

# Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos

*Ybrain Hernández-López, Raúl Rivas-Pérez, Vicente Feliu-Batlle*

## RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se desarrolla una revisión del estado del arte de las estrategias de control utilizadas para la distribución de agua en los sistemas de riego, orientadas a aumentar la operatividad de estos sistemas, así como a disminuir las pérdidas de agua por concepto de operación. Se muestran los avances históricos de esta clase de sistemas de control. Finalmente, se ofrecen algunos de los desafíos de la comunidad científica internacional para continuar mejorando las prestaciones y el desempeño de los controladores utilizados en los sistemas de riego.

Palabras claves: Sistemas de riego, distribución de agua, control automático, canales de riego, retardo de tiempo dominante.

*In this paper, a review of the state of the art of the control strategies used for the water distribution control in irrigation systems is developed, aimed at increasing the operability of these systems, as well as reducing water losses due to operation. The historical advances of this kind of control systems are shown. Finally, some of the challenges of the international scientific community are offered to continue improving the capability and performance of the controllers used in irrigation systems.*

*Key words: Irrigation systems, water distribution, automatic control, irrigation canals, dominant time delay*

*Automatic control of water distribution in irrigation systems: review and challenges*

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la escasez de agua potable en los diferentes continentes de nuestro planeta crece progresivamente debido a los significativos aumentos en la demanda de agua de la agricultura, de la industria, y del sector doméstico, por consiguiente, la gestión eficiente de los recursos hídricos existentes constituye un gran reto para los científicos, académicos, políticos, así como para la sociedad en general [1, 2].

La principal característica de los recursos hídricos del planeta consiste en que se encuentran desigualmente repartidos, tanto espacial como temporalmente [3]. Esto implica la existencia de cuencas y áreas geográficas con carencias de agua, debido tanto a su escasez física, como a la inexistencia de suficientes infraestructuras que viabilicen la satisfacción de las demandas hídricas [4].

En diversas regiones del planeta se sobreexplotan los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, originando fuertes impactos medioambientales [5]. Por otro lado, los volúmenes utilizables de agua potable en el planeta están disminuyendo como resultado del cambio climático, el cual está provocando el deshielo de los glaciares, y la disminución del caudal de los ríos, lagos, manantiales y pantanos [6]. Una parte importante de los recursos hidráulicos disponibles en el planeta está contaminada y/o salinizada, y por consiguiente no puede ser utilizada en el consumo humano, industrial y/o agrícola [2]. Consecuentemente, el equilibrio hidrológico que posibilita el suministro suficiente de agua a los sectores industrial, agrícola, comercial y doméstico solo se puede obtener mediante la gestión eficiente de los recursos hidráulicos disponibles [7].

Los resultados de los estudios realizados en diversos países entre los que se encuentran España, Francia, Estados Unidos, Holanda, Rusia, China, Japón, etc. muestran que controlar los caudales de agua potable, disminuir sus escurrimientos hacia el mar, almacenarlos en represas, distribuirlos, así como impedir su contaminación, constituye una labor que demanda grandes

Recibido: 10/3/2020

Aceptado: 11/5/2020

desafíos e inversiones y cuya solución resulta imposible de lograr sin la aplicación de las herramientas y de las tecnologías del control automático [8].

El uso de diferentes técnicas de riego en la agricultura ha posibilitado un significativo aumento de las producciones agrícolas [9]. Por consiguiente, el 70% de los recursos hidráulicos disponibles del planeta se utilizan en los sistemas de riego para el suministro de agua a los cultivos [10].

El riego contribuye decisivamente en la reducción del impacto de las variaciones climatológicas sobre los cultivos, por lo que la explotación eficiente de los sistemas de riego tiene una significativa importancia, fundamentalmente para los países en vía de desarrollo, en los que la producción de alimentos representa un objetivo prioritario [11]. Sin embargo, mientras en los sistemas de riego de los países altamente desarrollados se logra una alta eficiencia, en otros países en vía de desarrollo esta eficiencia se encuentra por debajo de las posibilidades reales debido a la operación manual de la distribución de agua en dichos sistemas, la cual conlleva al despilfarro, así como a grandes pérdidas tecnológicas de este importante recurso [12]. Por ejemplo, dos tercios del agua disponible se pierden durante su conducción a través de los canales a las áreas bajo riego y por consiguiente no se utilizan propiamente en el crecimiento de los cultivos. La eficiencia típica de los sistemas de riego es del 30 al 40% [13]. Por lo que el principal problema de los sistemas de riego no radica únicamente en la elevada demanda de agua, sino además en la baja eficiencia de los procesos de conducción y distribución del agua [14–16].

Los recursos hídricos disponibles en Cuba son limitados, con un potencial hídrico ascendente a 38,1 km<sup>3</sup>, de los cuales 31,6 km<sup>3</sup> (83 %) corresponden a las aguas superficiales y 6,5 km<sup>3</sup> (17 %) a las aguas subterráneas [16, 17]. De este potencial solo son aprovechables 24 km<sup>3</sup> [16, 17]. La media nacional de agua por persona al año de 1 220 m<sup>3</sup> sitúa a Cuba dentro de los países con un nivel de estrés hídrico moderado [17].

Entre los principales problemas relacionados con la gestión sostenible del agua en Cuba se encuentran: 1) el bajo volumen de agua disponible por habitante al año; 2) el reducido índice de reposición anual de los recursos hídricos ascendente a 13.7 %; 3) la baja eficiencia en el uso del agua; y 4) las enormes pérdidas en las redes de distribución y consumo [16, 17]. Por consiguiente, el agua constituye para Cuba el principal reto ambiental para garantizar su sostenibilidad en el desarrollo, así como su seguridad ambiental y alimentaria [16, 17].

En Cuba las precipitaciones durante el período seco del año no son suficientes para obtener un desarrollo adecuado de la mayor parte de los cultivos [16]. Este período seco coincide con los ciclos completos de diversos cultivos necesarios para el país, entre los que se encuentran el arroz, la papa, el tabaco y las hortalizas, así como con el inicio y finalización de otros cultivos, por lo cual el riego resulta imprescindible [17].

La superficie bajo riego de Cuba se estima en 2 733 500 ha [18]. En las superficies bajo riego existentes se originan grandes demandas de agua que conducen a escenarios caóticos, en los que no se dispone de la cantidad suficiente de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos [19]. Consecuentemente, un incremento en la superficie regable del país sólo es posible con el aumento de la eficiencia de los sistemas de riego existentes [19].

Cuba dispone 788 km de canales magistrales conectados a 239 presas con una capacidad total de embalse de 8 784 millones de m<sup>3</sup>, a esta infraestructura se agregan 805 micro-presas que en su conjunto embalsan más de 600 millones de m<sup>3</sup> de agua [20]. La presa Zaza constituye el mayor embalse del país con una capacidad de almacenamiento de 1020 millones de m<sup>3</sup> [20]. El canal magistral Zaza Ciego de Ávila es uno de los más grandes del país y se caracteriza por presentar: extensión de 44.5 km, caudal variable entre 33.0 y 23.0 m<sup>3</sup>/s en toda su extensión, pendiente total de 0.07 m/km, alto total variable entre 4.80 y 3.87 m, nivel del agua variable entre 4.30 y 3.35 m y sección transversal trapezoidal con ancho del plato variable entre 6.0 y 3.20 m [20]. En la Figura 1 se muestra una imagen aérea de este canal, en la cual es posible observar su gran extensión y deducir su complejidad dinámica.

En Cuba se utilizan técnicas de riego por superficie, por aspersión y riego localizado [18, 21]. Los grandes sistemas de riego se concentran en el riego por superficie debido a que el arroz es el cultivo con mayor área bajo riego y se riega mediante esta técnica [15, 19].

Entre las prioridades para la gestión sostenible del agua de la Política Nacional del Agua en Cuba, elaborada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos con la contribución de todas las instituciones y usuarios del agua se encuentran: 1) el uso racional y productivo de los recursos hidráulicos disponibles; 2) la gestión y utilización eficientes de la infraestructura construida (canales, sistemas de riego, terrazas planas arroceras, etc.) [17]. Estas prioridades no pueden ser satisfechas sin la aplicación de las nuevas tecnologías y herramientas disponibles para la operación efectiva de los sistemas de riego [13, 15, 16].



**Figura 1**

**Tramo del canal magistral Zaza-Ciego de Ávila.**

Los canales principales de riego constituyen los elementos más importantes de los sistemas de riego [22]. Estos canales se diseñan y construyen para conducir el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los diferentes puntos de derivación o de entregas (canales secundarios), de forma tal que el agua llegue con la operatividad y cantidad requeridas para satisfacer las necesidades hídricas de los diferentes usuarios y cultivos que demandan este recurso y que se encuentran en el área de dominio de los sistemas de riego [13, 15, 22].

Generalmente, los canales de riego se encuentran sobredimensionados, por lo que la operación tradicional de la distribución de agua ocasiona que se generen grandes pérdidas debido a que los excedentes en el agua demandada no pueden ser reutilizados, originando pérdidas significativas en las colas de los canales [22]. Actualmente, el control de la distribución de agua en los canales de riego se realiza manualmente o mediante controladores automáticos [23, 24].

El control manual de la distribución de agua se caracteriza por su baja eficiencia [13, 15], debido a que se sobredimensionan las entregas para impedir que eventos imprevistos no posibiliten satisfacer las demandas de los usuarios, por lo que el sobredimensionamiento conlleva al uso ineficiente de los recursos hidráulicos [22].

Bajo el término de control manual se incluye el control remoto de las magnitudes de aperturas de las compuertas desarrollado por los operadores mediante equipos electrónicos [25, 26].

La práctica mundial demuestra que una solución viable de la problemática relacionada con el aumento de la eficiencia de los sistemas de riego consiste en la automatización de la distribución de agua en los canales principales, la cual posibilita elevar la operatividad de estos sistemas, así como reducir el consumo de energía eléctrica al posibilitar una adecuada correspondencia entre las demandas y las entregas de agua [13, 23, 25].

En los últimos años la aplicación del control automático en la distribución de agua en los canales principales de riego ha aumentado significativamente y representa un campo de investigación con elevada atención en el ámbito internacional, existiendo diversos canales en diferentes países que se encuentran totalmente automatizados, ver por ejemplo [11, 13, 14, 22]. Sin embargo, es necesario señalar que las investigaciones destinadas a lograr un control automático efectivo de la distribución de agua en dichos canales no han sido suficientemente impulsadas y financiadas a pesar la importancia de esta problemática [27]. Ello se debe a que en esta dirección existen muchos problemas teóricos y prácticos aún no resueltos [13, 22, 28].

Las exigencias constantemente crecientes sobre el desempeño de los sistemas de control de la distribución de agua en los canales de riego fundamentan la búsqueda de nuevos y efectivos métodos y algoritmos de control de dichos procesos [29].

Por consiguiente, en la actualidad la ciencia y la tecnología tienen el reto de desarrollar e implementar mejores y más efectivas soluciones en el campo del control de la distribución de agua en los canales principales como respuesta a la creciente demanda de agua de la agricultura, de la industria y de la sociedad en general [13, 22, 26].

El presente trabajo tiene como objetivos fundamentales: 1) realizar una revisión de las diferentes estrategias desarrolladas de control automático de la distribución de agua en los canales de riego; 2) analizar el desempeño de dichas estrategias orientadas al aumento de la eficiencia y operatividad de la distribución de agua en los sistemas de riego; 3) analizar los retos actuales del control automático de esta clase de sistemas dinámicos complejos.

Este trabajo ha sido organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se presentan las diferentes estrategias desarrolladas para el control efectivo de la distribución de agua en los sistemas de riego. En la Sección 3 se ofrecen algunos de los retos actuales de la comunidad científica para mejorar el desempeño de los controladores de la distribución de agua. Finalmente, en la Sección 4 se ofrecen las conclusiones.

## 2. CONTROL AUTOMÁTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN LOS CANALES PRINCIPALES DE RIEGO

Para el diseño de sistemas efectivos de control automático se requiere de modelos matemáticos que describan de forma adecuada el comportamiento dinámico de los procesos a controlar [30–32]. Desde la perspectiva del comportamiento dinámico, los canales principales de riego se consideran procesos con dinámicas complejas debido a que se caracterizan por presentar no linealidades, grandes retardos de tiempo, parámetros dinámicos variantes en el tiempo y dependientes del entorno, fuertes interacciones entre sus diferentes variables, etc. [11, 13, 22].

Los resultados de las investigaciones desarrolladas sobre el comportamiento dinámico de los canales de riego muestran, que la dinámica de estos procesos se describe mediante el sistema de ecuaciones no lineales de Saint-Venant, el cual está compuesto por dos conjuntos de ecuaciones (la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento o momentum), las cuales son no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas y con restricciones complejas [33].

La ecuación de continuidad tiene en cuenta un balance de masa sobre un volumen de control y en forma conservativa se representa en términos del caudal ( $Q$ ) y del área ( $A$ ) mediante la expresión [34]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

donde  $x$  es la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua y  $t$  es el tiempo.

La ecuación de cantidad de movimiento surge al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control como la gravedad, la presión, la fricción, el viento, entre otras. En forma no conservativa esta ecuación puede escribirse en términos de la velocidad media longitudinal ( $v$ ) [35]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

donde  $y$  es la profundidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $S_0$  es la pendiente del canal y  $S_f$  es la pendiente de fricción.

Existen diferentes métodos de solución de estas ecuaciones [36–38], sin embargo, lo común de todos ellos son las grandes dificultades matemáticas que presentan y su orientación hacia el análisis de las respuestas temporales y de los regímenes estacionarios de trabajo de los canales [39], por lo que han encontrado muy poca aplicación en el diseño de los sistemas de control de esta clase de procesos [40].

En los últimos años se vienen aplicando con resultados satisfactorios los procedimientos y herramientas de la identificación de sistemas [41, 42] para la obtención de modelos matemáticos adecuados del comportamiento dinámico de los canales de riego, ver por ejemplo [43–53].

La identificación de sistemas constituye un área importante de la teoría del control, que posibilita la construcción de modelos matemáticos de procesos tecnológicos con comportamientos 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 [41, 42].

Los modelos obtenidos mediante la aplicación de las herramientas de la identificación de sistemas han encontrado una amplia aplicación en el diseño de sistemas efectivos de control de la distribución de agua en canales principales de riego, ver por ejemplo [54–56].

Los canales de riego deben ser operados adecuadamente para que puedan desempeñar sus funciones de manera eficiente, es decir, las estructuras de control deben manipularse de tal manera que los usuarios reciban los volúmenes de agua demandados en el menor tiempo posible [11, 13].

En la actualidad, el control efectivo de la distribución de agua en los canales de riego representa un reto para la comunidad científica, ver por ejemplo [13, 54, 56].

Los objetivos fundamentales del control de la distribución de agua consisten en regular los niveles y/o caudales de agua mediante la manipulación de las compuertas transversales de los diferentes tramos de los canales para satisfacer, a pesar de las incertidumbres, las demandas de agua de los diferentes usuarios, garantizando que los volúmenes de agua extraídos desde la fuente de abasto se correspondan con las necesidades reales, así como minimizar las pérdidas por concepto de operación, y

además evitar roturas y desbordamientos de los canales [13, 24, 56].

Las necesidades hídricas de los usuarios de los sistemas de riego normalmente se definen en términos de caudales [11, 13, 22]. No obstante, controlar caudales en los canales de riego no resulta una tarea simple [26], lo cual ha motivado el control de otras variables de menor complejidad, por ejemplo los niveles de agua en los diferentes tramos de los canales [57–59].

El control de nivel en un tramo de un canal de riego se realiza mediante alguno de los siguientes métodos: aguas arriba, aguas abajo, aguas abajo alejado, mixto, y BIVAL (volumen constante) [11, 13, 22]. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas [13, 24].

En la Figura 2 se exhibe un diagrama de un canal principal de riego controlado mediante el método aguas abajo con sensor alejado [13, 60–62], donde  $Q_i(t)$ ,  $u_i(t)$ ,  $H_i(t)$ , y  $q_i(t)$  son los caudales, las magnitudes de aberturas de las compuertas, los niveles y las descargas laterales de cada  $i$  tramo del canal respectivamente.

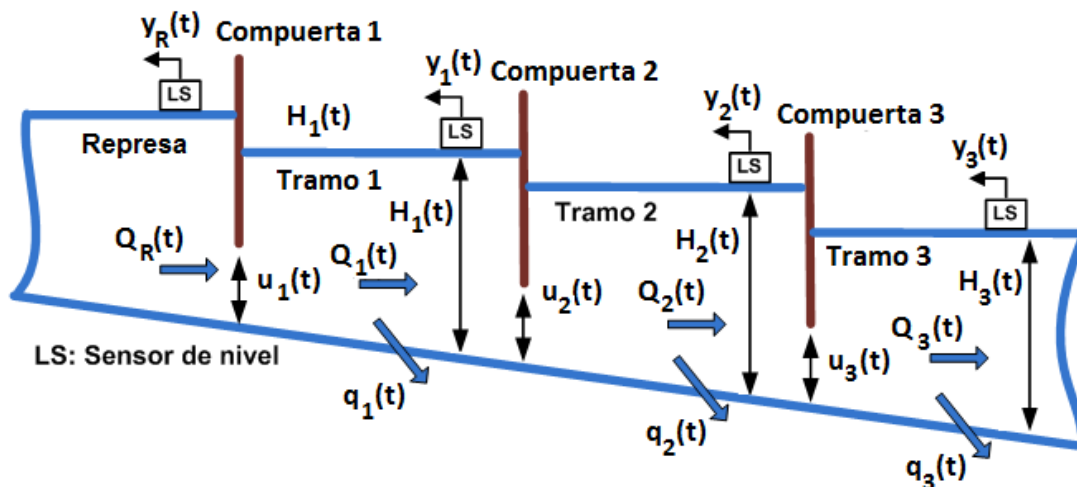


Figura 2

Diagrama de un canal principal de riego.

Usualmente, las variables de control son las magnitudes de aberturas de las compuertas, los incrementos de las magnitudes de aberturas de las compuertas, los caudales o los incrementos de los caudales [24, 26]. Las magnitudes de aberturas de las compuertas o sus incrementos posibilitan considerar la compleja dinámica de las compuertas, así como los niveles aguas arriba y aguas abajo de éstas [11, 13]. Los caudales permiten desacoplar el sistema en subsistemas, lo cual es importante cuando se utilizan controladores locales monovariables, pero en este caso no se considera la dinámica de las compuertas, por lo que el desempeño global del sistema no se garantiza [26]. En la Figura 3 se muestra una imagen de las compuertas de descarga de la presa Zaza al primer tramo del canal magistral Zaza-Ciego de Ávila.

En términos generales, el problema de la automatización de los canales de riego es muy complejo, por lo que la comunidad científica ha desarrollado importantes estudios para lograr soluciones satisfactorias, ver por ejemplo [12, 23, 25, 63–65].

Los trabajos de automatización de la distribución de agua en los canales principales de riego comenzaron unos años antes de la década de 1950 y se caracterizaron por el uso de compuertas de accionamiento hidráulico [11], las cuales aún se utilizan en diversos canales de diferentes regiones del planeta, a pesar de su baja eficiencia [13]. En la Figura 4 se muestra una imagen de esta clase de compuertas. Posteriormente, se desarrollaron controladores electrónicos para cada tramo del canal (control descentralizado) [13, 22].

Los controladores *PID* han sido y son los más utilizados y expandidos en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego, ver por ejemplo [11, 13, 22, 24, 27, 29, 57, 64–76]. Sin embargo, cuando los procesos presentan comportamientos dinámicos complejos, el desempeño de los controladores *PID* no resulta suficiente [77–80], y como resultado no se obtiene un control efectivo de la distribución del agua [12, 13, 23]. Consecuentemente, han sido propuestos y desarrollados otras clases de controladores para intentar solucionar este complejo problema.



**Figura 3**

**Compuertas aguas arriba (descarga de la presa) del canal magistral Zaza-Ciego de Ávila.**



**Figura 4**

**Compuertas de accionamiento hidráulico de un tramo de canal magistral de riego.**

Para el control de procesos con retardo de tiempo dominante uno de los controladores más utilizados es el predictor de Smith y sus diferentes modificaciones, ver por ejemplo [81–92]. La principal ventaja de este controlador consiste en que elimina el retardo de tiempo de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado, es decir excluye al proceso con retardo de tiempo del lazo de control [88]. De este modo, el problema de diseño y análisis de sistemas de control de procesos con retardo de tiempo se realiza como si no existiera dicho retardo [89]. Por consiguiente, el control basado en predictor de Smith ha sido propuesto para el control de la distribución de agua en los canales magistrales de riego, ver por ejemplo [93–95]. No obstante, es bien sabido que pequeños errores de modelado pueden causar inestabilidad en los sistemas de control basados en

el predictor Smith si el controlador no está correctamente diseñado [88]. Además, el desempeño de esta clase de controladores frente a los efectos de perturbaciones medibles y no medibles, así como de incertidumbres dinámicas es insuficiente [89].

El control centralizado basado en PC (computadora personal) de la distribución de agua en canales magistrales de riego también ha sido propuesto, ver por ejemplo [63, 96–102]. Sin embargo, los resultados obtenidos de la aplicación de este tipo de estrategia de control en diferentes canales no han sido satisfactorios debido al complejo comportamiento dinámico de los canales de riego y a la baja robustez de dicha estrategia de control.

El control óptimo desarrollado en la segunda mitad del siglo XX y aplicado fundamentalmente en el control de naves espaciales [103, 104] ha sido sugerido para el control de la distribución de agua en los canales de riego, ver por ejemplo [105–112]. Esta estrategia de control generalmente requiere de un modelo del proceso en variables de estados obtenido analíticamente o mediante identificación de sistemas [103]. La retroalimentación que se emplea es una retroalimentación de estados estimados y se requiere el uso de un estimador de estados (filtro de Kalman) para obtener los estados estimados de la planta a controlar [103]. No obstante, debido a las serias dificultades dinámicas que presentan los canales de riego los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta estrategia de control no han sido satisfactorios.

Los estudios desarrollados por algunos investigadores han demostrado que los parámetros dinámicos de diferentes canales principales de riego experimentan variaciones cuando sus regímenes de descargas varían en el intervalo de operación  $[Q_{\min}, Q_{\max}]$  y/o otros parámetros hidráulicos cambian [51, 70]. Esta clase de canales se conoce como canales con parámetros dinámicos variantes en el tiempo [51, 52]. Por consiguiente, cualquier controlador que se diseñe debe ser adaptativo o comportarse de forma robusta frente a esta clase de variaciones.

El control adaptativo desarrollado en la segunda mitad del siglo XX [113, 114] ha sido propuesto para el control de la distribución de agua en los canales de riego, ver por ejemplo [115–125]. Sin embargo, debido a la complejidad dinámica de los canales de riego los resultados conseguidos no siempre han sido satisfactorios.

Los controladores predictivos basados en modelos (*CPBM*) [126, 127] también han sido sugeridos para el control de la distribución de agua en los canales principales de riego, ver por ejemplo [128–141]. Estos controladores están basados en el uso de un modelo dinámico interno del proceso de distribución de agua (generalmente lineal) para predecir la salida del proceso en instantes futuros de tiempo, así como en el cálculo de las señales de control futuras minimizando un cierto criterio  $J$  para mantener al proceso lo más cerca posible de la trayectoria de referencia interna  $r(t+k)$  [126]. Este criterio usualmente considera una función cuadrática del error entre la salida predicha por el modelo y la trayectoria de referencia interna, e incluye además el esfuerzo de control [127]. Sin embargo, la solución explícita solamente se puede obtener cuando el criterio es cuadrático y el modelo es lineal, en caso contrario se requiere utilizar métodos numéricos para encontrar la solución [126]. Además, cuando los procesos 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 de los *CPBM* [2, 127]. Por otro lado, la implementación práctica los *CPBM* 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 [126], además se requiere una alta preparación del personal de operación, lo cual limita su aplicación en los canales de riego.

La robustez ha sido una característica no considerada durante mucho tiempo como parte integrante de los aspectos a contemplar en el diseño de los controladores de la distribución de agua en los canales de riego, debido a la complejidad matemática de esta formulación [13]. Los controladores  $H_2$  y  $H_\infty$  igualmente han sido propuestos para el control de la distribución de agua en los canales de riego, ver por ejemplo [51, 142–144]. En particular, la teoría  $H_\infty$  permite incorporar requerimientos de robustez, atenuación a las perturbaciones e incertidumbres dinámicas, así como mejorar el desempeño de los controladores [145]. Sin embargo, las complejidades matemáticas del diseño de esta clase de controladores son elevadas, se requiere de modelos matemáticos de la distribución de agua razonablemente adecuados, así como una elevada preparación del personal de operación.

En los últimos años, como resultado de una mejor comprensión del cálculo fraccional y de la salida al mercado de nuevos circuitos electrónicos conocidos como fractales, los operadores de orden fraccional han sido aplicados con resultados satisfactorios en el modelado y control de procesos con comportamiento dinámico complejo, entre los que se encuentran los procesos con parámetros distribuidos, ver por ejemplo [146–150]. El cálculo fraccional representa al campo de la matemática que involucra a derivadas e integrales de orden no entero (arbitrario), y constituye una generalización de los conceptos estándar de diferenciación e integración [146]. Recientemente, para el control de la distribución de agua en los canales principales de riego algunos investigadores han propuesto el uso de controladores de orden fraccional conocidos como

$PI^\alpha D^\lambda$ , donde  $\alpha$  y  $\lambda$  constituyen los órdenes no necesariamente enteros de los operadores de integración y derivación, ver por ejemplo [151–171]. Una de las ventajas de esta clase de controladores consiste en que posibilitan el diseño de sistemas de control robusto de procesos, cuyos parámetros dinámicos presentan un amplio rango de variación, o de procesos sometidos a grandes perturbaciones, logrando un mejor desempeño de los sistemas de control y por consiguiente minimizando las pérdidas de agua por concepto de operación [146]. Sin embargo, debido a la utilización de operadores de orden fraccional, la implementación práctica de esta clase de controladores es más compleja y requiere mayores conocimientos del personal de explotación.

El control de canales con estaciones de bombeo en su operación debido a las irregularidades del relieve (diferentes alturas del terreno) también ha sido abordado, ver por ejemplo [172–178]. La complejidad dinámica de estos canales es superior a la de los canales sin estaciones de bombeo [177, 178]. No obstante, es notorio destacar que en la actualidad el control efectivo de la distribución de agua en esta clase de canales constituye uno de los grandes retos de la comunidad científica internacional debido a la imperiosa necesidad de utilizar racionalmente no solo el agua, sino además la energía.

Finalmente, el control de la distribución de agua en las terrazas y cartas arroceras planas igualmente ha sido desarrollado, ver por ejemplo [178–182]. Sin embargo, se destaca que este eslabón de los sistemas de riego es el que cuenta con el menor nivel de automatización globalmente, debido a las dificultades técnicas que presentan estas terrazas relacionadas con el suministro de energía, así como con la instalación de los sensores y los controladores. Por consiguiente, el control efectivo de las terrazas planas arroceras constituye otro de los grandes retos de la comunidad científica internacional.

### 3. NUEVOS RETOS EN EL CONTROL DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA

Debido al complejo comportamiento dinámico que presentan los canales principales de riego (no linealidades, retardos dominantes de tiempo, perturbaciones persistentes, incertidumbres, fuertes interacciones entre los subsistemas (tramos), grandes dimensiones físicas, etc.) existen requerimientos en el diseño de los sistemas de control que hoy en día no pueden alcanzarse exclusivamente con la aplicación de la teoría del control [1, 183]. En los umbrales del siglo XXI, el control efectivo de los procesos dinámicos complejos y/o caóticos representa una asignatura pendiente y por consiguiente un reto de la teoría del control automático.

Es conocido, que en muchos procesos reales las plantas son efectivamente tan complejas que resulta casi imposible o inapropiado describir sus comportamientos dinámicos mediante modelos matemáticos convencionales basados en ecuaciones diferenciales o en diferencias [183]. Incluso, si fuera posible formular con precisión estas dinámicas, los modelos derivados pueden hacer el subsiguiente análisis muy difícil o demasiado complejo para que resulten útiles en el diseño de sistemas efectivos de control [183].

Por consiguiente, uno de los grandes retos de la comunidad científica consiste en desarrollar e implementar mejores y más sofisticadas soluciones de control de procesos complejos y/o caóticos, como respuesta a la creciente demanda de la agricultura, la industria y de la sociedad en general.

Cuando el diseño de sistemas efectivos de control de procesos con comportamientos dinámicos complejos es difícil o imposible mediante la aplicación de los métodos clásicos y ofrece beneficios productivos, económicos, sociales, etc. resulta conveniente la aplicación de las técnicas de inteligencia artificial [184]. Dado que los humanos son capaces de controlar esta clase de procesos ¿Por qué no tratar de emular esta capacidad?

La necesidad de controlar procesos productivos complejos o con entornos de incertidumbres, no formulables en un riguroso marco matemático, frente a los que otras técnicas convencionales se han mostrado ineficaces ha conducido al desarrollo de los controladores inteligentes [185]. En los últimos años se ha producido un crecimiento exponencial en la utilización de los controladores inteligentes y es muy probable que este crecimiento continúe en las próximas décadas [186, 187].

Los controladores inteligentes se definen como sistemas que presentan habilidad para imitar a los sistemas biológicos naturales mediante técnicas de inteligencia artificial, caracterizándose por aprender a partir de su propia experiencia, emulando la mente humana tanto como puedan [186]. Con esta clase de controladores se pretende resolver problemas de control inabordables mediante la aplicación de los métodos clásicos [187].

Actualmente, el control inteligente está ayudando a expandir el horizonte de la teoría del control [187]. Parte de esta expansión se debe a la extensión de las fronteras de la tecnología: desde el microprocesador al impacto del procesamiento en paralelo, o la computación en la nube. Contribuciones recientes apuntan a la unión del control convencional y el inteligente, (control híbrido) como uno de los retos para implementar potentes sistemas de control de procesos dinámicos complejos.

Las estrategias de control inteligente son muy variadas, e incluyen: la lógica borrosa, las redes neuronales artificiales, los sistemas expertos, la programación evolutiva, los algoritmos genéticos, la optimización heurística, etc. [186].



En la actualidad, se observa un creciente incremento en la aplicación de las redes neuronales artificiales para resolver problemas de identificación de sistemas, predicción y control de procesos complejos [188]. Las redes neuronales se caracterizan por su habilidad de aprender a partir de ejemplos, y no requieren de una programación convencional [188]. La relevancia del uso de las redes neuronales en el control de procesos se debe principalmente a su capacidad de aproximar con gran precisión comportamientos dinámicos no lineales mediante su entrenamiento con datos de entrada-salida de los procesos [189].

La demanda de agua constituye un parámetro fundamental para el desarrollo de pronósticos de riego, así como de estrategias que benefician la distribución y el uso racional de agua en los sistemas de riego [190]. Además, la demanda de agua es el parámetro de referencia en el diseño, modernización y explotación de los sistemas de riego [191].

Algunos autores han propuesto predecir las demandas de agua de los sistemas de riego mediante la aplicación de series temporales de datos de las variables meteorológicas, entre las que se encuentran: la temperatura, la humedad relativa, la presión, las precipitaciones, la velocidad y dirección del viento, etc. [192]. Por ejemplo, utilizando modelos ARIMA desarrollados en base a series temporales generadas mediante datos obtenidos de estas variables) [193], así como técnicas estadísticas avanzadas entre las que se encuentran las redes neuronales artificiales [191].

Una serie temporal se define como un conjunto de mediciones, sobre el estado de una variable, ordenadas en el tiempo [194, 195]. Los modelos matemáticos basados en series temporales (por ejemplo, ARMA, ARIMA, SARIMA) presentan una amplia aplicación en diferentes ramas de la ciencia e ingeniería, entre las que se destacan; la agricultura [41, 190], la meteorología [192], la bioingeniería [196, 197], la industria [44], el diagnóstico predictivo [198], etc.

Es notorio destacar que las tecnologías actuales no posibilitan realizar predicciones de la demanda de agua a largo plazo debido a que los continuos cambios en las condiciones meteorológicas conllevan a variaciones climáticas que se manifiestan varios días después [190]. Es por ello, que la aplicación de series temporales para el desarrollo de predicciones precisas de la demanda de agua a largo plazo en los sistemas de riego constituye un desafío para la comunidad científica.

Los controladores inteligentes también han sido propuestos para el control de la distribución de agua en los sistemas de riego, ver por ejemplo [199–204]. No obstante, aún no han sido reportados resultados evidentes que impliquen su aplicación inmediata en esta clase de procesos. Por consiguiente, el desarrollo de controladores inteligentes para el control efectivo de la distribución de agua en los sistemas de riego representa otro de los grandes retos actuales de la comunidad científica.

Predecir el futuro no es una tarea simple, pero los resultados y logros alcanzados en el campo del control inteligente están estableciendo la tendencia del desarrollo futuro de la automatización, la cual indudablemente será una de las ramas de la ciencia que afectará profundamente la vida humana del siglo XXI.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una revisión de las diferentes estrategias desarrolladas de control de la distribución de agua en los sistemas de riego, las cuales constituyen una viable solución a la problemática relacionada con la escasez de agua a escala global.

El análisis desarrollado sobre el estado del arte de los sistemas de control de la distribución del agua en los sistemas de riego muestra que aún existen problemas no resueltos tanto de carácter teórico, como práctico que imposibilitan la obtención de un elevado desempeño en el control de esta clase de procesos, a pesar de la gran cantidad de investigaciones realizadas. Además, una parte significativa de las estrategias de control propuestas no han sido implementadas en la práctica, y consecuentemente su efectividad no ha podido ser comprobada.

El desarrollo de controladores inteligentes y/o híbridos constituye una de las posibles vías de solución del complejo problema de control de la distribución de agua en los sistemas de riego.

Por consiguiente, el desarrollo de nuevas investigaciones encaminadas a mejorar el desempeño de los controladores actualmente utilizados en los sistemas de riego constituye un importante desafío para la comunidad científica internacional.

## 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. 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).
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. Pedro-Monzonís 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.
  5. Delgado Munevar WG. Gestión y valor económico del recurso hídrico. *Revista Finanzas y Política Económica*. 2015; 2(2):279–298.
  6. Brignardello M. ¿Escasez de agua en el siglo XXI? *Estudios Avanzados*. 2013;20(no. dic.):29–52.
  7. Gleick PH, Allen L, Christian-Smith J, Cohen MJ. *The World's water*, vol. 7. The biennial report on freshwater resources. Washington D.C: Island Press; 2011.
  8. Kovalienko PI, Rivas-Perez R. Improvements of rice irrigation systems in Cuba. *Hydraulic Construction and Land Reclamation*. 1985;12:57–58.
  9. de Fraiture C, Wichelns D. Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management*. 2010;97:502–511.
  10. Rivas-Perez R, Herranz Luis J, Kovalienko PI, Fernández Cantí RM. Uso eficiente de los recursos hidráulicos y energéticos en los sistemas de riego mediante la automatización. VIII Conferencia Científica de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana; Cuba; 1994.
  11. Kovalenko PI. Automation of land reclamation systems. Moscow; Kolos; 1983.
  12. 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](https://www.researchgate.net/profile/Raul_Rivas-Perez/publications?Sorting=newest&page=12).
  13. Litrico X, Fromion V. Modeling and control of hydrosystems. London: Springer-Verlag; 2009.
  14. Buyalski CP, Ehler DG, Falvey HT, Rogers DC, Serfozo EA.. Canal systems automation manual, Volume 1. A water resources technical publication, U.S. Denver: Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1991.
  15. Kovalenko PI, Rivas-Perez R. Improvements of rice irrigation systems in Cuba. *Hydraulic Engineering and Land Reclamation*. 1985;12:57–58.
  16. Rivas-Perez R. Hydraulic problems of the Republic of Cuba. *Hydraulic Engineering and Land Reclamation*. 1987;7:69–71.
  17. Diaz Duque JA. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2018;39(2):46–59.
  18. Capote Fuentes RM, Rafolls G. Cuba, dinámica del riego. Decenio 1995-2005. III Congreso Internacional de Riego y Drenaje, Cuba Riego. La Habana; Cuba; 2017. p. 25–28.
  19. Herrera Puebla J, González Robaina F. Estudio de las necesidades de agua de los cultivos, una demanda permanente, un nuevo enfoque. *Revista Ingeniería Agrícola*. 2015;5(1):52–57.
  20. Batista Silva JL. Evaluación de los recursos hídricos de Cuba. *Revista Geográfica*. 2016;157:73–83.
  21. Cardona Martínez J, Herranz Luis J, Rivas-Perez P, Pérez Pereira S, Martínez P, Pineda Reyes B. Automatización del sistema de riego superficial Güira de Melena. Segunda Conferencia Internacional Sobre el Control Automático en el Ahorro de Energía, Informática 96. La Habana; Cuba; 1996.
  22. García Villanueva NH. Operación de canales: conceptos generales. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; 2015.
  23. Rivas-Perez R. Automatic control of water distribution in irrigation systems. D.Sc Thesis. All Russia Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation A.N. Kostyakov; 1990. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Raul\\_Rivas-Perez/publications?sorting=newest&page=9](https://www.researchgate.net/profile/Raul_Rivas-Perez/publications?sorting=newest&page=9).
  24. Malaterre PO, Rogers DC. Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998;124(1):3–10.
  25. Clemmens A. Canal automation. *Resource Magazine*. 2006;13(1):7–8.
  26. Horváth K, Galvis E, Gomez Valentin M, Rodellar J. Is It better to use gate opening as control variable than discharge to control irrigation canals? *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2015;141(3).
  27. 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).

28. Rivas-Perez R, Peran Gonzalez JR, Pineda Reyes B, Perez Pereira S. Distributed control under centralized intelligent supervision in the Güira de Melena irrigation system. *Ingeniería Hidráulica en México*. 2003;18(2):53–68.
29. Litrico X, Malaterre PO, Baume JP, Vion PY, Ribot-Bruno J. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2007;133(1):27–37.
30. Ogata K. *Modern control engineering*. 5th ed. New Jersey: Pearson Education; 2010.
31. Rivas-Perez R, Aref Ghraizi R, Peran Gonzalez JR, Cesar Sanchez E. Industrial boilers. Integral automatic control system. *Automática e Instrumentación*. 2000;308:79-84.
32. Rivas-Perez R, Herranz J, Llanes-Santiago O, Cartaya L. Modelo matemático dinámico de generadores de vapor. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1994;15(3):45–54.
33. Chow VT. *Open-channel hydraulics*. New Jersey: The Blackburn Press; 2015.
34. Litrico X. Nonlinear diffusive wave modeling and identification of open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2001;127(4):313–320.
35. 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.
36. Schuurmans J, Clemmens AJ, Dijkstra S, Hof A, Brouwer R. Modelling of irrigation and drainage canals for controller design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1999;338–344.
37. Rivas-Perez R, Kovalienko PI, Matzeliuk EM, Pichuguin ED. Mathematical model of an irrigation canal. IV International Conference Integrated Problems of Industrial Control. Kiev; Ukraine; 1990.
38. Litrico X, Fromion V, Baume JP, Arranja C, Rijo M. Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations. *Control Engineering Practice*. 2005;13(11):1425–1437.
39. 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).
40. 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).
41. Ljung L. *System identification. Theory for the user*. NJ, USA: Prentice-Hall: Upper Saddle River; 1999.
42. Tangirala AK. *Principles of system identification: Theory and practice*. NY, USA: CRC Press; 2015.
43. Kovalenko P, Rivas-Perez R. Identificación de las características dinámicas de un canal magistral de riego como objeto de control automático. *Control, Cibernética y Automatización*. 1984;18(3):46–50.
44. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Sanchez-Rodriguez L. Robust system identification of an irrigation main canal. *Advances in Water Resources*. 2007;130(8):1785–1796.
45. Rivas Perez R, Feliu Batlle V, Sanchez Rodriguez L, Pedregal Tercero D, Linarez Saez A, Aguilar Mariñoso JV, et al. System identification of Aragon's Imperial irrigation main canal. *IFAC Proceedings Volumes*. 2007;40(1):274–279.
46. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-García F, Linarez Saez A. System identification for control of a main Irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes* 2008;41(2):9649–9654.
47. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Sanchez-Rodriguez L, Pedregal Tercero DJ, Linares-Saez A, Aguilar-Mariñosa JV, et al. Identification of the first pool of the Imperial de Aragon main irrigation canal. *Ingeniería Hidráulica en México*. 2008;23(1):71–87.
48. Pedregal DJ, Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Sanchez L, Linares A. A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain. *Environmental Modelling and Software*. 2009;24(4):502–509.
49. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-García FJ, Sanchez-Rodriguez L, Linares-Saez A. Control oriented model of a complex irrigation main canal pool. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011;44(1):2919–2924.
50. Aleem SA, Muhammad A, Nasir HA. System identification of distributory canals in the indus basin. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014;47(3):8743–8748.
51. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-García FJ, Linares-Saez A. Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool. *Environmental Modelling and Software*. 2014;51(1):207–220.
52. Bolea Y, Puig V, Blesa J. Linear parameter varying modeling and identification for real-time control of open-flow irrigation canals. *Environmental Modelling and Software*. 2015;53:87–97.
53. 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.
54. Van Overloop P. *Model predictive control on open water systems*. The Netherlands: IOS Press Inc; 2006.
55. Feliu-Batlle V, Rivas Perez R, Sanchez Rodriguez L. Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters. *Control Engineering Practice*. 2007;15(6):673–686.

56. Linares A, Rivas-Perez R, Feliu V. New advanced management and control strategies applied to hydraulic Infrastructures for water transport and distribution. *Abengoa*. 2008;No December;41–42.
57. Rogers D, Goussard J. Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998;124(1):11–25.
58. Rivas-Perez R. Digital control of water levels in main irrigation canals. *Land Reclamation and Water Management*. 1988;68:85–88.
59. Pérez Pereira S, Rivas-Perez R. Control distribuido bajo supervisión centralizada de caudales y niveles del agua en sistemas de riego. *Conferencia Internacional Sobre el Control de Sistemas Industriales, Informática 98*. La Habana; Cuba; 1998.
60. Wahlin B, Clemmens A. Performance of historic downstream canal control algorithms on ASCE test canal 1. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2002;128(6):365–375.
61. Clemmens AJ, Tian X; van Overloop PJ, Litrico X. Integrator delay zero model for design of upstream water-level controllers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(3)
62. 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).
63. Montazar A, Van Overloop P, Brouwer J. Centralized controller for the Narmada main canal. *Irrigation and Drainage*. 2005;54(1):79–89.
64. Wahlin BT, Clemmens AJ. Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2006;132(3):198–207.
65. Kovalienco PI, Pichuguin ED, Rivas-Perez R. Compensation of non-linear characteristics with dead-zone in water distribution control systems. *Construction and Exploitation of Land Reclamation Systems*. 1989;37–49.
66. Rivas-Perez R, Pérez S, Céspedes E. Sistema de control distribuido de gastos y niveles del agua en canales de riego. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1998;19(4):43–52.
67. Perez Pereira S, Céspedes García E, Rivas-Perez R. Sistema de control distribuido del sistema de riego Güira de Melena. *V Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente*. La Habana; Cuba; 1998.
68. Pérez S, Céspedes E, Rivas-Perez R. Control de nivel en el embalse Pimienta del sistema de riego Güira de Melena. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 1999;20(2):23–31.
69. Litrico X, Fromion V, Baume J. Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool. II: Implementation issues. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2006;132(4):369–379.
70. Litrico X, Malaterre PO, Baume JP, Vion PY, Ribot-Bruno J. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2007;133(1):27–37.
71. Begovich O, Felipe JC, Ruiz VM. Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype. *Asian Journal of Control*. 2007;9( 2):170-179.
72. Clemmens A.J. Water-level difference controller for main canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2012;138(1):1–8.
74. 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*. 2013;24(2):6–14.
75. 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.
76. Hernández Lopez Y, Rivas-Perez R. Control PI-2DoF de nivel en un tramo de un canal principal de riego. *18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana; Cuba; 2016.
77. Visioli A. *Practical PID Control*. London: Springer-Verlag; 2006.
78. Vilanova R, Alfaro V. Control PID robusto : Una visión panorámica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2011;8:141–158.
79. Astrom K, Hagglund T. *Control PID avanzado*. Madrid, España: Pearson Educación; 2009.
80. Vilanova R, Visioli A. *PID control in the third millennium lessons learned and new approaches*. New York: Springer; 2012.
81. Watanabe K, Ito M. A process-model control for linear systems with delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1981;26(6):1261–1269.
82. Rivas-Perez R, Cao TG, Franco Parellada C, Prokofiev VE. Automatic control systems of time delay plants. *Control, Cibernética y Automatización*. 1987;20(1):24–26.

83. Kao TG, Nguen M, Rivas-Perez R. Adaptive control of a time-delay plant using a searchless model-reference self-tuning system. *Automation and Remote Control*. 1989;49(12, part. 2):1620–1627.
84. Åström KJ, Hang CC, Lim BC. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1994;39(2):343–345.
85. Hagglung T. An industrial dead-time compensating PI controller. *Control Engineering Practice*. 1996;4(6):749–756.
86. Palmor Z. The control handbook. Time delay compensation: Smith predictor and its modifications. New York: CRC Press and IEEE Press; 1996.
87. Normey-Rico JE, Camacho EF. Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*. 2008;16:407–428.
88. Normey-Rico JE, Camacho EF. *Control of dead-time processes*. Berlin: Springer; 2007.
89. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-Garcia FJ, Benites Gonzalez I. Temperature control of a crude oil preheating furnace using a modified Smith predictor improved with a disturbance rejection term. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014;47(3):5760-5765.
90. Sanz R, García P, Albertos P. A generalized Smith predictor for unstable time-delay SISO systems. *ISA Transactions*. 2018;72:197–204.
91. Araujo JM, Santos TLM. Control of second-order asymmetric systems with time delay: Smith predictor approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020;137(Article 106355).
92. Nie Y, Zhang P, Cai G, Zhao Y, Xu M. Unified Smith predictor compensation and optimal damping control for time-delay power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;117(Article 105670).
93. Deltour J, Sanfilippo F. Introduction of Smith predictor into dynamic regulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998;124(1):3–30.
94. Cespedes Garcia E, Perez Pereira S, Rivas-Perez R, Acosta Corzo A. Smith predictor and its application in control of main canals of irrigation systems. *International Conference Science and Technology for Development, CIMA'99, Second Symposium of Automatic Control*. Havana, Cuba; 1999.
95. Bolea Y, Puig V, Blesa J. Gain-scheduled Smith predictor PID-based LPV controller for open-flow canal control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014;22(2):468–477.
96. Rivas-Perez R, Ordaz Hernández A, Pérez Pereira S. Control por computadora de niveles del agua en canales magistrales de los sistemas de riego. *Tercer Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos*, Cordoba; Argentina; 1996.
97. Rivas-Perez R, Perez Pereira S, Rodriguez D, Cespedes Garcia E. Computer integrate control of water distribution in irrigation systems. *IV Interamerican Conference on Environmental Issues, CIMA'97*. La Habana; Cuba; 1997.
98. Rivas-Perez R, Beauchamp-Baez G, Rodriguez D, Perez Pereira S. Computer control of water distribution in irrigation systems. *Tropical Hydrology and Caribbean Water Resources Proceedings, Book Series: American Water Resources Association Technical Publication Series*. 1998;98(2):149–154.
99. Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano J, de Prada Moraga C, Inga Castro J. Control en tiempo real de la distribución del agua en canales de riego. *Electro-Electrónica*. 2000;13(1):19–27.
100. Rivas-Perez R, Sotomayor Moriano J, de Prada Moraga C, de la Fuente Aparicio MJ, Inga Castro J. Real-time applications of water distribution control in irrigation systems. *VII International Conference on Electronics, Electrical and Systems Engineering*. Lima; Peru; 2000, p. 75–81.
101. Montazar A, Isapoor I. Centralized downstream PI controllers for the west canal of Aghili irrigation district. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012;14(2):375:378.
102. 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).
103. Aschepkov LT, Dolgy DV, Kim T, Agarwal RP. *Optimal control*. Berlin: Springer; 2017.
104. de Prada Moraga C, Baeyens Lazaro E, Rivas Perez R. Introduction to the special section of the modelling, control and optimization of the sugar industry. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2009;6(3):5–9.
105. Corriga G, Sanna S, Usai G. Sub-optimal constant-volume control for open channel networks. *Applied Mathematical Modelling*. 1983;7:262-267.
106. 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.
107. Lin Z, Manz DH. Optimal operation of irrigation canal systems using nonlinear programming - dynamic simulation model. *Cemagref-IIMI International Workshop*. Montpellier; France; 1992. p. 297–306.
108. Rivas-Perez R, Herranz Luis J, Cesar Sánchez E, Kovalienko PI. Control digital óptimo de niveles del agua en canales de riego. *Primera Conferencia Internacional Sobre el Control Automático en el Ahorro de Energía, Informática 94*. La Habana; Cuba; 1994.

109. Sawadogo S, Malaterre PO, Kosuth P. Multivariable optimal control for on-demand operation of irrigation canals. *The International Journal of Systems Science*. 1995;26(1):161–178.
110. Rivas-Perez R, Pineda Reyes B, Campos Cantón I, Perez Pereira S. Computer-based optimal control by pulse width modulation of hydraulic resources in irrigation systems. *World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 98, and 4th International Conference on Information Systems, Analysis and Synthesis, ISAS 98*. Orlando; USA; 1998. vol. 4, p. 642–649.
111. Begovich-Mendoza O, Ruiz-Carmona VM, Zapién JC. Implementación en tiempo real de un control LQG en un prototipo de canal abierto de riego de varios tramos. *Ingeniería Hidráulica en México*. 2004;19(2):5–15.
112. 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.
113. Astrom KJ, Wittenmark B. *Adaptive control*. Second ed. NY; USA: Addison-Wesley; 1995.
114. 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.
115. Cao TG, Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Stability analysis of control system by variable width pulses of water levels in irrigation main canals. *Problems of Rational Water Use in Land Reclamation Systems*. 1983;91–98.
116. Kovalenko PI, Rivas-Perez R, Cao TG. Pulse control system with controlled structures for regulation of water level in irrigation canals. *Theoretical and Applied Problems of Automation in Land Reclamation Control Systems*. 1984;81–85.
117. Rivas-Perez R. Sistema de control automático del nivel del agua en los canales magistrales de riego con estructura variable. *Control, Cibernética y Automatización*. 1986;19(1):30–33.
118. Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Adaptive control by pulse width modulation of water distribution in main canals of irrigation systems. *Drip irrigation of orchards and vineyards in Ukraine and Moldova*. 1987;43–50.
119. Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Self-tuning controller for control of water distribution in irrigation main canals with variable gain. *Land Reclamation and Water Management, Series Automation and Remote Control of Land Reclamation Systems: Express Information*. 1988;10(8):1–13.
120. 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.
121. Rivas-Perez R. Synthesis of adaptive control systems with predictor for control of water distribution in irrigation main canals. *Improvement of Technical Resources and Irrigation Technology*. 1989;25–35.
122. 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.
123. Rivas-Perez R, Herranz Luis J, Ordaz Hernández A, Pérez Pereira S, Noriega Ponce A. Control adaptativo de la distribución del agua en canales magistrales abiertos de los sistemas de riego. *VII Congreso Latinoamericano de Control Automático*. Buenos Aires; Argentina; 1996. Vol. 1 p. 440–445.
124. Rivas-Perez R, Herranz Luis J, Beauchamb Baez G, Perez Pereira S, Cespedes Garcia E. Control adaptativo de niveles del agua en canales abiertos de los sistemas de riego. *Conferencia Internacional Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CIMAF 97. I Simposium de Control Automático*. La Habana: Cuba; 1997. p. 153–160.
125. Sawadogo S, Faye RM, Mora-Camino F. Decentralized adaptive predictive control of multireach irrigation canal. *International Journal of Systems Science*. 2001;32(10):1287–1296.
126. Aguilar JV, Langarita P, Linares L, Rodellar J, Soler J. Adaptive predictive expert control of levels in large canals for irrigation water distribution. *Adaptive Control and Signal Processing*. 2012;15:945–960.
125. Bolea Y, Puig V. Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal system. *ISA Transactions*. 2016;63:274–280.
126. Xi Y, Li D. *Predictive control. Fundamentals and developments*. Singapore: John Wiley & Sons; 2019.
127. Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano J, Perez-Zuniga CG, Calderon-Mendoza EM. Design of a multivariable GPC based on an industrial PC for control of a reverse osmosis unit of a pharmaceutical industry. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2016;15(1):259–273.
128. Tadeo F, Alvarez T, del Valle F, Rivas-Perez R. Decentralized constrained predictive control of irrigation canals using on-line linearized models. *Yearly Seminar in Automation, Industrial Electronic and Instrumentation*. Matanzas; Cuba; 2001.
129. Rivas Perez R, Prada Moraga C, Peran Gonzalez JR, Kovalenko PI. Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals. *IFAC Proceedings Volumes*. 2002;35(1):97–102.

130. Gómez M, Rodellar J, Mantecon JA. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. *Applied Mathematical Modelling*, 2002;26:1039–1056.
131. van Overloop PJ, Clemens A, Strand R, Wagemaker R, Bautista E. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District's WM Canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2010;136(11):747–756.
132. 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. La Habana; Cuba; 2011.
133. Cuenca-Tinitana JC, 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*. 2012;119–130.
134. Aguilar J, Langarita P, Linares L, Rodellar J, Soler J. Adaptive predictive expert control of levels in large canals for irrigation water distribution. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2012;26:945–960.
135. Fele F, Maestre JM, Mehdy Hashemy S, Muñoz de la Peña D, Camacho EF. Coalitional model predictive control of an irrigation canal. *Journal of Process Control*. 2014;24(4):314–325.
136. 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.
137. Delgoda D, Malano H, Saleem SK, Halgamuge MN. Irrigation control based on model predictive control (MPC): Formulation of theory and validation using weather forecast data and AQUACROP model. *Environmental Modelling & Software*. 2016;78:40–53.
138. 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.
139. Ding Y, Wang L, Li Y, Li D. Model predictive control and its application in agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;151:104–117.
140. 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).
141. Xu M. Model Predictive Control of an Irrigation Canal Using Dynamic Target Trajectory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(3).
142. Fromion V, Baume JP. Canal controller design. A multivariable approach using  $H_\infty$ . *The European Control Conference Porto; Portugal; 2001*. p. 3398–3403.
143. Litrico X, Fromion V.  $H_\infty$  control of an irrigation canal pool with a mixed control politics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2006;14(1):99–111.
144. Merabti N, Arbaoui F, Yahmedi S. Robust control for irrigation canals. *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology*. 2014;1:59–63.
145. Liu KZ, Ya Y. Robust control. Theory and applications. Singapore: John Wiley & Sons; 2019.
146. Monje CA, Chen YQ, Vinagre BM, Xue D, Feliu V. Fractional-order systems and controls. *Fundamentals and Applications*. London: Springer-Verlag; 2010.
147. Rivas-Perez R, Castillo-García F, Sotomayor-Moriano J, Feliu-Batlle V. Control robusto de orden fraccionario de la presión del vapor en el domo superior de una caldera bagacera. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2014;11(1):20–31.
148. Castillo-García FJ, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Frequency specification regions of fractional order PI controller for first order plus time delay processes. *Journal of Process Control*. 2013;23(4):598–612.
149. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Robust fractional-order controller for an EAF electrode position system. *Control Engineering Practice*. 2016;56:159–173.
150. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Linares-Saez A. Fractional order robust control of a reverse osmosis seawater desalination plant. *IFAC PapersOnLine*, 2017;50(1):14545-14550.
151. Feliu Batlle V, Rivas-Perez R, Gorostiaga Canepa L, Sanchez Rodriguez L Fractional control for open irrigation canal. VI Inter-Regional Conference on Environment-Water. Land and Water Use Planning and Management, Envirowater 2003. Albacete; Spain; 2003.
152. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Castillo-García F. Fractional robust control to delay changes in main irrigation canals. *IFAC Proceedings Volumes*. 2005;38(1):28–33.
153. Sanchez-Rodriguez L, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Ruiz Torija MA. Robust control of a laboratory hydraulic canal by using a fractional PI controller. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Las Vegas; USA; 2007. 5(A,B,C): p. 1307–1315.
154. Rivas Perez R, Feliu Batlle V, Sanchez Rodriguez L, Pedregal Tercero D, Linares Saez A, Aguilar Mariñoso JV, et al.. Fractional PI control of an irrigation main canal. *IFAC Proceedings Volumes*. 2007;40(1):280–285.

155. 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.
156. 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.
157. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Castillo-García FJ, Sanchez-Rodriguez L. Smith predictor based robust fractional order control: Application to water distribution in a main irrigation canal pool. *Journal of Process Control*. 2009;19(3):506–519.
158. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Castillo-García FJ. Fractional order controller robust to time delay variations for water distribution in an irrigation main canal pool. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009;69(2):185–197.
159. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Sanchez-Rodriguez L, Ruiz-Torija MA. Robust fractional order PI controller implemented on a laboratory hydraulic canal. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2009;135(4):271–282.
160. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Castillo-García FJ, Sanchez-Rodríguez L. Smith predictor based robust fractional order control: Application to water distribution in a main irrigation canal pool. *Journal of Process Control*. 2009;19(3):506–519.
161. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, García F. Fractional order controller robust to time delay for water distribution in an irrigation main canal pool. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009;69(2):185–197.
162. Calderon-Valdez SN, Rivas-Perez R, Ruiz-Torija MA, Feliu-Batlle V. Fractional PI controller design with optimized robustness to time delay changes in main irrigation canals. *14th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'2009*. Badajoz; Spain; 2009. p. 1411–1417.
163. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Castillo-García FJ, Sanchez-Rodriguez L, Linares Saez A. Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011;76(2):205–217.
164. Castillo-García FJ, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R, Sanchez-Rodriguez L. Time domain tuning of a fractional order  $PI\alpha$  controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011;44(1):15049–15054.
165. Sanchez L, Castillo-García FJ, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Comparative analysis of stability and robustness between integer and fractional-order PI controllers for first order plus time delay plants. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011;44(1):15019–15024.
166. Rivas-Perez R, Feliu Batlle V, Castillo García FJ, Sanchez Rodriguez L, Linares Saez A. Sistema de control de orden fraccional con ganancia programada de niveles de agua en canales principales de riego. *ES Patente No 2345801*. Madrid; España; 2011.
167. Castillo-García FJ, Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Time domain tuning of fractional order controllers combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. *Asian Journal of Control*. 2013;15(3):819–833.
168. Rivas-Perez R, Feliu-Batlle V, Castillo-García FJ, Sanchez-Rodriguez L, Linares Saez A. Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2014;5(1):23–42.
169. Feliu-Batlle V, Rivas-Perez R. Robust fractional-order controller for an EAF electrode position system. *Control Engineering Practice*. 2016;56:159–173.
170. 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.
171. 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.
172. Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Automatic control system of flow and level in an irrigation main canal with head pumping station. *Water Management Bulletin*. 1986;38(2):27–30.
173. Kovalenko PI, Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Cascade control system of flows and levels in main canals with head pumping station. *Hydrotechnical Constructions in Land Reclamation Systems*. 1986;91–98.
174. Rivas-Perez R, Kovalenko PI, Cao TG, Reznik TV, Prokofiev VE. Automatic control system of water flows and levels in irrigation main canals with head pumping station. *CU Patente No 21641 A1*. La Habana; Cuba; 1987.
175. Rivas-Perez R, Kovalienko PI, Cao TH, Pichuguin ED, Matzeliuk EM. Automatic control system of water flows in canal pools with pumping station at the head. *SU Patent No 1298303*. Moscow, Soviet Union; 1987.
176. Rivas-Perez R, Pichuguin ED. Cascade control of water distribution processes in main canals with head pumping station. *Construction and Exploitation of Land Reclamation Systems*. 1989;93–102.
177. Galindo J, Torok S, Salguero F, de Campos S, Romera J, Puig V. Optimal management of water and energy in irrigation systems: application to the Bardenas canal. *IFAC PapersOnLine*, 2017;50(1):6613–6618.



178. 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).
179. Rivas-Perez R. Determinación de las características dinámicas de una carta arrocera tipo Krasnodar, variante Kuban. *Problemas de la Hidrotecnia y del Mejoramiento de Suelos en Ucrania*. 1982;126–133.
180. Kovalenko PI, Pichuguin ED, Rivas-Perez R. System identification of dynamic behaviors of a rice flat terrace. *Hydrotechnical and Land Reclamation Problems in Ukraine*. 1982;76–79.
181. Rivas-Perez R. Cascade control of water distribution in rice plane terraces of Krasnodar class and Kuban variant. *Land Reclamation and Water Management*. 1991;75;72–76.
182. Masseroni D, Uddin J, Tyrrell R, Mareels I, Gandolfi C, Facchi A. Towards a smart automated surface irrigation management in rice-growing areas in Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2017;47(585):42–48.
183. Santos M. Un enfoque aplicado del control inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2011;8:283–296.
184. Russell SJ, Norvig P. *Artificial intelligence. A modern approach*, 3rd ed.; New Jersey: Pearson Education; 2010.
185. Lucci S, Kopec D. *Artificial Intelligence in the 21st Century (Computer Science)*, 2nd ed. Virginia: Herndon; 2015.
186. Cai ZX. *Intelligent control. Principles, techniques and applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 1997.
187. Liu J. *Intelligent control design and Matlab simulation*. London: Springer-Verlag; 2017.
188. Medsker LR, Jain LC. *Recurrent neural networks. Design and applications*. Boca Raton: CRC Press; 2001.
189. 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.
190. Pulido Calvo I, Montesino P., Roldan J., Ruiz Navarro FJ. Estimación de la demanda de agua para riego: regresiones lineales versus aproximaciones neuronales. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 2005;12:7–19.
191. Adeyemi O, Grove I, Peets S, Domun Y, Norton T. Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling. *Sensors*; 2018;18(3408).
192. 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.
194. Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC. *Time series analysis, forecasting and control*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc; 2008.
193. Peña D. *Análisis de series temporales*. Madrid: Alianza Editorial; 2005.
195. Shunway RH, Stoffer DS. *Time series analysis and its applications with R examples*. New York: Springer; 2006.
196. Lauzurica Díaz B, Rivas-Perez R. Metodología para el diseño de sistemas informáticos de control de la urgencia médica. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2002;23(3):89–94.
197. Castillo Cruz AL, Rivas-Perez R, Tellería Prieto MC, Rodríguez Delgado F. Sistema de control basado en computadora del laboratorio clínico de una unidad de cuidados intensivos. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2002;23(3):39–44.
198. Prieto-Moreno A, Llanes-Santiago O, García E. Fault diagnosis in industrial process: a comparison of classification methods. *IEEE Latin American Transactions*. 2013;11:682–689.
199. Rivas-Perez R, Sotomayor Moriano J, Perez-Zuñiga CG. Adaptive expert generalized predictive multivariable control of seawater RO desalination plant for a mineral processing facility. *IFAC PapersOnLine*. 2017;50(1):10244–10249.
200. Hernández Lopez Y, Rivas-Perez R. Identificación basada en redes neuronales de un tramo de un canal principal de riego. *X Seminario Euro-Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería, 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana; Cuba; 2014.
201. 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*. 2015;14(2):471–476.
202. Ribeiro Mendes W, Araújo FMU, Dutta R, Heeren DM. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Systems with Applications*. 2019;12415:13–24.
203. Zhang S, Wang M, Shi W, Zheng W. Construction of intelligent water saving irrigation control system based on water balance. *IFAC PapersOnLine*. 2018;51(17):466–471.
204. 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.

## 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, su análisis e interpretación. Redacción del borrador del artículo y de su versión final.

**Raúl Rivas Pérez:** contribución en el análisis de la información y bibliografía. 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 retos de los sistemas de control de la distribución de agua en los sistemas de riego. Revisión crítica del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar.

## 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, Email: [ybra@automatica.cujae.edu.cu](mailto:ybra@automatica.cujae.edu.cu). 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, Email: [rivas@automatica.cujae.edu.cu](mailto:rivas@automatica.cujae.edu.cu). 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 de tiempo dominantes, control robusto de plantas con dinámicas inciertas y/o caóticas.

**Vicente Feliu Battle,** Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla La-Mancha, Ciudad Real, España, Email: [vicente.feliu@uclm.es](mailto:vicente.feliu@uclm.es). 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/)