



Controlador IMC-PID con filtro de orden fraccionario de un tramo de un canal principal de riego

Ybrain Hernández-López, Raúl Rivas-Perez, Vicente Feliu-Batlle

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se propone el diseño de un controlador IMC-PID con filtro de orden fraccionario (IMC-FPID) para el control efectivo de la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego. A partir de datos en tiempo real y aplicando el procedimiento de identificación de sistemas se obtiene un modelo matemático dinámico de este proceso representado mediante una función de transferencia de primer orden con retardo. Basado en el modelo obtenido se diseñó un controlador IMC-PID con filtro de orden fraccionario que se comporta de forma efectiva. Los resultados de simulación comparan el desempeño del controlador propuesto con un controlador IMC-PID convencional. En esta comparación se utilizó el índice de desempeño de la integral del error absoluto (IAE). Los resultados obtenidos muestran que el controlador propuesto proporciona valores más bajos de este índice y en consecuencia supera al controlador IMC-PID convencional en términos de desempeño y precisión.

Palabras claves: Controlador IMC-PID, filtro de orden fraccionario, tramo de un canal principal de riego, distribución de agua, control automático.

This paper proposes the design of an IMC-PID controller with a fractional order filter (IMC-FPID) for the effective control of water distribution in a main irrigation canal pool. From real-time data and applying the system identification procedure a dynamic mathematical model of this process is obtained, which is represented by a first-order transfer function with a time delay. Based on the model obtained an IMC-PID controller with a fractional order filter was designed that behaves effectively. The simulation results compare the performance of the proposed controller with a conventional IMC-PID controller. In this comparison, the performance index of the integral of absolute error (IAE) was used. The results obtained show that the proposed controller provides lower values of this index and consequently outperforms the conventional IMC-PID controller in terms of performance and accuracy.

Key words: IMC-PID controller, fractional order filter, main irrigation canal pool, water distribution, automatic control IMC-PID controller with fractional order filter of a main irrigation canal pool.

1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión eficiente de los recursos hidráulicos constituye una de las principales preocupaciones del siglo XXI [1, 2]. A nivel global, como consecuencia del crecimiento demográfico, del acelerado ritmo del desarrollo industrial y agrícola, de la urbanización, así como de la contaminación ambiental, se está desplegando una amenaza sin precedentes sobre los recursos hídricos disponibles, principalmente en regiones y países caracterizados por presentar estrés hídrico, por lo que en diversas regiones del planeta no resulta viable garantizar un suministro estable de este importante recurso [3-5].

La agricultura representa un componente importante de la cadena productiva alimentaria y representa el sector económico en el que la insuficiencia de recursos hídricos ocasiona el mayor impacto negativo [6, 7], realizando el 70% de las extracciones globales de agua y más del 90% de su uso consuntivo debido a la aplicación de los sistemas de riego [8, 9]. Los canales principales de riego constituyen los elementos más importantes de los sistemas de riego debido a que transportan los mayores volúmenes de agua [10].

Recibido: 2/10/2020 Aceptado: 10/12/2020

La distribución de los recursos hidráulicos en los sistemas de riego se realiza sobre la base de las demandas hídricas de los diferentes usuarios durante un ciclo de riego [11]. Los bajos rendimientos de los cultivos, generalmente relacionados con la gestión deficiente de la distribución de agua en los canales principales de riego representan un grave problema para la agricultura [12, 13].

En los canales principales de riego se originan pérdidas de agua por infiltración, evaporación, así como por operaciones ineficientes en el posicionamiento de las compuertas [14, 15]. Por ello, la gestión de los recursos hídricos se debe realizar con una elevada efectividad para obtener desempeños competitivos y minimizar las pérdidas de agua por concepto de operación [16].

Las variaciones previstas e imprevistas en las demandas hídricas de los cultivos generan un amplio rango de condiciones de funcionamiento hidráulico en los canales [17, 18]. Consecuentemente, para garantizar la operación eficiente de los canales principales resulta necesario obtener un buen desempeño en todas las condiciones de funcionamiento y estados transitorios de los mismos, provocados por los movimientos de las compuertas transversales y laterales para suministrar de forma precisa los caudales requeridos por los usuarios [19, 20]. En la Figura 1 se muestra un diagrama de un canal principal de riego, en el cual es posible observar sus compuertas transversales y laterales.

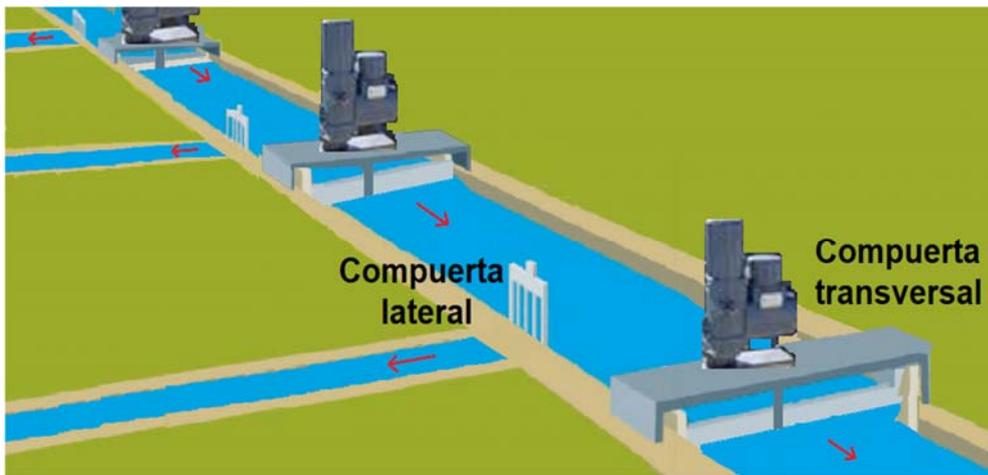


Figura 1

Diagrama de un canal principal de riego.

Los caudales derivados dependen del nivel de agua en las posiciones de las compuertas laterales, los que a la vez se encuentran condicionados por las posiciones de las compuertas transversales [21, 22]. Por ende, para realizar variaciones en los caudales laterales se requiere modificar las posiciones de las compuertas transversales [23, 24].

Desde el enfoque dinámico los canales principales de riego se caracterizan por presentar comportamientos dinámicos complejos debido a que constituyen plantas no lineales, con parámetros dinámicos distribuidos y variantes en el tiempo, y con retardos dominantes [25–27].

La aplicación de estrategias convencionales de control en los canales principales de riego ha sido una de las medidas utilizadas para garantizar la gestión eficiente de los recursos hídricos disponibles [9, 23]. Sin embargo, es bien conocido que estas estrategias no siempre han conducido a garantizar una correcta correspondencia entre las demandas y las entregas debido al complejo comportamiento dinámico de los canales [2, 28].

Por consiguiente, actualmente la comunidad científica internacional tiene el reto de desarrollar e implementar mejores soluciones de control que posibiliten aumentar la efectividad en la gestión de los canales principales de riego, así como minimizar las pérdidas de los recursos hídricos.

Los controladores PID continúan siendo hoy en día los predominantes en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego debido a la sencillez de su estructura, capacidad de eliminar errores en estado estacionario mediante la acción integral, y anticipar el futuro con la acción derivativa, así como a su naturaleza robusta, a la prevalencia de una práctica bien establecida de instalación, sintonización y utilización de estos controladores, y a la familiarización con esta clase de controladores de un gran número de ingenieros y técnicos de instrumentación y control [2, 15, 22, 26]. Sin embargo, los controladores PID resultan insuficientes frente a procesos con retardo dominante [29, 30], y además, presentan la dificultad

de ser muy sensibles a las variaciones de los parámetros dinámicos de los procesos, desajustándose con facilidad o incluso pudiendo llegar a la pérdida de la estabilidad de los sistemas de control [30].

En los últimos años se han propuesto diferentes controladores avanzados con detección y diagnósticos de fallos para el control efectivo de diferentes procesos industriales con comportamientos dinámicos complejos [31–33]. Entre los controladores avanzados desarrollados se encuentra el controlador con modelo interno (por sus siglas en inglés IMC), el cual ha ganado una gran aceptación debido a su simple estructura, diseño intuitivo, capacidad para rechazar perturbaciones, y propiedades de robustez, ver por ejemplo [34–36].

La estructura del controlador IMC desarrollada por Morari y Zafriou en la década de los 80 [37] se encuentra integrada por un controlador $C_{IMC}(s)$, y un modelo matemático interno del proceso $G_m(s)$ conectado en paralelo con el proceso $P(s)$. En la Figura 2 se muestra un diagrama con la estructura del controlador IMC convencional. En el diagrama se considera que todas las perturbaciones que actúan sobre el proceso se reducen a una perturbación equivalente $d(s)$ en la salida del proceso.

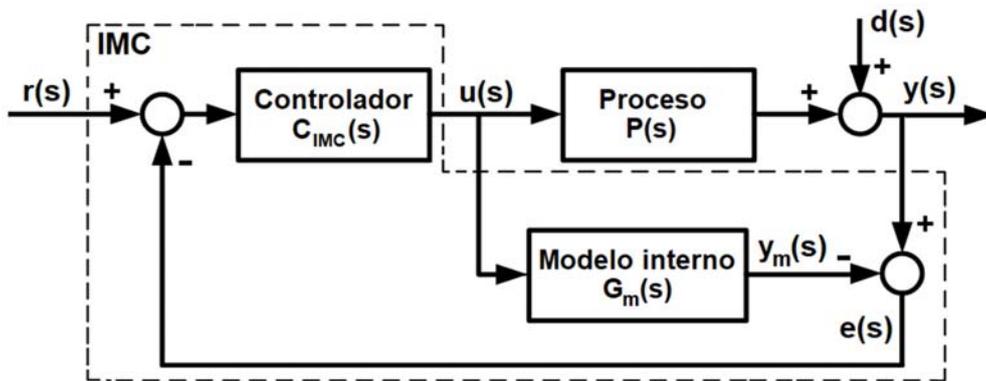


Figura 2

Estructura del controlador con modelo interno (IMC) convencional.

La señal de salida de lazo cerrado $y(s)$ de esta estructura de control se representa como:

$$y(s) = \frac{C_{IMC}(s)P(s)}{1 + C_{IMC}(s)(P(s) - G_m(s))} r(s) + \frac{1 - C_{IMC}(s)G_m(s)}{1 + C_{IMC}(s)(P(s) - G_m(s))} d(s) \quad (1)$$

La estructura del controlador IMC puede ser reducida a la estructura clásica de control con realimentación (ver Figura 3) si se define la función de transferencia del controlador equivalente $C(s)$ mediante la expresión:

$$C(s) = \frac{C_{IMC}(s)}{1 - C_{IMC}(s)G_m(s)} \quad (2)$$

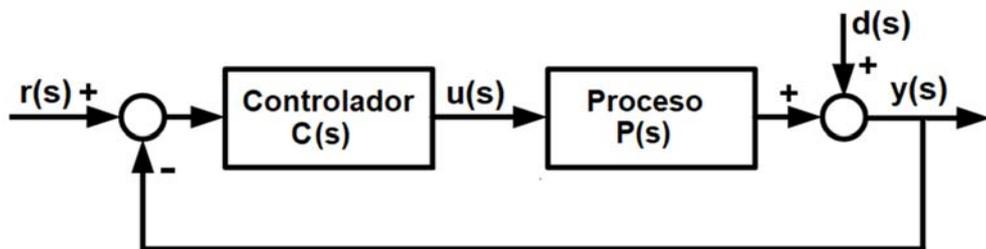


Figura 3

Estructura clásica de un sistema de control con realimentación.

Mediante el desarrollo de determinadas hipótesis, la expresión (2) del controlador equivalente $C(s)$ permite obtener controladores PID o PI que se conocen como controladores IMC-PID [37].

En correspondencia con las propiedades del controlador IMC, si el modelo matemático interno es perfecto ($G_m(s) = P(s)$) la señal realimentada $e(s)$ es igual a la perturbación $d(s)$ para todas las acciones de control $u(s)$, y en este caso es posible obtener un seguimiento de la señal de referencia $r(s)$ [37]. Sin embargo, si el modelo matemático interno no describe exactamente el comportamiento dinámico del proceso, entonces la señal realimentada $e(s)$ incluye los efectos del error de modelado y de la perturbación equivalente $d(s)$ [37].

El controlador $C_{IMC}(s)$ se define matemáticamente como el inverso de la parte invertible del modelo matemático del proceso $G_m(s)$, obteniéndose una función de transferencia impropia, la cual ocasiona acciones de control excesivas que pueden producir problemas de estabilidad [38]. Es por ello que, con el fin de asegurar una función de transferencia propia, así como de reducir la sensibilidad a los errores de modelado, se introduce un filtro paso bajo (conectado en serie con el controlador), cuyos parámetros se ajustan de forma tal de mejorar la robustez del sistema de control, y/o establecer una velocidad de respuesta determinada [30, 37].

En las últimas dos décadas los operadores de orden fraccionario han sido aplicados con resultados satisfactorios en el modelado y control de procesos con comportamientos dinámicos complejos, posibilitando obtener una elevada flexibilidad y robustez en el diseño de controladores, ver por ejemplo [39–43]. En el dominio de Laplace (siempre que las condiciones iniciales sean cero) el operador de orden fraccionario se corresponde con s^α , donde α ($\alpha \in \mathfrak{R}$) es el orden del operador, y por consiguiente su respuesta en frecuencia es $(j\omega)^\alpha$ [44, 45]. Recientemente algunos autores, para aumentar la robustez del controlador IMC-PID, han propuesto utilizar un filtro pasa bajo de orden fraccionario [46, 47].

Los controladores predictivos basados en modelos (por sus siglas en inglés MBPC) igualmente han sido propuestos para el control efectivo de la distribución de agua en los tramos de los canales principales de riego, ver por ejemplo [48–51]. Esta clase de controladores también dispone de un modelo matemático interno, el cual se utiliza para realizar predicciones sobre el comportamiento dinámico futuro del proceso a controlar, así como en el cálculo de las señales de control futuras. Sin embargo, como resultado de que la implementación práctica de estos controladores es muy compleja debido a que la señal de control se obtiene mediante la ejecución de un algoritmo de optimización, en muchos casos con restricciones, y además que se requiere de una alta preparación del personal de operación, la aplicación real de los controladores MBPC en los canales principales de riego ha sido muy limitada.

El objetivo de este trabajo consiste en el diseño de un controlador IMC-PID con filtro pasa bajo de orden fraccionario (IMC-FPID) para su aplicación por primera vez en el control de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.

La principal contribución de este trabajo consiste en demostrar que los controladores IMC-FPID diseñados en base a las especificaciones en el dominio de la frecuencia posibilitan mejorar el desempeño en el control de la distribución de agua en los tramos de los canales principales de riego.

El trabajo ha sido estructurado de la siguiente forma: en la Sección 2 se desarrolla la identificación del tramo de canal objeto de estudio. En la Sección 3 se realiza el diseño de los controladores IMC-FPID. En la Sección 4 se desarrolla el análisis y discusión de los resultados. Finalmente, en la Sección 5 se ofrecen las conclusiones.

2.- IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL DE RIEGO

Para el diseño de controladores IMC-PID se requiere disponer de modelos matemáticos que describan de forma adecuada el comportamiento dinámico de los procesos a controlar [37].

El comportamiento dinámico de los canales de riego se describe mediante las ecuaciones de Saint-Venant [25], las cuales presentan serias dificultades matemáticas para su aplicación en el diseño de sistemas de control de la distribución de agua, ver por ejemplo [2, 9].

Los modelos matemáticos lineales son usualmente suficientes para capturar las características dinámicas fundamentales de los canales principales de riego, requeridas en el diseño de sistemas de control [2, 52]. Esta clase de modelos puede obtenerse mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas [53, 54].

La identificación de sistemas posibilita la construcción de modelos matemáticos simples de procesos dinámicos complejos 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 [53].

El primer tramo del canal principal Güira de Melena ubicado en la provincia de Artemisa es el utilizado en calidad de tramo de canal principal de riego. Este canal presenta un caudal nominal de 5 m³/s en toda su extensión, tiene una longitud aproximada de 5 km, está revestido con losas prefabricadas de hormigón, y cuenta con compuertas transversales aguas arriba y aguas abajo, moto-reductores, sensores de nivel, y sensores de posición de compuerta.

Para determinar el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de la variación de nivel aguas abajo alejado 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 [53].

En correspondencia con este método, se aplicó una señal de entrada $u(t)$ tipo escalón a la compuerta aguas arriba obteniéndose un incremento en su magnitud de apertura de 14 cm, y un aumento en el nivel aguas abajo alejado (señal de salida $y(t)$) de aproximadamente 12 cm. En la Figura 4 se muestran los resultados del experimento de identificación desarrollado. Mediante el procesamiento de los datos obtenidos del experimento con señal escalón se obtuvo el siguiente modelo de primer orden con retardo:

$$G_m(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-L_m s} = \frac{0.8679}{1290 s + 1} e^{-390 s} \quad (3)$$

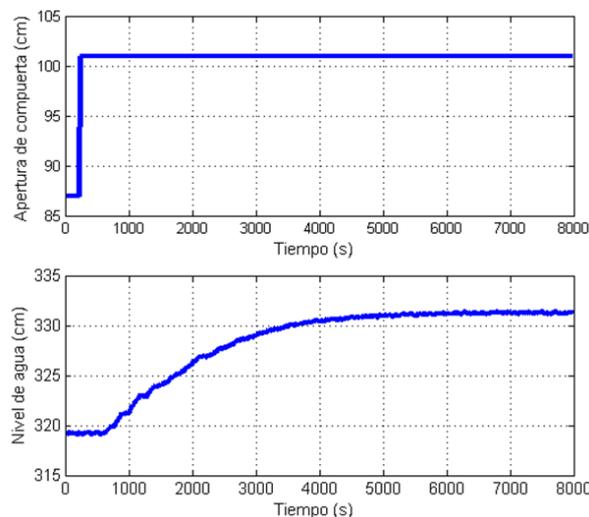


Figura 4

Resultados del experimento de identificación con señal escalón de un tramo de un canal principal de riego.

Para la validación del modelo matemático obtenido de la distribución de agua en el tramo de canal objeto de estudio se utilizó el método de validación cruzada [53]. Los resultados de validación se exhiben en la Figura 5. De esta figura se observa que el modelo obtenido describe el comportamiento dinámico del proceso real con un índice de ajuste FIT = 89.88%, el cual se considera adecuado para la utilización de dicho modelo en el diseño de sistemas efectivos de control [53].

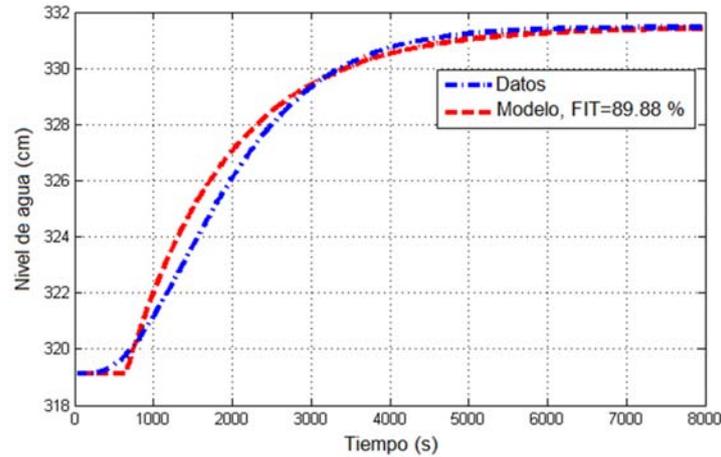


Figura 5

Resultados de validación del modelo matemático obtenido.

3.- DISEÑO DEL CONTROLADOR IMC-PID CON FILTRO DE ORDEN FRACCIONARIO

Para el diseño del controlador IMC-PID se realiza la factorización del modelo de la planta (3) en términos invertible y no invertible:

$$G_m(s) = G_m^+(s)G_m^-(s) \quad (4)$$

donde $G_m^-(s)$ es el término invertible del modelo, y $G_m^+(s)$ representa al término no invertible que contiene el retardo y todos los ceros de fase no mínima (en el semiplano derecho). Por consiguiente, la factorización del modelo $G_m(s)$ se representa como:

$$G_m^-(s) = \frac{K_m}{1 + T_m s} \quad (5)$$

$$G_m^+(s) = e^{-L_m s} \quad (6)$$

El controlador $C_{IMC}(s)$ se obtiene mediante el inverso de la parte invertible del modelo matemático del proceso $G_m(s)$ conectado en serie con un filtro pasa bajo $F(s)$:

$$C_{IMC}(s) = \frac{1}{G_m^-(s)} F(s) \quad (7)$$

El filtro $F(s)$ se define como [37]:

$$F(s) = \frac{1}{1 + T_f s} \quad (8)$$

donde T_f representa a la constante de tiempo del filtro y constituye un parámetro de diseño del controlador. Cuanto menor sea el valor de T_f , más rápidamente responderá el sistema, pero puede producir respuestas oscilatorias que afectan la estabilidad del sistema de control.

La propiedad fraccionaria del controlador $C_{IMC}(s)$ se garantiza mediante la sustitución del filtro de orden entero $F(s)$ por el siguiente filtro de orden fraccionario $\hat{F}^\alpha(s)$ [47]:

$$\hat{F}^\alpha(s) = \frac{1}{1 + \lambda s^{\alpha+1}} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (9)$$

donde los parámetros de diseño del filtro λ y α se seleccionan para garantizar un margen de fase φ_m y una frecuencia de cruce de ganancia ω_c deseados.

Los parámetros de diseño del filtro λ y α se derivan mediante las siguientes expresiones [47]:

$$\alpha = \frac{\pi - \varphi_m}{\pi / 2} - 1 \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{1}{\omega_c^{\alpha+1}} \quad (11)$$

Considerando (9) de la expresión (7) se obtiene:

$$C_{IMC}(s) = \frac{1}{G_m^-(s)} \hat{F}^\alpha(s) \quad (12)$$

Para obtener el término invertible $G_m^-(s)$ se requiere reemplazar el retardo $e^{-L_m s}$ en el modelo matemático $G_m(s)$ del proceso mediante las aproximaciones de Padé y/o de Taylor [37].

Utilizando la aproximación de Padé de primer orden [30]:

$$e^{-L_m s} = \frac{1 - \frac{L_m}{2} s}{1 + \frac{L_m}{2} s} \quad (13)$$

el modelo de la planta $G_m(s)$ se representa como:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{1 + T_m s} e^{-L_m s} = \frac{K_m}{(1 + T_m s)} \frac{(1 - \frac{L_m}{2} s)}{(1 + \frac{L_m}{2} s)} \quad (14)$$

Definiendo en (14) los términos invertible y no invertible como:

$$G_m^-(s) = \frac{K_m}{(1 + T_m s)(1 + \frac{L_m}{2} s)} \quad (15)$$

$$G_m^+(s) = 1 - \frac{L_m}{2} s \quad (16)$$

de (12) se obtiene el controlador $C_{IMC}(s)$:

$$C_{IMC}(s) = \frac{(1 + T_m s)(1 + \frac{L_m}{2} s)}{K_m (1 + \lambda s^{\alpha+1})} \quad (17)$$

Sustituyendo (17) en la expresión del controlador equivalente (2) se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{L_m} s^\alpha} \frac{2T_m + L_m}{K_m L_m} \left(1 + \frac{1}{\frac{2T_m + L_m}{2} s} + \frac{T_m L_m}{2T_m + L_m} s \right) \quad (18)$$

Realizando las siguientes sustituciones:

$$K_C = \frac{2T_m + L_m}{K_m L_m} \quad (19)$$

$$T_I = \frac{2T_m + L_m}{2} \quad (20)$$

$$T_D = \frac{T_m L_m}{2T_m + L_m} \quad (21)$$

$$F^\alpha(s) = \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{L_m} s^\alpha} \quad (22)$$

de la expresión (18) se deriva el siguiente controlador equivalente:

$$C_{FPID}(s) = F^\alpha(s) K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (23)$$

Por consiguiente, mediante la aplicación de la aproximación de Padé de primer orden se obtiene un controlador PID en serie con un filtro de orden fraccionario (IMC-FPID).

Si se utiliza la aproximación de Taylor de primer orden [30]:

$$e^{-L_m s} = 1 - L_m s \quad (24)$$

el modelo de la planta $G_m(s)$ se representa aproximadamente como:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{1 + T_m s} e^{-L_m s} \approx \frac{K_m(1 - L_m s)}{(1 + T_m s)} \quad (25)$$

Definiendo los términos invertible y no invertible de (25) como:

$$G_m^-(s) = \frac{K_m}{(1 + T_m s)} \quad (26)$$

$$G_m^+(s) = 1 - L_m s \quad (27)$$

de (12) se obtiene el controlador $C_{IMC}(s)$:

$$C_{IMC}(s) = \frac{1 + T_m s}{K_m (1 + \lambda s^{\alpha+1})} \quad (28)$$

Sustituyendo (28) en la expresión (2) se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{L_m} s^\alpha} \frac{T_m}{K_m L_m} \left(1 + \frac{1}{T_m s} \right) \quad (29)$$

Realizando las siguientes sustituciones:

$$K_C = \frac{T_m}{K_m L_m} \quad (30)$$

$$T_I = T_m \quad (31)$$

$$F^\alpha(s) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{L_m} s^\alpha} \quad (32)$$

se deriva de (29) el siguiente controlador equivalente:

$$C_{FPI}(s) = F^\alpha(s) K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (33)$$

Consecuentemente, mediante la aplicación de la aproximación de Taylor de primer orden se obtiene un controlador PI en serie con un filtro de orden fraccionario (IMC-FPI).

Para el diseño de los controladores C_{FPID} y C_{FPI} se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones de diseño:

- especificación de margen de fase: $Arg(C(j\omega_c)P(j\omega_c)) = -\pi + \varphi_m$, donde $\varphi_m = 60^\circ$;
- especificación de frecuencia de cruce de ganancia: $|C(j\omega_c)P(j\omega_c)| = 1$, donde $\omega_c = 0.0013$ rad/s.

Utilizando las expresiones (10) y (11) se obtuvo: $\alpha = 0.3333$ y $\lambda = 6893.7$.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros de diseño de los controladores C_{FPID} y C_{FPI} obtenidos mediante las expresiones (19)-(22) y (30)-(32) respectivamente. La función de transferencia del filtro de orden fraccionario $F^\alpha(s)$ se desarrolló seleccionando la banda de frecuencia de 0.001 a 1000 rad/s y la aproximación de Oustaloup de orden 8.

Tabla 1
Parámetros de diseño de los controladores IMC-FPID, IMC-FPI e IMC-PID

Controlador	$F^\alpha(s)$	K_C	T_I	T_D
C_{FPI}	$1/(1+17.45 s^{0.333})$	3.76	1290	0
C_{FPID}	$1/(1+34.9 s^{0.333})$	8.68	1487.5	171.28
C_{PID}	$1/(1+16 s)$	8.11	1485	168.38

Con el objeto de realizar un análisis comparativo con otros controladores utilizados en la actividad práctica industrial se diseñó además un controlador IMC-PID convencional (C_{PID}) [37, 55]:

$$C_{PID}(s) = F(s)K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (34)$$

Los parámetros del controlador (34) se obtuvieron de las siguientes expresiones [46]:

$$K_C = \frac{T_m + 0.5 L_m}{K_m (T_f + 0.5 L_m)} \quad (35)$$

$$T_I = T_m + 0.5 L_m \quad (36)$$

$$T_D = \frac{T_m L_m}{2T_m + L_m} \quad (37)$$

Los valores obtenidos de los parámetros del controlador (34) considerando las expresiones (35)-(37) se muestran en la Tabla 1.

4.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 6 se exhiben los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control de la distribución de agua en el tramo del canal objeto de estudio con los controladores diseñados C_{FPID} (23) y C_{FPI} (33) frente a un paso en la referencia de nivel de 3.60 a 3.825 m. De dicha figura se observa que el sistema de control con el controlador C_{FPID} alcanza el nuevo valor de referencia (régimen de operación) sin sobre impulso y en un tiempo de establecimiento de 3000 s, mientras que con el controlador C_{FPI} se alcanza con sobre impulso y en un tiempo de establecimiento de 5000 s, lo que representa un tiempo de establecimiento 1.66 veces mayor. Estos resultados revelan la conveniencia de aplicar un controlador C_{FPID} para el control del proceso objeto de estudio debido a que permite alcanzar el nuevo régimen de operación con un mejor desempeño.

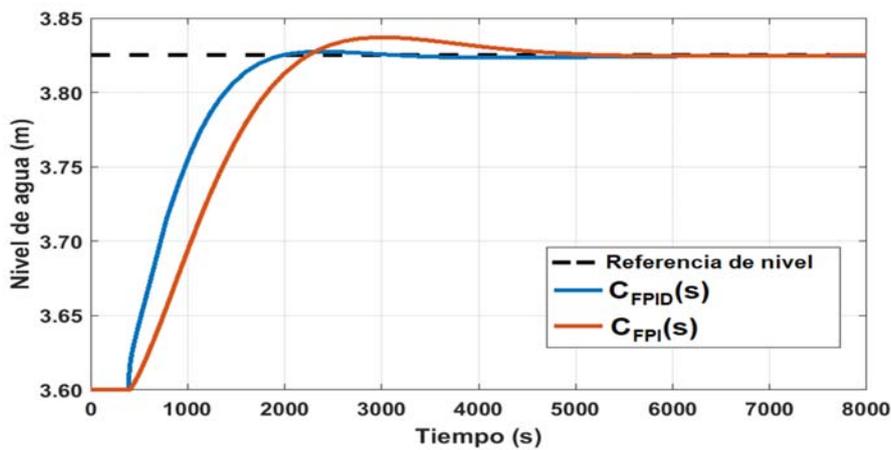


Figura 6

Respuestas temporales del sistema de control de la distribución de agua con controladores IMC-FPID e IMC-FPI frente a cambios en la señal de referencia.

En la Figura 7 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control de la distribución de agua en el tramo del canal objeto de estudio con los controladores diseñados C_{FPID} (23) y C_{PID} (34) frente a un paso en la referencia de nivel de 3.60 a 3.825 m.

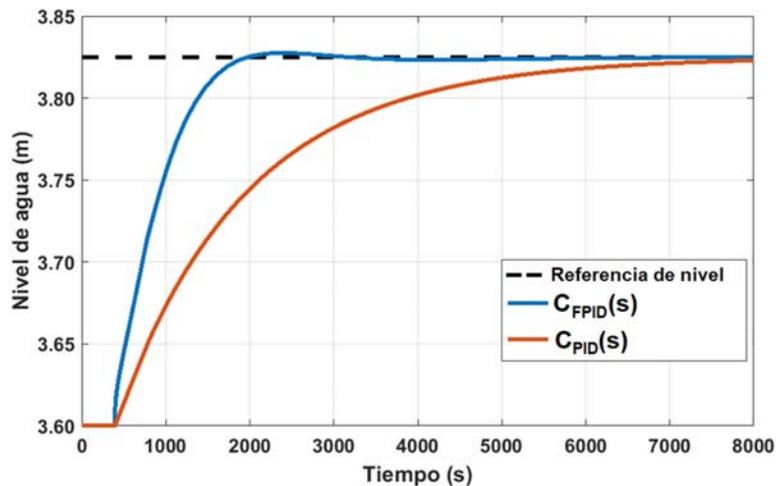


Figura 7

Respuestas temporales del sistema de control de la distribución de agua con controladores IMC-FPID e IMC-PID frente a cambios en la señal de referencia.

De dicha figura se observa que el sistema de control con el controlador C_{PID} alcanza el nuevo valor de referencia (régimen de operación) en un tiempo de establecimiento de 8000 s, mientras que con el controlador C_{FPID} se alcanza en un tiempo de establecimiento de 3000 s, lo que representa un tiempo de establecimiento 2.66 veces mayor.

De la Figura 8 es posible observar que en el instante de tiempo $t = 8000$ s se origina una perturbación externa $d(t)$ tipo escalón negativo debido a un incremento en la magnitud de apertura de la compuerta lateral del tramo de canal objeto de estudio (ver Figura 1) ocasionando una disminución del nivel de agua de 2.5 cm.

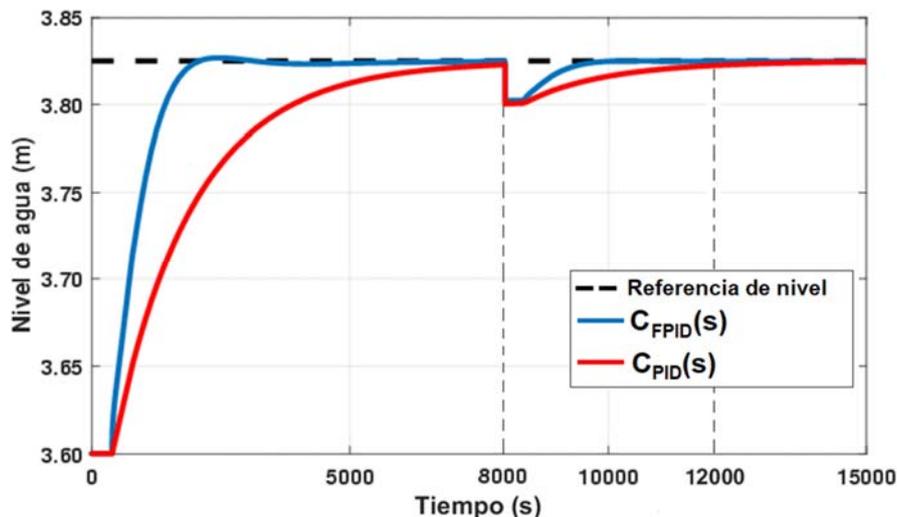


Figura 8

Respuestas temporales del sistema de control de la distribución de agua con controladores IMC-FPID e IMC-PID frente al efecto de perturbaciones externas.

De la Figura 8 se observa que con el controlador C_{FPID} se logra compensar el efecto negativo de dicha perturbación en un tiempo de 1800 s, mientras que con el controlador C_{PID} se compensa en un tiempo de 4000 s, es decir en un tiempo 2.22 veces mayor. Por consiguiente, la mejor respuesta del sistema de control frente al efecto de la perturbación externa se obtiene con el controlador C_{FPID} .

Para evaluar el desempeño de los controladores diseñados se utilizó el índice de desempeño de la integral del error absoluto (IAE) [30, 56]:

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |e(\sigma)| d\sigma \quad (38)$$

donde t_0 es el tiempo inicial y t_f es el tiempo en el que la respuesta del sistema entra en la banda del $\pm 2\%$ de error con respecto al valor de referencia.

En la Tabla 2 se exhiben los resultados comparativos del índice de desempeño IAE definido en (38) del sistema de control del proceso objeto de estudio con los controladores C_{FPID} y C_{PID} considerando el efecto de la perturbación externa $d(t)$. Nuevamente los resultados muestran que el mejor desempeño del sistema de control de la distribución de agua en el tramo de canal objeto de estudio se obtiene con el controlador C_{FPID} debido a que proporciona los valores más bajos del índice (38) y en consecuencia supera al controlador IMC-PID convencional en términos de desempeño y precisión.

Tabla 2
Índice de desempeño de los controladores IMC-FPID y IMC-PID

Controlador	IAE
C_{FPID}	5200
C_{PID}	7800

Por consiguiente, el controlador IMC-FPID posibilita obtener mejoras significativas en el desempeño del sistema de control de la distribución de agua en el tramo de canal objeto de estudio, lo cual implica satisfacer en el tiempo establecido las demandas hídricas de los diferentes usuarios durante los ciclos de riego, así como reducir las pérdidas de agua por concepto de operación.

5.- CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas se obtuvo un modelo matemático del comportamiento dinámico de la distribución de agua en el primer tramo del canal principal de riego Güira de Melena.

Usando el modelo matemático obtenido se realizó el diseño de un controlador IMC-FPID, de un controlador IMC-FPI, y de un controlador convencional IMC-PID para el control de la distribución de agua en el tramo del canal principal de riego objeto de estudio.

Los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control del proceso objeto de estudio con los controladores diseñados revelaron que el controlador IMC-FPID es el que posibilita obtener el mejor desempeño en el seguimiento de forma efectiva de las variaciones en la señal de referencia (régimen de operación), así como en el rechazo a los efectos negativos de las perturbaciones externas.

Los resultados de la evaluación comparativa del desempeño de los controladores IMC-FPID vs IMC-PID mediante el índice de la integral del error absoluto (IAE) mostraron que el mejor desempeño se obtiene con el controlador IMC-FPID.

Es importante destacar que en este trabajo se presentan las primeras experiencias relacionadas con el diseño de un controlador IMC-FPID para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego, el cual debido a su

precisión posibilita satisfacer en el tiempo establecido las demandas hídricas de los diferentes usuarios durante los ciclos de riego, así como reducir las pérdidas de agua por concepto de operación.

La siguiente etapa de nuestra investigación consiste en la implementación del controlador diseñado IMC-FPID en el primer tramo del canal principal de riego Güira de Melena.

REFERENCIAS

1. Al-Jawad JY, Alsa_ar HM, Bertram D, Kalin RM. A comprehensive optimum integrated water resources management approach for multidisciplinary water resources management problems. *Journal of Environmental Management*. 2019;239: 211–224.
2. Hernández-López Y, Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V. Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2020;41(2):80–97.
3. Afzal M, Battilani A, Solimando D, Ragab R. Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: field and modelling study. *Agricultural Water Management*. 2016;176(no. May.):40–54.
4. Jiang Y, Xiong L, Yao F, Xu Z. Optimizing regional irrigation water allocation for multi-stage pumping-water irrigation system based on multi-level optimization-coordination model. *Journal of Hydrology*. 2019;4(Article 100038).
5. Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano J, Pérez-Zuñiga G, Soto-Angles ME. Real-time implementation of an expert model predictive controller in a pilot-scale reverse osmosis plant for brackish and seawater desalination. *Applied Sciences*. 2019;9(2932).
6. Pedro-Monzonis M, Solera A, Ferrer J, Estrela T, Paredes-Arquiola J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*. 2015;527:482–493.
7. García Villanueva NH. Operación de canales: conceptos generales. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015.
8. Orojloo M, Hashemy Shahdany SM, Roozbahani A. Developing an integrated risk management framework for agricultural water conveyance and distribution systems within fuzzy decision making approaches. *Science of The Total Environment*. 2018;627:1363–1376.
9. Rivas-Perez R. 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; 1984. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Raul_Rivas-Perez/publications?Sorting=newest&page=12.
10. Fu, Q, Liu Y, Li T, Liu D, Cui S. Analysis of irrigation water use efficiency based on the chaos features of a rainfall time series. *Water Resources Management*. 2017;31:1961–1973.
11. Hashemy Shahdany SM, Hasani Y, Majidi Y, Maestre JM. Modern operation of main irrigation canals suffering from water scarcity based on an economic perspective. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(3).
12. Diaz Duque JA. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2018;39(2):46–59.
13. Hashemy Shahdany SM, Taghvaeian S, Maestre JM, Firoozfar AR. Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;163(104862).
14. Rivas-Perez R. Synthesis of optimal stationary automatic control systems of water distribution in main irrigation canal by means of time delay compensation. *Land Reclamation and Water Management*. 1991;74:77–82.
15. Bolea Y, Puig V. Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal system. *ISA Transactions*. 2016;63:274–280.
16. San-Millan A, Feliu-Talegón D, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. On the modelling and control of a laboratory prototype of a hydraulic canal based on a TITO fractional-order model. *Entropy*. 2017;19(401).
17. Cen L, Wu Z, Chen X, Zou Y, Zhang S. On modeling and constrained model predictive control of open irrigation canals. *Journal of Control Science and Engineering*. 2017;Article ID 6257074.
18. Nguyen LDL, Prodan I, Lefevre L, Genon-Catalot D. Distributed model predictive control of irrigation systems using cooperative controllers. *IFAC PapersOnLine*. 2017;50(1):6564–6569.
19. Kovalienko PI, Matzeliuk EM, Rivas-Perez R. Adaptive control of water distribution in main irrigation canals with variable time delay. *Scientific Researches in Hydrotechnique and Land Reclamation*. 1990;32–40.

20. Cen L, Wu Z, Chen X, Zou Y, Zhang S. On modeling and constrained model predictive control of open irrigation canals. *Journal of Control Science and Engineering*. 2017; Article ID 6257074.
21. Zheng Z, Wang Z, Zhao J, Zheng H. Constrained model predictive control algorithm for cascaded irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2019;45(6).
22. Hernandez-Lopez Y, Rivas-Perez R, Lorenzo Galván G. Robust proportional integral control of water level in an irrigation main canal. *Revista Cubana de Ingeniería*. 2015;6(2):25–34.
23. Cueto W, Rivas R. Sistema de control basado en autómatas programables de la red de distribución de agua potable Troncoso. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2003;24(2):6–14.
24. Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Synthesis of adaptive control systems of water distribution in main irrigation canals. *Land Reclamation and Water Management*. 1989;70:66–70.
25. Chow VT. *Open-channel hydraulics*. New Jersey, USA: The Blackburn Press; 2015.
26. Calderon Mendoza EM, Rivas Perez R, Sotomayor Moriano JJ. Design of neuro-fuzzy controller for control of water distribution in an irrigation main canal. *IEEE Latin America Transactions*. 2016;14(2):471–476.
27. Zhang S, Wang M, Shi W, Zheng W. Construction of intelligent water saving irrigation control system based on water balanced. *IFAC PapersOnLine*. 2018;51-17:466–471.
28. Mendes WR, Araújo FMU, Duttac R, Heeren DM. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Systems with Applications*. 2019;124:13–24.
29. Kao TG, Nguen M, Rivas-Perez R. Adaptive control of a delay plant by using a nonsearching self-adjusting systems with a model. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1988;12:106–116.
30. Astrom K, Hagglund T. *Control PID avanzado*. Madrid, España: Pearson Educación; 2009.
31. Rodriguez Vasquez JR, Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano JJ. Advanced control system of the steam pressure in a fire-tube boiler. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008;41(2):11028-11033.
32. Quiñones-Grueiro M, Verde C, Llanes Santiago O. Features of demand patterns for leak detection in water distribution networks. *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. 2017;171–189.
33. Quiñones-Grueiro M, Verde C, Llanes Santiago O. Demand model in water distribution networks for fault detection. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3263–3268.
34. Zeng W, Zhu W, Hui T, Chen L, Xie J, Yu T. An IMC-PID controller with particle swarm optimization algorithm for MSBR core power control. *Nuclear Engineering and Design*. 2020;360(Article 110513).
35. Li P, Zhu G. IMC-based PID control of servo motors with extended state observer. *Mechatronics*. 2019;62 (Article 102252).
36. Pachauri N, Rani A, Singh V. Bioreactor temperature control using modified fractional order IMC-PID for ethanol production. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017;122:97–112.
37. Morari M, Zafirov E. *Robust process control*. New Jersey, USA: Prentice-Hall; 1989.
38. Rivas-Perez R, Cao TG, Franco Parellada C. Análisis de la estabilidad asintótica de sistemas no lineales con retardo de tiempo en el control. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1986;7(4):294–297.
39. Calderon-Valdez SN, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Fractional-order mathematical model of an irrigation main canal pool. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2015;13(3):0212.
40. Feliu-Batlle V, Feliu-Talegón D, San-Millan A, Rivas-Perez R. Wiener-Hopf optimal control of a hydraulic canal prototype with fractional order dynamics. *ISA Transactions*. 2018;82:130–144.
41. Barbosa de Oliveira J, Pinho TM, Coelho JP, Boaventura-Cunha J, Moura Oliveira P. Optimized fractional order sliding mode controller for water level in irrigation canal pool. *IFAC-Papers On Line*. 2017;50(1):7663–7668.
42. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Sánchez Rodríguez L, Castillo Garcia FJ, Linares Sáez A. Desarrollo de una nueva familia de controladores de orden fraccionario (FOC) para el control robusto de procesos productivos con comportamientos dinámicos difíciles e inciertos. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. 2018;8(1):1–11.
43. Gharab S, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. A fractional-order partially non-linear model of a laboratory prototype of hydraulic canal system. *Entropy*. 2019;21(309).
44. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Sanchez-Rodriguez L, Castillo-García FJ, Linares Saez A. Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008;41(2): 15535–15540.
45. Castillo Garcia F, Rivas-Perez R, Feliu Batlle V. Fractional $I\alpha$ controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008;41(2):14558–14563.
46. Lakshmanprabu SK, Banu US, Hemavathy PR. Fractional order IMC based PID controller using novel bat optimization algorithm for TITO process. *Energy Procedia*. 2017;117:1125–1133.
47. Maâmar B, Rachid M. IMC-PID-fractional-order-filter controllers design for integer order systems. *ISA Transactions*. 2014;53(5):1620–1628.
48. Cuenca Tinitana JC, Rivas-Perez R. Predictive controller design for water distribution in an irrigation main canal. 13th

- Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering, XIII CHLIE. Valencia; Spain; 2013.
49. Cuenca-Tinitana J, Rivas-Perez R. 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;119–130.
 50. Cuenca Tinitana JC, Rivas-Perez R. Diseño de un controlador predictivo para la distribución de agua en un canal magistral de riego. X Simposio Internacional de Automatización, XIV Convención y Feria Internacional, Informática'2011. La Habana; Cuba; 2011.
 51. Aguilar JV, Langarita P, Rodellar J, Linares L, Horváth K. Predictive control of irrigation canals – robust design and real-time implementation. *Water Resource Management*. 2016;30:3829–3843.
 52. Xu M. Model predictive control of an irrigation canal using dynamic target trajectory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(3).
 53. Ljung L. System identification. Theory for the user. NJ, USA: Prentice-Hall: Upper Saddle River; 1999.
 54. Hernández Y, Feliu V, Rivas R. Artificial neural network based system identification of an irrigation main canal pool. *IEEE Latin America Transactions*. 2017;15(9):1595–1600.
 55. Kumar DS, Sree RP. Tuning of IMC based PID controllers for integrating systems with time delay. *ISA Transactions*. 2016;63:242–255.
 56. Li D, Liu L, Jin Q, Hirasawa K. Maximum sensitivity based fractional IMC–PID controller design for non-integer order system with time delay. *Journal of Process Control*. 2015;31:17–29.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución. Las opiniones expresadas en este artículo son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Ybrain Hernández López: contribución en la revisión bibliográfica, diseño del controlador y análisis de resultados. Redacción del borrador del artículo y de su versión final.

Raúl Rivas Pérez: contribución en la revisión bibliográfica y en el análisis de los resultados. Participación en la redacción del borrador del artículo. Revisión crítica de la versión final y su aprobación.

Vicente Feliu Battle: contribución en el análisis de los resultados. Revisión crítica del borrador del artículo y aprobación de la versión final.

AUTORES

Ybrain Hernández López, Ingeniero en Automática, Máster en Informática Industrial y Automatización, Departamento de Automática y Computación, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba, ybra@automatica.cujae.edu.cu. No ORCID: 0000-0002-2460-0786. Sus intereses de investigación incluyen: identificación de sistemas, redes neuronales artificiales, modelado y control inteligente de canales de riego.

Raúl Rivas Pérez, Ingeniero en Automática y Telemática, Doctor en Ciencias (D.Sc), Departamento de Automática y Computación, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba, rivas@automatica.cujae.edu.cu. No ORCID: 0000-0002-4639-4274. Sus intereses de investigación incluyen: identificación robusta de sistemas dinámicos con grandes incertidumbres, control de procesos, control avanzado, dinámica y control de orden fraccional, control de plantas con retardos dominantes, control robusto de plantas con dinámicas inciertas y caóticas.

Vicente Feliu Battle, Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla La-Mancha, Ciudad Real, España, vicente.feliu@uclm.es. No ORCID: 0000-0002-3578-7910. Sus intereses de investigación incluyen: control multivariable, control digital, dinámica y control de orden fraccional, cinemática, dinámica y control de robots rígidos y flexibles, visión por computadora de robots.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)