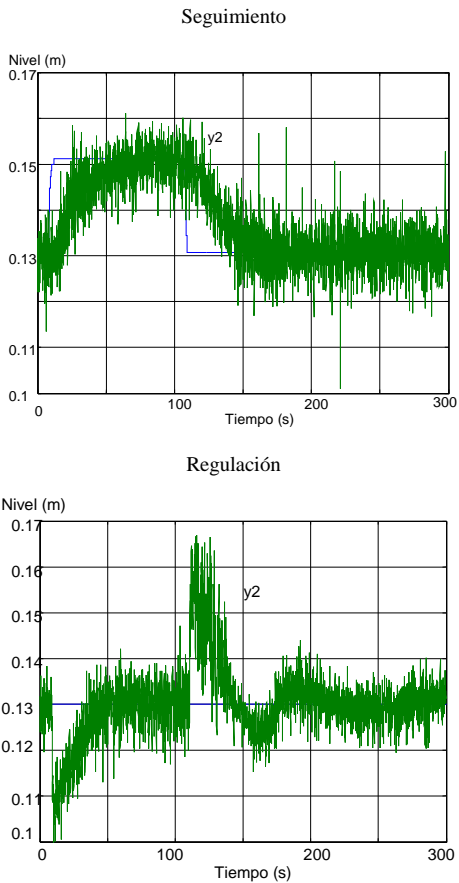


Fig 2. Desempeño del regulador LQG en un tramo de canal

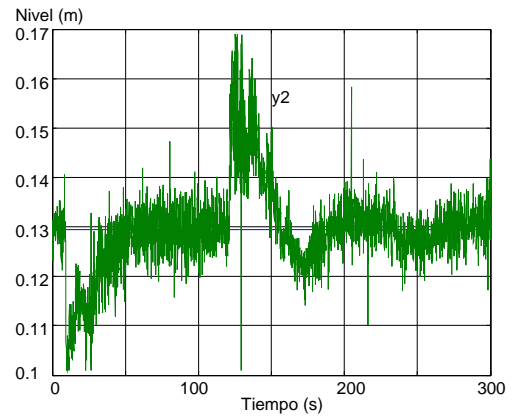
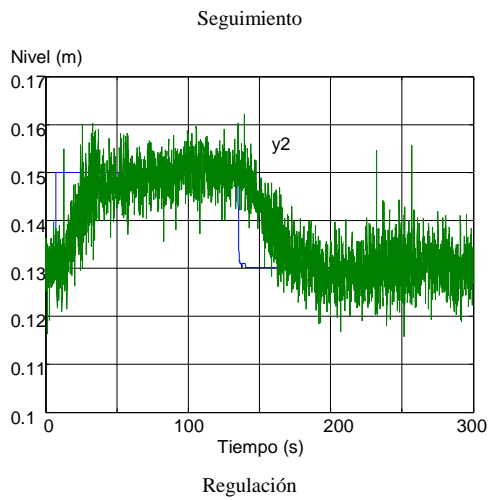


Fig 3 Desempeño del regulador PI en un tramo de canal

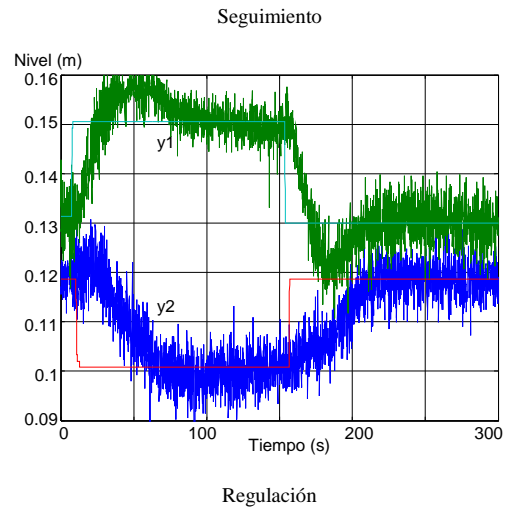


Fig 4. Desempeño del Regulador LQG centralizado en un canal de 2 tramos.

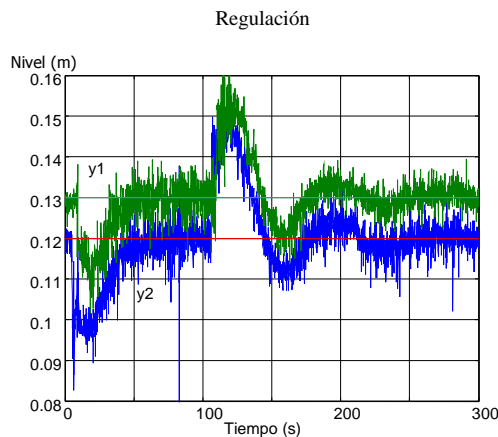


Fig 5. Desempeño del regulado LQG descentralizado en un canal de 2 tramos

Conclusiones

De los resultados obtenidos se aprecia cómo los controladores probados son capaces de regular el funcionamiento del canal ante cambios en la referencia (y_1 y y_2) y rechazar perturbaciones en gasto introducidas aguas abajo del canal (a_3).

Los resultados ponen claramente de manifiesto que es posible introducir el control aguas abajo de un canal si se dispone de la infraestructura de control: (sensores, actuadores, radios, etc.) necesaria para hacerlo.

Las experiencias obtenida en este trabajo son de gran utilidad en los trabajos que el CINVESTAV y el IMTA realizan en la implementación de sistemas de control para canales, ya que permitirán disponer en un futuro próximo, de los conocimientos necesarios para diseñar en forma exitosa el sistema de control requerido para las estructuras de control de los canales que actualmente se están instrumentando en México.

Referencias

- [1] C. P. Buyalski., D. G. Ehler, H. T. Flavey, D. C. Rogers Y E. A. Serfozo. *Canal Systems Automation Manual, Volume 1*. United State Department of the Interior, Bureau of Reclamation. EUA, 1991.
- [2] BURT, C. *Canal Modernization*, ITRC CalPoly EUA, 1996.
- [3] V.M Ruiz., J. Castillo, B. de León M.. Dynamic Analysis of Multi-Pool Irrigation Canal. *North American Water and Environment Congress*. Anaheim, CA, EUA.1996..

- [4] P.O. Malaterre, D. C. Rogers y J. Schuurmans Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, pp 3-10, 1998.
- [5] D. C. Rogers y J. Goussard Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage engineering*, vol. 125. pp. 11-15, 1998.
- [6] O. Balogun, M. Hubbard y J.Devries. Automatic control of canal flow using Linear Quadratic Regulator theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 114, pp.75-102, 1988.
- [7] O. Begovich. V. M. Ruiz y Zapién J. C.. Implementación en tiempo real de un control LQG en un prototipo de canal abierto de riego de varios tramos. *Ingeniería Hidráulica en Mexico*, vol. 19, no. 2, 5-15, 2004
- [8] S. Sawadogo, A. K. Achaibou, y J. Aguilar Martin. An applictaion of adaptive predictive control to water distribution systems. IFAC, ITAC, 91, Singapour, 1991.
- [9] M. L.Chen y D. Georges Nonlinear robust state feedback control of an open-channel hydraulic system. *European Control Conference Ecc'01*, Porto, Portugal, Septiembre, 2001.
- [10] J-F Dulhoste, G. Besancon y D. Georges Non-linear control of water flow dynamics by input-output linearization based on a collocation model. *European Control Conference Ecc'01*, Porto, Portugal, Septiembre, 2001.
- [11] K. J. Astrom y B. Wintenmark. *Computer Conotrolled Systems*. Prentice Hall, New Jersey, EUA, 1990.
- [12] B. D. Anderson y J. B. Moore *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Prentice Hall, New Jersey, EUA, 1990
- [13] W. Wonham *Linear Multivariable Control: A geometric approach*. Springer-Verlag, 1985.
- [14] S. Chaussinand. Reporte de DEA ESISAR, Valence, Francia, 2003.
- [15] T. Kailath. *Linear Systems*. Prentice Hall, 1980.

Dirección de los autores: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnahuac 8532, Jiutepec, Morelos, 62550 México, email: vmruiz@tlaloc.imta.mx. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara, Avenida López Mateos Sur 590, Guadalajara, Jalisco 45232, Mexico. ENSICA, Valance, Francia, email: {Eduardo.Mendes,laurent.lefevre}@esisar.inpg.fr. Laboratoire d'Automatique de Grenoble, ENSIEG BP 46-38402 Saint-Martin d'heres, Francia Email: {Gildas.Besancon,Didier.Georges}@inpg.fr . ENSICA, 1 place Émile Blouin, 31056 Toulouse Cedex 5, Francia, email:joel.bordeneuve@ensica.fr.