

Respuesta de diferentes sistemas de control de nivel de un canal abierto ante perturbaciones en variables trascendentales

Different open channel level control systems response due to disturbances on transcendental variables

Matamoros, Alejandra

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería de Sistemas.
Mérida, Venezuela.
matamoros@ula.ve

Dulhoste, Jean y Jerez, Carlos

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Mérida, Venezuela

Recibido: 26-02-07

Revisado: 17-01-2008

Resumen

Se presenta el estudio de la respuesta de un canal abierto, cuyo nivel ha sido controlado a través de diseños realizados en trabajos previos, empleando dos esquemas de control basados en técnicas distintas: el control por linealización dinámica entrada-salida (LESD) y el control proporcional-integral (PI). El propósito de este artículo es presentar los resultados del estudio del sistema empleando cada uno de los controles, cuando éste es sometido a perturbaciones en algunas de sus variables trascendentales, como lo son: los niveles en las adyacencias del canal y las mediciones de los niveles en los extremos internos del canal. Se realizaron simulaciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia para observar la sensibilidad revelada por el sistema empleando cada uno de los controles, así como para determinar los rangos de perturbación, en frecuencia y amplitud, que producen sensibilidad y aquellos a los que son capaces de atenuar las perturbaciones a las cuales son sometidos. Se encontró que la técnica clásica de control PI, es capaz de ofrecer una ligera mejor atenuación en la mayoría de los casos, pero que el control LESD tiene una velocidad de respuesta para la recuperación ante perturbaciones de baja frecuencia o cese de perturbaciones eventuales, mucho más rápida que la del control PI. El estudio permite concluir que la propiedad de rechazo y atenuación de perturbaciones que ambos controles ofrecen a este sistema, no difiere en gran proporción. En este sentido, podríamos abordar la implementación de cualquiera de ellos, al menos que se requiera contar específicamente con una de las ventajas particulares que ofrece cada uno de los controles por separado: mejor velocidad y mejor atenuación para bajas frecuencias de perturbación –control LESD, o mejor atenuación a las perturbaciones de alta frecuencia –control PI.

Palabras clave: Sistemas no lineales hidráulicos, canales abiertos, control por linealización dinámica entrada-salida, control PI, rechazo de perturbaciones.

Abstract

The study of the water level response in an open-channel is presented. The water level has been controlled using two designs made in previous works by different techniques: input-output dynamic linearization (LESD) and proportional-integral control (PI). The intention of this article is to present the results obtained from the system study using each of the mentioned controls when some of its transcendental variables are perturbed. Those variables are: the adjacent levels of the open-channel and the level measurements in the internal extremes of the open-channel. Computer simulations were made in the time and frequency domains to observe the sensibility revealed by the system using each control and to determine the per-

turbation ranges in amplitude and frequency for which the system is sensible, and those for which the controls can attenuate the perturbations to which they are exposed. We found that the classical technique of PI control is capable of to better attenuate the perturbations in the most cases but that the LESD control has a much better velocity response in the recuperation under low frequency perturbations and eventual perturbations than the PI control. This study lets us to conclude that the reject and attenuation of perturbations properties that both controls offer to the system do not differ in a significative manner. In this sense, we could approach the whichever implementation unless the needs are some particular advantages offered by each control independently: a better velocity and attenuation for low frequency perturbations –LESD control, or a better attenuation of high frequency perturbations –PI control..

Key words: Non linear hydraulic systems, open channels, input-output dynamic linearization, PI control, perturbation reject.

1 Introducción

El control automático del nivel de agua en los canales de distribución, ha de garantizar un suministro constante a través de la regulación de los mecanismos accionadores de los cuales está provisto, con el fin de que a su salida, disponga del volumen de líquido necesario para abastecer la demanda objetivo. Uno de los usos comunes para los cuales se ha estado estudiando el caso de los canales abiertos, es el de los sistemas de riego de campos de cultivo, en los cuales el agua se traslada desde una represa hasta las estaciones de bombeo de los campos de cultivo.

La distribución de aguas a través de canales abiertos depende de variables que van desde la geometría del canal, hasta la incidencia de variables externas ajenas al diseño físico del canal. Es claro que un sistema de control real no puede ser modelado exactamente, debido a las incertidumbres naturales que ha de tener un sistema físico real, a las perturbaciones a las cuales puede estar expuesto y a la complejidad matemática que ello significa. Sin embargo, el uso de modelos matemáticos aproximados de la realidad y, la consideración estimada de tales incertidumbres y perturbaciones externas, hacen que los sistemas de control puedan dar resultados exitosos a la hora de implementarlos. En este estudio, se aborda la segunda de las consideraciones para la validación de una de las potencialidades de un sistema de control: su sensibilidad ante perturbaciones en variables trascendentales. Estas últimas, se han definido para este estudio, como aquellas que al ser susceptibles a perturbaciones, pudiesen afectar el comportamiento dinámico del sistema, perceptible a través de la medición del nivel en ciertos puntos del canal. Entre ellas, los niveles de agua en las adyacencias del canal y las mediciones de nivel en los puntos de control.

El modelo unidimensional del canal abierto de un solo tramo para control de nivel, ha sido escrito matemáticamente a través de las ecuaciones diferenciales parciales de Saint-Venant (Graf y Altinakar, 1993) e implementado en un simulador numérico-gráfico, empleando un esquema de discretización basado en las diferencias finitas de Preissman (Dulhoste, 2001). En sistemas de control de nivel de canales, basados en este modelo, han sido varios los diseños que se han realizado, entre ellos: control por realimentación del estado (Dulhoste, 2001; Dulhoste et al, 2004), control por linealización dinámica entrada-salida (Isidori, 1995),

Backstepping (Besançon et al, 2001), control PID, control predictivo y control robusto (Jerez et al, 2005), entre otros. Particularmente, de estos diseños, se han seleccionado para este trabajo, el control por linealización dinámica entrada-salida (LESD) de las técnicas de control no-lineal y el control proporcional-integral (PI) de las técnicas clásicas, diseñados e implementados en el simulador antes mencionado.

El artículo está desarrollado en 5 secciones en el siguiente orden: el modelo del sistema, las técnicas de control a ser comparadas, el modelo de las perturbaciones utilizadas, los resultados obtenidos con sus respectivos análisis y, en la última sección, las conclusiones de este estudio.

2 Modelo del sistema

Las ecuaciones de Saint-Venant, representadas en ecuaciones diferenciales parciales, definen la dinámica del flujo de agua en un canal abierto de la siguiente manera:

$$\frac{\partial S}{\partial Q} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial Q} + gS \left(\frac{\partial h}{\partial x} - I + J \right) = k_q q \frac{Q}{S},$$
(1)

con condiciones iniciales:

$$h(x, 0) = h_1(x); \quad Q(x, 0) = Q_1(x); \quad \forall \quad x \in (0, L) \quad (2)$$

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

Las condiciones de frontera seleccionadas para el canal fueron los flujos en las compuertas aguas arriba y aguas abajo, variables que pueden ser empleadas como variables de control de manera directa o, indirectamente, a través de la apertura de las compuertas respectivas.

3 Técnicas de control

Se seleccionaron como técnicas de control para el estudio: el control por linealización dinámica entrada-salida –

de las técnicas de control no-lineales, y el control Proporcional-Integral PI –uno de los controles más clásicos; ambos diseñados en estudios anteriores (Dulhoste, 2001; Dulhoste et al, 2004, y Jerez et al, 2005). El estudio fue realizado para el caso más real, en el cual, el mecanismo de control son las posiciones de las compuertas, las cuales regulan los caudales de entrada y de salida. Sin embargo, se presentan algunas conclusiones importantes del sistema control directo del caudal.

3.1 Lineación dinámica entrada salida (LESD)

El control LESD puede verse para un sistema no lineal de una entrada una salida representado en el espacio de estados y dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{3}$$

que tiene solución definida sobre un intervalo [0,T], como la estrategia de encontrar qué condiciones se deben satisfacer para que exista una realimentación de estados a través de un control dinámico de la forma:

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \tag{4}$$

haciendo uso de un cambio de variables tal que transforme el sistema no lineal en una forma lineal equivalente. En (Dulhoste et al, 2004) se mostró que si el sistema satisface la condición:

$$\forall t \geq 0, \quad y_3(t) - y_1(t) < \min\left(LI, \frac{gL}{k^2B}\right) \tag{5}$$

entonces el controlador dinámico diseñado en (Dulhoste et al, 2004), de la forma:

$$[\dot{u}_1 \quad \dot{u}_3]^T = \begin{bmatrix} [K_{u11} & K_{u13}]^T & [K_{u31} & K_{u33}]^T \end{bmatrix} \cdot [\dot{u}_1 \quad \dot{u}_3]^T \tag{6}$$

garantiza que el sistema en lazo cerrado sea estable con:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} h_3(t) = h_e, \quad \forall Q_2(0) \geq 0 \tag{7}$$

siendo K_{uij} ganancias dependientes de los parámetros del sistema, con $i=1,3$ y $j=1,3$, y h_e el nivel de referencia.

3.2 Proporcional-integral (PI)

El esquema de control basado en diseños PI, fue implementado en (Jerez et al, 2005) basado en el mismo objetivo, ahora con la utilización de 2 controladores PI, uno para cada compuerta, identificados como $u_1(t)$ y $u_3(t)$:

$$u_j(t) = \bar{m}_j + K_{pj} \left(y_j(t) + \frac{1}{\tau_{ij}} \int y_j(t) dt \right), \quad j=1,3 \tag{8}$$

4 Perturbación del sistema

La forma de las señales de perturbación de las variables de un sistema, es más resultado del conocimiento de la naturaleza de las variables y la estimación de su posible comportamiento, que de una medición.

Para este trabajo, se realizaron simulaciones en el sistema controlado por el movimiento de las compuertas, considerando la perturbación de una variable a la vez. La Fig. 1 muestra la ubicación de cada una de las variables perturbadas en este estudio: los niveles en las caras externas de las compuertas del canal –niveles adyacentes y, las mediciones de los niveles en las caras internas de las compuertas – niveles dentro del canal.

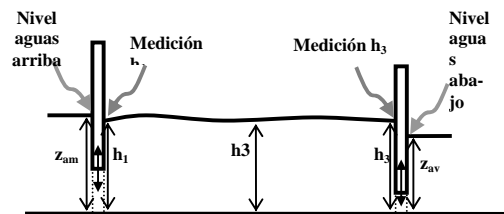


Fig. 1. Ubicación de las variables perturbadas.

4.1 Perturbación en los niveles adyacentes

El canal está delimitado por una compuerta aguas arriba y una compuerta aguas abajo, a cuyas caras externas existen niveles de agua asociados (z_{am} y z_{av}), debidos a la continuidad que pudiese existir con otros canales adyacentes o a las propias fuentes de carga y descarga de agua de este tramo del canal. Tales niveles, fueron considerados en estudios anteriores como constantes. En este artículo, ahora los niveles se consideran variables en forma de ondas, en búsqueda de simular la dinámica de la superficie del agua por efectos del viento, ondas generadas por propagación debida a fenómenos en localizaciones anteriores, entre otras causas (CO-OPS, 2006; Lebedev y Soong, 2005; Hong-Wu y Tian, 1999). No se consideran comportamientos con fuertes turbulencias en las adyacencias del canal, se hace una aproximación a comportamientos armónicos.

Se modeló la perturbación en cada uno de los niveles de líquido, z_{am} y z_{av} , considerando diferentes amplitudes (9) y diferentes frecuencias (10) de las ondas. Se trata de ondas con distintas componentes frecuenciales y de distintas amplitudes; frecuencias y amplitudes éstas, delimitadas (pero no equivalentes) por los rangos definidos para la simulación de las ondas (9) y (10).

$$p_{1z_{am}/z_{av}}(t) = A_{z_{am}/z_{av}}(t) \cdot \text{sen}(\omega_{z_{am}/z_{av}} \cdot t) \tag{9}$$

$$p_{2zam/zav}(t) = A_{zam/zav} \cdot \text{sen}(\omega_{zam/zav}(t) \cdot t) \quad (10)$$

Ambas señales fueron aplicadas por separado para realizar una estimación aproximada de los rangos de sensibilidad, a la amplitud y a la frecuencia, de los controladores seleccionados.

Existen varias maneras para describir las condiciones de las ondas en el agua, en términos de cantidades estadísticas medibles, entre ellas, la determinación de parámetros significativos de las ondas (descripción en el dominio del tiempo), y la determinación del espectro de ondas (en el dominio de la frecuencia) (Lebedev y Soong, 2005). Al incorporar estas perturbaciones, se simuló las respuestas del sistema en el tiempo para inspecciones gráficas y cálculos de errores y se obtuvo el espectro de frecuencias basado en la transformada rápida de Fourier (Figliola y Beasley, 2000) y MathWorks, 2005) para el estudio de las componentes de mayor potencia en la respuesta y determinar rangos de sensibilidad.

4.2 Perturbación en las mediciones de los niveles

Los sistemas de control diseñados para el canal de un solo tramo, están basados en las mediciones de los niveles en los dos extremos del mismo: niveles de agua en la cara interna de la compuerta aguas arriba, h_1 , y de la compuerta aguas abajo, h_3 . Se consideró el caso en el cual pudiesen existir perturbaciones en los instrumentos de medición de los niveles en los extremos internos del canal, suponiéndolas de naturaleza eléctrica para este estudio. La definición de su naturaleza, condujo a la selección de perturbaciones aleatorias de distribución Gaussiana, con media 0 y varianza 0.1, con una frecuencia de repetición equivalente a la frecuencia de las mediciones, dt , para considerar el caso más crítico. La amplitud de esta señal aleatoria fue modificada proporcionalmente por un factor β_i , el cual corresponde a un porcentaje de la medición i .

$$p_{hi}(t) = \beta_i \cdot \text{rand}(\mu = 0, \sigma^2 = 0.1) \quad (11)$$

4.3 Índice de desempeño

Se utilizó la Integral del producto del error absoluto por el tiempo (CIEAT) (Ogata, 1993) como índice de desempeño (Ec. (8)), con el propósito de penalizar con el tiempo el error producido por baja velocidad de respuesta en atenuación o rechazo de perturbaciones.

$$\int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (12)$$

Se utilizó la particularidad de compararlo respecto a la respuesta del sistema sin perturbación; el estado transitorio del sistema no es afectado significativamente por perturba-

ciones, por tanto, no es estudiado el desempeño en esta etapa. Los estudios previos han comparado el desempeño del sistema de control para el seguimiento de referencias. CIEAT es empleado sólo para comparar respuestas con igual tiempo de simulación

5 Resultados

Una vez seleccionadas las señales de perturbación y aplicadas en cada variable trascendental, se obtuvieron las simulaciones en el dominio del tiempo para ambos tipos de perturbación. En cada caso se estudió la incidencia de las perturbaciones por inspección gráfica y el cálculo del CIEAT, respecto al comportamiento ideal. Adicionalmente, para el caso de las perturbaciones en los niveles adyacentes, también se utilizó el espectro de frecuencias.

Se obtuvieron los resultados que se presentan en esta sección, en los cuales, el nivel del agua en estado estable en los puntos de control, h_1 y h_3 son las principales variables de estudio. Para el simulador y los sistemas de control que han sido implementados, dt es 30s. Los tiempos de simulación fueron seleccionados a conveniencia en cada caso.

5.1 Resultados de la perturbación en los niveles adyacentes

El sistema fue perturbado en cada uno de los niveles adyacentes, basándose en las Ecs. (9) y (10). Éstas permitieron generar perturbaciones de características variables y determinadas: amplitud y frecuencias variables. Basados en las consecuencias observadas en los resultados, se aplicaron luego perturbaciones particulares de frecuencia nula (aproximación a muy bajas frecuencias) que confirmaran los análisis generales, ante cada uno de los sistemas de control. Las perturbaciones fueron aplicadas una a la vez, para los niveles adyacentes aguas arriba, zam , y aguas abajo, zav . Bajo condiciones normales, se tiene $zam(t)=2m$ y $zav(t)=1m$, $t>0$.

Caso 1: Variación en las amplitudes, frecuencia constante:

Para perturbar el nivel zam , se utilizó una onda sinusoidal, definida como en (9), para amplitudes entre el 1% y el 10% de su valor original, y una frecuencia constante de $1/(125 \cdot dt)$ Hz. Como el sistema resultó menos sensible a perturbaciones de este tipo en zav , se amplió el rango de amplitud y se aumentó la frecuencia: entre el 1% y 20% de zav , y $1/(25 \cdot dt)$ Hz.

Se obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 2 para la perturbación en zam y, en la Fig. 3 para la perturbación en zav , al simular el comportamiento de los niveles de interés, h_1 y h_3 . Los resultados del CIEAT se reflejan en la Tabla 1.

Para el caso de la perturbación en zam , se obtuvo una atenuación del 100% hasta una amplitud de perturbación del 7%, luego se obtuvieron atenuaciones un poco más leves, hasta que, en tiempos similares, ambos sistemas de

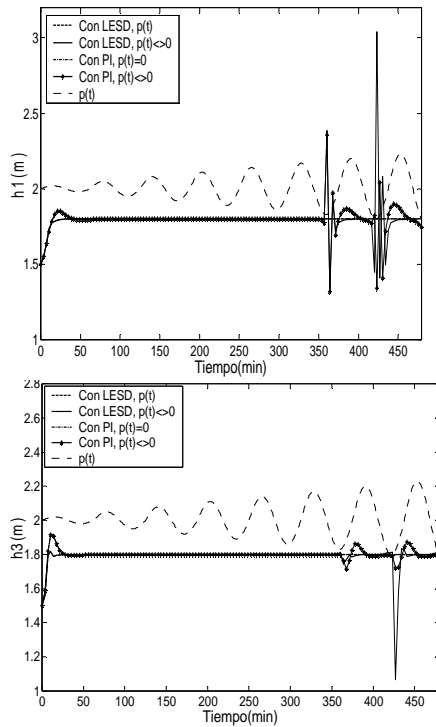


Fig. 2. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación y ante $p_{1zam}(t)$ (en: h_1 (Arriba), h_3 (Abajo)).

control se volvieron inestables para amplitudes de onda de más del 11%. Dicha inestabilidad es atribuible al modelo matemático de la dinámica de las compuertas que se implementó en el simulador, más no implica una inestabilidad real en el modelo del canal, limitándose el estudio únicamente al análisis dentro del rango de estabilidad garantizada. Se debe aclarar que esta limitación se presenta únicamente cuando la amplitud de la perturbación es de más del 11% por debajo del zam original, y sólo para ciertos tiempos de simulación.

La Fig. 2 y la Tabla 1 permiten deducir que, dentro del rango de estabilidad, ambos sistemas son sensibles a la perturbación aplicada y, que el control basado en PI es, capaz de atenuar un poco mejor perturbaciones en zam de estas magnitudes que el LESD. La Fig. 2 muestra que la sensibilidad se ve incrementada mayormente, a partir de amplitudes de perturbación de más del 11%. La perturbación en zav, por otra parte, fue rechazada en un 100%, tanto para el control LESD como para el PI.

Caso 2: Variación en las frecuencias, amplitud constante:

Se utilizaron perturbaciones como en (10) con amplitud constante del 7%, pues fue la máxima perturbación a la cual el sistema aún producía una buena atenuación, cuando ω variaba linealmente con el tiempo, según el caso 1. La onda fue generada a frecuencias variables entre $1/150dt$ y $1/16dt$ ($2.2 \cdot 10^{-4} - 2.1 \cdot 10^{-3}$ Hz) lo cual se consideró como un

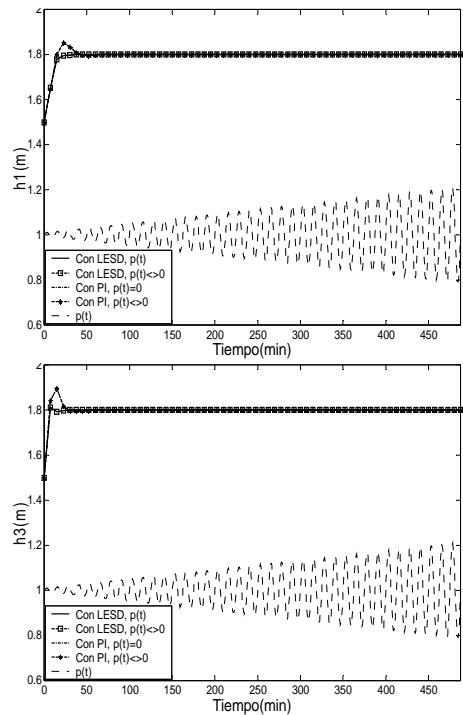


Fig. 3. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación y ante $p_{1zav}(t)$ (en: h_1 (Izq.), h_3 (Der)).

Tabla 1. CIEAT calculados para cada caso de perturbación.

Variable perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
zam(t)	LESD	11131	7188	3435
	PI	11556	6888	2456
zav(t)	LESD	0.00	0.00	0.00
	PI	0.00	0.00	0.00

rango amplio de altas y bajas frecuencias para la generación de la perturbación, dado que las componentes de máxima potencia de la respuesta del sistema ideal para ambos casos se encuentran entre 10^{-4} y 10^{-3} Hz (Fig. 4), siendo esto producto de la etapa transitoria de cada sistema de control. El rango acá definido, tiene como propósito obtener una generalización estimada para comportamientos del sistema ante frecuencias fuera del rango de máxima potencia revelado por la perturbación.

La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos al perturbar zam, y la Fig. 6, al perturbar zav con una onda más significativa en amplitud y frecuencia. Puede observarse en la Fig. 5 que a bajas frecuencias, el sistema ante ambos tipos de control, es capaz de atenuar notoriamente la perturbación $p_{2zam}(t)$. A altas frecuencias de la perturbación, ninguno de los dos sistemas es capaz de garantizar dicha atenuación.

En la Fig. 6, por otra parte, puede observarse que una perturbación $p_{2zav}(t)$ del 50% de zav no afecta el comportamiento de los niveles en los puntos de control $h_1(t)$ y $h_3(t)$, reflejándose a través del CIEAT en la Tabla 2. Se realizaron pruebas en las cuales, ni aún amplitudes de perturbaciones

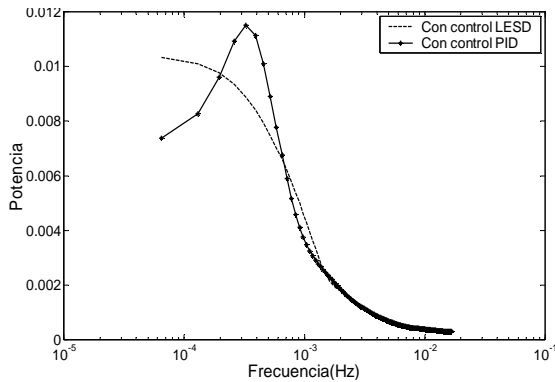


Fig. 4. Respuesta frecuencial del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación.

Tabla 2. CIEAT calculados para cada caso de perturbación.

Variable perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
zam(t)	LESD	9247.0	2169.2	4218.4
	PI	8257.3	2256.6	1404.2
zav(t)	LESD	0.0	0.0	0.0
	PI	0.0	0.0	0.0

En la Fig. 7, el espectro de frecuencias de cada sistema de control ante cada perturbación, permite extraer información sobre cuáles son las frecuencias a las que cada sistema de control se hace sensible a $p_{2zam}(t)$, resultando éstas desde aproximadamente $4 \cdot 10^{-4}$ Hz en ambos casos. El espectro de frecuencias para $p_{zav}(t)$, muestra que, pese a la elevada potencia de la perturbación en el rango de frecuencias delimitado, el sistema no es sensible en zav.

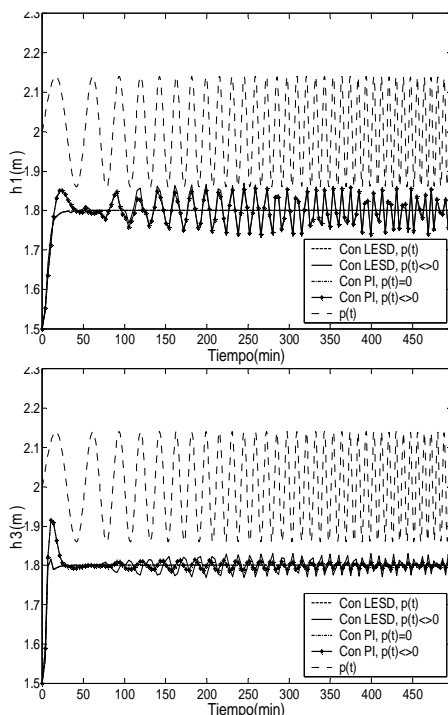


Fig. 5. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación y ante $p_{2zam}(t)$, $A_{zam}=7\%$ zam y frecuencia entre $2.2 \cdot 10^{-4} - 2.1 \cdot 10^{-3}$ Hz en: h_1 (Arriba), h_3 (Abajo).

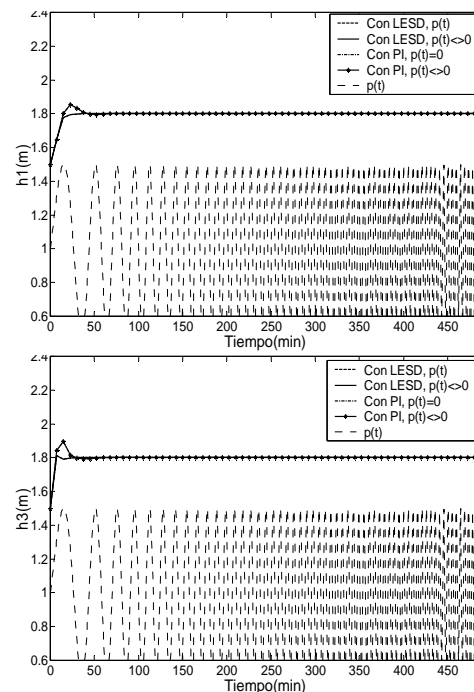


Fig. 6. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación y ante $p_{2zav}(t)$, $A_{zav}=50\%$ zav y frecuencia entre $2.2 \cdot 10^{-4} - 3.7 \cdot 10^{-3}$ Hz en: $h_1(t)$ (Arriba), $h_3(t)$ (Abajo).

cercanas al 100% de zav, con $\omega(t)$ variable, son capaces de perturbar el sistema al emplear cada uno de los controles.

El CIEAT calculado para cada caso de perturbación, evidencia que, para $h_1(t)$ –la variable de mayor sensibilidad a $p_{2zam}(t)$, el PI logra una atenuación ligeramente mejor a la del LESD (diferencia del 12% del CIEAT del PI). Esta atenuación fue observada en la respuesta temporal de la Fig. 5. Para $h_3(t)$, también el PI actúa con mejor atenuación (200% del CIEAT del PI); en niveles intermedios como $h_2(t)$, sin embargo, LESD da resultados muy similares a los del PI, los cuales difieren en 3.9% del CIEAT del sistema con PI para $h_2(t)$.

Caso 3: Perturbación de amplitud y frecuencia constantes en zam, durante un período de tiempo t_1 :

Se aplicó a ambos sistemas de control, una perturbación sinusoidal, con amplitud 7% zam y frecuencia de $7 \cdot 10^{-3}$ Hz, la cual ya es una frecuencia alta para el sistema, cuyo comportamiento general según el análisis anterior ya es predecible. La perturbación fue aplicada durante 1000s (16.6min) a los 4000s (67min), tiempo en el cual el nivel ya se había estabilizado.

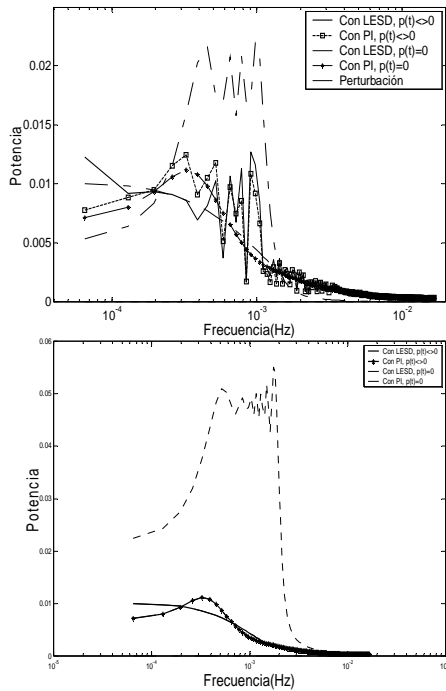


Fig. 7. Comparación del espectro de frecuencias del sistema con control LESD y con PI, ante: $p_{2zam}(t)$, $A_{zam}=7\%$ de z_{am} , $2.2 \cdot 10^{-4} - 2.1 \cdot 10^{-3}$ Hz (Arriba), $p_{2zav}(t)$, $A_{zav}=50\%$ de z_{av} , $2.2 \cdot 10^{-4} - 3.7 \cdot 10^{-3}$ Hz (Abajo).

La respuesta temporal de la Fig. 8, permite confirmar, por inspección, la sensibilidad media (~30% para la variable más sensible $-h_1(t)$) del sistema, empleando cada control, ante perturbaciones con amplitudes y frecuencias de estas magnitudes. Además se observa que el tiempo de recuperación del sistema, ante el cese de la perturbación, para el control LESD fue de 0min y, para el PI, de 24min, lo cual da buena información sobre el tiempo de respuesta de cada sistema ante cambios de condiciones.

La Fig. 9, muestra cómo, a la frecuencia de perturbación, ambos controles reaccionan ante la señal de perturbación $p_{zam}(t)$ con potencias muy similares. El espectro de frecuencias del sistema con control PI, particularmente, también muestra cambios en las componentes de menor frecuencia, debido éstos a su baja velocidad de respuesta ante los cambios percibidos.

La Fig. 10, muestra las respuestas del nivel obtenido en todo el tramo del canal, al utilizar cada controlador. Las simulaciones en el tiempo, permiten observar que la estabilidad y seguimiento del nivel de referencia del sistema (1.8m) –aplicada como un escalón, son recuperados en su totalidad por ambos sistemas de control, pese al bajo rechazo que presentaron a la perturbación.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos en este caso. Debido al rápido tiempo de respuesta del control LESD para recuperarse ante perturbaciones eventuales, el CIEAT obtenido con LESD es mucho mejor que el del sistema con control PI. Sin embargo, no debe perderse de vista que la sensibilidad de ambos sistemas de control es muy

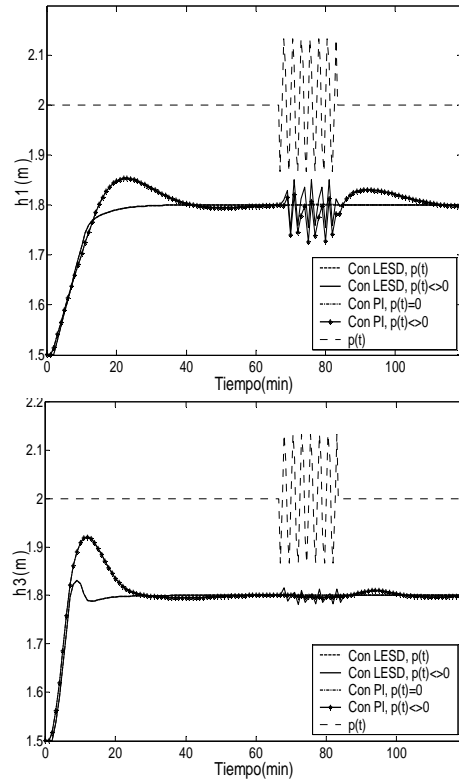


Fig. 8. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, con $p_{zam}(t)=A_{zam} \cdot \text{sen}(\omega_{zam} \cdot t)$, $A_{zam}=7\%$ z_{am} y $\omega_{zam}=2 \cdot \pi \cdot f_{zam}$ ($f_{zam}=6.5 \cdot 10^{-3}$ Hz), entre 4000 y 5000s (67-83 min): h_1 (Arriba), h_3 (Abajo).

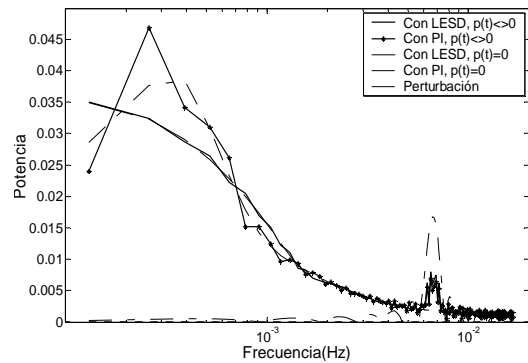


Fig. 9. Comparación del espectro de frecuencias de $h_1(t)$ del sistema con control LESD y con PI, con $p_{zam}(t)=A_{zam} \cdot \text{sen}(\omega_{zam} \cdot t)$, $A_{zam}=7\%$ z_{am} y $\omega_{zam}=2 \cdot \pi \cdot f_{zam}$ ($f_{zam}=6.5 \cdot 10^{-3}$ Hz).

cercana entre sí; para este caso: 34.87% con el PI y 36.85% con el LESD, siendo entonces el sistema con LESD ligeramente más sensible.

Tabla 3. CIEAT para una perturbación $p_{zam}(t)$, frecuencia variable.

Variable Perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
$z_{am}(t)$	LESD	94.51	9.73	26.41
	PI	182.61	107.65	34.99

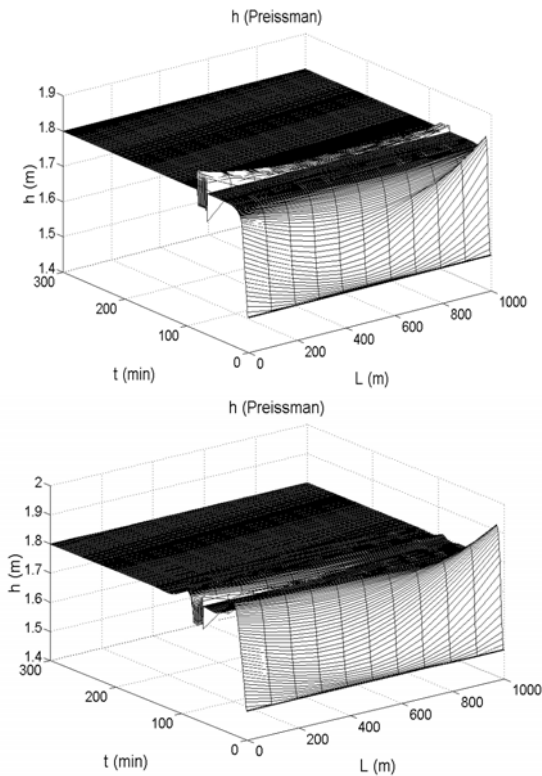


Fig. 10. Respuesta temporal del nivel ante $p_{zam}(t)$: con control LESD (Arriba), con control PI (Abajo).

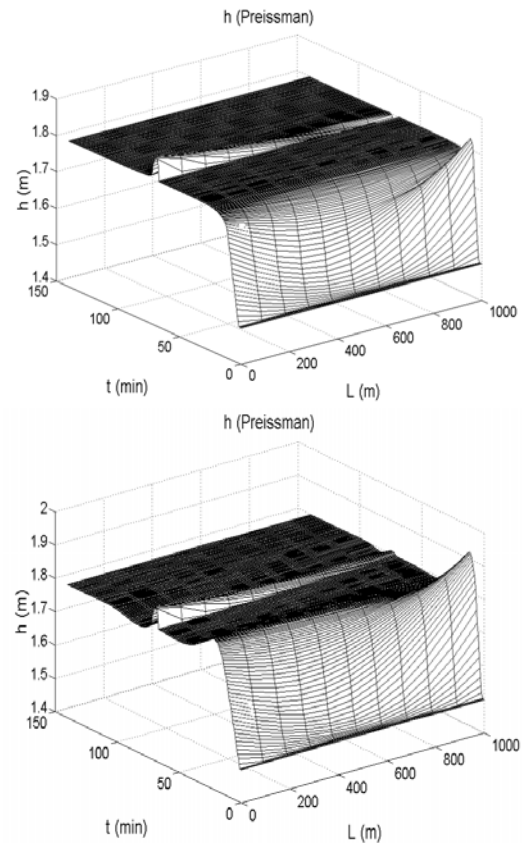


Fig. 11. Respuesta temporal del nivel ante $p_{zam}(t)=0.1 \cdot zam(t)$, ($t \geq 4000s$): con control LESD (Arriba), con control PI (Abajo).

Caso 4: Perturbación en escalón en zam:

Se aplicó una perturbación en escalón de amplitud 10% de zam a los 4000s (perturbación de frecuencia nula) y, una de amplitud negativa de menor amplitud (6%) debido a la limitación impuesta por el modelo de las compuertas utilizado. Por similitud en los resultados, en las Figs. 11 y 12 se presentan los obtenidos sólo para el caso de perturbación positiva; sin embargo, la Tabla 4 muestra los valores del CIEAT para cada caso.

Se extienden los análisis para ambas pruebas realizadas: Los dos sistemas de control reaccionaron instantáneamente a la perturbación. Tal como se obtuvo a través del análisis de los rangos de amplitudes y de frecuencias y, a partir de las figuras, se puede observar cómo ambos sistemas son sensibles pero actúan para su rechazo a distintas velocidades de respuesta (ver detalle en la Fig. 12). En cuanto a velocidad de respuesta, el sistema con control LESD, tardó un tiempo de 9.5 min para rechazar en un 95% a $p_{zam}(t)$, mientras que, al igual que en el caso anterior, el sistema con control PI, es más lento (23 min). Este último resultado fue el mismo para las dos perturbaciones.

La Tabla 4, muestra una diferencia bastante significativa (55.8% de CIEAT de PI) entre los errores obtenidos empleando cada controlador para el escalón positivo y, una

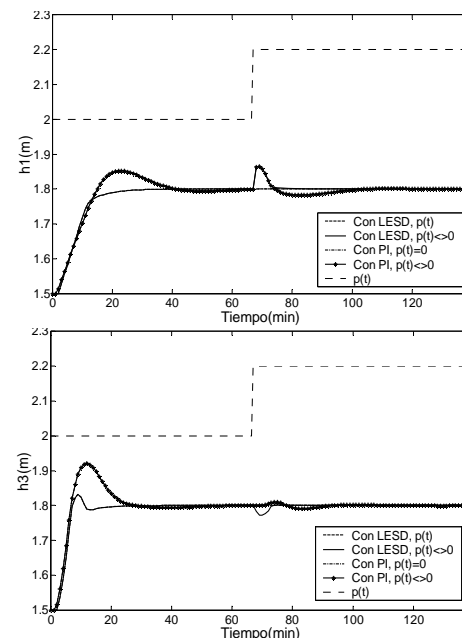


Fig. 12. Comparación de la respuesta temporal del sistema con control LESD y con PI, sin perturbación y ante $p_{1zam}(t)=0.1 \cdot zam(t)$, ($t \geq 4000s$): en: h_1 (Arriba), h_3 (Abajo).

muy similar (56.3%) para el negativo. Tales diferencias son justificadas por la velocidad de respuesta, más no por errores en estado estable ni por amplitudes máximas de la incidencia de la perturbación. Esta última fue de la misma magnitud para ambos sistemas de control: ~30% para la perturbación positiva y ~42% para la negativa. En ambas pruebas, el sistema logró recuperar el nivel en el canal, respecto a las referencias: $h_1(t)$ y $h_3(t)$.

Tabla 4. CIEAT calculados para perturbaciones $p_{zam}(t)$ en escalón.

Variable Perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
zam(t) +	LESD	43.96	25.69	16.98
	PI	99.45	62.99	27.29
zam(t) -	LESD	40.93	24.13	15.30
	PI	93.75	60.40	25.55

Caso 5: Perturbaciones en escalón en zav:

Según el caso 2, sistema es insensible ante cualquier perturbación en zav de amplitud significativa y de cualquier frecuencia no nula, para ambos sistemas de control. Se realizaron simulaciones cuando la perturbación es una señal en escalón, como en el caso 5 de perturbación en zam, ahora para zav. Para perturbaciones positivas y amplitudes menores al 100% de zav, el sistema fue capaz de rechazarlas por completo. Amplitudes del 100% ya fueron percibidas, pero atenuadas a una muy buena velocidad de respuesta. Señales de estas magnitudes (y constantes) ya dejan de considerarse como perturbaciones, deben revisarse las condiciones del sistema. En contraposición a lo sucedido en el caso 5 con la perturbación negativa en escalón en zam, el sistema es totalmente insensible ante una perturbación de este tipo en zav y, por lo tanto el modelo es siempre estable en este caso.

5.2 Resultados de la perturbación en las mediciones

Para este tipo de perturbaciones, se esperaría que el sistema fuese más insensible; sin embargo, es de presuponer, que perturbaciones significativas y de baja frecuencia en las mediciones, ocasionan evidentemente desvíos en el valor de las variables medidas y, como el control es calculado usando estas mediciones, también se obtendrán desvíos en las variables controladas. En el análisis de la incidencia de estas perturbaciones, se deprecó el estudio de la frecuencia, pues sólo se abordó el caso más crítico: la frecuencia de la perturbación coincide con la de medición.

Caso 1: Perturbación en la medición h_1 :

Se perturbó el instrumento de medición del nivel $h_1(t)$ del canal con una señal $p_{h_1}(t)$, según la Ec. (11), con una amplitud de $\beta_1=0.01 \cdot h_1(t)$ y un período dt. La Fig. 13 muestra los resultados obtenidos en el comportamiento del nivel en

el canal. La Tabla 5, muestra los valores del índice de desempeño.

Se obtuvo que el sistema con control PI es relativamente insensible a las perturbaciones, con una atenuación del 8.24%, mientras que el sistema con control LESD, sí se hizo sensible a las mismas, revelando una atenuación del 41.34% en $h_1(t)$ (CIEAT máximo debido a la perturbación: 48.45).

Caso 2: Perturbación en la medición h_3 :

Al someter la medición de $h_3(t)$ a la misma perturbación (11), se obtuvieron los resultados de la Tabla 6, según los cuales, el sistema con control LESD nuevamente revela su sensibilidad, mientras que con el control PI, es aún insensible. Se amplió la magnitud de la perturbación, ahora del 10% (Tabla 6), donde ya el sistema con control PI se hace sensible a la perturbación en la medición, pero aún revela mejor atenuación que el control LESD; la diferencia obtenida entre ambos, para la variable perturbada, medición de $h_3(t)$, con un $t=6000s$, fue del 25% del CIEAT de $h_3(t)$ con el control PI.

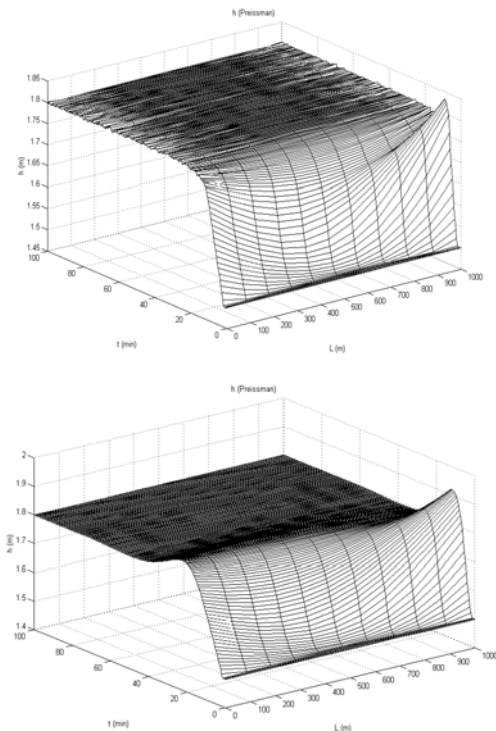


Fig. 13. Respuesta temporal del nivel ante $p_{h_1}(t)$ de $\beta_1=0.01 \cdot h_1(t)$: con control LESD (Arriba), con control PI (Abajo).

Tabla 5. CIEAT calculados para una perturbación en $h_1(t)$ al 1%.

Variable Perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
$h_1(t)$	LESD	20.03	3.58	18.24
	PI	3.99	2.14	0.68

Tabla 6. CIEAT calculados para una perturbación $h_3(t)$ al 1 y 10%

Variable Perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
$h_3(t)$ al 1%	LESDD	13.7	5.65	27.83
	PI	0.02	0.08	0.31
$h_3(t)$ al 10%	LESDD	55.33	65.47	183.45
	PI	9.42	43.65	146.09

Caso 3: Perturbaciones constantes en las mediciones h_1 y h_3 :

Al someter el sistema controlado a perturbaciones constantes por separado, en las mediciones de $h_1(t)$ y $h_3(t)$, se obtiene un desvío constante en las salidas. Sin embargo, con el control LESDD, la atenuación de esta perturbación constante o desvío es mejor que con el PI, aunque para el nivel del extremo opuesto del canal, el PI es capaz de ofrecer una mejor atenuación (Tabla 7). Perturbaciones en $h_3(t)$, son mayormente atenuadas en ambos casos de control (alrededor del 50%), respecto a la perturbación en $h_1(t)$, lo cual indica una mayor sensibilidad en la medición $h_1(t)$.

Tabla 7. CIEAT calculados para perturbaciones en $h_1(t)$ y $h_3(t)$ al 10%.

Variable Perturbada	Control	CIEAT		
		$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
$h_1(t)$	LESDD	2277.0	1733.0	726.4
	PI	2996.7	1950.2	6.5
$h_3(t)$	LESDD	364.9	627.2	1138.8
	PI	5.3	514.4	1504.9

6 Conclusiones

La incidencia de perturbaciones en variables trascendentales de un sistema de canal abierto, depende de la naturaleza y ubicación de dichas variables en el sistema. Particularmente, aquellas que tienen relación directa con la fuente de alimentación del sistema o caudal de entrada, son más sensibles a las perturbaciones, aún de que el sistema sea controlado por una técnica lineal o no lineal. Tal es el caso de las perturbaciones en los niveles en las caras de la primera compuerta del canal, tanto en la cara externa -zam como en la interna h_1 .

Entre los resultados más significativos, se obtuvo en general, el de la atenuación de perturbaciones pequeñas ($\pm 11\%$) de frecuencia no nula en zam, y perturbaciones de mayor escala, para el caso de perturbaciones en zav, empleando cualquiera de los controles. Particularmente, se pudo validar que ambos controles son capaces de rechazar por completo perturbaciones positivas constantes de hasta un 10% en ambos niveles adyacentes, aunque a distinta velocidad; para perturbaciones negativas en zam, debido a las limitaciones del modelo no se pueden establecer conclusiones respecto al desempeño de los controles en el sistema. Otro hallazgo importante fue el de la mejor velocidad de

respuesta que ofrece el control no lineal LESDD por encima del PI, como consecuencia de la naturaleza no lineal del sistema. Además, se pudo observar que, pese a su velocidad, LESDD tiene menor capacidad de atenuación que el control PI. Sin embargo, ambos controles son capaces de atenuar las perturbaciones de baja frecuencia. En zav se observó insensibilidad a las perturbaciones.

Las perturbaciones en las mediciones, cuando el sistema es controlado a través de la manipulación de la posición de las compuertas del canal, no producen mayores efectos sobre el sistema cuando se trata de frecuencias no nulas. Cuando las perturbaciones son constantes, tales desvíos son reflejados también en la salida, con mejor atenuación para el control LESDD.

Puede adelantarse, que según pruebas realizadas cuando el control es directamente el caudal, estas mediciones ganan mayor importancia y por lo tanto, se debe tener mayor garantía de la estabilidad de las mediciones.

Referencias

- Besançon G, Dulhoste J y Georges D, 2001, A Non-linear backstepping like controller for a three-point collocation model of water flow dynamics, Conference on Control Application CCA2001, México.
- Center for Operational Oceanographic Products and Services (CO-OPS), 2006, How do we measure water levels, <http://tidesandcurrents.noaa.gov/levelhow.html>.
- Dulhoste J, 2001, Contribution a la commande no linéaire de systèmes d'irrigation, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Dulhoste J, Georges D y Bensaçon G, 2004, Nonlinear control of open-channel water flow based on collocation control model, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers SCE, Vol. 130, No. 3.
- Figliola R y Beasley D, 2000, Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos.
- Graf, WH. y Altinakar, 1993, Hydraulique fluviale, Collection traité de génie civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Hong-WY y Tian JW, 1999, Mathematical analysis of long-wave breaking on open channels with bottom friction, Ocean Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 187-202.
- Isidori A, 1995, Nonlinear control systems, Springer-Verlag, 3ª ed., Berlin.
- Jerez CJ y Dulhoste JF, 2005, 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, Ciencia e Ingeniería, Vol. 26, No. 3, pp. 95-104.
- Ogata K, 1993, Ingeniería de control moderna, Prentice Hall, México.
- Lebedev I y Soong Y, 2005, Oceanography, Matthias Tomczak's oceanography web site, notes chapter 9.