



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 277 757**

② Número de solicitud: 200502338

⑤ Int. Cl.:

**G05D 9/12** (2006.01)

**E02B 7/36** (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

② Fecha de presentación: **27.09.2005**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **16.07.2007**

④ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**16.07.2007**

⑦ Solicitante/s:  
**Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)**  
**Pza. Universidad, 2**  
**02006 Albacete, ES**  
**Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE)**

⑦ Inventor/es: **Rivas Pérez, Raúl;**  
**Feliu Batlle, Vicente;**  
**Sánchez Rodríguez, Luis;**  
**Castillo García, Fernando José y**  
**Linares Sáez, Antonio**

⑦ Agente: **No consta**

⑤ Título: **Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego.**

⑤ Resumen:

Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego.

Consiste en un sistema de control fraccional desarrollado sobre un ordenador, que posibilita controlar de forma robusta y efectiva los niveles del agua en un tramo de un canal de riego caracterizado por presentar parámetros dinámicos variables.

La robustez, precisión y calidad exigida del sistema se obtienen mediante la aplicación de nuevos algoritmos de control. La generación de la señal de control se realiza a través de un algoritmo de control FPID discreto, el cual dispone de cinco parámetros de sintonía, dos de ellos de orden no entero.

El sistema dispone de un software conformado por un entorno gráfico, un módulo de tratamiento de datos y control y un módulo de comunicaciones.

El sistema diseñado se caracteriza por su robustez, precisión, bajo coste y cumplimiento de las especificaciones requeridas para esta clase de sistemas.

ES 2 277 757 A1

## DESCRIPCIÓN

Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego.

5 **Sector de la técnica**

La invención se encuadra en los sectores técnicos de la hidráulica y la agricultura, más concretamente en el relativo a los sistemas de control de los niveles del agua en canales principales de riego.

10 **Explicación de la invención**

Actualmente, existen algunos sistemas de control que realizan la regulación aguas abajo de los niveles del agua en un tramo de un canal principal de riego, pero su funcionamiento se encuentra seriamente afectado por las variaciones que presentan los parámetros dinámicos de dicho tramo (ganancia y retardo de tiempo) al variar sus regímenes de explotación, determinados por los movimientos de la compuerta aguas arriba del tramo. Los controladores utilizados en estos sistemas no presentan la robustez necesaria para realizar un control efectivo de los niveles del agua bajo condiciones de variación en un amplio rango de los parámetros dinámicos del tramo del canal, lo que origina que se produzcan grandes pérdidas de agua (Patentes S.U. No 362 895 y No 1 135 837, CIP E02B 13/00; Patente CA No 2 450 151, CIP E02B0 11/00; Patente U.S. No 4 349 296, CIP E02B0 11/00).

Otros sistemas de control realizan la estimación on-line de los parámetros dinámicos del tramo del canal (ganancia y retardo de tiempo) y posteriormente reajustan los parámetros del controlador mediante un algoritmo adaptativo. Estos sistemas se caracterizan por presentar estructura y algoritmos de control muy complejos. Igualmente presentan un comportamiento global (estabilidad y/o robustez) altamente sensible a cualquier error que se pueda cometer en el reajuste (sintonía) de los parámetros del controlador, lo que en muchas ocasiones origina la pérdida total de la estabilidad del sistema de control. Para mejorar la estabilidad de estos sistemas, los controladores se diseñan con un algoritmo de funcionamiento que produce un reajuste muy lento de sus parámetros, lo que provoca que el sistema de control pierda la capacidad de seguir con rapidez las variaciones bruscas de los niveles del agua que se originan en el tramo del canal. Esto conlleva una baja operatividad del canal y por consiguiente un aumento en las pérdidas de agua (Patente CU No 21885, CIP E02B 13/02).

La presente invención resuelve estos problemas mediante un controlador de orden fraccional, el cual no necesita para su funcionamiento robusto y efectivo ninguna estimación de los parámetros dinámicos del canal, ni tampoco ningún reajuste de los parámetros dinámicos del controlador.

Un controlador se considera robusto cuando: (1) presenta una baja sensibilidad a efectos de la planta (canal) que no fueron considerados en la fase de análisis y de diseño del sistema de control (por ejemplo perturbaciones, ruidos de medida, dinámicas no modeladas, etc.), (2) garantiza un funcionamiento estable del sistema de control sobre el rango de variaciones de los parámetros dinámicos de la planta (canal) y (3) exhibe el comportamiento deseado, cumpliendo con las especificaciones de diseño, a pesar de la presencia de grandes incertidumbres en la planta (grandes cambios en los parámetros dinámicos del canal).

El objetivo de la invención consiste en elevar la efectividad y robustez en el control de los niveles del agua en los tramos de los canales de riego cuyos parámetros dinámicos (ganancia y retardo de tiempo) varían en un amplio rango al variar sus regímenes de explotación, de forma tal de aumentar la operatividad sobre el canal y obtener una significativa reducción de las pérdidas actuales de agua por concepto de explotación.

**Breve descripción del contenido de los dibujos**

La figura 1 muestra la configuración y los elementos del sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en un tramo de un canal principal de riego. El tramo del canal principal de riego 1, con compuerta del comienzo del tramo 2 y compuerta del fin de tramo 3, presenta un sensor de niveles del agua aguas abajo 4 situado al final del tramo. La señal de salida del sensor de niveles del agua  $H_{aa}(t)$  mediante el convertidor analógico/digital A/D 5 se convierte en una señal discreta  $H_{aa}(kT)$ . El ordenador 6 desarrolla la función de controlador de orden fraccional, generando las señales de error  $e(kT)$  y de control  $u(kT)$  en correspondencia con un algoritmo de control de orden fraccional discreto tipo FPID. La señal de control discreta  $u(kT)$  se convierte en señal continua  $u(t)$  mediante el convertidor digital/analógico D/A 7, el cual representa a un dispositivo de muestreo y retención de datos. La señal de control continua  $u(t)$  actúa sobre el motor 8 de la compuerta de comienzo del tramo, originando desplazamientos de dicha compuerta en correspondencia con la magnitud y signo de la señal de error  $e(kT)$ . Los desplazamientos de la compuerta de comienzo del tramo producen variaciones en el caudal de agua de entrada al tramo del canal, las cuales se mantienen mientras la señal de error  $e(kT)$  no se iguale a cero.

**Modo de realización de la invención**

La presente invención se refiere a un nuevo sistema de control fraccional de niveles del agua en un tramo de un canal de riego, el cual incorpora un ordenador como controlador de orden fraccional. La inclusión del ordenador facilita enormemente la implementación y ejecución del algoritmo de control de orden fraccional. El control de los

## ES 2 277 757 A1

niveles del agua en el tramo del canal se desarrolla en correspondencia con el método de regulación aguas abajo, con sensor de niveles del agua situado al final del tramo.

El algoritmo de control constituye un PID de orden fraccional (FPID), el cual presenta un integrador de orden  $\alpha$  y un diferenciador de orden  $\mu$ . Este algoritmo en el dominio del tiempo se representa mediante la ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\alpha} e(t) + K_d D^{\mu} e(t), \quad (1)$$

donde:

$D^r$  - operador integro-diferencial de orden no entero  $r$ ;  $\alpha, \mu$  - números reales arbitrarios ( $\alpha, \mu > 0$ );  $K_p, K_i, K_d$  - coeficientes de proporcionalidad, integración y derivación respectivamente;  $u(t)$  - señal de salida del controlador;  $e(t)$  - señal de error entre la variable controlada y la señal de referencia.

La magnitud del nivel del agua aguas abajo al final del tramo del canal  $H_{aa}(t)$  es captada por el sensor de niveles del agua y transmitida al convertidor analógico/digital A/D, el cual la convierte en una señal discreta  $H_{aa}(kT)$  para su procesamiento por el controlador de orden fraccional (ordenador). El valor de la señal de referencia del nivel del agua aguas abajo al final del tramo del canal constituye un dato, por lo que se introduce en el ordenador en formato numérico  $H_r(kT)$ . El dato  $H_r(kT)$  se registra y almacena en la memoria del ordenador.

La señal de error entre los valores de la señal de referencia y la señal de niveles del agua al final de tramo del canal, se determina mediante la expresión:

$$e(kT) = H_r(kT) - H_{aa}(kT), \quad (2)$$

El controlador de orden fraccional genera la señal de control  $u(kT)$  en correspondencia con la magnitud y signo de la señal de error  $e(kT)$ . La generación de la señal de control se realiza a través de un algoritmo de control FPID discreto, el cual presenta la forma:

$$u(z) = K_p e(z) + K_i (\omega(z^{-1}))^{-\alpha} e(z) + K_d (\omega(z^{-1}))^{\mu} e(z), \quad (3)$$

donde:

$(\omega(z^{-1}))^{\pm r}$  - equivalente discreto del operador integro-diferencial de orden no entero  $r$ ,  $0 < r < 1$ , que se determina mediante la siguiente fórmula general:

$$(\omega(z^{-1}))^{\pm r} = \left( \frac{8}{7T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}/7} \right)^{\pm r}; \quad (4)$$

$T$  - periodo de muestreo.

La expresión (4) representa a una función de transferencia racional de tiempo discreto de orden infinito. Una aproximación como función racional de orden finito se obtiene aplicando el método de expansión de fracciones continuas (CFE). Utilizando este método la expresión (4) se expresa como:

$$(\omega(z^{-1}))^{\pm r} \approx \left( \frac{8}{7T} \right)^{\pm r} CFE \left\{ \left( \frac{1-z^{-1}}{1+\frac{z^{-1}}{7}} \right)^{\pm r} \right\}_{p,q} = \left( \frac{8}{7T} \right)^{\pm r} \frac{P_p(z^{-1})}{Q_q(z^{-1})}; \quad (5)$$

donde:

$CFE\{U\}$  - denota la expansión de fracciones continuas de  $U$ ;  $P(z^{-1}), Q(z^{-1})$  - polinomios de grado  $p, q$  respectivamente.

## ES 2 277 757 A1

La señal de control discreta  $u(kT)$  de salida del ordenador se convierte en una señal de control continua  $u(t)$  mediante el convertidor digital/análogo (D/A), que representa a un dispositivo de muestreo y retención de datos.

5 La señal de control continua  $u(t)$  actúa sobre el motor que mueve la compuerta de comienzo del tramo, originando un desplazamiento de dicha compuerta en correspondencia con la magnitud y signo de la señal de error  $e(kT)$ . De esta forma se varía el caudal de agua de entrada al tramo del canal, hasta que la señal de error  $e(kT)$  se iguale a cero.

10 De la expresión (3) se observa que los controladores FPID tienen 5 parámetros de sintonía  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$ , lo que posibilita obtener un ajuste más efectivo que otras realizaciones precedentes.

15 El hecho de que los parámetros  $\alpha$  y  $\mu$  sean no enteros, ofrece una elevada flexibilidad y posibilidades de obtener un ajuste efectivo del controlador ante las variaciones de los parámetros dinámicos del canal, ya que esta clase de controladores además de contar con las facilidades del PID convencional, permite seleccionar la pendiente de la curva de magnitud o las aportaciones de fase a bajas y altas frecuencias, lo que proporciona un comportamiento dinámico robusto del controlador.

20 Al variar los regímenes de explotación del tramo del canal, originados por los movimientos de la compuerta aguas arriba, varían los parámetros dinámicos del tramo del canal (ganancia y retardo de tiempo). Bajo estas condiciones el sistema no necesita reajustar los parámetros del controlador, ya que los controladores de orden fraccional son pocos sensibles a estos cambios, caracterizándose por su elevada robustez. Esto posibilita aumentar la efectividad en el control de los niveles del agua, así como la operatividad sobre el canal y como consecuencia reducir las pérdidas de agua por concepto de explotación.

25 El sistema que se propone cuenta con un entorno gráfico que puede ser manejado por los usuarios, el cual permite observar desde el ordenador el proceso de control de los niveles del agua en el tramo del canal, ajustar todos los parámetros del controlador, comunicarse con el programa de control, accionar de forma manual sobre el motor de la compuerta de comienzo del tramo del canal, introducir nuevos datos y/o variar los datos existentes (por ejemplo el valor de la referencia  $H_r(kT)$ ), así como conocer posibles fallos en el sistema.

30 Los datos de entrada  $e(kT)$ ,  $H_r(kT)$ ,  $H_{aa}(kT)$  y de salida  $u(kT)$  del sistema se registran y almacenan en ficheros en el ordenador y pueden ser reproducidos por los usuarios mediante la aplicación informática encargada de realizar el procedimiento de tratamiento de datos. La salida de estos datos se realiza por el puerto USB del ordenador en formato digital.

35 El sistema que se propone dispone de un software que forma parte de esta invención y que constituye una parte indisoluble de la misma. Este software se encuentra conformado por tres módulos íntimamente relacionados: el primer módulo lo constituye un entorno gráfico, que es manejado por los usuarios para gestionar el proceso de control fraccional de los niveles del agua en un tramo de un canal de riego. El segundo módulo desarrolla las tareas de tratamiento de datos y control. Este módulo se ejecuta en el propio ordenador y se relaciona con el entorno gráfico para interpretar sus órdenes.

40 El tercer módulo se ocupa de la comunicación entre el entorno gráfico y el módulo de tratamiento de datos y control.

45 De todo lo descrito y mediante la observación de la figura 1, se desprenden las ventajas que presenta el sistema de control fraccional que se propone, respecto a otras realizaciones precedentes.

50 Lo nuevo en el sistema que se propone lo constituye la simplificación de la estructura del controlador, así como de los algoritmos de control; la inclusión de un controlador de orden fraccional, basado en ordenador, el cual se caracteriza por presentar una baja sensibilidad ante las variaciones de los parámetros dinámicos del tramo del canal al variar sus regímenes de explotación en un amplio rango, lo que implica un aumento significativo en la robustez y efectividad en el control, así como en la operatividad sobre el canal y como consecuencia una reducción en las pérdidas actuales de agua; la introducción de las tecnologías digitales, las cuales aumentan enormemente las posibilidades del sistema de control fraccional y se distinguen por su flexibilidad, velocidad de respuesta y exactitud en la ejecución de los algoritmos de control.

60

65

REIVINDICACIONES

5 1. Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego que comprende compuertas al comienzo y fin del tramo del canal, sensor de niveles del agua aguas abajo situado al final del tramo y motor que mueve la compuerta de comienzo del tramo **caracterizado** porque comprende un controlador de orden fraccional, basado en un ordenador, que genera las señales de error y de control, cuya entrada se encuentra conectada con un convertidor analógico/digital y la salida con un convertidor digital/analógico.

10 2. Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego según reivindicación 1 **caracterizado** por utilizar un algoritmo fraccional tipo FPID discreto para generar la señal de control.

15 3. Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego según reivindicaciones 1 y 2 **caracterizado** por disponer de un software conformado por un entorno gráfico que puede ser manejado por los usuarios, un módulo de tratamiento de datos y control, y un módulo de comunicaciones.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DIBUJOS

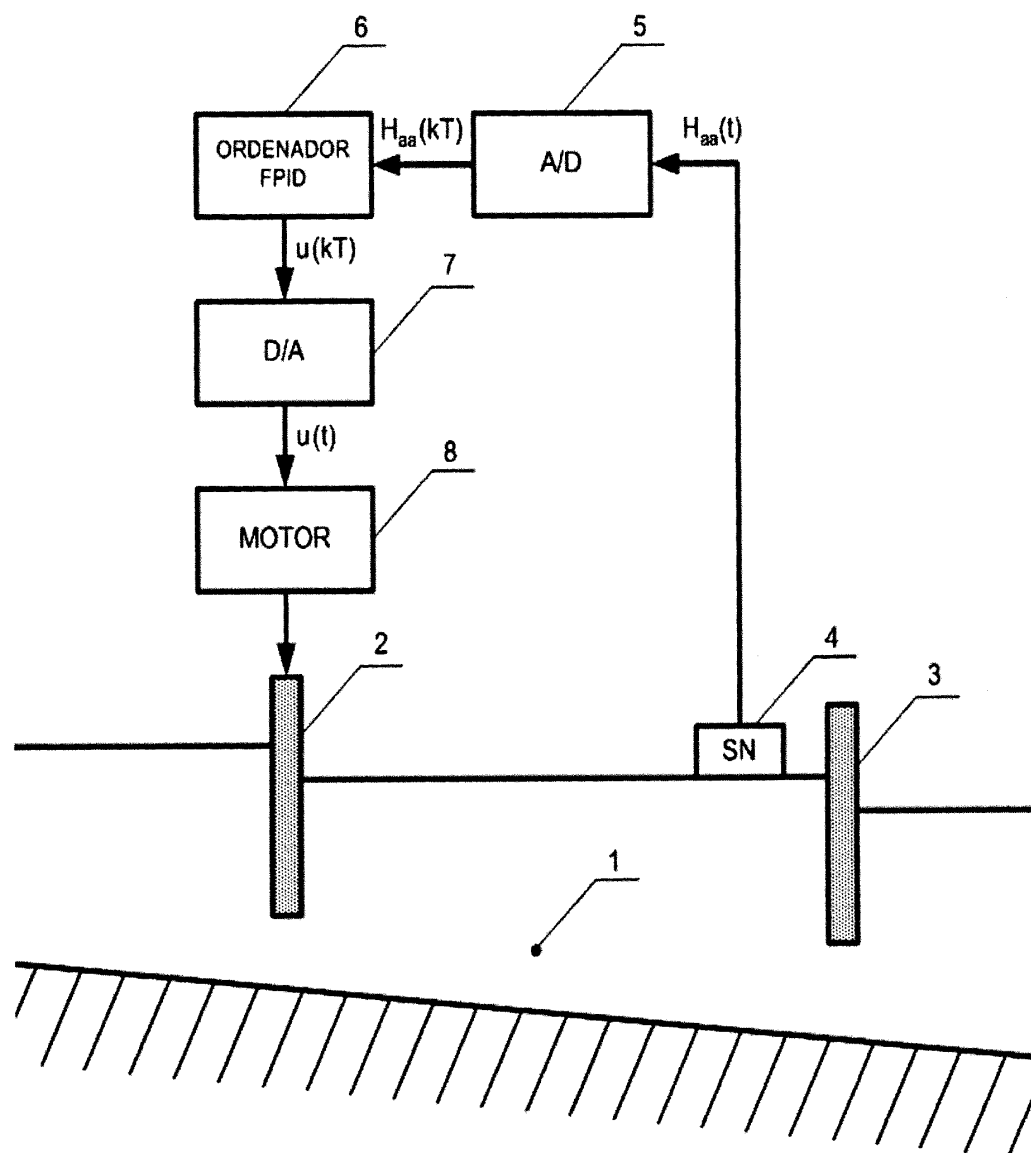


Figura 1



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 277 757

② Nº de solicitud: 200502338

③ Fecha de presentación de la solicitud: **27.09.2005**

④ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: **G05D 9/12** (2006.01)  
**E02B 7/36** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	US 2002066484 A1 (STRINGAM et al.) 06.06.2002, todo el documento.	1-3
Y	CA 2450151 A1 (AQUA SYSTEMS 2000 INC) 19.05.2005, todo el documento.	1-3
Y	JP 61235914 A (HITACHI LTD) 21.10.1986, resumen; figuras. Extraída de la base de datos PAJ en EPODOC.	1-3
A	GB 2187573 A (THAMES WATER AUTHORITY) 09.09.1987, todo el documento.	1-3
A	JP 57146320 A (HITACHI LTD; HITACHI ENG CO LTD) 09.09.1982, resumen; figuras. Extraída de la base de datos PAJ en EPODOC.	1-3

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia  
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría  
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita  
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud  
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
25.06.2007

Examinador  
P. Pérez Fernández

Página  
1/1