

Control automático de niveles en un canal experimental dividido en tres tramos

*José Vicente Aguilar Mariñosa **, *Pedro Langarita García **, *Lorenzo Linares Miranda ***
*Eduard Galvis****, *Klaudia Horváth *****, *José Rodellar ****, *Manuel Gómez *****

* *Grupo de Automatización y Control. Servicio S.A.I.H. Confederación Hidrográfica del Ebro. Pº de Sagasta Nº 24-28, C.P. 50071, Zaragoza, España. e-mail: jvaguilar@chebro.org; plangarita@chebro.org*

** *Grupo de Automatización y Control. SICE, Zaragoza, España. e-mail: llinares@uteebro.com*

*** *Grupo de Control, Dinámica y Aplicaciones. Departamento de Matemática Aplicada III. Universidad Politécnica de Catalunya. Campus Nord UPC, C2, 08034 Barcelona, España. e-mail: jose.rodellar@upc.edu; eduard.galvis@upc.edu*

**** *Grupo FLUMEN, Departamento de Hidráulica, Universidad Politécnica de Catalunya., 08034 Barcelona, España. e-mail: manuel.gomez@upc.edu; claudia.horvarth@upc.edu*

Resumen: En este artículo se muestran los resultados del control aguas abajo a distancia de los niveles finales de tramo en el canal experimental UPC-PAC (Canal de Prueba de Algoritmos de Control – Universitat Politècnica de Catalunya). En el artículo además de comprobar las posibilidades que ofrece el canal para desarrollar en él trabajos de investigación tanto en el campo de la modelización cómo en el campo del control, se pretende comprobar lo siguiente: (1) que para realizar diseños de control robustos y eficientes las dinámicas del canal en sus distintos tramos pueden ser descritas por modelos sencillos en el dominio de Laplace del tipo IDZ (integrador, retardo y cero) o por modelos de primer orden con tiempo de retardo; (2) que aunque el proceso es altamente no lineal y con grandes tiempos de retardo el control para cambios de consigna y para rechazo de perturbaciones se puede realizar con reguladores PI discretos diseñados con un solo grado de libertad y (3) que a pesar de las interacciones existentes entre los tramos, el diseño de los controladores PI se puede realizar de forma independiente sin tener que recurrir a técnicas de diseño de sistemas multivariables.

1. Introducción

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta actualmente la comunidad científica así como los técnicos de control de organizaciones tanto públicas como privadas dedicadas a la gestión y explotación de recursos hídricos es la falta de infraestructuras adecuadas en las que desarrollar, ensayar y validar nuevas tecnologías y estrategias de control para los grandes canales de distribución a cielo abierto. Son muy pocas las referencias aparecidas en la literatura técnica relacionada con el control automático en canales en donde se describan ensayos de control en pequeños canales experimentales. En la referencia [1] se describe un control de nivel local aguas abajo y un control aguas abajo a distancia del nivel de fin de un tramo de canal con controladores PI. Estos experimentos se realizaron en el canal experimental del Centro de Hidráulica y Control de Canales (NuHCC) de la Universidad de Évora en Portugal. En [2] se presentan resultados ampliados de los experimentos descritos en [1] en el mismo canal experimental. En [3] se muestran resultados de control proporcional integral fraccional (FPI) en el prototipo de canal experimental que el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Castilla-La Mancha (España) tiene en Ciudad Real, y en [4,5] se presentan resultados de control predictivo del nivel aguas abajo a distancia realizados en el canal experimental UPC-PAC de la Universitat Politècnica de Catalunya en Barcelona.

En este artículo se muestra el desarrollo de dos esquemas de control basados en tres controladores PI discretos diseñados de forma independiente. El primer esquema utiliza sólo control PI y el segundo esquema utiliza control PI más control anticipativo para el control aguas abajo a distancia de los niveles de fin de tramo en un canal dividido en tres tramos. Esta estrategia de control ha sido ensayada en el canal experimental UPC-PAC por técnicos de control del servicio SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro junto con el grupo de investigación en control de canales del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental y el Departamento de Matemática Aplicada III de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPC.

El artículo está estructurado en cinco apartados. En el segundo se analiza la modelización de los tramos del canal. El tercero está dedicado al diseño de los reguladores PI y al diseño del control anticipativo. En el apartado cuarto se muestran los resultados del control para el rechazo a perturbaciones y para cambios de consignas. Y en el apartado quinto se analizan los resultados y se exponen las conclusiones.

2. Modelización

2.1 Modelo lineal simplificado para un tramo de canal

Para el diseño de sistemas efectivos de control se necesitan modelos matemáticos que describan de forma adecuada los comportamientos dinámicos de las variables a controlar. Tradicionalmente se han considerado las ecuaciones de Saint-Venant [6] como la herramienta más completa para el modelado de un tramo de canal por estar basadas en las leyes físicas que describen el proceso del flujo unidimensional en lámina libre. Estas ecuaciones en su formulación no conservativa son unas ecuaciones hiperbólicas no lineales en derivadas parciales sin solución analítica en la mayoría de los casos, de manera que para su resolución se necesitan métodos numéricos. Los métodos clásicos de resolución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant completas en el caso de flujo unidimensional son el método de las características de Abbott [7,8], y el método en diferencias implícitas de Preissmann o método de los cuatro puntos [9]. Como herramientas de simulación estas soluciones numéricas pueden ser muy precisas pero requieren un enorme coste computacional que hace que no sean modelos apropiados como base para el diseño de sistemas de control.

Pueden seguirse dos líneas generales para obtener modelos lineales simplificados con los que diseñar sistemas de control: (1) linealizar las ecuaciones de Saint-Venant alrededor de un punto de equilibrio y (2) utilizar modelos del tipo “caja negra” con parámetros determinados mediante pruebas experimentales de identificación que sean semejantes en su estructura a los modelos obtenidos con el método primero.

En la línea primera, para el caso general de flujo no uniforme, en las referencias [10-13] se propone un método que linealiza las ecuaciones de Saint-Venant alrededor de un estado de equilibrio y las transforma al dominio de Laplace. De esta forma, para un tramo genérico de canal en el que no hay extracciones laterales, las ecuaciones que relacionan los niveles (y) en el origen y final del tramo con los caudales (q) que entran y salen quedan en la forma:

$$\begin{bmatrix} y(0,s) \\ y(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}(s) & p_{12}(s) \\ p_{21}(s) & p_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(0,s) \\ q(L,s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde las funciones de transferencia en el dominio de Laplace $p_{ij}(s)$ son modelos IDZ (integrador, retardo y cero) válidos para casi todos los regímenes del flujo. Los parámetros que definen a estos modelos se obtienen analíticamente de los parámetros físicos del tramo: geometría, pendiente, coeficiente de Manning etc y capturan la mayor parte de las dinámicas del flujo. El modelo ID es suficiente para capturar la dinámica del proceso a bajas frecuencias mientras que el modelo IDZ es necesario para capturar la dinámica del proceso a altas frecuencias en los tramos donde se producen modos oscilantes. Las expresiones generales de los modelos IDZ correspondientes al nivel de fin de tramo $y(L,s)$ son :

$$\begin{aligned}
p_{21}(s) &= \left(\frac{1}{A_d s} + b_d \right) e^{-\tau_d s} \\
p_{22}(s) &= - \left(\frac{1}{A_d s} + \bar{b}_d \right)
\end{aligned} \tag{2}$$

donde el área equivalente A_d , las ganancias estáticas b_d, \bar{b}_d y el retardo equivalente τ_d son función de los parámetros físicos del tramo y sus expresiones exactas están detalladas en [13]. Ahora bien, en los canales de distribución es conveniente que las variables de control o de entrada sean los movimientos de las compuertas y no las variaciones de los caudales. Por este motivo se debe transformar el sistema de ecuaciones (1) a otro equivalente en el que las entradas sean las variaciones de las compuertas de origen y fin de tramo (c_1, c_2). El caudal que circula a través de una compuerta semisumergida se puede expresar en la forma:

$$Q = C_d L_c C \sqrt{2g(Y_1 - Y_2)} \tag{3}$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, L_c la anchura, C la apertura, Y_1 el nivel aguas arriba de la compuerta, Y_2 el nivel aguas abajo y g la aceleración gravitacional. Si se linealiza esta ecuación para considerar pequeñas desviaciones del caudal alrededor de un estado de equilibrio se puede poner:

$$q = k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_c c \tag{4}$$

siendo $k_1 = Q/2(Y_1 - Y_2)$, $k_2 = -k_1$ y $k_c = Q/L_c$. Ahora si en la segunda ecuación de (1) sustituimos el caudal por la ecuación (4), introducimos las ecuaciones (2) y operamos, la ecuación para el nivel de fin de tramo queda en la forma:

$$y(L, s) = \tilde{G}_1(s) y_{11}(s) + \tilde{G}_2(s) y_{21}(s) + \tilde{G}_3(s) c_1(s) + \tilde{G}_4(s) y_{22}(s) + \tilde{G}_5(s) c_2(s) \tag{5}$$

donde y_{11}, y_{21} son respectivamente las desviaciones de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la compuerta de origen del tramo, y_{22} es la desviación del nivel aguas abajo de la compuerta de fin de tramo y c_1, c_2 son respectivamente las desviaciones de las compuertas de origen y fin de tramo. En esta ecuación $\tilde{G}_i(s)$ son modelos de primer orden con un polo, un cero y con tiempo de retardo y tienen la forma general siguiente:

$$\tilde{G}_i(s) = \frac{k(s+z)}{s+p} e^{-T_m s} \tag{6}$$

De la ecuación (5) se deduce, para el caso general, que existen dos tipos de interacciones entre los tramos de un canal. Por una parte existe una interacción entre tramos “aguas arriba”, ya que el nivel de fin de tramo depende no solo de la compuerta de fin de tramo c_2 si no que depende además del nivel aguas abajo de dicha compuerta y_{22} . Y por otra parte existe una interacción entre tramos “aguas abajo”, ya que el nivel de fin de tramo depende del nivel aguas arriba de la compuerta de origen de tramo y_{11} .

Sin embargo, en el diseño de estructuras de control en los grandes canales de distribución de agua para regadío se suele desprestigiar en la ecuación (4) los efectos debidos a las desviaciones en los niveles y_1 e y_2 , ya que estas desviaciones se producen en intervalos largos de tiempo. Con esta simplificación la ecuación (4) queda en la forma siguiente:

$$q = k_c c \tag{7}$$

y la ecuación (5) que relaciona el nivel de fin de tramo con las posiciones de las compuertas de origen y fin de tramo queda de ésta otra forma:

$$y(L, s) = G_1(s) c_1(s) + G_2(s) c_2(s) \tag{8}$$

donde ahora los modelos $G_i(s)$ son modelos IDZ con la expresión general:

$$G_i(s) = \frac{k(s+z)}{s} e^{-T_m s} \tag{9}$$

donde los parámetros k, z, p dependen de A_d, k_c, b_d, \bar{b}_d , y el tiempo de retardo T_m además de depender de τ_d considera el hecho de que el sensor del nivel no esté justamente al lado de la compuerta de fin de tramo.

2.2 Identificación de modelos en el canal UPC-PAC

De entre todas las configuraciones posibles del canal, para este trabajo se ha utilizado la estructura mostrada en la Figura 1 de canal dividido en tres tramos. En la figura se muestran los niveles de consigna, el caudal total de descarga del depósito y los caudales de descarga por los vertederos laterales w_i en el estado estacionario inicial previo a la realización de las pruebas de control.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de estructuras de control para los niveles de fin de tramo, considerando las hipótesis de diseño que se utilizan en los grandes canales de distribución. Estas hipótesis son cuatro. La primera es utilizar la ecuación (7) para las desviaciones de los caudales a través de las compuertas, de esta manera sólo se consideran las interacciones entre los tramos en el sentido aguas arriba. La segunda es considerar a todos los caudales laterales de un tramo w_i como perturbaciones no medibles. La tercera hipótesis considera la interacción aguas arriba de la compuerta de fin de tramo sobre el nivel controlado como una perturbación también no medible, y sólo en el caso de que esta interacción sea muy intensa la considera como una perturbación medible de manera que se puedan adoptar estrategias de control anticipativo. Por último, la cuarta hipótesis plantea la necesidad de que sólo se deben diseñar estructuras de control que se puedan implementar con facilidad en autómatas programables industriales (PLC), al considerar que éstos son los elementos adecuados para funcionar en condiciones adversas por su robustez y fiabilidad.

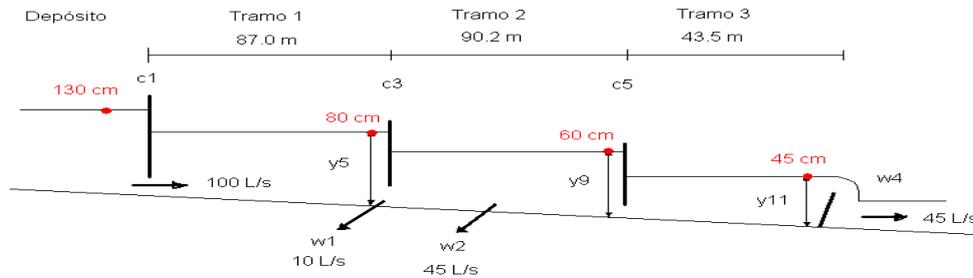


Figura 1 Canal UPC-PAC dividido en tres tramos

Con este planteamiento, las ecuaciones que relacionan los niveles finales de tramo con sus correspondientes compuertas de origen y fin quedan en la forma:

$$\begin{aligned} y_5(s) &= G_1(s)c_1(s) + G_2(s)c_3(s) \\ y_9(s) &= G_3(s)c_3(s) + G_4(s)c_5(s) \\ y_{11}(s) &= G_5(s)c_5(s) \end{aligned} \quad (10)$$

donde los modelos $G_{1,2,3,4}(s)$ tienen la forma expresada en (9) y el modelo $G_5(s)$ tiene la estructura de primer orden con tiempo de retardo. En los grandes canales de distribución, el cálculo de los parámetros de estos modelos a partir de los parámetros hidráulicos de los tramos presenta en general una gran complejidad. Por este motivo la modelización en estos canales se realiza con pruebas de identificación paramétricas con entradas del tipo escalón. Siguiendo esta línea de trabajo, para obtener todos los modelos $G_i(s)$ de (10) se han realizado pruebas de identificación paramétrica de tipo entrada escalón para cada una de las relaciones entrada-salida. Como ejemplo, en la Figura 2 se muestra el resultado de la prueba abrir 4,5 centímetros la compuerta $c_3(s)$ para obtener $G_3(s)$.

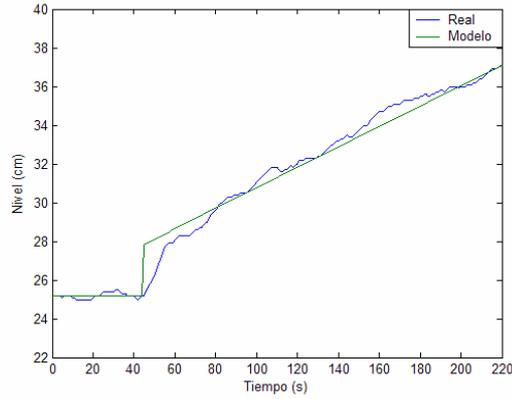


Figura 2 Prueba escalón de identificación paramétrica

Las expresiones que se obtienen con las pruebas de identificación para cada uno de los modelos $G_i(s)$ son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 G_1(s) &= \frac{0.5(s+0.007)}{s} e^{-24s} ; & G_2(s) &= \frac{-0.5(s+0.011)}{s} e^{-4s} ; & G_3(s) &= \frac{0.6(s+0.02)}{s} e^{-45s} \\
 G_4(s) &= \frac{-0.4(s+0.004)}{s} e^{-4s} ; & G_5(s) &= \frac{0.45}{375s+1} e^{-25s}
 \end{aligned}
 \quad (11)$$

Como se observa, todos los modelos son del tipo IDZ excepto el modelo $G_5(s)$ que es un modelo de primer orden con tiempo de retardo. Esta diferencia de modelos responde al hecho de que al final del tercer tramo hay un vertedero y no una compuerta semisumergida.

3. Diseño de estructuras de control

3.1 Control PI

Desde su introducción en 1940 los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) son la opción más utilizada en las diferentes aplicaciones de control de procesos, incluyendo los procesos hidráulicos. En los procesos hidráulicos y en especial en el control aguas abajo a distancia del nivel de fin de tramo, el tiempo de retardo presenta valores muy elevados por lo que el efecto positivo que en los márgenes de fase y de ganancia tiene la acción derivativa, aporta 90° de avance de fase, es mínimo y por lo tanto no se implementa. De manera que los controladores diseñados tendrán la estructura de un PI no interactivo con un solo grado de libertad. La ecuación que describe este controlador es la siguiente:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (12)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_i es el tiempo integral. En los últimos sesenta años se ha desarrollado una gran variedad de técnicas y metodologías de diseño y sintonización de controladores PID. En este trabajo se utiliza la herramienta de sintonía SISO accesible en (<http://www.dia.uned.es/~fmorilla>) cuyos principios metodológicos se describen en [14]. La sintonía de los parámetros del controlador se realiza en el dominio de la frecuencia y como indicativos de estabilidad y robustez se utiliza un ajuste combinado por márgenes de fase M_F y de ganancia M_G . Para un margen de fase fijo existirá un intervalo de márgenes de ganancia alcanzables que dependerán de la frecuencia de diseño utilizada. En caso de que para una especificación concreta del M_F el M_G especificado esté dentro de ese intervalo el problema tendrá solución. Pero en el caso general esto no ocurrirá y habrá que ser menos exigentes en alguna de las dos especificaciones (o las dos) de forma que se llegue a un

compromiso entre las dos. Cuando esto sucede hay programado un algoritmo en la herramienta que minimiza el siguiente índice de calidad:

$$J = \frac{|M_{Fesp} - M_{Fobt}|}{M_{Fesp}} + \frac{|M_{Gesp} - M_{Gobt}|}{M_{Gesp}} \quad (13)$$

donde M_{Fesp}, M_{Gesp} son dos especificaciones en el dominio de la frecuencia y M_{Fobt}, M_{Gobt} son los márgenes de fase y de ganancia resultantes en cada paso de iteración del algoritmo de búsqueda de la solución.

En este trabajo se han utilizado unas especificaciones de $M_F \geq 40^\circ$ y $M_G \geq 10dB$, de manera que los controladores PI en tiempo continuo que se obtienen son muy robustos. Como el control se debe aplicar en tiempo discreto se discretiza la acción integral con la aproximación bilineal o regla de Tustin de manera que para un periodo de control $T_s = 10s$, los controladores PI discretos quedan en las formas siguientes:

$$PI_5(z) = \frac{0.5344 - 0.4156z^{-1}}{1 - z^{-1}}; \quad PI_9(z) = \frac{0.4781 - 0.4219z^{-1}}{1 - z^{-1}}; \quad PI_{11}(z) = \frac{1.0632 - 0.9375z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (14)$$

En la Figura 3 se representan los lazos de control PI de los tres niveles de fin de tramo del canal. En la figura se observan las interacciones aguas arriba existentes entre los tramos a través del efecto que sobre los niveles controlados y_5 e y_9 tienen los movimientos de las compuertas c_3 y c_5 respectivamente. Las pruebas reales de control considerarán en primer lugar esta estructura donde estas interacciones son consideradas como perturbaciones no medibles.

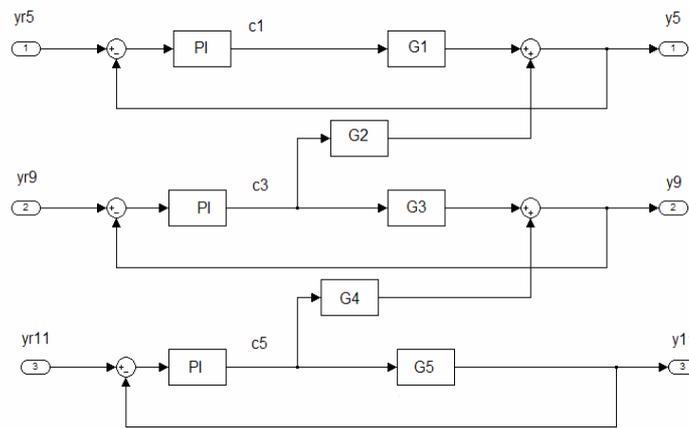


Figura 3 Diagrama de bloques para control PI

3.2 Control PI más control anticipativo

Cuando las perturbaciones producidas por los movimientos de las compuertas de fin de tramo sobre los niveles controlados son muy importantes es aconsejable adoptar alguna estrategia de control adicional que trate de minimizar dichas perturbaciones. La estructura de control avanzado que se ha utilizado para este fin en este trabajo es el control anticipativo. En esta estructura, la interacción aguas arriba de la compuerta de fin de tramo sobre el nivel controlado es considerada como una perturbación medible, ya que además de conocer los movimientos de las compuertas se conocen los modelos matemáticos que los relacionan con los niveles controlados. El objetivo es detectar la perturbación (el movimiento de la compuerta) y actuar sobre el proceso adelantándose al efecto que éste produce sobre la variable controlada. Conviene señalar que como el tiempo de retardo de la compuerta de origen del tramo, señal de control, sobre el nivel controlado es muy superior al tiempo de retardo de la compuerta de fin de tramo, el control anticipativo no podrá eliminar estas perturbaciones pero es de esperar que con él disminuyan los tiempos necesarios para alcanzar los estados estacionarios.

La Figura 4 muestra los lazos de control PI más el control anticipativo de los tres niveles de fin de tramo del canal. En la figura se observa cómo ahora la acción de control para los tramos primero y segundo tiene dos componentes, una como en el caso anterior en que un PI genera una acción de control en función del error de

control y otra componente que genera una acción de control considerando los movimientos que se producen en la compuerta de fin de tramo, de manera que el control se anticipa a los efectos que sobre el nivel tendrán estos movimientos de compuerta. Las pruebas reales de control considerarán en segundo lugar esta estructura de control PI más control anticipativo. Para su implementación práctica es necesario que el control se calcule en primer lugar para el tramo tercero, de esta forma el control para el tramo segundo podrá considerar el movimiento en c_5 y el control para el tramo primero podrá considerar el movimiento en c_3 .

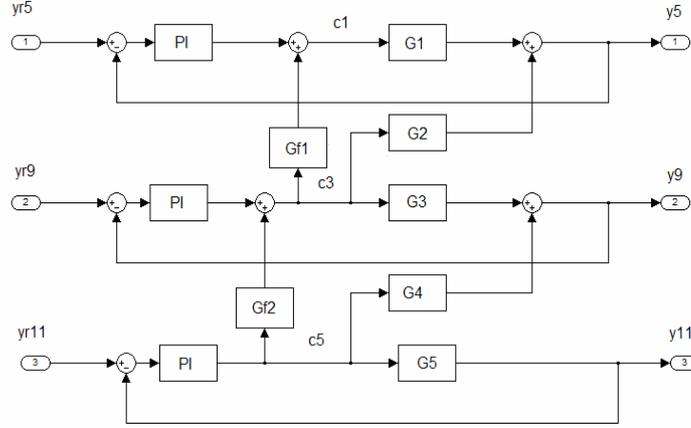


Figura 4 Diagrama de bloques para control PI más control anticipativo

Para el cálculo de las funciones del control anticipativo Gf_1 y Gf_2 se escriben las ecuaciones de los lazos de los dos primeros tramos del canal:

$$\begin{aligned} y_5(s) &= \frac{PI_5(s)G_1(s)}{1+PI_5(s)G_1(s)} y_{r5}(s) + \frac{G_2(s) + Gf_1(s)G_1(s)}{1+PI_5(s)G_1(s)} c_3(s) \\ y_9(s) &= \frac{PI_9(s)G_3(s)}{1+PI_9(s)G_3(s)} y_{r9}(s) + \frac{G_4(s) + Gf_2(s)G_3(s)}{1+PI_9(s)G_3(s)} c_5(s) \end{aligned} \quad (15)$$

y como para asegurar que se eliminan los efectos de las variaciones en c_3 y c_5 se debe verificar que:

$$\begin{aligned} G_2(s) + Gf_1(s)G_1(s) &= 0 \\ G_4(s) + Gf_2(s)G_3(s) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

se tiene que las funciones del control anticipativo quedan en la forma:

$$\begin{aligned} Gf_1(s) &= -\frac{G_2(s)}{G_1(s)} = -\frac{-0.5(s+0.011)e^{-4s}}{0.5(s+0.007)e^{-24s}} = -\frac{-0.5(s+0.011)}{0.5(s+0.007)} e^{20s} \approx \frac{0.5(s+0.011)}{0.5(s+0.007)} \\ Gf_2(s) &= -\frac{G_4(s)}{G_3(s)} = -\frac{-0.4(s+0.004)e^{-4s}}{0.6(s+0.02)e^{-45s}} = -\frac{-0.4(s+0.004)}{0.6(s+0.02)} e^{40s} \approx \frac{0.4(s+0.004)}{0.6(s+0.02)} \end{aligned} \quad (17)$$

En las ecuaciones (17) se observa cómo las funciones exactas del control anticipativo son físicamente irrealizables ya que e^{20s} y e^{40s} son elementos predictivos. La solución adoptada a sido aproximar estas funciones eliminando los elementos predictivos. Por otra parte en las ecuaciones (15) se observa cómo el control anticipativo no modifica la ecuación característica en lazo cerrado, de manera que este control no afecta a la estabilidad del sistema. Por último, como el control se realiza en tiempo discreto se discretizan estas funciones con un periodo de control $T_s = 10s$ quedando el control anticipativo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Gf_1(z) &= \frac{1.019 - 0.913z^{-1}}{1 - 0.9324z^{-1}} \\ Gf_2(z) &= \frac{0.6182 - 0.5939z^{-1}}{1 - 0.8182z^{-1}} \end{aligned} \quad (18)$$

4. Pruebas de control en el canal UPC-PAC

En las Figuras 5-10 se muestran los resultados de las pruebas de control realizadas en el canal UPC-PAC, la línea sólida es el control PI y la línea a puntos el control PI más el control anticipativo. El estado estacionario inicial para todas las pruebas es el que aparece en la Figura 1, y para cada tramo se ejecutaron dos tipos de pruebas. Con las pruebas primeras se comprobó la eficiencia del control para cambios de consigna y con las pruebas segundas se comprobó la eficiencia del control para el rechazo de perturbaciones desconocidas. Los cambios de consigna para los tramos primero y segundo fueron de 10 centímetros y para el tramo tercero fue de 5 centímetros. Hay que señalar que estas variaciones en las consignas representan un 12.5%, un 16.6% y un 11.1% respectivamente respecto de los valores iniciales de los niveles, siendo estas maniobras normales en los canales reales. Las pruebas de rechazo a perturbaciones desconocidas consistieron en variar de forma instantánea el caudal por los vertederos laterales. Para el primer tramo, las variaciones de caudal a través de w_1 fueron -10 l/s en $t = 3m$ y +10 l/s en $t = 23m$. Para el tramo segundo, las variaciones de caudal a través de w_2 , situado a mitad de tramo, fueron -45 l/s en $t = 3m$ y +45 l/s en $t = 28m$. Y para el tramo tercero, las variaciones de caudal a través de w_4 fueron -25 l/s en $t = 3m$ y +25 l/s en $t = 23m$. De estas tres pruebas, la prueba del tramo segundo es la que constituye la mayor perturbación al representar un 45% de variación en el caudal total que circula por el canal. Esta variación es muy elevada y no es habitual realizar en los canales reales maniobras instantáneas de magnitudes tan elevadas en las tomas de riego.

Para evaluar la eficiencia del control diseñado se han utilizado tres índices de rendimiento, la desviación absoluta máxima (DAM) del nivel en centímetros, el tiempo en segundos en alcanzar el nivel el régimen estacionario (TRE) entendiendo éste como una banda de +/- 1 centímetro alrededor del nivel de consigna, y la integral del valor absoluto del error de control (IAE). En las Tablas 1-2 se indican los valores de los índices para las pruebas de cambio de consigna y para las pruebas de rechazo a perturbaciones, para cada tramo y para cada estrategia de control.

Tabla 1 Índices de rendimiento para cambios de consigna

		DAM (cm)	TRE (s)	IAE
Tramo 1	PI	4,5	1500	1495
	PI+CA	3,5	800	1359
Tramo 2	PI	1,5	1000	1299
	PI+CA	0	700	1455
Tramo 3	PI	0	130	492
	PI+CA	0	140	409

Tabla 2 Índices de rendimiento para rechazo de perturbaciones

		DAM (cm)	TRE (s)	IAE
Tramo 1	PI	4	400	703
	PI+CA	3	250	540
Tramo 2	PI	10	1600	1920
	PI+CA	7	1000	1710
Tramo 3	PI	2,5	200	269
	PI+CA	3	220	397

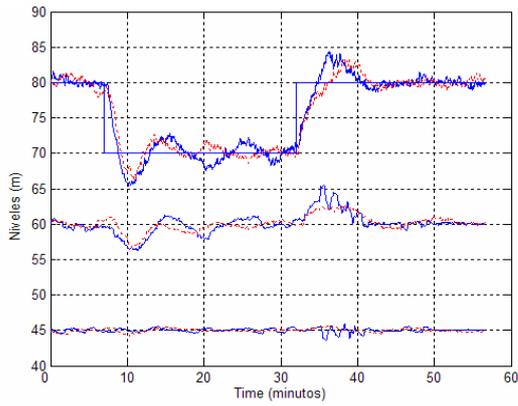


Figura 5 Cambio consigna tramo 1

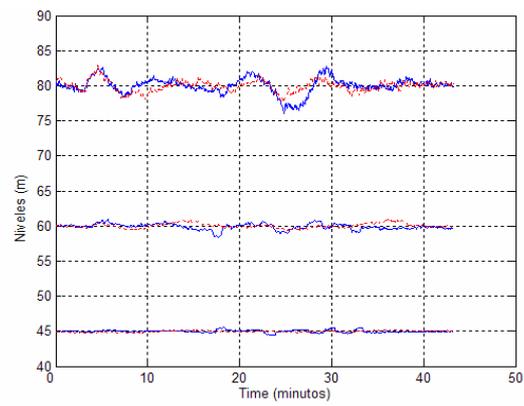


Figura 6 Perturbación caudal tramo 1

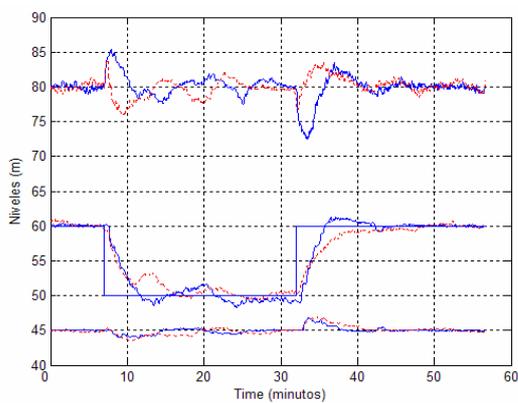


Figura 7 Cambio consigna tramo 2

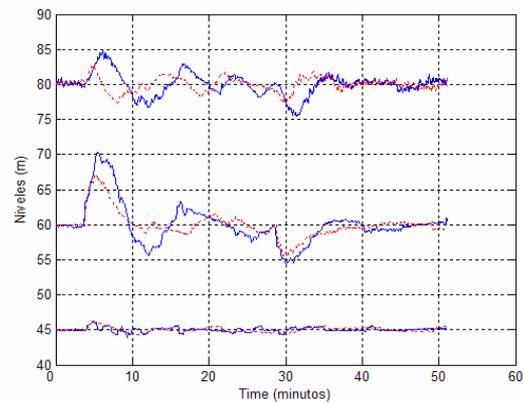


Figura 8 Perturbación caudal tramo 2

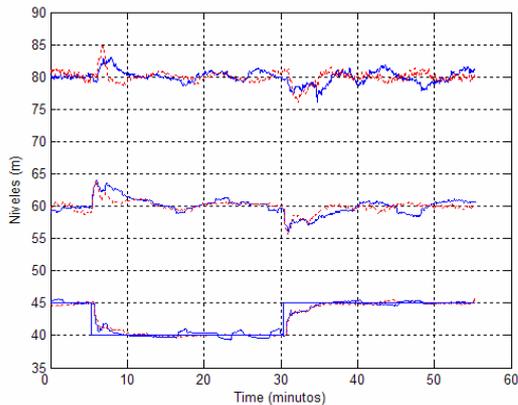


Figura 9 Cambio consigna tramo 3

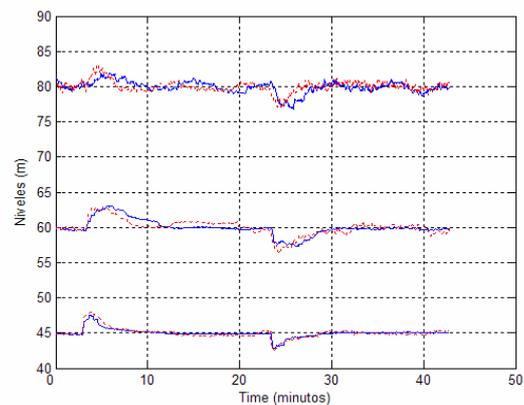


Figura 10 Perturbación caudal tramo 3

5. Análisis de resultados y conclusiones

En las Figuras 5-10 se observa cómo el control PI más el control anticipativo mejora en general los resultados del control, sobre todo reduce el tiempo en alcanzar los regímenes estacionarios. Respecto al primer tramo del canal cabe señalar que el diseño del control PI se realizó de forma deliberada, no para conseguir un control óptimo, sino que se realizó de forma que pusiera de manifiesto cómo en este canal experimental, debido a sus

características dimensionales, las interacciones aguas abajo entre los tramos originadas por las variaciones en los niveles aguas arriba de las compuertas es significativa. Esto se ve con claridad en la Figura 5, donde al no ser óptimo el control del primer tramo estas interacciones se manifiestan en el nivel controlado del tramo segundo. Sin embargo en la Figura 7 se observa que las interacciones en el nivel del tramo tercero son mucho menores al ser más preciso el control del tramo segundo.

Los resultados del control ponen también de manifiesto las distintas dinámicas del flujo en el canal. Se observa cómo el rendimiento del control varía si el cambio de consigna es ascendente o descendente. Esto es debido por una parte a las dinámicas variables y por otra es debido a que el diseño de los controladores PI se realizó para puntos concretos de operación del canal, de manera que si el control se realiza en otros puntos de operación el rendimiento del control disminuye, si bien hay que señalar que en todos los casos el rendimiento del control es satisfactorio.

Por último, y como conclusiones finales de este trabajo, se puede afirmar en primer lugar que el canal experimental UPC-PAC es un excelente canal de pruebas para realizar en él proyectos de investigación en el ámbito de la identificación y diseño de estructuras de control para canales de distribución a cielo abierto, ya que además de permitir distintas configuraciones con las que obtener distintas ganancias y tiempos de retardo, se pueden crear en él situaciones en las que se manifiesten todos los tipos de interacciones entre los tramos. Y en segundo lugar, con este trabajo se ha confirmado la idoneidad de los modelos IDZ para el diseño de estructuras de control, y que el diseño de los controladores PI se puede realizar con un sólo grado de libertad y sin recurrir a técnicas de diseño de control de sistemas multivariables.

Bibliografía

- [1] X. Litrico, V. Fromion, J. P. Baume, M. Rijo, "Modelling and PI controller desing of an irrigation canal", *European Control Conference*, Cambridge, UK, 2003.
- [2] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, C. Arranja, M. Rijo, "Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations", *Control Engineering Practice*, Vol. 13/11, pp. 1425-1437, 2005.
- [3] V. Feliu, R. Rivas, L. Sánchez, "Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters", *Control Engineering Practice*, 15, pp. 673-686, 2007.
- [4] Rodellar, J., Gómez M. y Bonet L. (1993) "Control mehtod for on-demand operation of open-channel flow," *J. Irri. Drain. Eng.*, 119(2), pp. 225-241.
- [5] C. Sepúlveda. "Instrumentation, model identification and control of an experimental irrigation canal", *Doctoral Thesis*. UPC. 2007.
- [6] V.T.Chow, "Open-channels Hydraulics", McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1988.
- [7] M. Abbott, "An introduction to the method of characteristics". *Elsevier*, New York, 1966.
- [8] M. Abbott, "Computational hydraulics. Elements of the theory of free surface flows", *Pitman Publishing*, London, 324 p, 1979.
- [9] A. Preissmann, "Propagation des intumescences dans les canaux et rivières", In: *1 er Congrès de l' Association Française de Calcut*, Grenoble, France, pp 433-442, 1961.
- [10] T. Sturm, "Open-channel hydraulic", *McGraw-Hill*, New York, 2001.
- [11] T. Kailath, "Linear systems", *Information and system sciences series*, Prentice Hall, London, 1980.
- [12] X. Litrico and V. Fromion, "Frecuency modelling of open channel flow", *J. Irri. Drain. Eng.*, vol. 132, no. 4, pp. 806-815, 2004.
- [13] X. Litrico and V. Fromion, "Analytical approximation of open-channel flow for controller desing", *Appl. Math. Model.*, 28(7) 677-695, 2004.
- [14] F. Morilla, S. Dormido, "Methodologies for the tunung of PID controllers in the frequency domain", *IFAC PID'00*, pp 155-160, Tarrasa (España), 2000.