

Control proporcional integral robusto de nivel en un tramo de un canal principal de riego

Ybrain Hernández López

Correo electrónico: ybra@electrica.cujae.edu.ec

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Artículo Original

Raúl Rivas-Pérez

Correo electrónico: rivas@electrica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Gisselle Lorenzo Galván

Correo electrónico: glorenzo@electrica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla el diseño de un controlador proporcional integral (*PI*) robusto para el control efectivo de nivel en el segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena. Aplicando las herramientas de identificación de sistemas se obtiene un modelo matemático que describe de forma adecuada el comportamiento dinámico de la planta objeto de estudio y el cual se caracteriza por su sencillez (primer orden con retardo de tiempo). El análisis de robustez del controlador diseñado frente a variaciones paramétricas del modelo matemático obtenido mostró resultados satisfactorios y por ende valida la implementación del controlador *PI* diseñado

Palabras claves: controlador PI robusto, identificación de sistemas, canales de riego, medidas de robustez

Recibido: 7 de octubre del 2014 Aprobado: 14 de diciembre del 2014

INTRODUCCIÓN

El agua como recurso renovable existe en cantidades limitadas y con fuertes variaciones en el espacio y el tiempo [1]. El ser humano mantiene una relación muy especial con este preciado líquido debido a su indispensable importancia para la vida y la economía.

A nivel mundial, el 40 % del total de los alimentos se producen en áreas de cultivos bajo riego. El 70 % del agua potable aprovechable se utiliza para producir alimentos [2]. Se estima que el consumo de agua en el mundo aumente más del doble de la tasa de crecimiento demográfico [3], ello establece la necesidad de utilizar de forma racional e inteligente los recursos hidráulicos disponibles.

Para aliviar la difícil situación que presenta la ciudad de La Habana con el consumo de agua potable se construyó

el canal trasvase Matanzas-Mayabeque, el cual fue concebido para trasladar 106 millones de metros cúbicos de agua por año a partir del río San Agustín, situado a unos 8 km de la ciudad de Matanzas. Este canal tiene 43 km de longitud y se extiende hasta el municipio de Güines, donde se conecta con el complejo hidráulico Mampostón-Pedroso-Güira. El objetivo principal de este canal trasvase consiste en suplir el déficit de agua de dicho complejo para beneficiar las áreas dedicadas a los cultivos de viandas, hortalizas, cañas y pastos. Además, este canal tiene como objetivo estratégico recargar la cuenca de Jaruco, de donde se abastece el acueducto el Gato, el cual suministra agua a la capital.

Desde el complejo Mampostón-Pedroso-Güira, el agua transita, a través del canal principal Güira de Melena,

hasta el municipio de Güira de Melena, en la provincia de Artemisa. Sin embargo, la cuenca del territorio de Güira de Melena, no siempre posee los recursos hídricos necesarios para abastecer tanto a la agricultura como a la ciudad de la Habana [2]. Es por ello que una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en dicho canal principal influiría notablemente en la calidad y cantidad de agua disponible para la agricultura y para la capital, lo cual resulta imposible sin la aplicación de sistemas efectivos de control.

Para el diseño de sistemas efectivos de control de la distribución de agua en los canales principales de riego se requiere de modelos matemáticos que describan de forma adecuada la dinámica de dichos canales. Es necesario acentuar, que el comportamiento dinámico de los canales de riego se describe mediante las ecuaciones de Saint-Venant [4], las cuales son no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas con restricciones complejas, por lo que su aplicación en el diseño de sistemas de control presenta serias dificultades [3,5]. Ello fundamenta la necesidad de desarrollar modelos matemáticos simples que describan de forma adecuada el comportamiento dinámico de los canales principales de riego y que posibiliten su aplicación en el diseño de sistemas efectivos de control. El desarrollo de un buen modelo matemático no es trivial, sobre todo porque los criterios para determinar lo que es bueno y lo que no, dependen esencialmente de la finalidad y la aplicación del mismo [5]. Un buen modelo debe capturar el comportamiento dinámico más importante del proceso en condiciones reales y ser tan simple y robusto como sea posible [6].

La necesidad de mejorar la efectividad en la distribución de agua, así como de introducir las ventajas de la automatización en los canales principales de riego ha motivado un gran esfuerzo de investigación y desarrollo científico, que se ha venido prolongando de manera creciente en los últimos años [3,7,8,9]. Debido al complejo comportamiento dinámico que presentan los canales de riego se han propuesto diferentes estrategias de control [10-17].

En [18,19] para el control efectivo de la distribución de agua en el segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena se propone la aplicación de un controlador predictivo generalizado (*GPC*). Es notorio destacar, que en estos trabajos no se tiene en cuenta que este canal se caracteriza por presentar parámetros dinámicos variantes en el tiempo [20], así como que la efectividad de esta clase de controladores depende de la precisión y robustez con la que el modelo interno realiza la predicción del comportamiento dinámico de la planta a controlar [21]. Cuando los canales de riego presentan comportamientos dinámicos variantes en el tiempo, el modelo interno no puede realizar predicciones precisas, lo cual conlleva a un significativo deterioro de las prestaciones del *GPC*, requiriéndose en este caso otro tipo de estrategia de control, por ejemplo, la aplicación de un controlador

predictivo adaptativo robusto [22]. Por otro lado, el *GPC* requiere de una compleja implementación práctica debido a que la señal de control se obtiene mediante la ejecución de un algoritmo de optimización, en muchos casos con restricciones [21]. Es por ello que la aplicación de esta clase de controladores en el canal principal de riego Güira de Melena no constituye una solución viable.

Transcurridos más de 65 años desde su aparición en el mercado, los controladores PID mantienen un papel protagónico en la automatización industrial y agrícola [23,24]. Estos controladores representan un campo de investigación actual y muy importante de diversos especialistas e instituciones. En la página de internet de la Federación Internacional de Control Automático (www.IFAC-control.org) se exhiben los resultados y aportes recientes al conocimiento, relacionados con el diseño de diversas innovaciones de controladores *PID* [24]. El éxito de esta clase de controladores se debe principalmente, a la sencillez de su estructura y simple funcionamiento, lo cual posibilita un fácil entendimiento del personal de operación, comparado con otros controladores avanzados (por ejemplo, el *GPC*).

Los aportes al conocimiento, orientados a encontrar enfoques alternativos de diseño de controladores *PID* con el fin de mejorar la efectividad de los sistemas de control basados en esta clase de controladores, son amplios [25]. Reviste especial importancia el taller de la IFAC *PID* 2000 "Presente y futuro del control *PID*" que tuvo lugar en España, en el año 2000, donde se evidenció un buen pronóstico para las investigaciones relacionadas con los controladores *PID* [23]. Confirmándose de esta forma, el interés científico actual, tanto en el ámbito académico como en el industrial, en las investigaciones relacionadas con los controladores *PID* [24].

La robustez, ha sido un aspecto no considerado durante mucho tiempo, como parte integrante de los aspectos a contemplar en el diseño de controladores *PID* [24]. No obstante a la disponibilidad de herramientas numéricas avanzadas, sigue existiendo una determinada predilección por la formulación del problema de diseño de los controladores *PID* con base en reglas de sintonía, por ser estas de baja complejidad [25]. Es por ello, que la inclusión de especificaciones de robustez en el diseño de controladores *PID* constituye un tema de actualidad.

Algunos investigadores [1,3,9,17,26] han señalado que los controladores *PID* convencionales no presentan la robustez requerida para su aplicación en el control de la distribución de agua en canales principales de riego, caracterizados por presentar parámetros dinámicos variantes en el tiempo y como resultado proponen el diseño de controladores avanzados, cuya implementación práctica resulta compleja y en algunos casos imposible. Este es un problema interesante y no resuelto completamente debido a que el diseño del controlador no se vincula directamente a parámetros de medida de la

robustez del sistema de control [8]. Por consiguiente, las investigaciones encaminadas al diseño de controladores *PID* robustos para su implementación en el control de nivel en los canales principales de riego, presentan una gran importancia y elevado valor científico-técnico [8,17,26]. Es notorio destacar, que en los canales principales de riego el controlador más utilizado es el controlador *PI* [3,11,17].

El objetivo de este trabajo consiste en la obtención de un modelo matemático simple que reproduzca con suficiente exactitud para los fines deseados, el comportamiento dinámico del segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena, así como el diseño de un controlador *PI* basado en especificaciones explícitas de robustez para el control efectivo de la distribución de agua en dicho tramo.

La principal contribución de este trabajo consiste en demostrar que los controladores *PI* convencionales diseñados en base a especificaciones de robustez posibilitan el control efectivo de la distribución de agua en canales principales de riego caracterizados por presentar parámetros dinámicos variantes en el tiempo. Por consiguiente, esta clase de controladores debe ser considerada como una solución viable del complejo problema de automatización de los canales principales de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Breve descripción del canal principal de riego Güira de Melena

El territorio de Güira de Melena se caracteriza por no presentar ríos. Las aguas superficiales que como complemento del agua subterránea abastecen al sistema de riego de dicho territorio (20 000 000 de m³) provienen del complejo hidráulico Mampostón-Pedroso-Güira, situado aproximadamente a 60 km al este del poblado Güira de Melena. El sistema de riego Güira de Melena está conformado por un canal principal que abastece directamente a tres embalses mayores (de 20 000 m³) e indirectamente a cinco embalses de menor capacidad (de 5 000 m³) [10].

El canal principal de riego Güira de Melena presenta un caudal nominal de 5 m³/s en toda su extensión, tiene una longitud aproximada de 10 km, está revestido con losas prefabricadas de hormigón y se encuentra conformado por dos tramos [2]. La operación del canal se realiza de forma completamente manual debido a que no existen dispositivos electrónicos de medición y control [5]. Es por ello que en este canal tienen lugar grandes pérdidas de agua que afectan a la producción agrícola de la zona [27].

Un canal principal de riego constituye un sistema hidráulico abierto cuyo principal objetivo consiste en transportar el agua desde una fuente de alimentación (presa, reservorio, río, etc.) hasta los diferentes usuarios [4]. En la figura 1, se muestra un diagrama simplificado de un canal principal de riego, donde: $Q_R, Q_1, Q_2, \dots, Q_i$ representan los caudales de agua en el reservorio y en los diferentes tramos; $q_R, q_1, q_2, \dots, q_i$ son las descargas laterales; $y_R, y_1, y_2, \dots, y_i$ representan los niveles aguas abajo alejado en los diferentes tramos

(variables controladas), $u_R, u_1, u_2, \dots, u_i$ constituyen las magnitudes de apertura de las compuertas (variables de control) de los tramos. La sección de canal ubicada entre dos compuertas se denomina tramo.

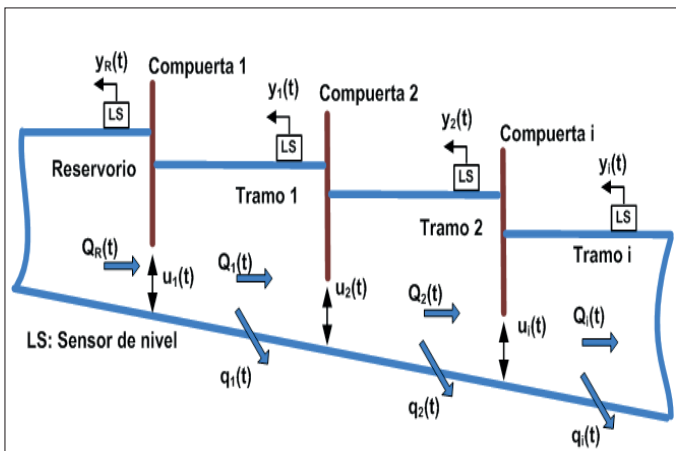


Fig. 1 Diagrama simplificado de un canal principal de riego

En general, en los canales principales de riego, el agua debe ser distribuida de la siguiente manera:

- En forma flexible, ajustándose a los volúmenes de agua disponibles y a los cambios en la demanda.
- De forma segura, evitando inundaciones, roturas y fallas en los equipos.
- De manera operativa y económica, garantizando una estricta y rápida correspondencia entre las demandas y las entregas, así como reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

Existen diferentes métodos para cumplir con estos requisitos. Habitualmente, se ejerce alguna acción sobre la magnitud de apertura de las compuertas, en este caso sumergibles, para mantener constante el nivel en los diferentes tramos del canal. Normalmente, las compuertas incluyen elementos eléctricos y mecánicos.

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Identificación del segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena

La identificación de sistemas constituye un área importante de la teoría del control, que posibilita la construcción de modelos matemáticos de los procesos físicos sobre la base de las observaciones (mediciones) de sus señales de salida y entrada obtenidas en condiciones de funcionamiento, teniendo en cuenta que estas mediciones se verán afectadas por ruidos, perturbaciones e incertidumbres [28]. Para determinar el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de la variación de nivel aguas abajo del tramo de canal objeto de estudio se empleó el método de identificación experimental basado en la respuesta escalón, debido a su sencillez y efectividad [9,29].

El experimento de identificación se desarrolló en tiempo real y consistió en mantener las compuertas aguas arriba y aguas abajo del tramo de canal en posición fija, a fin de estabilizar la variación de nivel aguas abajo en el

tramo. Los datos estabilizados de las variables fueron: magnitud de apertura de la compuerta aguas arriba (87 cm) y nivel aguas abajo alejado (320 cm). Posteriormente, se aplicó una señal escalón a la compuerta aguas arriba, obteniéndose un incremento en su magnitud de apertura de 14 cm, lo cual se corresponde con el régimen de explotación habitual del tramo de canal objeto de estudio [2,27]. El incremento de nivel aguas abajo alejado fue de aproximadamente 12,34 cm. En la figura 2 se muestran los resultados del experimento desarrollado.

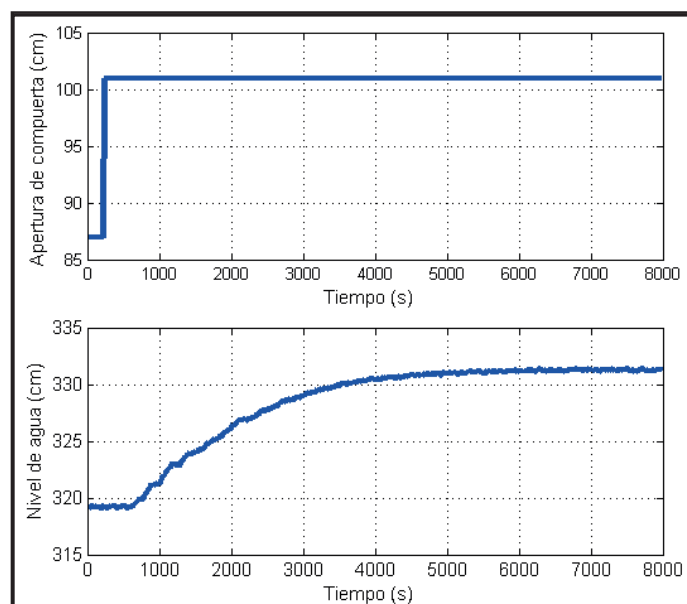


Fig. 2. Apertura de compuerta (superior) y variación de nivel (inferior) del experimento con respuesta escalón

Para la determinación del modelo matemático que mejor describe el comportamiento dinámico del tramo de canal objeto de estudio se utilizaron diferentes métodos, entre los que se encuentran [29]:

- Método de Cecil Smith (aproximación a un modelo de primer orden con retardo):

$$G_{m1} = \frac{K_p}{T_1s + 1} e^{-Ls} \quad (1)$$

- Método de Oldenbourg-Sartorius (aproximación a un modelo de segundo orden con retardo):

$$FIT = \left[1 - \frac{\text{norm}(y - \hat{y})}{\text{norm}(y - \bar{y})} \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

- Método de Strejc (aproximación a un modelo de orden superior con retardo):

$$G_{mn} = \frac{K_p}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

donde:

K_p : Ganancia.

T_1, T_2, \dots, T_n : Constantes de tiempo.

L : Retardo de tiempo del proceso de variación de nivel aguas abajo alejado del tramo de canal.

Para la selección del modelo que mejor describe el comportamiento dinámico del tramo de canal objeto de estudio, así como para la estimación de sus parámetros y validación del modelo final se utilizaron tanto técnicas estadísticas como técnicas basadas en comparación de datos (comparación de las respuestas de los modelos con los datos de la respuesta escalón) [28,29], debido a la complejidad dinámica que presenta este tipo de planta [8,30]. Como criterios de validación se utilizaron los siguientes:

1. Índice de ajuste (FIT). Se corresponde con la variación de la salida estimada, con respecto a la variación de la salida real del proceso [31]. Se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$FIT = \left[1 - \frac{\text{norm}(y - \hat{y})}{\text{norm}(y - \bar{y})} \right] \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\text{norm}(a - b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (5)$$

donde:

\bar{y} : Nivel de agua, aguas abajo alejado (medido).

\bar{y} : Media del nivel de agua, aguas abajo alejado (medido).

\hat{y} : Nivel de agua, aguas abajo alejado (estimado).

2. Coeficiente de determinación o proporción de la varianza (VAF). Ofrece una medida porcentual de la coincidencia entre dos señales, en este caso, entre el nivel aguas abajo medido y el nivel aguas abajo estimado (salida del modelo). Un mayor valor porcentual indica una menor varianza residual, por lo que se puede afirmar que el modelo describe de forma satisfactoria el comportamiento de la variable [31] y se determina mediante la expresión:

$$VAF = 1 - \frac{\text{var}(y - \hat{y})}{\text{var}(y)} \cdot 100\% \quad (6)$$

En la tabla 1 y en la figura 3 se muestran los resultados de validación de los modelos considerados. Además, se observa que los tres modelos describen el comportamiento dinámico del tramo de canal objeto de estudio con resultados muy similares. Por supuesto, el modelo G_{m3} (tercer orden) es el que ofrece los mejores resultados de validación, pero es el de mayor orden y por ende el modelo

más complejo, lo cual puede representar un inconveniente en la etapa de diseño del controlador.

Considerando el criterio práctico que establece que entre los modelos matemáticos que describen de forma muy similar la dinámica de un mismo proceso se debe escoger el más simple [29]; se seleccionó el siguiente modelo del proceso objeto de estudio:

$$G_p(s) = G_{m1}(s) = \frac{0,8679}{1\ 290s + 1} e^{-395s} \quad (7)$$

Tabla 1 Resultados de validación de los modelos considerados		
Modelos	FIT (%)	VAF (%)
G _{m1}	89,88	98,91
G _{m2}	92,54	99,51
G _{m3}	93,21	99,62

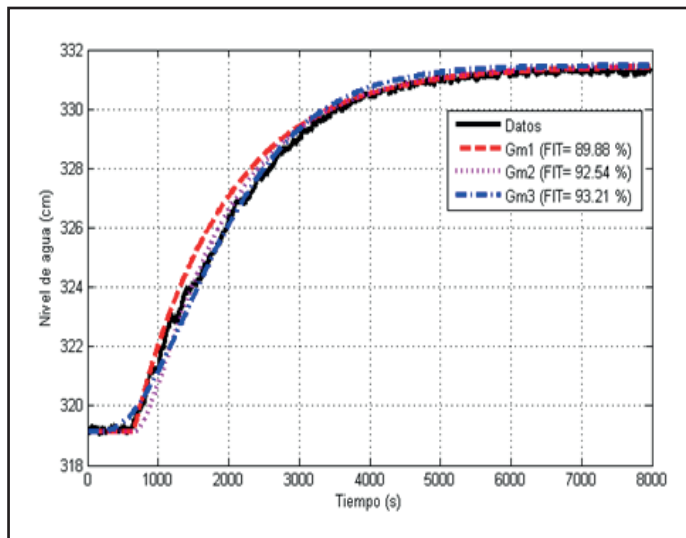


Fig. 3. Resultados de validación de los modelos considerados

Diseño del controlador PI robusto de nivel basado en margen de ganancia y margen de fase

El diseño de un controlador PI con base a especificaciones de unos determinados márgenes de ganancia (A_m) y de fase (ϕ_m), se puede considerar como el primer planteamiento en el que se especifica de manera explícita la robustez del controlador en base a medidas (indicadores) de robustez. Estas medidas se apoyan en el criterio de estabilidad de Nyquist y consideran la posibilidad de variar el número de giros alrededor del punto crítico (-1, 0), bajo una variación en la ganancia o en la fase, respectivamente, del sistema. El valor de A_m se define a través de las expresiones:

$$A_m |G_c(j\omega_g)(G_p(j\omega_g))| = 1 \quad (8)$$

$$A_m = \frac{1}{|G_c(j\omega_g)(G_p(j\omega_g))|} \quad (9)$$

mientras que el valor de ϕ_m se determina mediante la siguiente condición (en grados):

$$-\phi_m + \arg[G_c(j\omega_f)(G_p(j\omega_f))] = -180^\circ \quad (10)$$

$$\phi_m = \arg[G_c(j\omega_f) G_p(j\omega_f)] + 180^\circ \quad (11)$$

donde:

$G_c(s)$ y $G_p(s)$: Funciones transferenciales del controlador y del modelo del proceso respectivamente.

ω_g y ω_f : Frecuencia de cruce de ganancia y frecuencia de cruce de fase respectivamente.

El controlador PI se representa mediante la siguiente función de transferencia:

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

donde:

K_c : Ganancia proporcional.

T_i : Constante de tiempo de la acción integral.

De las expresiones (1) y (12) se obtiene la función de transferencia de lazo abierto del sistema de control:

$$G_c(s)G_p(s) = \frac{K_c K_p (T_i s + 1)}{s T_i (T_i s + 1)} e^{-Ls} \quad (13)$$

Sustituyendo (13) en las expresiones (8)-(11) se obtiene:

$$\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}(\omega_f T_i) - \tan^{-1}(\omega_f T_1) - \omega_f L = 0 \quad (14)$$

$$A_m K_c K_p = \omega_g T_i \sqrt{\frac{\omega_g^2 T_1^2 + 1}{\omega_g^2 T_i^2 + 1}} \quad (15)$$

$$K_c K_p = \omega_g T_i \sqrt{\frac{\omega_g^2 T_1^2 + 1}{\omega_g^2 T_i^2 + 1}} \quad (16)$$

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}(\omega_f T_i) - \tan^{-1}(\omega_f T_1) - \omega_f L \quad (17)$$

Considerando un margen de ganancia $A_m=3$ y un margen de fase $\phi_m = 60^\circ$ y resolviendo numéricamente las expresiones (14)-(17) se obtienen los parámetros

del controlador *PI*. Por consiguiente, el controlador *PI* se presenta en la forma:

$$G_c(s) = 0,815 \left(1 + \frac{1}{1101,53s} \right) \quad (18)$$

En la figura 4 se exhiben los resultados de simulación del sistema de control de nivel en el tramo de canal objeto de estudio con el controlador *PI* diseñado.

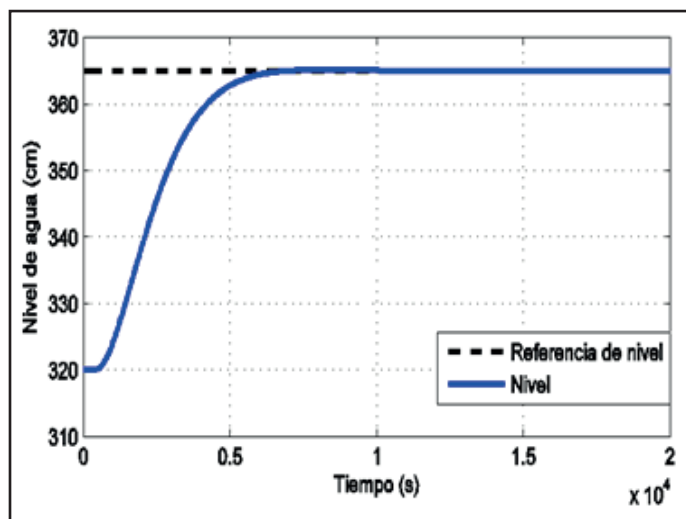


Fig. 4. Respuesta temporal del sistema de control de nivel con el controlador *PI* diseñado

En la tabla 2 se presentan las especificaciones de respuesta temporal del sistema de control de nivel bajo la acción del controlador *PI* diseñado, donde MP representa el pico máximo, E_{ee} el error de estado estacionario, T_s y T_r , los tiempos de establecimiento y de subida respectivamente.

Tabla 2

Especificaciones de respuesta temporal alcanzadas con el controlador *PI*

Controlador	MP (%)	E_{ee}	T_s (s)	T_r (s)
<i>PI</i>	0,36	0	5 800	3 279

Análisis de la robustez del controlador *PI* diseñado

La robustez de un controlador se encuentra relacionada con la habilidad para responder adecuadamente, en términos de desempeño y estabilidad, aun cuando el modelo de la planta difiere de la planta física real debido a perturbaciones y/o incertidumbres [8].

El análisis de robustez del controlador *PI* diseñado se realiza considerando cuatro escenarios frente a: efecto de perturbaciones medibles; variaciones en la ganancia del proceso; variaciones en la constante de tiempo del proceso y variaciones en el retardo de tiempo del proceso.

Análisis de robustez del controlador *PI* diseñado frente al efecto de perturbaciones medibles

En la figura 5 se muestra la respuesta temporal del sistema de control de nivel con el controlador *PI* diseñado frente al efecto de una perturbación externa (extracción lateral de agua de un usuario), la cual se origina en el instante de tiempo de 12 000 s ocasionando una disminución de un 5 % en el nivel de agua. De la figura se deduce que el controlador *PI* posibilita rechazar completamente el efecto de dicha perturbación en un periodo de tiempo relativamente corto.

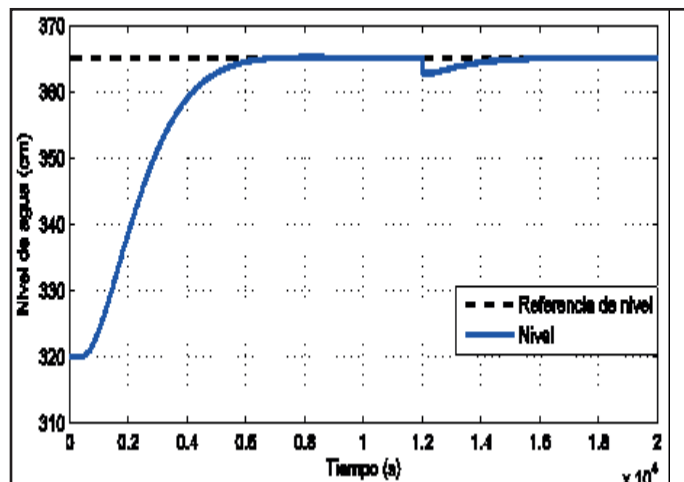


Fig. 5. Respuesta temporal del sistema de control de nivel con el controlador *PI* diseñado, frente al efecto de una perturbación externa medible

Análisis de robustez del controlador *PI* diseñado frente a variaciones en la ganancia del proceso

Las respuestas temporales del sistema de control de nivel, con el controlador *PI* diseñado cuando la ganancia de la planta varía en el rango de operación [K_{min} , K_{max}] se muestran en la figura 6. Las especificaciones de estas respuestas se exhiben en la tabla 3.

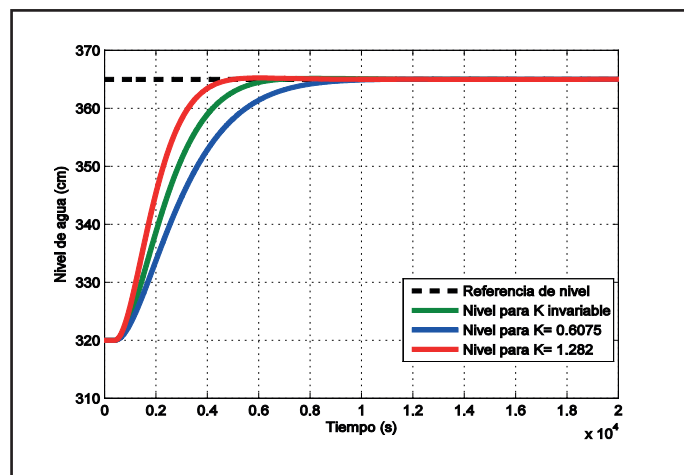


Fig. 6. Respuestas temporales del sistema de control, con el controlador *PI* diseñado, frente a variaciones en la ganancia de la planta

Tabla 3
Especificaciones de las respuestas temporales frente a variaciones en la ganancia de la planta

Controlador	Ganancia nominal planta K_p	Variación de K_p	MP (%)	E_{ee}	T_s (s)	T_r (s)
PI	0,867 9	0,607 5	0,047	0	800 0	448 0
		1,282	0,508	0	420 0	241 3

Análisis de robustez del controlador PI diseñado frente a variaciones en la constante de tiempo de la planta

Las respuestas temporales del sistema de control de nivel, con el controlador PI diseñado, cuando la constante de tiempo de la planta varía en el rango de operación de $[T_{1min}, T_{1max}]$ se presenta en la figura 7. Las especificaciones de las respuestas temporales se presentan en la tabla 4.

Análisis de robustez del controlador PI diseñado frente a variaciones en el retardo de tiempo de la planta

Las respuestas temporales del sistema de control de nivel con el controlador PI diseñado, cuando el retardo de tiempo de la planta varía en el rango de operación $[L_{min}, L_{max}]$ se exhiben en la figura 8. En la tabla 5 se muestran las especificaciones de dichas respuestas.

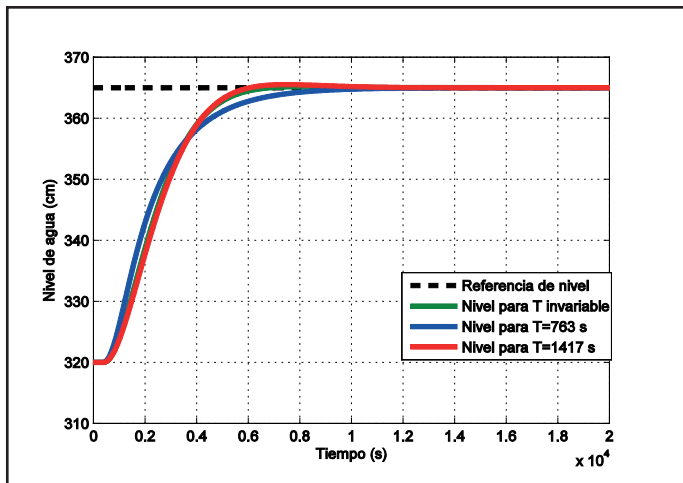


Fig. 7. Respuestas temporales del sistema de control, con el controlador PI diseñado, frente a variaciones en la constante de tiempo de la planta

Tabla 4
Especificaciones de las respuestas temporales frente a variaciones en la constante de tiempo de la planta

Controlador	Constante de tiempo nominal planta T_1 (s)	Variación de T_1 (s)	MP (%)	E_{ee}	T_s (s)	T_r (s)
PI	1 290	763	0	0	8 000	3 839
		1 417	1,08	0	5 000	3 234

En las figuras 5 - 8, así como en las tablas 3 - 5 se observa que frente al efecto de perturbaciones y/o variaciones en los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio, el controlador PI diseñado es capaz de cumplir con las especificaciones de respuestas temporales, por consiguiente se comporta de forma robusta.

De esta forma se demuestra que el controlador PI diseñado es robusto y puede ser aplicado en el control efectivo de nivel de agua en el segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena.

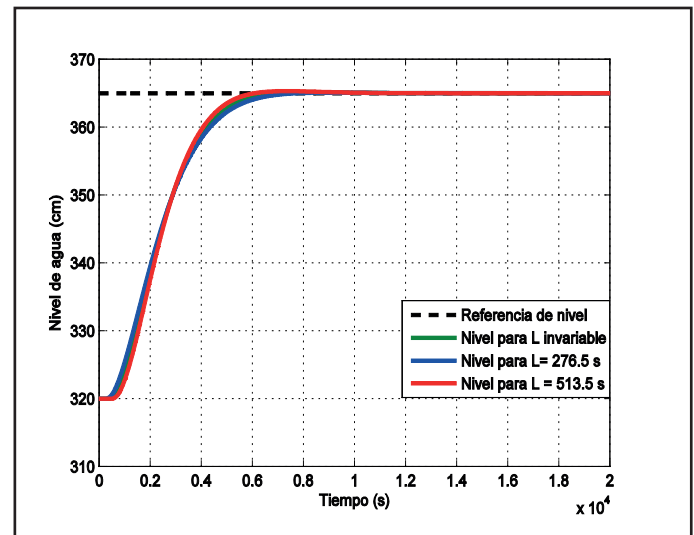


Fig. 8. Respuestas temporales del sistema de control, con el controlador PI diseñado, frente a variaciones en el retardo de tiempo de la planta

Tabla 5						
Especificaciones de las respuestas temporales frente a variaciones en el retardo de tiempo de la planta						
Controlador	Retardo de tiempo nominal planta L (s)	Variación de L (s)	MP (%)	E _{ee}	T _s (s)	T _r (s)
PI	395	276,5	0,17	0	6 000	3 540
		513,5	0,6	0	5 220	3 009

CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas se obtuvo un modelo matemático que describe de forma adecuada, el comportamiento dinámico del nivel aguas abajo alejado en el segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena. El modelo matemático obtenido se caracteriza por ser de primer orden y presentar un retardo de tiempo de 395 s. La constante de tiempo del modelo es de 1290 s, es decir, 3,25 veces mayor que el retardo de tiempo. Ello implica, que la planta objeto de estudio no presenta retardo de tiempo dominante y por ende puede ser controlada de forma satisfactoria, mediante la aplicación de controladores convencionales del tipo PI.

Considerando el modelo matemático obtenido se realizó el diseño de un controlador PI robusto con base en especificaciones de margen de ganancia y margen de fase (medidas de robustez). Los resultados de simulación del sistema de control de la planta objeto de estudio con el controlador diseñado exhiben resultados satisfactorios.

Los resultados del análisis de robustez desarrollado del controlador PI diseñado considerando cuatro diferentes escenarios (frente al efecto de perturbaciones y/o variaciones en los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio) mostraron que este controlador se comporta de forma robusta y por ende el mismo puede ser implementado en el segundo tramo del canal principal de riego Güira de Melena.

REFERENCIAS

1. PEDREGAL TERCERO, Diego José *et al.* "A non-linear fore-casting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain". *Environmental Modelling & Software*. 2009, vol. 24, núm. 4, pp. 502-509. ISSN: 1364-8152.
2. RIVAS-PÉREZ, Raúl; PERAN GONZÁLEZ, José Ramón; PINEDA REYES, Benito; PÉREZ PEREIRA, Sergio. "Distributed control under centralized intelligent supervision in the Güira de Melena irrigation system". *Hydraulic Engineering in Mexico*. 2003, vol. 18, núm. 2, pp. 53-68. ISSN: 0186-4076.
3. LITRICO, Xavier; FROMION, Vicent. *Modeling and Control of Hydrosystems*. 2009, Springer-Verlag, London, 409 pp. ISBN: 978-1-84882-623-6.
4. CHOW, Ven Te. *Open-Channel Hydraulics*. 2009, The Blackburn Press, New Jersey, 700 pp. ISBN-13: 978-1932846188. Disponible en Web <http://web.ipb.ac.id/~erizal/hidrolika/Chow%20-%20OPEN%20>

CHANNEL%20HYDRAULICS.pdf[consultado noviembre 2014].

5. RIVAS-PÉREZ, Raúl; FELIÚ BATLLE, Vicente; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, Luis. "Robust system identification of an irrigation main canal". *Advances in Water Resources*. 2007, vol. 30, núm. 8, pp. 1785-1796. ISSN: 0309-1708.
6. KOVALENKO, Pietr Ivanovich; RIVAS-PÉREZ, Raul; PICHUGUIN, Evgueni Dimitrievich; KAO, Tien Guin. "Identificación de las características dinámicas de un canal magistral de riego como objeto de control automático". *Control, Cibernética y Automatización*. 1984, vol. 18, núm. 3, pp. 46-50. ISSN: 1013-2287.
7. RIVAS-PÉREZ, Raul *et al.* "Identification of the first pool of the Imperial de Aragon main irrigation canal". *Hydraulic Engineering in Mexico*. 2008, vol. 23, núm. 1, pp. 71-87. ISSN: 0186-4076.
8. RIVAS-PÉREZ Raúl; FELIÚ BATLLE, Vicente; CASTILLO GARCÍA, Fernando; LINARES SÁEZ, Antonio. "Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool". *Environmental Modelling & Software*. 2014, vol. 51, núm. 1, pp. 207-220. ISSN: 1364-8152.
9. MONJE MICHARET, Concepción Alicia *et al.* *Fractional-Order Systems and Controls. Fundamentals and Applications*. 2010, Springer-Verlag, London, 414 p. ISBN 978-1-84996-334-3.
10. PÉREZ PEREIRA, Sergio; CÉSPEDES GARCÍA, Erick; RIVAS-PÉREZ, Raúl. "Control de nivel en el embalse Pimienta del sistema de riego Güira de Melena". *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1999, vol. 20, núm. 2, pp. 23-31. ISSN: 0258-5944.
11. MALATERRE, Pierre.; ROGERS, David; SCHUURMANS, Jan. "Classification of canal control algorithms". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998, vol. 124, núm. 1, pp. 3-10. ISSN: 0733-9437.
12. BAUME, Jean; MALATERRE, Pierre; SAU, Jacques. "Tuning of PI to control an irrigation canal using optimization tools". *ASCE-ICID Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems*. Oct. 18-21, 1999, Arizona, USA, pp. 1-16. ISBN: 1887903070.
13. LOZANO, David; ARRANJA, Carina; RIJO, Manuel; MATEOS, Luciano. "Simulation of automatic control of an irrigation canal". *Agricultural Water Management*. 2010, vol. 97, pp. 91-100. ISSN: 0378-3774. Disponible

- Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377409002467> [consultado noviembre 2014].
14. **RABBANI, Tarek. et al.** "Feed-forward control of open channel flow using differential flatness". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2010, vol. 18, núm. 1, pp. 213-221. ISSN: 1063-6536. Disponible en Web https://www.researchgate.net/publication/221045036_Feed-Forward_river_flow_control_using_differential_flatness [consultado noviembre 2014].
 15. **SALAHOU, Mohamed et al.** "Control of an irrigation canal". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013, vol. 5, núm. 15, pp. 3916-3924. ISSN: 2040-7459.
 16. **CLEMMENTS, Albert; STRAND, Robert.** "Downstream-water-level control test results on the WM Lateral Canal". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2010, vol. 136, núm. 7, pp. 460-469. ISSN: 0733-9437.
 17. **RIVAS-PÉREZ, Raúl et al.** "Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal". *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2014, vol. 5, núm. 1, pp. 23-42. ISSN: 0187-8336.
 18. **CUENCA TINITANA, Julio César; RIVAS-PÉREZ, Raúl.** "Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego". *Revista Estudios Universitarios Universidad Nacional de Loja*. 2012, pp. 119-130. ISSN: 1390-4167.
 19. **CUENCA TINITANA, Julio César; RIVAS PÉREZ, Raúl.** "Predictive controller design for water distribution in an irrigation main canal". *Proceedings of 13th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering XIII CHLIE*. 2013, Valencia, Spain. ISBN: 978-84-695-7778-3.
 20. **RIVAS-PÉREZ Raúl.** Technological process control in main canals of irrigation systems, with application to irrigation systems of Cuba. Ph.D thesis, Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation of Ukrainian Academy of Agrarian Sciences (UkrNIIGIM). 1984, Kiev, Ukraine 157 pp. (in russian language).
 21. **CAMACHO, Eduardo; BORDONS, Carlos.** *Model Predictive Control*. 1999, Springer-Verlag, London, 280 p. ISBN: 3-540-76241-8.
 22. **RIVAS-PÉREZ, Raúl; PRADA MORAGA, César; PERAN GONZÁLEZ, José Ramón; KOVALENKO, Pietr Ivanovich.** "Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals". *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2002, vol. 15, núm. Part 1, pp. 97-102. ISSN: 1474-6670.
 23. **ASTROM, Karl; HAGGLUND, Tore.** *Control PID Avanzado*. 2009, Pearson Educación S.A., Madrid, 501 p. ISBN: 978-84-8322-511-0.
 24. **VISIOLI, Antonio.** *Practical PID Control*. 2010, Springer-Verlag, London, 322 pp. ISBN-13: 978-1849966221.
 25. **VILANOVA, Ramon; ALFARO, Victor.** "Control PID robusto: una visión panorámica". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2011, vol. 8, pp. 141-158. ISSN:1697-7912.
 26. **FELIÚ BATLLE, Vicente et al.** "Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters". *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011, vol. 76, núm. 2, pp. 205-217. ISSN: 0168-1699.
 27. **RIVAS-PÉREZ, Raúl; PÉREZ PEREIRA, Sergio; CÉSPEDES GARCÍA, Erick.** "Distributed control system of water flows and levels in irrigation canals". *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1998, vol. 19, núm. 4, pp. 43-52. ISSN: 0258-5944.
 28. **LJUNG, Lennart.** *System Identification: Theory for the User*. 2nd edition. 1999, Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 313 pp. ISBN: 0-13-656695-2.
 29. **AGUADO BEAR, Alberto.** *Temas de Identificación y Control Adaptable*. 2000, ICIMAF, La Habana, 313 pp. ISBN: 959-7056-11-9.
 30. **RIVAS-PÉREZ, Raúl; FELIÚ BATLLE, Vicente; CASTILLO GARCÍA, Fernando; LINARES-SAEZ, Antonio.** "Control oriented model of a complex irrigation main canal pool". *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online)*. 2011, vol. 18, núm. PART 1, pp. 2919-2924. ISSN: 1474-6670.
 31. **ROFFEL, Brian; BETLEM, Ben.** *Process Dynamics and Control. Modeling for Control and Prediction*. 2006, John Wiley & Sons Ltd, London, 541 pp. ISBN: 978-0-470-01663-3.

AUTORES

Ybrain Hernández López

Ingeniero Automático, Profesor Asistente, Departamento de Automática y Computación, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría Cujae, La Habana, Cuba. Miembro de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC)

Raúl Rivas-Pérez

Ingeniero Automático y Telemática, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Investigador Titular, Departamento de Automática y Computación, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Miembro de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC)

Gisselle Lorenzo Galván

Ingeniera Automática, Profesora, Departamento de Física, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Robust Proportional Integral Control of Water Level in an Irrigation Main Canal

Abstract

Nowadays In this paper, the design of a robust PI controller for effective level control in the second pool of the irrigation main canal Güira de Melena is developed. A mathematical model that adequately describes the dynamic behavior of the plant under study is obtained from system identification procedure. This model is characterized by its simplicity (first order with time delay). The robustness analysis of the designed PI controller vs parametric variations of the obtained mathematical model showed satisfactory results, and therefore the implementation of this controller is validated.

Key words: robust PI controller, system identification, irrigation main canal, measures of robustness