

Comparación entre las técnicas de control tradicional y las de control no lineal para la regulación del nivel de agua en un tramo de un canal abierto

Comparative study between linear and nonlinear control techniques to regulate water level in one reach open channel

C. J. Jerez* y J. F. Dulhoste

Departamento de Ciencias Térmicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes.

Mérida, Venezuela

*rico@ula.ve

Resumen

El propósito de este trabajo, es comparar el comportamiento de la técnica de control no lineal por linealización dinámica entrada salida, con el de las técnicas de control tradicional: PID, atraso, difuso, predictivo y robusto para la regulación del nivel de agua en un tramo de un canal abierto. Para estudiar el comportamiento de la dinámica del nivel y del flujo en el canal se dispone de un simulador unidimensional, que resuelve las ecuaciones diferenciales parciales no lineales de Saint-Venant. Los controladores fueron sintonizados a partir de la identificación de un modelo de segundo orden de la dinámica del flujo del canal al operar en lazo abierto. Los resultados de funcionamiento obtenidos mediante simulaciones, muestran índices de desempeño en lazo cerrado similares a los obtenidos mediante las técnicas del control no lineal. Basado en los resultados del estudio se concluye que controles tradicionales pueden ser implementados satisfactoriamente en un canal.

Palabras claves: Canales abiertos; control no lineal; control PID; control predictivo; control robusto.

Abstract

The objective of this work is to compare the performance between the nonlinear dynamic input-output linearization control technique, and the traditional control techniques PID, lag, fuzzy, predictive and robust, to regulate level in one reach open channel. To study water level and flow dynamics we have one-dimensional simulator, which solve Saint-Venant's nonlinear partial differential equations. The controllers were tuned using an identified second order model that describes open loop water flow dynamic. The results obtained by simulations showed that feedback performance indexes of each controller were similar to those obtained by the nonlinear control technique. Based upon results it is concluded that these controllers are feasible to implement in an open channel.

Key words: Open channels; nonlinear control; PID control; predictive control; robust control.

1 Introducción

El motivo principal de este trabajo, es comparar el funcionamiento de una técnica de control no lineal, propuesta en Dulhoste et al (2004), con técnicas comúnmente usadas en el control lineal para la regulación del nivel en un canal abierto,

En Dulhoste (2001a) se implementó un simulador que permite describir el comportamiento de la dinámica del flujo en un canal, basándose en las ecuaciones diferenciales

parciales de Saint Venant. Uno de los métodos propuestos por Dulhoste para resolver estas ecuaciones, fue el método de las diferencias finitas con discretización de Preissman, el cual fue elegido para esta comparación, por ser más representativo de la realidad.

Uno de los aportes más destacado del simulador implementado por Dulhoste es la posibilidad de regular el nivel mediante la manipulación de la posición de ambas compuertas del canal. Mientras que en otros trabajos el control se realiza al regular la posición de una de las compuerta pa-

ra regular el nivel del otro extremo (Akouz, 1997).

De las técnicas del control no lineal propuestas en trabajos anteriores (Dulhoste et al, 2001b) se seleccionó como base de comparación el control dinámico por linealización entrada salida, por presentar el mejor desempeño. Las técnicas de control lineal escogidas para la comparación fueron: PID, Atraso, Difuso, Predictivo y Robusto. El control PI es la técnica de control más ampliamente usada en este tipo de sistema (Baume, 1999), mientras que el control predictivo (Akouz, 1997) y robusto (Schuurmanns, 1997) han mostrado ser factibles de implementar.

La sintonización de los controladores lineales se basó en la obtención de modelos lineales de una entrada una salida, a partir del funcionamiento en lazo abierto del canal obtenido mediante el simulador disponible. Las técnicas de control fueron posteriormente evaluadas según índices de desempeño de su funcionamiento en lazo cerrado.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta un resumen del modelo matemático del canal abierto basado en las ecuaciones de Saint-Venant. La sección 3 trata sobre los fundamentos de las leyes de control estudiadas. En la sección 4 se realizan las comparaciones de funcionamiento de los controladores basándose en gráficas de simulación e índices de desempeño. La sección 5 presenta las conclusiones, y las expectativas que se esperan de trabajos futuros.

2 Modelo de la dinámica de flujo en canales abiertos basado en las ecuaciones de Saint-Venant

2.1 Ecuaciones de Saint-Venant

El modelo de Saint-Venant, se utiliza comúnmente para representar el comportamiento el flujo en canales abiertos, y está dado por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales.

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial x} + gS\left(\frac{\partial h}{\partial x} - I + J\right) &= k_q q \frac{Q}{S} \end{aligned} \tag{1}$$

donde: $J=Q|Q|/(kS(S/p)^{2/3})^2$: fricción; k: Coeficiente de Strickler; S: sección mojada; Q: flujo o gasto de agua; h: nivel relativo al fondo; I: pendiente del fondo; g: gravedad; q: infiltración; $k_q = 0$ si $q > 0$, y $k_q = 1$ si $q < 0$. Cuando el canal posee una sección rectangular se tiene que:

$$S = Bh, \quad p = B + 2h, \tag{2}$$

siendo B el ancho del canal. Para un canal fluvial (flujo subcrítico) se escogieron como condiciones de frontera el flujo en la compuerta aguas arriba y en la compuerta aguas abajo, pudiéndose utilizar estas como variables de control:

$$Q_{(x=0,t)} = Q_{0(t)}, \quad Q_{(x=L,t)} = Q_{n(t)} \tag{3}$$

Si se utiliza como variable de control la apertura W de la compuerta, la ecuación que describe el flujo Q para una compuerta tipo ‘de fondo’ viene dado por:

$$Q = B\sqrt{2g}(k_a h^{3/2} - k_b (h - W)^{3/2}) \tag{4}$$

con

$$k_a = k_F \mu; \quad k_b = k_{F1} \mu_1 \tag{5}$$

donde k_F , k_{F1} , μ y μ_1 son constantes que dependen de la geometría de la compuerta. Finalmente se toman en cuenta las siguientes condiciones iniciales:

$$h(x,0) = h_1(x); \quad Q(x,0) = Q_1(x); \quad \forall x \in [0, L] \tag{6}$$

3 Leyes de control

En esta sección se presentan las leyes de control a ser consideradas para la comparación. Estas leyes tienen como objetivo el control del nivel en los extremos del canal, escogiéndose como salidas:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 - h_e \\ h_3 - h_e \end{pmatrix} \tag{7}$$

Donde h_1 y h_3 representan el nivel de agua en las compuertas y h_e es el nivel deseado o de referencia.

3.1 Control dinámico por linealización entrada-salida

En Dulhoste et al (2004) se mostró que si el sistema satisface la condición

$$\forall t \geq 0, \quad y_3(t) - y_1(t) < \min\left(LI, \frac{gL}{k^2 B}\right) \tag{8}$$

entonces el controlador dinámico de la Ec. (9) garantiza que el sistema en lazo cerrado sea estable con $\lim_{t \rightarrow \infty} h_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} h_3(t) = h_e$ para todo $Q_2(0) \geq 0$.

$$\begin{aligned} \dot{u} = & \left[\frac{2Q_2}{BLh_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} - M^{-1}K_1M \right] u - M^{-1} \left[\frac{4}{BL}(Q_2K_1 \right. \\ & \left. + F1) \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \right] + K_1 \frac{q}{B} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + K_2 \begin{bmatrix} h_1 - h_e \\ h_3 - h_e \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{9}$$

donde $K_1 > 0$, $K_2 > 0$ y:

$$F1 = \frac{Q_2^2(-h_1 + h_3)}{LBh_2^2} + \frac{k_q q Q_2}{B h_2} - gBh_2 \left[\frac{(-h_1 + h_3)}{L} \right. \\ \left. - I + \frac{Q_2^2}{k^2 B^2 h_2^2 (Bh_2/(B + 2h_2))^{4/3}} \right] \quad (10)$$

3.2 Control PI

El control PI es un caso particular de las técnicas de control clásicas por adelanto-atraso siendo la técnica de control más ampliamente usada en canales abiertos (Baume, 1999). La ley de control adaptada para este tipo de sistema viene dado por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} \\ u = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 \\ \bar{m}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 \\ 0 & K_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{c1} & 0 \\ 0 & K_{c3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde el subíndice $j = 1$ ó 3 se refiere al controlador de la compuerta aguas arriba y aguas abajo respectivamente; K_{cj} ganancia proporcional; K_{ij} ganancia integral; y \bar{m}_j desvío o valor de salida del controlador j cuando $y_j=0$.

Existen diversos métodos para obtener la sintonización de los parámetros de este controlador; la técnica usada en este trabajo fue la propuesta por Ziegler y Nichols (Smith y Corripio, 1997) la cual consiste en aproximar la curva experimental del sistema, obtenida al operar en lazo abierto con la de un modelo de primer orden más tiempo muerto. Los parámetros del modelo obtenidos de este ajuste permiten calcular mediante la tabla de sintonización de Ziegler-Nichols los parámetros K_{cj} y K_{ij} de este controlador.

3.3 Control por atraso

El control por adelanto atraso, se utiliza cuando es necesario alcanzar ciertos criterios o especificaciones de funcionamiento del sistema de control en lazo cerrado (Ogata, 1993). Entre estas especificaciones se puede mencionar: velocidad de respuesta, máximo sobrepaso o el amortiguamiento de la respuesta que sea deseado.

Mediante simulaciones se observó que el componente de adelanto de un controlador adelanto atraso afecta negativamente el desempeño del sistema en lazo cerrado, por lo que se implementó solo el componente de atraso

Para el canal abierto se propone la siguiente ley de control por atraso:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{11} & 0 \\ 0 & -K_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{12} & 0 \\ 0 & -K_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} \\ u = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 \\ \bar{m}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{13} & 0 \\ 0 & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde los parámetros del controlador $K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{31}, K_{32}$ y K_{33} se obtuvieron utilizando el método del diseño del punto a partir del diagrama del lugar de las raíces de un modelo aproximado del sistema de segundo orden.

3.4 Control difuso

El controlador difuso es una estrategia de control lingüística, donde las acciones ejecutadas por el controlador dependen de una serie de reglas lingüísticas, basadas en la experiencia de un operador humano que controla manualmente un proceso manipulando una serie de variables para mantener otra (u otras) en una referencia o valor deseado (Colina, 1995).

En general los controladores difusos utilizan el error entre la salida real y la deseada y_j , para inferir el comportamiento del sistema y así poder calcular una acción de control que permita disminuir este error, obteniéndose una acción que permita al sistema comportarse de acuerdo a lo deseado.

La ley de control por lógica difusa propuesta para el canal queda definida como:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{CLD}(K_{11}\Delta y_1, K_{12}y_1) \\ \text{CLD}(K_{31}\Delta y_3, K_{32}y_3) \end{bmatrix} \\ u = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 \\ \bar{m}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{13} & 0 \\ 0 & -K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde CLD es el controlador por lógica difusa tipo Mamdani, K_{11}, K_{12}, K_{31} , y K_{32} son constantes que permiten normalizar en el rango $[-1,1]$ las señales de entrada a este controlador. K_{31} , y K_{33} son las constantes que permiten desnormalizar la salida del controlador al rango en el cual éste debe operar.

La selección de las variables, definición de universos, de etiquetas y de las reglas para el controlador difuso implementado fueron las mismas que las propuestas por Mamdani (Colina, 1995).

3.5 Control predictivo

El control predictivo (MPC) es el conjunto de técnicas de control que en los últimos tiempos han cobrado un mayor auge (Bequette, 2002). Dentro de estas técnicas, el control dinámico matricial (DMC) es en la actualidad uno de los algoritmos MPC más utilizado, siendo su principal campo de aplicación la industria química. La idea principal tras el DMC es usar un modelo en el tiempo de la respuesta escalón para calcular los futuros cambios en la variable manipulada que minimicen un índice de funcionamiento. Este método utiliza las mismas herramientas estadísticas que se usan en un procedimiento estándar de mínimos cuadrados, para determinar los mejores parámetros de una ecuación que se ajuste a un número de datos.

La ley de control DMC propuesta para el canal viene dada por:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0 \\ u &= \begin{bmatrix} \Delta m_{1,1}^{\text{nuevo}} \\ \Delta m_{1,3}^{\text{nuevo}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

donde $(\Delta m_{i,j}^{\text{nuevo}}) = (A_j^t A_j + I^2) A_j^t e_j$; A_j representa la forma matricial del modelo de convolución obtenido para la compuerta j del canal. e_j es el vector que contiene los N_C mejores cambios futuros calculados usando el modelo de convolución

3.6 Control robusto

Uno de los problemas más frecuentes que se puede encontrar en la teoría de control es la obtención de una ley, que mantenga la respuesta del sistema y la señal de error dentro de márgenes de tolerancia aceptables a pesar de todas las incertidumbres que puedan ocurrir en el proceso. Estas incertidumbres comúnmente tienen forma de ruido, de perturbación o de error de modelado de la función de transferencia del proceso, por ejemplo las distorsiones causadas por las no linealidades del proceso. (Chiang, 1998)

Existen diferentes técnicas para la obtención de un control robusto, siendo una de las más sencillas el método de síntesis H_∞ , el cual permite diseñar controladores robustos que logran las especificaciones de forma de los valores singulares de la matriz de funciones de transferencia deseados.

El procedimiento de diseño H_∞ es simple y requiere de un solo parámetro, la iteración γ . En primer lugar se deben escoger las funciones de ponderación W_1 , W_2 y W_3 según las especificaciones de diseño requeridas, para luego obtenerse el controlador al aplicar el diseño H_∞ . Los resultados obtenidos se evalúan a partir de la gráfica de bode de los valores singulares de la función de costo T_{γ, u_1} . Si se cumplen las especificaciones de diseño se acepta el controlador obtenido, si no, se ajusta el parámetro γ y se repite el procedimiento.

Para el canal abierto, la ley de control robusto propuesta posee la siguiente forma

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + b_1 h_1 \\ u_1(t) &= \bar{m}_1 + C_1 x_1 + d_1 h_1 \\ \dot{x}_3 &= A_3 x_3 + b_3 h_3 \\ u_3(t) &= \bar{m}_3 + C_3 x_3 + d_3 h_3 \end{aligned} \quad (15)$$

donde las matrices A_j , C_j y los vectores b_j , d_j representa al controlador robusto obtenido por la síntesis H_∞ para la compuerta j .

4 Comparación de los controladores

En esta sección se presenta un resumen de las comparaciones realizadas entre la técnica del control dinámico por linealización entrada-salida (ESD) y las técnicas de control presentadas anteriormente. Para realizar el estudio se dispone de un simulador (Dulhoste, 2001a) que utiliza un modelo del canal obtenido a partir del método de las diferencias finitas con esquema de discretización de Preissman.

Las características del modelo de canal utilizado son: 1000 m de longitud, 1 m de ancho, pendiente de 0.1% y coeficiente de Strickler de 25. Las pruebas que se consideraron para la realización de este estudio fueron: Cambio en la señal del nivel de referencia; infiltración constante a lo largo de todo el canal; perturbación lateral en forma de extracción de agua ubicada en la mitad del canal; cambio en la longitud del canal sin realizar un reajuste de los parámetros del controlador. Los índices que se utilizaron para medir el desempeño fueron:

1) Integral del error cuadrático (ICE): Representa la suma cuadrática de la señal de error durante el tiempo de simulación. Está definido mediante

$$ICE = \int_0^t y^2 dt \quad (16)$$

con $y = h - h_e$, la señal de error de entrada al controlador, y t el tiempo de finalización de la simulación.

2) Tiempo de asentamiento (T_s): Definido como el tiempo que tarda la variable controlada h en mantenerse dentro de una banda de $\pm 2\%$ de su valor final o de estado estacionario.

4.1 Cambio en el nivel de referencia (caudales)

En primer lugar se estudió la evolución del nivel en el canal, ante una variación en el nivel de referencia del 20% pasando éste de 1.5 m a 1.8 m. Como variable de control se usó el caudal de entrada en ambos extremos del canal, sin tomar en cuenta las ecuaciones de las compuertas (4).

Tabla 1. Índices de desempeño de las diferentes técnicas de control propuestas cuando se realiza un cambio en el nivel de referencia de 1.5 a 1.8 m, en un canal de 1000 m (Caudales)

Controlador	Compuerta Aguas Arriba		Compuerta Aguas Abajo	
	ICE	T_s (s)	ICE	T_s (s)
ESD	4.387	1200	26.167	840
PI	0.959	510	19.957	570
Atraso	6.377	510	24.351	840
Difuso	7.631	1860	22.836	2490
Predictivo	17.933	2940	38.514	3540
Robusto	4.558	750	23.588	1080

En la Tabla 1 se pueden apreciar los índices de desempeño para las diferentes técnicas de control estudiadas. El mejor desempeño lo obtiene el control PI, seguido del control dinámico por linealización entrada salida (ESD) y luego el control robusto. El control predictivo presenta el peor de los desempeños, teniendo un tiempo de asentamiento mayor que los anteriores. Esta característica del control predictivo se debe a la naturaleza de esta técnica, en la cual la variable manipulada se mantiene constante durante prolongados intervalos de tiempo

La Fig. 1 muestra la comparación de funcionamiento entre el control PI y el control ESD. Se puede apreciar un mayor sobredisparo en el nivel cercano a los extremos del canal para el control PI y velocidades de respuestas menores que las obtenidas por el otro método. Es importante destacar que el método de sintonización de Ziegler-Nichols proporciona valores iniciales para los parámetros del controlador PI, los cuales posteriormente fueron ajustados hasta obtener mejores índices de funcionamiento. En el caso del control ESD estos parámetros no fueron ajustados siendo usados los propuestos en Dulhoste (2001b).

4.2 Cambio en el nivel de referencia (Compuertas)

Al incluir las ecuaciones de las compuertas (4) para la regulación del nivel en el canal se obtiene una representación más realista del fenómeno en estudio. Todos los resultados que se presentan de aquí en adelante utilizan estas ecuaciones.

En la Tabla 2 se muestran los índices de funcionamiento para las distintas técnicas de control estudiadas, cuando se realiza un cambio en el nivel de referencia de 1.5 a 1.8 m, en ambos extremos del canal.

Tabla 2. Índices de desempeño de las diferentes técnicas de control propuestas cuando se realiza un cambio en el nivel de referencia de 1.5 a 1.8 m, en un canal de 1000 m (Compuertas)

Controlador	Compuerta aguas arriba		Compuerta aguas abajo	
	ICE	T_s (s)	ICE	T_s (s)
ESD	21.645	1380	41.790	1050
PI	22.920	2310	38.882	1500
Atraso	29.244	2070	41.888	1830
Difuso	31.685	2790	44.949	3030
Predictivo	35.544	2940	48.262	2700
Robusto	31.034	3360	46.536	3560

Principalmente se notan las bondades del control ESD, con los menores índices de funcionamiento, seguidos por el control PI. Los controladores por atraso, difuso, predictivo y robusto presentan índices de desempeño similares. Los índices de funcionamiento para todos los controladores son mayores, ya que en este caso se toma en cuenta el tiempo que tarda el motor en mover la compuerta desde una posición inicial hasta una final. El control predictivo se destaca

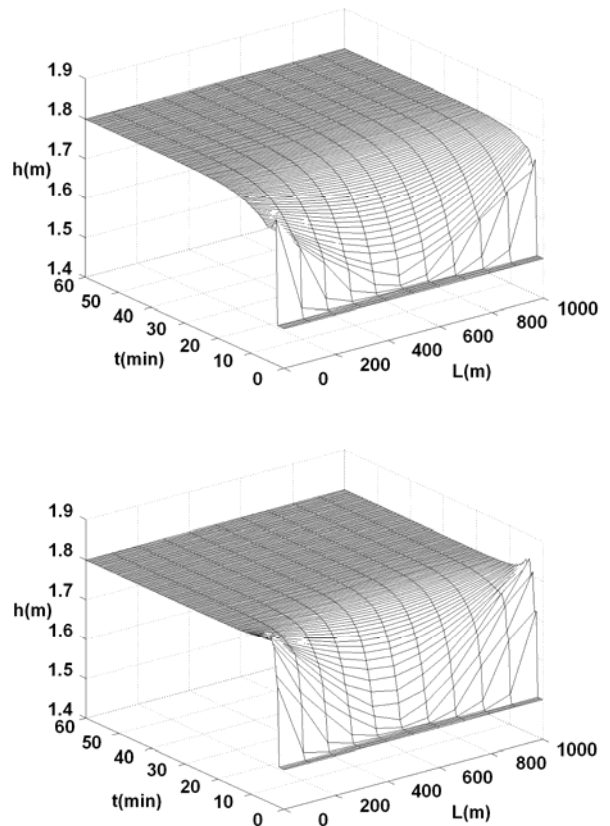


Fig. 1. Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden control ESD y PI), con modelo de simulación de Preissman al hacer un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m (Caudales)

por un funcionamiento aceptable, con tiempos de asentamiento cercanos al promedio de todos los controladores. Es interesante destacar que este tipo de control no tuvo una desmejora tan importante en su funcionamiento, como el resto de los controladores estudiados.

La Fig. 2 muestra la evolución del nivel en el canal cuando el control se realiza a través de la posición de las compuertas. Se puede observar que al usar el Control PI se obtiene un sobrepaso aún mayor en el nivel de la compuerta ubicada aguas abajo del canal, lo cual causa mayores tiempos de respuesta que los obtenidos con el control ESD. Es de destacar que el control PI, es una técnica que muestra ser factible de implementar para regular el nivel en un canal real.

La Fig. 3 muestra la evolución del nivel en el canal para las técnicas de control atraso y difuso cuando la señal de referencia se varía en forma de escalón. El control por atraso presenta un pequeño error en estado estacionario (Diferencia entre el nivel de referencia y el nivel controlado), tanto en la compuerta aguas arriba como aguas abajo. El comportamiento del control por atraso es muy parecido al control PI. El control difuso presenta una respuesta de control más lenta, con mayores tiempos de asentamiento y so

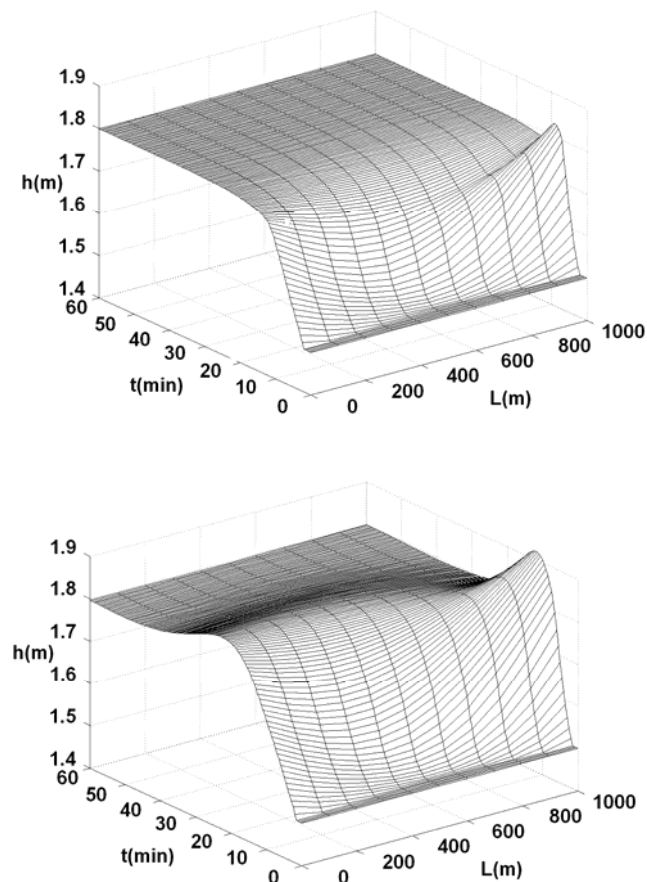


Fig. 2. Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden control ESD y PI), con modelo de simulación de Preissman al hacer un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m (Compuertas)

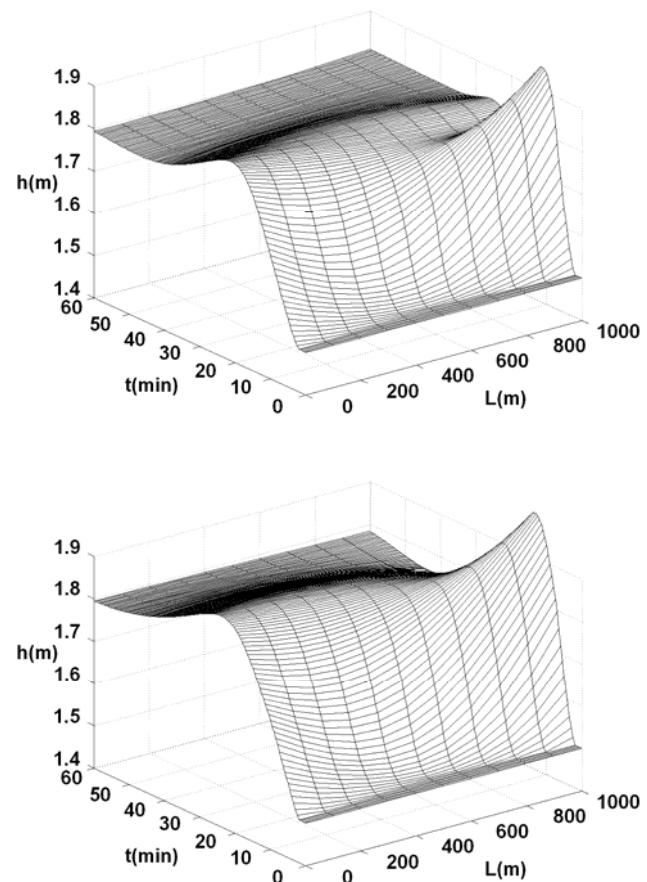


Fig. 3 Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden control Atraso y Difuso), con modelo de simulación de Preissman al hacer un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m (Compuertas)

bredisparo. La sencillez de sintonización de este tipo de control, y un funcionamiento aceptable constituye suficiente motivo para considerar su implementación en un canal abierto.

En la Fig. 4 se muestra el desempeño de los controladores predictivo y robusto al controlar el nivel en ambos extremos del canal. En este caso los controladores presentan un funcionamiento similar al de los otros controladores, siendo notables mayores sobredisparos y mayores tiempos de asentamiento. Es de destacar que el control predictivo, mantiene un funcionamiento similar a cuando no se tomaron en cuenta las posiciones de las compuertas, lo cual se traduce una técnica a considerar en el caso de un canal real. En el caso del controlador robusto, la regulación del nivel se caracteriza por presentar sobredisparos en ambos niveles del canal similares a los del control predictivo, y tiempos de asentamiento apreciablemente mayores que los de este último. Esta desmejora en el funcionamiento del control robusto indica que hace falta para su implementación en el canal real un estudio detallado de las funciones de sensibilidad para lograr una mejor sintonización.

4.3 Infiltración (Compuertas)

La Tabla 3 muestra el desempeño de los controladores cuando una infiltración (extracción de agua) constante a lo largo del canal está presente, y se mantiene la señal de referencia del controlador constante en 1.5 m. De esta tabla se observa que los mejores índices de desempeño se obtienen para el control ESD, seguido sorprendentemente del control predictivo. Además se puede observar que el caso del control por atraso presenta tiempos de asentamiento similares a los del control ESD, aunque muestra también para este caso pequeños errores en estado estacionario. El controlador que tiene mayores índices de funcionamiento es el controlador difuso. Este mal funcionamiento se debe a que las señales de error y variación del error fueron normalizadas para el caso del cambio en escalón, por lo que el controlador no resulta en una sintonización satisfactoria. El control robusto presenta índices ligeramente mejores que el promedio de los controladores.

La Fig. 5 muestra el funcionamiento de los controladores ESD y predictivo cuando una infiltración está presen

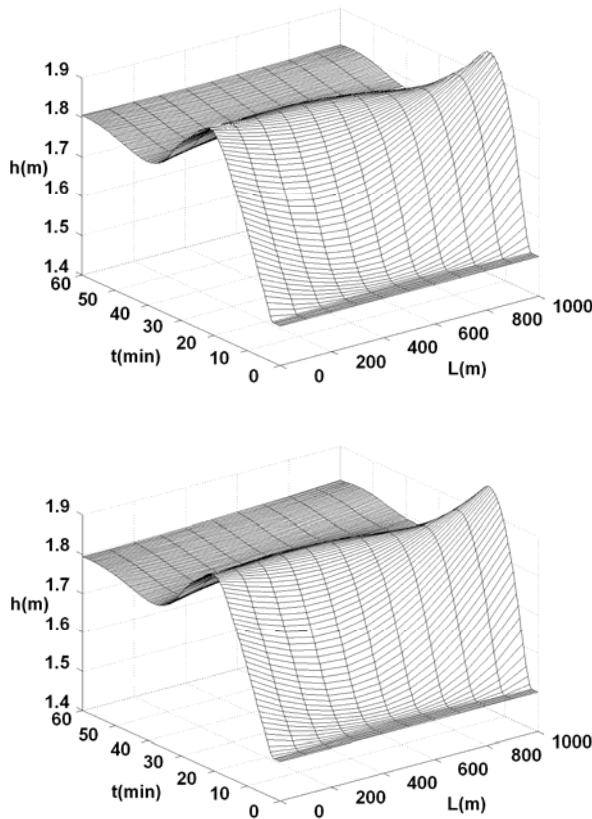


Fig. 4. Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden control predictivo y robusto), con modelo de simulación de Preissman al hacer un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m (Compuertas)

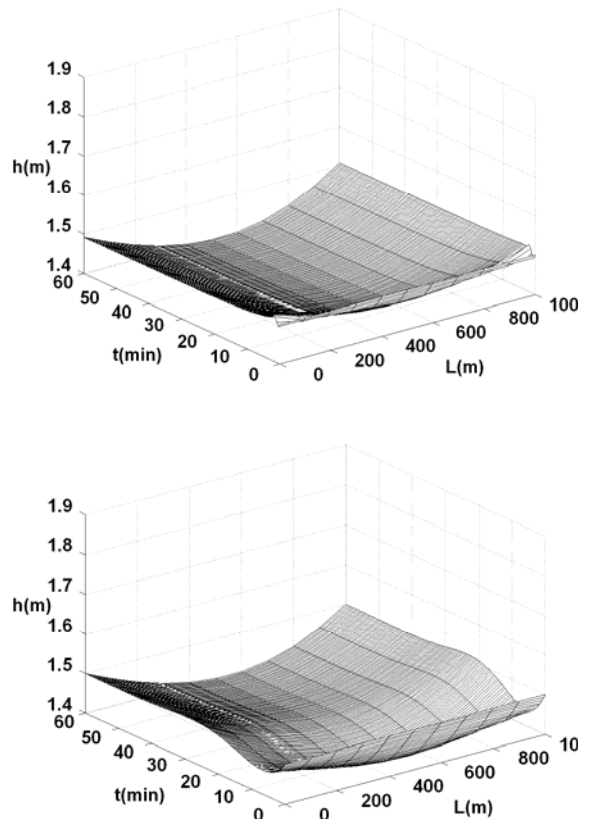


Fig. 5. Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden control ESD y predictivo), con modelo de simulación de Preissman e infiltración constante a lo largo del canal (Compuertas)

te a lo largo del canal, en este caso ambos controladores son capaces de mantener el nivel en ambos extremos del canal, observándose respuestas similares, siendo los mayores tiempos de respuesta los del control predictivo.

En este caso se pueden apreciar las bondades del control ESD sobre las otras técnicas de control, como son: responder de manera inmediata y lograr el objetivo de control en ambos extremos del canal.

Tabla 3. Índices de desempeño de las diferentes técnicas de control propuestas cuando se mantiene el nivel de referencia de 1.5 m y se considera una infiltración en un canal de 1000 m (Compuertas)

Controlador	Compuerta aguas arriba		Compuerta aguas abajo	
	ICE	T_s (s)	ICE	T_s (s)
ESD	0.196	30	32.056	30
PI	1.625	1020	39.517	570
Atraso	1.901	30	42.718	30
Difuso	6.911	1920	54.414	2820
Predictivo	0.955	720	37.631	720
Robusto	1.430	870	43.270	780

4.4 Toma lateral (Compuertas)

La Tabla 4 muestra el desempeño de los controladores cuando se mantiene constante la señal de referencia en ambos extremos del canal, y se presenta una toma lateral (extracción de agua) en la mitad del canal. De esta tabla se puede notar que la técnica ESD presenta los mayores índices de funcionamiento, mientras que las demás tienen índices relativamente bajos. El controlador PI se destaca a

Tabla 4. Índices de desempeño de las diferentes técnicas de control propuestas cuando se mantiene el nivel de referencia de 1.5 m y se considera una toma lateral, en un canal de 1000 m (Compuertas)

Controlador	Compuerta aguas arriba		Compuerta aguas abajo	
	ICE	T_s (s)	ICE	T_s (s)
ESD	9.809	30	29.636	300
PI	0.080	30	18.929	30
Atraso	0.940	30	19.818	30
Difuso	0.785	30	24.099	1230
Predictivo	0.049	30	18.752	600
Robusto	0.075	30	19.960	720

su vez por presentar el menor tiempo de asentamiento. El control por atraso sigue presentando pequeños errores en estado estacionario. El controlador difuso también presenta índices altos, motivado a que se sintonizó para el caso del cambio en la señal de referencia. Los controladores predictivo y robusto presentaron funcionamientos satisfactorios.

La Fig. 6 muestra la evolución del nivel en el canal para las técnicas de control ESD y robusto cuando se considera una extracción de agua en la mitad de éste. En esta figura se puede apreciar por qué el control ESD presenta los peores índices de funcionamiento. La causa de este bajo desempeño se debe a que presenta un error en estado estacionario considerable, no logrando mantener el nivel en su valor de referencia. La solución a este problema fue propuesta en (Dulhoste, 2001a) y se basa en el uso de un observador de estado que permita al controlador ESD anticiparse a este tipo de situación.

En la Fig. 6 además se puede apreciar que la técnica del control robusto no presenta este tipo de error en el funcionamiento del sistema de control logrando mantener el nivel en ambas compuertas. El otro controlador que presenta error en estado estacionario es el control por atraso pero éste es considerablemente menor al producido por el control ESD.

4.5 Cambio de longitud (Compuertas)

La Tabla 5 muestra los índices de funcionamiento para la regulación del nivel cuando los controladores propuestos se sintonizan para un canal de 1000 m y se implementan en uno de 5000 m.

Los mejores índices de desempeño se obtienen para el control PI. Además se nota que las otras técnicas de control logran tiempos de asentamiento considerablemente menores a los del control ESD.

Tabla 5. Índices de desempeño de las diferentes técnicas de control propuestas cuando se realiza un cambio en el nivel de referencia de 1.5 a 1.8 m, en un canal de 5000 m (Compuertas)

Controlador	Compuerta aguas arriba		Compuerta aguas abajo	
	ICE	T_s (s)	ICE	T_s (s)
ESD	31.510	10980	357.999	3000
PI	22.528	3120	310.731	1680
Atraso	28.023	2370	314.570	1380
Difuso	30.901	6120	297.754	9960
Predictivo	28.445	2160	304.907	2100
Robusto	28.569	2820	320.133	1890

En este caso, la desmejora en el funcionamiento del controlador ESD se debe a la pérdida de validez del modelo interno que posee, cuando varía alguno de los parámetros físicos del canal.

También es de destacar el buen funcionamiento del control predictivo, que logra índices de funcionamiento se-

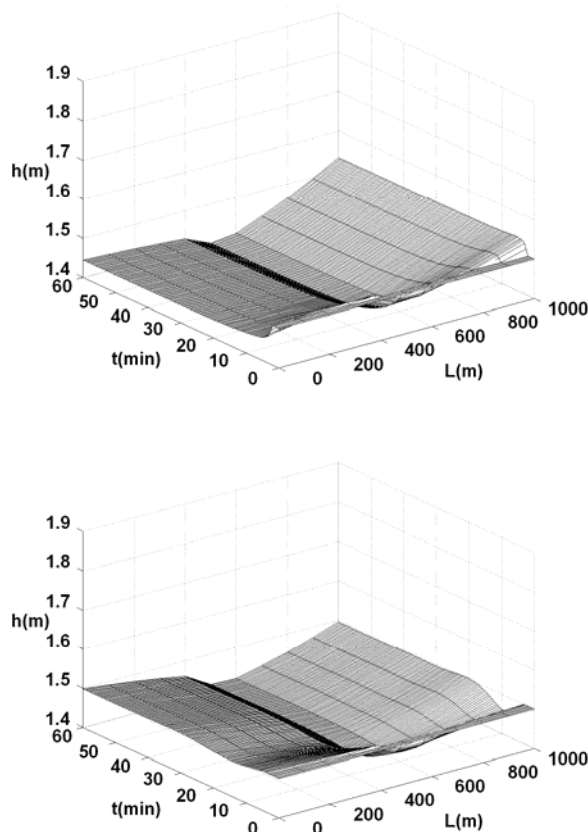


Fig. 6. Evolución del nivel en un canal de 1000 m (en orden Control ESD y Robusto), con modelo de simulación de Preissman y una toma lateral (Compuertas)

mejantes a los del control robusto.

La Fig. 5 muestra la evolución del nivel para un canal con longitud de 5000 m cuando se realiza un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m, utilizando las técnicas ESD y PI. En este caso se puede apreciar un comportamiento similar para ambos sistemas de control, presentando el PI un sobrepaso mayor, siendo los tiempos de respuestas del control ESD apreciablemente mayores que los que presenta el control PI.

5 Conclusiones

Una vez alcanzados los objetivos propuestos en este trabajo, se puede concluir que es factible usar las técnicas existentes del control lineal para la regulación del nivel en un canal abierto, el cual es un sistema que posee parámetros distribuidos.

Al comparar el funcionamiento del control dinámico por linealización entrada salida (ESD), y los diferentes controladores propuestos se destacó:

- Los controladores lineales mostraron índices de funcionamiento mejores que el control ESD, cuando el nivel de agua fue regulado mediante los caudales de entrada

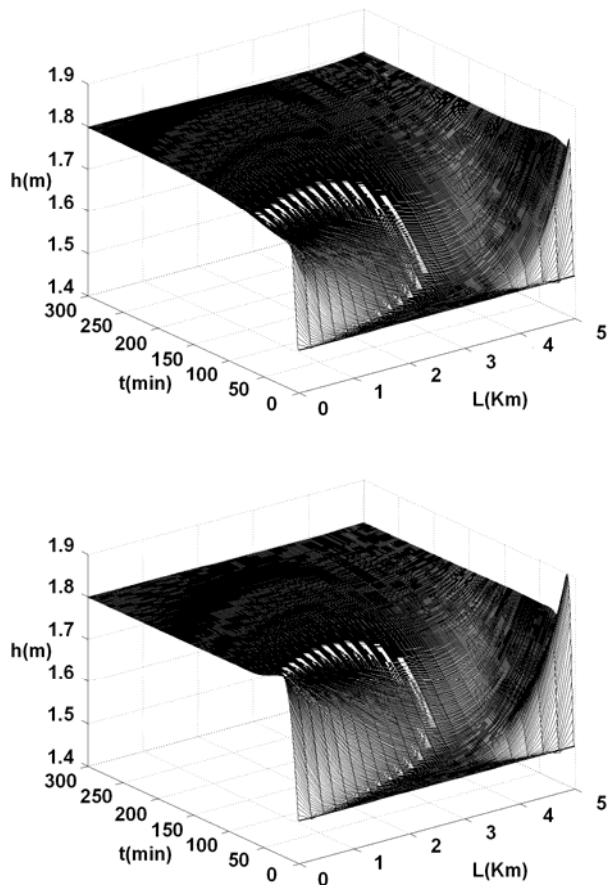


Fig. 5. Evolución del nivel en un canal de 5000 m (en orden control ESD y PI), con modelo de simulación de Preissman al hacer un cambio en la señal de referencia de 1.5 a 1.8 m (Compuertas)

y salida del canal.

- El control ESD mostró un mejor funcionamiento que el resto de los controladores estudiados, cuando se reguló el nivel del canal mediante la posición de las compuertas.
- El control PI logró índices de funcionamiento similares al control ESD, en la mayoría de los casos, lo cual justifica su utilización en canales abiertos.
- El control por atraso presentó un funcionamiento similar al PI, como era de esperarse, pero con pequeños errores en estado estacionario.
- El control difuso tipo Mamdani mostró ser una solución sencilla de implementar, aunque sus índices de desempeño no fueron del todo satisfactorios.
- El control DMC (Predictivo) mostró un funcionamiento bastante lento, pero capaz de realizar la regulación del nivel. De este controlador se puede destacar una mejoría cuando se manipulan la posición de las compuertas, alcanzando índices de funcionamiento similares y en algunos casos mejores que los demás controladores estudiados.
- El control robusto mostró un comportamiento similar al del PI con índices de funcionamiento promedio. En los ca-

sos que fueron estudiados, su funcionamiento nunca presentó una notable desmejora.

- Cuando se consideró una infiltración que extrae agua a lo largo del canal, todos los controladores lograron mantener el nivel en los extremos del canal, destacándose como el mejor el control ESD.
- Al considerar una extracción de agua constante en la mitad del canal, el control ESD, no logró mantener los niveles de los extremos en su referencia. Los controladores propuestos en este trabajo, a excepción del control por atraso, si lo lograron.
- Cuando se sintoniza la ley de control para un canal de longitud L y se implementa en un canal de mayor longitud, la técnica de control ESD pierde validez rápidamente, por lo que el sistema de control presenta un funcionamiento más lento que las otras técnicas de control estudiadas. Este problema que presenta el control ESD se debe a que usa un modelo interno de colocación del canal de 3 puntos, el cual pierde su validez al aumentar la longitud de éste.

Entre las ventajas del uso de controladores lineales sobre no lineales, está su amplia aceptación, ya que son técnicas de control bastante sencillas. Entre las desventajas que presentan, se puede mencionar: requieren un controlador para cada compuerta; la obtención de los parámetros de cada uno de estos controladores necesita de procedimientos de identificación y validación de modelos, los cuales son particulares para cada canal en estudio.

Las ventajas que presenta el controlador ESD son: mejora de funcionamiento cuando el modelo se parece más al sistema real; número de parámetros de sintonización reducidos que solo dependen de las características del canal. La mayor desventaja para este tipo de control son las complejidades involucradas en sus cálculos lo cual hacen imprescindible el uso de un microcomputador.

6 Expectativas

Entre las expectativas más importantes que se tienen para la continuación de este trabajo se tienen:

- Aplicación y comparación de las técnicas de control propuestas en un canal abierto real, mediante el uso de un sistema de control basado en un microcomputador
- Estudiar el funcionamiento de estos controladores cuando se aplican en un canal abierto con múltiples tramos.
- Desarrollar leyes de control para canales con sección diferente a la rectangular.
- Estudiar las características frecuenciales ideales de estos sistemas al funcionar en lazo cerrado, basándose en las posibles configuraciones físicas que pueda presentar el canal, que puede servir de información útil para sintonizar los controladores lineales.
- Hacer énfasis en las técnicas del control predictivo, ya que mostró ser una de las mejores técnicas cuando el modelo considerado se asemeja más al sistema real.

Referencias

- Akouz K, Benhammou A, Malaterre P y Dahhou, B. 1997. Predictive control of an irrigation channel, International workshop on regulation of irrigation channels: State of the art of research and applications, Marrakech, Morocco.
- Baume J, Malaterre P y Sau J, 1999. Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools, Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, October 18-21, 1999, Phoenix, Arizona. p 483-500.
- Bequette W, 2002. Process control: modeling, design, and simulation, Prentice Hall, USA.
- Chiang R y Safonov M, 1998. Robust control toolbox, The Math Works Inc.
- Colina E. 1995. Diseño de controladores por lógica difusa, Cuadernos de control, Maestría en Ingeniería de Control, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida.
- Dulhoste J, 2001, Contribution a la commande no linéaire de systèmes d'irrigation. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. France.
- Dulhoste J, Georges D, Besançon G, 2001, Comparación de controladores de nivel para canales abiertos basados en un modelo por colocación, Quinto Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela.
- Dulhoste J, Besançon G y Georges D, 2004, Nonlinear control of open channel water flow based on a collocation control model, Journal of Hydraulic Engineering, SCE, Vol. 130, No. 3, pp 254-266.
- Isidori A, 1995, Nonlinear control systems. 3era. ed., Springer Verlag, Berlín.
- Ogata K, 1993. Ingeniería de control moderna, 2da edición, Prentice Hall, México.
- Smith C y Corripio A, 1989, Principles and practice of automatic process control, John Wiley & Sons: 2nd ed., USA.
- Schuurmanns J. 1997. Robust decentralized control of open channels, II Control design, International workshop on regulation of irrigation channels: State of the art of research and applications, Marrakech, Morocco.