

**DESARROLLO DE UNA NUEVA FAMILIA DE CONTROLADORES DE ORDEN FRACCIONARIO (FOC) PARA EL CONTROL ROBUSTO DE PROCESOS PRODUCTIVOS CON COMPORTAMIENTOS DINÁMICOS DIFÍCILES E INCIERTOS**

**ENTIDAD EJECUTORA PRINCIPAL:** Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría

**AUTORES PRINCIPALES:** Raúl Rivas Pérez, Vicente Feliu Batlle

**OTROS AUTORES:** Luis Sánchez Rodríguez, Fernando José Castillo García, Antonio Linares Sáez

**OTRAS ENTIDADES PARTICIPANTES:** Universidad de Castilla la Mancha (España)

**RELACIÓN DE COLABORADORES:** Diego Pedregal Tercero (UCLM), Daniel Feliu-Talegon (UCLM), Andrés San-Millan Rodríguez (UCLM), Miguel A. Ruiz Torrija (UCLM), Shlomi N. Calderón Valdez (Universidad Nacional de Piura), José V. Aguilar Mariñoso (Confederación Hidrográfica del Ebro), Pedro Langarita García (Confederación Hidrográfica del Ebro), Victor H. Jaramillo Velásquez (Universidad Nacional de Colombia), Javier Sotomayor Moriano (Pontificia Universidad Católica del Perú).

**AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA:**

Raúl Rivas Pérez, Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Facultad de Ingeniería Automática y Biomédica, Departamento de Automática y Computación, Calle 114 No 11901, Marianao, La Habana, C.P. 19390. Tel. 72663285, e-mail: rivas@automatica.cujae.edu.cu, raul\_rivas\_perez@yahoo.es.

**RESUMEN:**

El trabajo se enmarca en el campo de las investigaciones básicas y aplicadas de las Ciencias Técnicas y abarca una obra desarrollada durante los últimos 15 años por investigadores de la Universidad Tecnológica de la Habana y de la Universidad de Castilla La Mancha (España), con resultados originales y novedosos, así como con aportes teóricos y prácticos al conocimiento (con impacto económico) en el campo de la automatización de procesos caracterizados por presentar comportamientos dinámicos difíciles e inciertos y sometidos al efecto negativo de fuertes perturbaciones (frecuentes, rápidas y agresivas). El campo de investigación es muy relevante y de gran actualidad.

La novedad científica del trabajo consiste en el desarrollo de una nueva familia de controladores de orden fraccionario (FOC), así como de nuevos métodos de análisis, síntesis y diseño de esta clase de controladores, y de algoritmos y programas, que garantizan la solución efectiva y fiable del complejo problema del control de procesos productivos con comportamientos dinámicos difíciles (no linealidades, grandes interacciones y variaciones en el tiempo en un amplio rango de los parámetros dinámicos, retardos de tiempo dominantes, perturbaciones, etc.), e inciertos (con grandes incertidumbres). Los controladores de orden fraccionario se caracterizan por utilizar operadores (integradores y/o derivadores) de orden no entero con el objeto de aumentar la

robustez y mejorar el desempeño en el control de procesos. El diseño de esta clase de controladores constituye un campo de creciente interés científico y académico en el ámbito internacional.

En el plano teórico, los resultados obtenidos realizan nuevas contribuciones al conocimiento y amplían la línea científica relacionada con el control robusto de procesos dinámicos difíciles e inciertos, por lo que los mismos han sido considerados por diferentes investigadores como nuevos logros, así como una valiosa herramienta para el control de esta clase de procesos.

El valor práctico del trabajo consiste en que los resultados teóricos obtenidos han sido aplicados para resolver el complejo problema del control robusto de procesos productivos con comportamientos dinámicos complejos e inciertos, entre los que se encuentran (hasta la fecha actual): procesos hidráulicos (sistemas y canales principales de riego), procesos térmicos (diferentes tipos de hornos siderúrgicos), procesos de generación de energía eléctrica (calderas de bagazo) y procesos químicos (plantas desalinizadoras de agua de mar).

El impacto científico de los resultados se fundamenta en la publicación de: **13 artículos** en revistas indexadas en la base de datos de la **Web of Science** con alto factor de impacto (**9** de ellas pertenecientes al **primer cuartil (Q1)** de sus respectivas clasificaciones), **12 artículos** en revistas indexadas en la base de datos de **SCOPUS** (para un total de **25 publicaciones en revistas indexadas en el Grupo 1**), **2 patentes** en el **extranjero** (España), **17 artículos** en las memorias de congresos científicos de reconocido prestigio internacional (**8** de ellos en el **Congreso Mundial de la Federación Internacional de Control Automático**), así como en la introducción de varios de estos resultados en la actividad práctica y en el proceso docente.

El **beneficio económico** evaluado (hasta la fecha) por la introducción de algunos de los controladores desarrollados en un canal principal de riego se cifra en aproximadamente **1.000.000.00** (1 millón) de **euros/año** debido al aumento de la operatividad en la distribución de agua, a la satisfacción en tiempo de las demandas de los diferentes usuarios, así como a la drástica reducción de las pérdidas de agua por concepto de operación. Desde el punto de vista de transferencia de tecnología desde la universidad a empresas se han desarrollado 3 proyectos de investigación con un financiamiento de **268.076.00** (doscientos sesenta y ocho mil setenta y seis) **euros**.

## **DESCRIPCIÓN DEL RESULTADO**

### **Introducción**

Actualmente, diversos procesos productivos (industriales, biomédicos, biotecnológicos, agrícolas, etc.) se distinguen por presentar comportamientos dinámicos difíciles e inciertos, los cuales se caracterizan por exhibir no linealidades, interacciones y grandes variaciones en el tiempo de sus parámetros dinámicos, retardos de tiempo dominantes, fuertes perturbaciones (frecuentes, rápidas y agresivas), actuaciones inciertas e imprevisibles, es decir resulta prácticamente imposible predecir su evolución dinámica futura. La dinámica de esta clase de procesos se caracteriza por la fluctuación, comportamiento en el que el orden y el desorden se alternan constantemente. Sus estados evolutivos no transcurren a través de procesos continuos y graduales, sino que suceden por medio de reorganizaciones y saltos con grandes incertidumbres. Cada nuevo estado es sólo una transición, es decir un período de reposo entrópico. Por consiguiente, desde la perspectiva del control automático, estos procesos representan un enorme e interesante desafío, debido a que es bien conocido que cuando los procesos presentan comportamientos dinámicos difíciles e inciertos, los

controladores *PID* convencionales no son suficientes.

Para el control de esta clase de procesos se han propuestos diferentes controladores avanzados entre los que se encuentran controladores predictivos basados en modelos (CPBM), controladores robustos ( $H_2$ ,  $H_\infty$ , etc.), controladores inteligentes, controladores multivariables, etc. Muchos de estos controladores presentan una difícil implementación práctica debido a la complejidad de sus algoritmos de control y a requerimientos de ingenieros y especialistas con un elevado nivel de preparación. Por consiguiente, el desarrollo de métodos sistemáticos de diseño de controladores robustos y simples para el control de esta clase de procesos constituye un área de investigación de elevado y creciente interés científico-técnico y práctico.

En los últimos años, como resultado de una mejor comprensión del cálculo de orden fraccionario, los operadores de orden fraccionario han sido aplicados con resultados satisfactorios en el modelado y control de procesos con comportamientos dinámicos difíciles e inciertos. El cálculo de orden fraccionario representa a la teoría que involucra a derivadas e integrales de orden arbitrario, la cual generaliza y unifica los conceptos de diferenciación e integración de orden entero y constituye un campo poco explorado y difundido, por lo que su fundamento matemático se encuentra en continuo desarrollo.

El operador básico de integración y diferenciación de orden no necesariamente entero (real e incluso complejo) se representa como  ${}_a D_t^\alpha$ , donde  $a$  y  $t$  son los límites de operación y  $\alpha$  es el orden del operador. Este operador se puede definir, por ejemplo, mediante la expresión:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & : \alpha > 0; \\ 1 & : \alpha = 0; \\ \int_a^t (dt)^\alpha & : \alpha < 0. \end{cases} \quad (1)$$

En este sentido, se han propuesto diferentes definiciones de este operador, entre las que se encuentran las de: Riemann-Liouville, Caputo y Grünwald-Letnikov. Por lo general, el límite inferior  $a$  del operador integro-diferencial (1) se toma igual a cero. En el dominio del tiempo, estos operadores se encuentran definidos por la operación de convolución, por lo que están especialmente indicados para describir fenómenos con memoria (difusión, transporte, etc.). En el dominio de Laplace, este operador se corresponde con  $s^\alpha$  (siempre que las condiciones iniciales sean cero) y por lo tanto su respuesta en frecuencia es  $(j\omega)^\alpha$ . Esta última característica es muy atractiva en el diseño de controladores con especificaciones en el dominio de la frecuencia, ya que posibilita la obtención de sistemas de control con nuevos comportamientos asintóticos en el dominio de la frecuencia, tanto en magnitud, como en fase.

En los últimos años, los operadores de orden fraccionario han sido aplicados de forma exitosa en el modelado y diseño de controladores de procesos con comportamientos dinámicos difíciles e inciertos, muchos de ellos con parámetros distribuidos. Una de las ventajas de los controladores de orden fraccionario (FOC) consiste en que posibilitan el diseño de sistemas de control robusto de procesos cuyos parámetros dinámicos varían en un amplio rango (LPV), de procesos con fluctuaciones, o de procesos con dinámicas inciertas.

El comportamiento cualitativo, así como la robustez de los controladores *PID* convencionales puede mejorarse considerablemente mediante su generalización a controladores del tipo  $PI^\alpha D^\lambda$ , los cuales involucran un integrador de orden  $\alpha$  y un derivador de orden  $\lambda$ . Por consiguiente, estos controladores cuentan con 5 grados de libertad, dos grados más que los *PID* convencionales, lo que posibilita obtener un mejor desempeño de los sistemas de control.

Sin embargo, a pesar de las grandes ventajas que potencialmente pueden reportar los FOC en el control de procesos con comportamientos dinámicos difíciles, el diseño y aplicación de estos controladores es muy limitado. Ello se debe a las dificultades matemáticas y de implementación práctica que se originan debido a la utilización de operadores de orden fraccionario.

Considerando lo antes expuesto, el grupo conjunto de investigadores CUJAE/UCLM se encuentra trabajando desde el año 2001 en el objetivo de diseñar e implementar, con aportes al conocimiento, una nueva familia de controladores robustos y simples de orden fraccionario para el control de procesos productivos caracterizados por presentar comportamientos dinámicos difíciles e inciertos. En el plano teórico, los resultados obtenidos amplían significativamente el campo del conocimiento relacionado con el desarrollo de métodos de análisis, síntesis y diseño de controladores de orden fraccionario.

#### **Resultados obtenidos:**

- ✓ Se propone por primera vez un controlador robusto  $PI^\alpha F$ , donde  $F$  es un filtro, combinado con un predictor de Smith (PS) para el control de procesos con grandes variaciones en el retardo de tiempo. Este controlador se aplica en el control de nivel en un canal principal de riego. Es notorio destacar que por primera vez se inserta un controlador de orden fraccionario en la estructura de un PS (**S12, 2005**).
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores  $PI^\alpha D^\lambda$  para el control robusto de procesos caracterizados por presentar grandes variaciones en la ganancia y en el retardo de tiempo. En base a este método se diseña un controlador que se aplica, por primera vez, en la solución del complejo problema del control robusto de la distribución de agua en un canal principal de riego. Además el controlador diseñado, por primera vez, se implementa en un canal prototipo de laboratorio (**WoS13, 2007**).
- ✓ Se propone el diseño de un nuevo controlador  $IID^\alpha$ , el cual exhibe un comportamiento robusto frente a ruidos de medidas de alta frecuencia e incertidumbres del modelo (**S11, 2007**).

- ✓ Se propone el diseño de un nuevo controlador  $I^\alpha DI^\alpha$ , el cual muestra un comportamiento robusto frente a variaciones del retardo de tiempo. El controlador diseñado se implementa en el control de nivel de un canal prototipo de laboratorio **(S10, 2007)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de un controlador  $II^\alpha$  combinado con un PS, el cual presenta un comportamiento robusto frente a variaciones de la ganancia del proceso **(S9, 2008)**.
- ✓ Se propone el diseño de un nuevo tipo de controlador  $IID^\alpha$  y se realiza una propuesta de su implementación práctica en tiempo real en un canal principal de riego **(S8, 2008)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores  $I^\alpha$  combinados con PS para el control robusto de procesos con grandes variaciones en el retardo de tiempo. Los controladores diseñados en base a este método muestran comportamientos robustos frente a ruidos de medidas de alta frecuencia y fuertes perturbaciones. El método se aplica en el diseño de un controlador de la distribución de agua en un canal principal de riego **(WoS12, 2009)**.
- ✓ Se realiza el diseño de un nuevo controlador  $I^\alpha DI^\alpha F$  el cual exhibe un comportamiento robusto frente a grandes variaciones de la ganancia del proceso. Se realiza una propuesta de su implementación práctica en un canal prototipo de laboratorio **(WoS11, 2009)**.
- ✓ Se propone un nuevo método para el diseño de controladores  $PI^\alpha F$  combinado con un PS para el control de procesos con drásticas variaciones del retardo de tiempo. El controlador derivado mediante este método se utiliza en el control de la distribución de agua en canales principales de riego **(WoS10, 2009)**.
- ✓ Se desarrolla el diseño de un nuevo controlador  $DI^\alpha I^\alpha$  para el control de procesos con grandes variaciones en sus parámetros dinámicos. El controlador diseñado se aplica en el control de nivel en un canal prototipo de laboratorio **(S7, 2009)**.
- ✓ Se desarrolla una metodología para el diseño de controladores de orden fraccional en base a especificaciones en el dominio de la frecuencia que posibilita que se cumplan las especificaciones en el dominio del tiempo para plantas de primer orden. Las relaciones clásicas entre las especificaciones en el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo se modifican para considerar los efectos del operador fraccionario. Estas modificaciones consideran el orden del operador fraccionario, lo que permite obtener sistemas de lazos cerrados que verifican exactamente las especificaciones deseadas en el dominio del tiempo **(WoS9, 2010)**. El método se aplica en el diseño de un controlador  $PI^\alpha$  de la distribución de agua en un canal principal de riego **(S6, 2011)**.
- ✓ Se propone una metodología para el análisis comparativo de la estabilidad de sistemas de control con controladores  $PI$  y  $PI^\alpha$ , y plantas de primer orden con retardo de tiempo **(S5, 2011)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores robustos  $PI^\alpha DI^\alpha$  para el control de procesos con parámetros dinámicos variantes en el tiempo. El controlador diseñado en base a este método se aplica en el control de la distribución de agua en un canal principal de riego **(WoS8, 2011)**.
- ✓ Se propone una nueva metodología de diseño de controladores  $PI^\alpha$ ,  $II^{1-\alpha}$  y  $I^\alpha D^{1-\alpha}$  combinados

con un PS para el control robusto de plantas de segundo orden con grandes variaciones en todos sus parámetros dinámicos. Los controladores derivados en base a esta metodología se utilizan en el control de la distribución de agua en un canal principal de riego **(WoS7, 2013)**.

- ✓ Se desarrolla una nueva metodología de análisis de estabilidad de sistemas de control con controladores  $I^\alpha$ ,  $PI^\alpha$ ,  $II^\alpha$ ,  $I^\alpha D^{1-\alpha}$ . El análisis de estabilidad se desarrolla considerando el ajuste de los controladores en el dominio de la frecuencia y una planta de primer orden con retardo de tiempo. Con el fin de analizar la estabilidad que proporcionan los controladores, se presenta un nuevo concepto: región de especificaciones de frecuencia factible. Además se propone un método de análisis de robustez, el cual proporciona un procedimiento de ajuste de controladores basado en el concepto de región de especificaciones de frecuencia factible **(WoS6, 2013)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores  $I^\alpha F$  combinados con un PS para el control de temperatura en hornos de recalentamiento de palanquillas con grandes variaciones en el retardo de tiempo **(WoS5, 2013; S4, 2014)**.
- ✓ Se propone una metodología de diseño de controladores robustos  $PI^\alpha$  para el control del posicionamiento de los electrodos de un horno de arco eléctrico. El método se basa en el desarrollo de una inversión parcial de la dinámica del proceso. Por primera vez se aplica un controlador de orden fraccionario en esta clase de procesos **(S3, 2011)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores robusto  $ID^{\alpha-1}$  en base a especificaciones en el dominio de la frecuencia para el control efectivo de la presión del vapor en el domo superior de una caldera bagacera, caracterizada por presentar grandes variaciones en la ganancia y en el retardo de tiempo. Por primera vez se aplica un controlador de orden fraccionario en esta clase de procesos **(WoS4, 2014)**.
- ✓ Se propone el diseño de un controlador robustos  $PI^\alpha$  para el control de la presión del vapor en una caldera bagacera **(S2, 2014)**.
- ✓ Se propone una metodología de diseño de controladores robustos  $PID^{\alpha-1}$  para el control de la

distribución de agua en canales principales de riego. En base a esta metodología se diseñó un controlador que se programó en un *PLC SIMATIC S-7 300* y se implementó en tiempo real en el primer tramo del canal principal Imperial de Aragón, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro, España. Por primera vez se implementa en tiempo real un controlador de orden fraccionario en un canal principal de riego **(WoS3, 2014)**.

- ✓ Se desarrolla una metodología de diseño de controladores robustos  $G_p^{-1}DFPI^\alpha$  para el control del posicionamiento de los electrodos de un horno siderúrgico de arco eléctrico, los cuales se caracterizan por presentar grandes variaciones en sus parámetros dinámicos **(WoS2, 2016)**.
- ✓ Se propone un nuevo método de diseño de controladores de procesos con comportamientos dinámicos de orden fraccionario y retardo de tiempo, basado en una extensión del método de diseño de controladores óptimos de Wiener-Hopf y la aproximación de Padé del retardo de tiempo. Por otra parte, con el fin de mejorar la robustez del sistema de control, se propone un nuevo controlador de orden fraccionario con ganancia programada. Los controladores diseñados se aplican en el control de nivel en un canal prototipo de laboratorio **(WoS1, 2017)**.
- ✓ Se propone un método de diseño de controladores robustos de orden fraccionario para el control de procesos multivariables TITO (dos entradas y dos salidas). El sistema de control propuesto se encuentra conformado por un desacoplador, un compensador diagonal de la dinámica menos variable y un controlador  $PI^\alpha$  para cada uno de los dos lazos. El controlador diseñado se aplica en el control de un bastidor de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar. Por primera vez se aplica un controlador de orden fraccionario en esta clase de procesos **(S1, 2017)**.
- ✓ Se patenta un controlador de orden fraccionario, basado en una PC, para el control de niveles del agua en canales principales de riego, caracterizados por presentar parámetros dinámicos variables en el tiempo. La generación de la señal de control se realiza a través de un algoritmo de control  $PI^\alpha D^\lambda$  discreto. 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 **(P2, 2008)**.
- ✓ Se patenta un controlador de orden fraccionario con ganancia programada, que posibilita elevar la robustez y efectividad en el control de niveles de agua en los tramos de los canales principales de riego, caracterizados por presentar grandes variaciones en sus parámetros dinámicos (ganancias, constantes de tiempo y retardos de tiempo) al variar la descarga a través de sus compuerta aguas arriba. Además, este controlador garantiza una alta seguridad en la operatividad de los tramos del canal, y reduce significativamente las pérdidas actuales de agua por concepto de explotación **(P1, 2011)**.

**Nota: WoS** – Publicaciones en revistas indexadas en la Web de la Ciencia;

**S** – Publicaciones en revistas indexadas en Scopus

**C** – Publicaciones en las memorias de congresos internacionales

**P** – Patentes

### **Publicaciones en revistas indexadas en la base de datos de la Web de la Ciencia (WoS)**

**WoS1.** Feliu-Batlle V., Feliu-Talegon D., San-Millan A., Rivas-Perez R. (2017). Wiener-Hopf optimal control of a hydraulic canal prototype with fractional order dynamics. ISA Transactions

- (approved for publication). <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2017.06.012>. **Q1**
- WoS2.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R. (2016). Robust fractional-order controller for an EAF electrode position system. *Control Engineering Practice*, 56, 159-173, England. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.017>. **Q1**
- WoS3.** Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F.J., Sanchez-Rodriguez L., Linares Saez A. (2014). Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 23-42. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n1/v5n1a2.pdf>. **Q4**
- WoS4.** Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sotomayor-Moriano J., Feliu-Batlle V. (2014). Robust fractional order control of steam pressure in steam drum of bagasse boiler. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(1), 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.002>. **Q4**
- WoS5.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2013). Simple fractional order controller combined with a Smith predictor for temperature control in a steel slab-reheating furnace. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 11(3), 533-544. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12555-012-0355-z>. **Q2**
- WoS6.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R. (2013). Frequency specification regions of fractional order PI controller for first order plus time delay processes. *Journal of Process Control*, 23(4), 598-612. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.01.001>. **Q1**
- WoS7.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R. (2013). 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*, 15(3), 819-833. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asjc.558/pdf>. **Q2**
- WoS8.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sanchez-Rodriguez L., Linares Saez A. (2011). Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.018>. **Q1**
- WoS9.** Castillo F.J., Feliu V., Rivas R., Sanchez L. (2010). Design of a class of fractional controllers from frequency specifications with guaranteed time domain behaviour. *Computers and Mathematics with Applications*, 59(5), 1656-1666. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.007>. **Q1**
- WoS10.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2009). Fractional order controller robust to time delay variations for water distribution in an irrigation main canal pool. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(2), 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.08.005>. **Q1**
- WoS11.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez Rodriguez L., Ruiz Torrija M.A. (2009). Robust fractional order *PI* controller implemented on a laboratory hydraulic canal. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 135(4), 271-282, USA. [http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:4\(271\)](http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:4(271)). **Q1**
- WoS12.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.G., Sanchez-Rodríguez L. (2009). Smith predictor based robust fractional order control: Application to water distribution in a main irrigation canal pool. *Journal of Process Control*, 19(3), 506-519, United Kingdom. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2008.05.004>. **Q1**
- WoS13.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez Rodriguez L. (2007). Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters. *Control Engineering Practice*, 15(6), 673-686. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.11.018>. **Q1**

**Nota:**  $Q_i$  muestra el cuartil en la que se encuentra indexada la revista en su clasificación en la WoS.

**Publicaciones en revistas indexadas en la base de datos SCOPUS (S)**

- S1.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., (2017). Fractional order robust control of a reverse osmosis seawater desalination plant. IFAC Proceedings Volumes (IFAC- PapersOnLine), **Elsevier** (approved for publication). Por el momento, publicado solamente en las memorias del XX Congreso Mundial de la IFAC).
- S2.** Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sotomayor Moriano J., Feliu-Batlle V. (2014). Design of a fractional order PI controller for steam pressure in the steam drum of a bagasse fired boiler. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 47(3), 1337-1342. <http://dx.doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00927>. **Elsevier**.
- S3.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Rodríguez Martínez C.A. (2014). A robust fractional order controller for an EAF electrode position system. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 47(3). <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.017>, **Elsevier**.
- S4.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2014). Robust fractional-order temperature control of a steel slab-reheating furnace with large time delay uncertainty. IEEE Proceedings of International Conference on Fractional Differentiation and its Applications, ICFDA'2014. DOI: 10.1109/ICFDA.2014.6967372.
- S5.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez L. (2011). Comparative analysis of stability and robustness between integer and fractional-order PI controllers for first order plus time delay plants. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 44(1), 15019-15024. <http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01875>, **Elsevier**.
- S6.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez L. (2011). 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 (IFAC-PapersOnLine), 44(1), 15049-15054. <http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03138>, **Elsevier**.
- S7.** Calderon Valdez S.N., Rivas-Perez R., Ruiz Torija M.A., Feliu-Batlle V. (2009). 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, 1411-1417. DOI: 10.1109/ETFA.2009.5347163.
- S8.** Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez Rodriguez L., Castillo Garcia F.J., Linarez Saez A. (2008). Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 41(2), 15535-15540. <http://dx.doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02627>, **Elsevier**.
- S9.** Castillo Garcia F., Rivas-Perez R., Feliu Batlle V. (2008). Fractional  $II_\alpha$  controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 41(2), 14558-14563. <http://dx.doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02466>, **Elsevier**.
- S10.** Sanchez Rodriguez L., Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Ruiz-Torrija M.A. (2007). Robust control of a laboratory hydraulic canal by using a fractional PI controller. Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Vol. 5, Parts A, B, C, 1307-1315. DOI: 10.1115/DETC2007-34670.
- S11.** Feliu Batlle V., Sanchez Rodriguez L., Rivas Perez R., Pedregal Tercero D., Linarez Saez A., Aguilar Mariñoso J.V., Langarita García P. (2007). Fractional PI control of an irrigation main canal. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 40(1), 280-285. <http://dx.doi.org/10.3182/20070213-3-CU-2913.00048>, **Elsevier**.
- S12.** Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo F. (2005). Fractional robust control to delay changes in

main irrigation canals. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnLine), 38(1), 28-33. <http://dx.doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.02095>, Elsevier.

**Publicaciones en las memorias de congresos de elevado impacto científico (C)**

- C1.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Linares-Sáez A. (2017). Fractional order robust control of a reverse osmosis seawater desalination plant. Proceedings of **20th IFAC World Congress** (Toulouse, July 9-14), France.
- C2.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Rodríguez Martínez C.A. (2014). A robust fractional order controller for an EAF electrode position system. Proceedings of **19th IFAC World Congress** (Cape-Town, August 24-29), 10670-10675, South Africa.
- C3.** Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J., Sotomayor Moriano J., Feliu-Batlle V. (2014). Design of a fractional order PI controller for steam pressure in the steam drum of a bagasse fired boiler. Proceedings of **19th IFAC World Congress** (Cape-Town, August 24-29), 1337-1342, South Africa.
- C4.** Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo-Garcia F.J. (2014). Robust fractional-order temperature control of a steel slab-reheating furnace with large time delay uncertainty. **IEEE Proceedings of International Conference on "Fractional Differentiation and its Applications, ICFDA '14** (Catania, June 23-25), Italy. DOI: 10.1109/ICFDA.2014.6967372.
- C5.** Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J., Feliu-Batlle V., Castillo-García F., Mora, I. Y. (2012). Control robusto de orden fraccional de la presión del vapor en el domo superior de una caldera bagacera. Memorias del XV Congreso Latinoamericano de Control Automático "CLCA12" (Lima, Octubre 23-26), Perú. Congreso IFAC. DOI: 10.13140/RG.2.1.4230.0323.
- C6.** Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Castillo F. (2012). Fractional order temperature control of a steel slab-reheating furnace robust to delay changes. Proceedings of 5th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications "FDA12" (Nanjing, May 14-17), China. DOI: 10.13140/RG.2.1.1960.0803.
- C7.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L. (2011). Comparative analysis of stability and robustness between integer and fractional-order PI controllers for first order plus time delay plants. Proceedings of **18th IFAC World Congress** (Milan, August 28 - September 2), 15019-15024, Italy.
- C8.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L. (2011). 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. Proceedings of **18th IFAC World Congress** (Milan, August 28 - September 2), 15049-15054, Italy.
- C9.** Calderon-Valdez S.N., Ruiz-Torija M.A., Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V. (2010). Fractional order *PI* controller with minimized weighted integral squared error using extreme possible models of a laboratory hydraulic canal. Proceedings of 4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications "FDA10" (Badajoz, October 18-20), Spain.
- C10.** Castillo F.J., Feliu V., Sánchez L., Rivas-Perez R., Jaramillo V.H. (2010). Robust  $PD^\alpha$  time-domain tuning rules for controlling DC-motors. Proceedings of 4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications "FDA10" (Badajoz, October 18-20), 2010, Spain.
- C11.** Calderon Valdez S.N., Ruiz Torija M.A., Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V. (2009). Fractional PI controller design with optimized robustness to time delay changes in main irrigation canals. Proceedings of the 14th **IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, ETFA'09** (Palma de Mayorca, September 22-25), Spain, 1411-1417. DOI: 10.1109/ETFA.2009.5347163.
- C12.** Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L. (2008). On the

relationship between frequency and time-domain specifications in a class of fractional PI controllers. Proceedings of Third IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications "FDA08" (Ankara, November 5-7), Turkey.

- C13.** Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez Rodriguez L., Castillo Garcia F., Linarez Saez A. (2008). Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool. Proceedings of **17th IFAC World Congress** (Seoul, July 6-11), South Korea.
- C14.** Castillo Garcia F., Rivas-Perez R., Feliu Batlle V. (2008). Fractional I $\alpha$  controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool. Proceedings of **17th IFAC World Congress** (Seoul, July 6-11), South Korea.
- C15.** Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Ruiz Torrija M.A., Sanchez Rodriguez L. (2007). Fractional control strategies implemented in an automated experimental hydraulic canal of laboratory. Proceedings of Symposium on Applied Fractional Calculus "SAFC07" (Badajoz, October 15-17), Spain.
- C16.** Sanchez Rodriguez L., Feliu Batlle V., Rivas-Perez R., Ruiz Torija M.A. (2007). Robust control of a laboratory hydraulic canal by using a fractional PI controller. Proceedings of the **ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference "IDETC07"** (Las Vegas, September 4-7), Vol. 5(Parts A, B, and C), 1307-1315, USA. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1591761>.
- C17.** Feliu Batlle V., Rivas Perez R., Castillo F. (2005). Fractional robust control to delay changes in main irrigation canals. Proceedings of **16th IFAC World Congress** (Prague, July 3-8, 2005), Czech Republic.

## **Patentes (P)**

- P1.** Rivas-Perez R., Feliu Batlle V., Castillo García F.J., Sanchez Rodriguez L., Linares Saez A. (2011). Sistema de control de orden fraccional con ganancia programada de niveles de agua en canales principales de riego. **Patente No ES 2345801**, Clasificación Internacional G05 D 9/12, E02 B 7/36. Boletín Oficial de la Propiedad Industrial 16/05/2011. Oficina Española de Patentes y Marcas, España. DOI: 10.13140/RG.2.1.4769.9363.
- P2.** Rivas-Perez R., Feliu Batlle V., Sanchez Rodriguez L., Castillo Garcia F.J., Linares Saez A. (2008). Sistema de control fraccional, basado en ordenador, de niveles del agua en canales principales de riego. **Patente No ES 2277757**, Clasificación Internacional G05 D 9/12, E02 B 7/36. Boletín Oficial de la Propiedad Industrial 16/06/2008. Oficina Española de Patentes y Marcas, España. DOI: 10.13140/RG.2.1.5097.6163.