

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
*Comité Español
de Automática*

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)
servipub@uniovi.es

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinares.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politecnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad PolitÁcnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politécnica de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
Miguel Ángel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia
Beltrán de La Cita, Jorge
Bermudez-Cameo, Jesus
Blanco-Claraco, Jose-Luis
Blanes, Francisco
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar
Gimenez, Antonio
Gruber, Patrick
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul
Marín Plaza, Pablo
Mañanas, Miguel Angel
Morales, Rafael
Moreno, Francisco-Angel

Nuñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio
Posadas-Yague, Juan-Luis
Poza-Luján, Jose-Luis
Pumarola, Albert

Raya, Rafael
Revestido Herrero, Elías
Rocon, Eduardo
Ruiz Sarmiento, José Raúl
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control	
<hr/>	
TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobioreactor raceway	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> Automar <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> Bioingeniería <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive.....	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG)	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG	328
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> Control Inteligente <hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> Educación en Automática <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruiz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO.....	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios.....	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK.....	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning.....	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA.....	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO.....	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.....	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras.....	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS.....	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martin and S. Diaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA.....	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES.....	641
<i>Manuel Jesús Vasallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocarú and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía.....	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab.....	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior.....	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroya and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot	787
<i>Sara Marqués Villarroya, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO	793
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS	806
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....	821
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL	829
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias.....	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO	844
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....	852
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

Sistemas de Tiempo Real

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>María Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

Visión por Computador

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletismográfica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador ..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS .	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS

Pedro M. Vallejo Llamas (pedrito@usal.es)
Dpto. de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.
Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca.

Pastora Vega Cruz (pvega@usal.es)
Dpto. de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.
Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca

Resumen

El trabajo que aquí se presenta se sitúa en el ámbito del Control Predictivo No Lineal, tomando como base de las predicciones un modelo fuzzy del proceso (FMBPC), obtenido mediante identificación a partir de datos de entrada y salida. En nuestro caso, siguiendo una línea particular introducida previamente por otros autores, tal modelo es tratado adecuadamente para poder expresarlo en forma de ecuaciones de estado, más comprensibles y manejables. Y utilizando estas ecuaciones para el cálculo de las predicciones, junto con la restricción del seguimiento de una trayectoria de referencia, se deducirá una expresión analítica expresa para la Ley de Control. El enfoque elegido reúne dos posibles ventajas, según diversos autores: la idoneidad de los esquemas de control predictivo basados en modelos fuzzy para controlar procesos con una dinámica fuertemente no lineal, por un lado, y la claridad y concreción del procedimiento numérico de obtención de la ley de control predictivo de una manera analítica, frente a los procedimientos basados en optimización. En este artículo se estudia la aplicación de esta estrategia al control de un proceso biológico de depuración de fangos activados, un proceso fuertemente no lineal y multivariable, realizando diversos experimentos de Control Predictivo basado en modelos Fuzzy (FMBPC), mediante simulación.

Palabras Clave: control predictivo, modelo no lineal, identificación fuzzy, espacio de estados, ley de control analítica, depuración de fangos activados.

1 INTRODUCCIÓN

El conjunto de estrategias agrupadas bajo la denominación de *Control Predictivo basado en Modelos (MBPC)* [4], constituye una de las alternativas más consolidadas en control de procesos industriales (normalmente multivariables y con restricciones), frente a los esquemas clásicos de

control. Existen numerosas variantes dentro de este grupo, entre ellas las basadas en modelos no lineales del proceso a controlar (*Control Predictivo No Lineal*). De forma abreviada, podemos decir que la estrategia de *Control Predictivo* consiste, en esencia, en la utilización de un modelo del proceso (*modelo de predicciones*) para poder determinar las acciones de control idóneas en cada instante, imponiendo la minimización de alguna función de coste (dependiente del error y generalmente también de los esfuerzos de control, entre otras posibles variables). No existe, sin embargo, una única estrategia de control predictivo, abarcando esta denominación a un amplio conjunto de estrategias que coinciden en el método de determinación de la ley de control que acabamos de describir, pero que admite muchas variantes, dependiendo de varios factores, principalmente del tipo de modelo utilizado para calcular las predicciones y del algoritmo matemático empleado para determinar la ley de control. Dependiendo de la naturaleza del modelo de predicciones (lineal o no lineal), podemos clasificar estas estrategias en dos grandes grupos: *Control Predictivo Lineal* y *Control Predictivo no Lineal*. El segundo grupo está integrado por los métodos que utilizan modelos matemáticos no lineales, como modelos de tipo Fuzzy [12], modelos formalizados mediante Redes Neuronales Artificiales u otras alternativas (...). El presente trabajo pertenece al conjunto de estrategias de control predictivo basadas en modelos no lineales y más concretamente en modelos fuzzy [2, 7 y 9]. En relación con la determinación de la variable de control, la mayoría de las estrategias (tanto con modelo lineal, como con modelo no lineal) utilizan algún tipo de algoritmo matemático de optimización (imponiendo la minimización de alguna función de coste). Sin embargo, en nuestro trabajo tal cálculo no se hace mediante optimización, sino que se lleva a cabo de forma analítica y explícita, que constituye una interesante alternativa.

El modelo de predicciones elegido en este trabajo es

un modelo fuzzy de tipo *Takagi-Sugeno* [10], en el cuál las premisas de las reglas son expresiones lógicas difusas relativas a los antecedentes de las reglas, mientras que las conclusiones son combinaciones lineales numéricas de los consecuentes de tales reglas. Los modelos fuzzy son muy apropiados para describir sistemas no lineales, pero existe quizás cierta dificultad a la hora de utilizar las relaciones matemáticas fuzzy y por ello se han formalizado las expresiones del modelo con un formato similar al de las Ecuaciones de Estado, obteniendo así un modelo matemático expresado de manera analítica. Haciendo uso del mismo podremos *despejar* la variable de control que garantice, para cada instante de muestreo, el objetivo de seguimiento deseado. Así, dispondríamos de la variable de control expresada de manera analítica y explícita. Este método podría considerarse una extensión al caso de los sistemas no lineales del denominado *Predictive Functional Control (PFC)*, ideado inicialmente para sistemas lineales.

La estrategia de control predictivo considerada en el presente artículo ha sido abordada antes por otros autores. Más concretamente, en [3] se desarrolla para un caso de estudio con una entrada manipulable y una única salida controlada y sin considerar perturbaciones. En este artículo, sin embargo, se aborda un caso de estudio en el que el proceso es multivariable y se consideran perturbaciones en la entrada del mismo. Se trata de un proceso biológico de depuración de fangos activados en el que se han considerado tres entradas y dos salidas. De las tres entradas, únicamente una de ellas es manipulable y las otras dos son perturbaciones. Y el objetivo es controlar simultáneamente ambas salidas. El modelo fuzzy de predicciones se expresará, como hemos dicho anteriormente, en forma de ecuaciones en el espacio de estados. Estas ecuaciones serán matriciales debido al carácter multivariable del proceso y, por otra parte, tendrán la importante particularidad de que los coeficientes de los distintos términos no serán constantes, puesto que, tras la correspondiente formalización matemática, resultan dependientes del vector premisa instantáneo (más concretamente, de los grados de cumplimiento del vector premisa respecto de las diferentes reglas, en cada instante) y por tanto, en última instancia, dependientes del instante de muestreo, siendo necesario por tanto que tales coeficientes sean actualizados (recalculados) en cada período de tiempo. La existencia de dos perturbaciones y una única entrada manipulada, supone que no será fácil controlar el proceso. Sobre todo, teniendo en cuenta que el proceso considerado es de tipo biológico, fuertemente no lineal y bastante más impredecible

que muchos procesos industriales fisicoquímicos. Abordar un caso de estudio con todas estas complejidades constituye precisamente una de las principales aportaciones del presente artículo.

2 CASO DE ESTUDIO

Nuestro caso de estudio consiste en una planta depuradora de aguas residuales (*EDAR*) con tratamiento biológico de depuración mediante fangos activados, simplificada a efectos de estudio. En la figura siguiente (Fig. 1) puede verse el diagrama de bloques entrada/salida del sistema elegido, con las distintas variables implicadas y en la Tabla 1 se muestra, organizada, toda la información relativa a las distintas entradas y salidas consideradas:

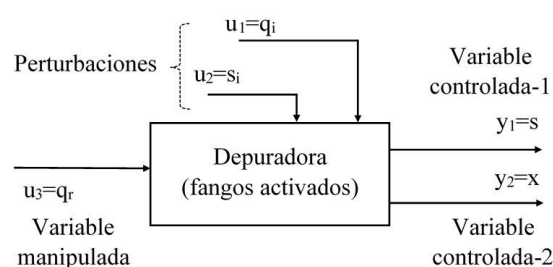


Figura 1: Sistema biológico multivariable (diagrama de bloques entrada/salida)

Tabla 1: Entradas y salidas de la depuradora

Entradas	u_1	Perturbaciones	Caudal de agua entrante	q_i
	u_2		Concentración de sustrato entrante	s_i
	u_3	Variable Manipulada	Caudal de recirculación de fangos activados	q_r
Salidas	y_1	Variable Controlada 1	Concentración de sustrato saliente	s
	y_2	Variable Controlada 2	Concentración de biomasa saliente	x

En la depuradora, la eliminación de los contaminantes orgánicos o *sustrato* corre a cargo de la denominada *biomasa*, que son poblaciones de microorganismos que se alimentan de los contaminantes, reaccionando con ellos en presencia de oxígeno, depurando así el agua y generando como subproducto los denominados fangos activados, que son separados mediante sedimentación en el decantador secundario. Una de las principales acciones de control de este tipo de procesos es, precisamente, la recirculación de tales fangos (los

cuales contienen microorganismos digestores), desde el decantador secundario hacia el reactor biológico aerobio, para mantener en un cierto nivel la concentración de microorganismos en el reactor. Y, por supuesto, también influirá en la evolución del proceso de depuración, el grado de aireación en el reactor, acción que se realiza para suministrar el oxígeno que necesitan las reacciones aerobias entre bacterias y contaminantes orgánicos. En nuestro caso, no obstante, y por razones de simplificación, hemos considerado como única variable manipulada el caudal de recirculación de fangos (q_r), considerando constante, y con un valor adecuado, el grado de aireación.

El modelo matemático del proceso de depuración utilizado es una simplificación del modelo estándar denominado *Activated Sludge Model No.1*, más conocido por sus siglas en inglés: *ASMI* [6]. La simplificación ha consistido en lo siguiente: por un lado, hemos considerado una planta depuradora con un único reactor aeróbico seguido de un decantador secundario y, por otro, se han considerado únicamente los balances de masa correspondientes al sustrato y a la biomasa (no se ha considerado el del oxígeno). La estructura de la planta y las ecuaciones del modelo considerado pueden verse en [5], teniendo en cuenta la limitación mencionada en cuanto a número de reactores y considerando únicamente la parte del modelo relativa al sustrato y a la biomasa.

3 MODELADO FUZZY

En nuestro caso de estudio, el modelado fuzzy constituye una buena alternativa, entre otras posibles, por su potencialidad para capturar dinámicas no lineales. La primera etapa de nuestro trabajo consistió en diseñar y llevar a cabo un proceso de identificación con el objetivo de obtener un modelo fuzzy para el proceso de depuración. La identificación se llevó a cabo partiendo de series de datos numéricos de entrada-salida, determinando previamente las salidas mediante simulación en lazo abierto (con la depuradora representada por su modelo matemático clásico no lineal en forma de ecuaciones diferenciales [5]). Los datos disponibles fueron procesados mediante la herramienta-software de identificación denominada *FMID (Fuzzy Model Identification Toolbox)* [1], junto con algunas adaptaciones y complementos de código que programamos en el entorno de *Matlab & Simulink*. La herramienta fue desarrollada principalmente por el profesor Robert Babu ka como soporte software de las teorías y técnicas de modelado e identificación fuzzy descritas en el libro *Fuzzy Modeling for Control* [2]. El mecanismo de identificación de la

herramienta se basa en técnicas de clusterización (mediante el algoritmo de *Gustafson-Kessel*).

3.1 IDENTIFICACIÓN

Uno de los aspectos a destacar del presente trabajo consiste en haber tomado como referencia datos procedentes de campañas de una depuradora industrial real, concretamente de la depuradora municipal de Manresa (provincia de Barcelona). Los registros originales fueron tomados con ocasión del trabajo sobre control predictivo llevado a cabo en su día por Moreno, R. [8]. A partir de esos datos (o de variaciones de ellos), se han realizado numerosas pruebas de identificación. Alguno de los experimentos ya fue presentado con anterioridad [11] y otros, llevados a cabo posteriormente, serán mostrados aquí, ampliando así el estudio con nuevos casos relevantes. Para este artículo se han seleccionado tres casos concretos, correspondientes a tres identificaciones diferentes. Mostraremos de forma gráfica datos de entrada y salida (con el número de muestras en el eje de abscisas) y algunas gráficas de validación. En estas gráficas se incluye el índice de validación denominado VAF^1 , que es uno de los que se usa habitualmente para dar validez a los modelos identificados, comparando la salida *real* con la salida *estimada* del modelo. En nuestro estudio, la salida *real* es una salida obtenida en simulación y la salida *estimada* se obtiene aplicando las mismas entradas al modelo fuzzy identificado.

3.1.1 Caso 1

En las Figuras 2 y 3 vemos la representación gráfica de los datos de entrada y salida y en la Figura 4 se muestran los resultados de validación de este caso:

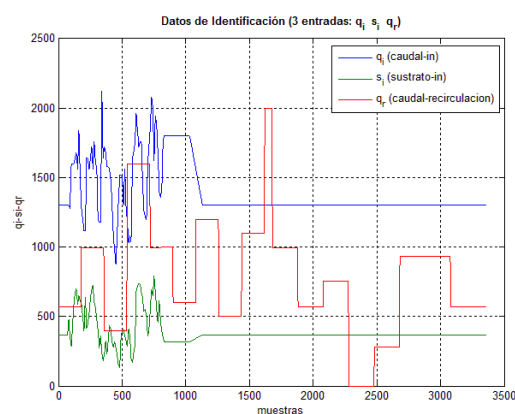


Figura 2: Datos de identificación del caso 1 (q_i , s_i , q_r)

¹ VAF : Percentile variance accounted for between two signals

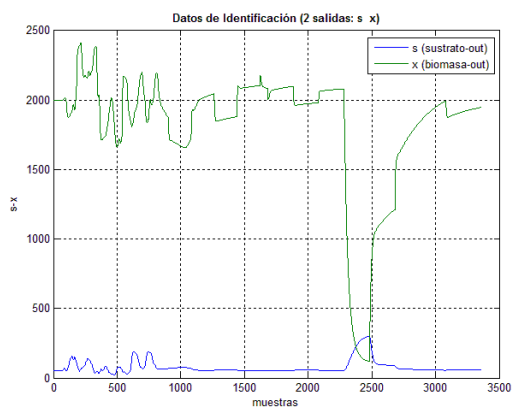


Figura 3: Datos de identificación del caso 1 (s, x)

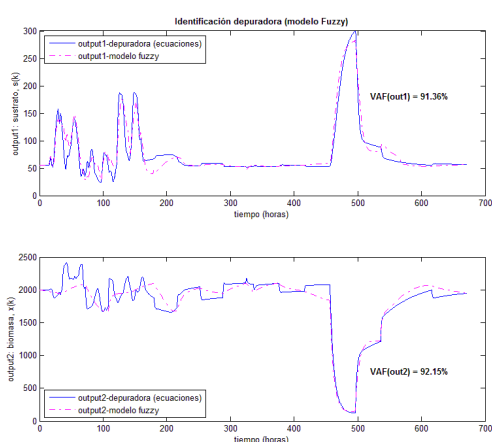


Figura 4: Validación del modelo fuzzy (caso 1)

3.1.2 Caso 2

Se utilizaron para la validación datos diferentes a los de identificación. Vemos la gráfica de validación en la figura siguiente (Fig. 5):

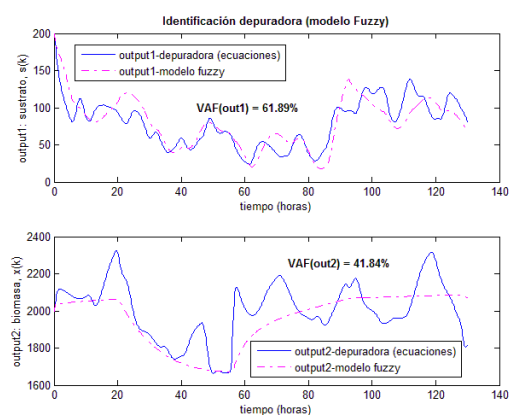


Figura 5: Validación del modelo fuzzy (caso 2)

3.1.3 Caso 3

En el tercer caso considerado, los datos de validación también fueron diferentes a los datos de identificación. Pero la principal característica de este caso es que, en los parámetros de configuración referentes a las hipótesis de la dinámica del proceso, se ha añadido un parámetro que en los otros dos casos se consideró nulo. Concretamente, en este caso no se ha despreciado en la dinámica del proceso la influencia directa de q_i . Como consecuencia de ello, el índice de validación es bastante mejor que el del caso 2. En la figura siguiente, (Fig. 6), se muestra la gráfica de validación correspondiente a este caso:

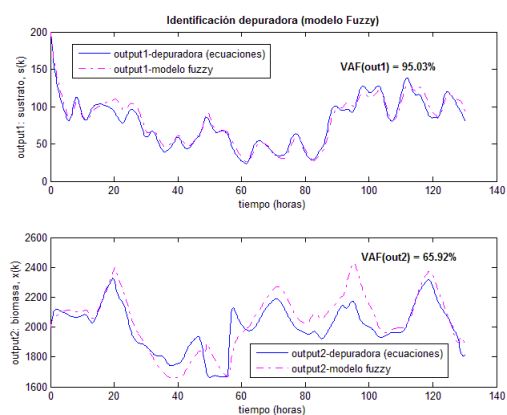


Figura 6: Validación del modelo fuzzy (caso 3)

3.2 MODELOS FUZZY IDENTIFICADOS

Los modelos fuzzy identificados son modelos del tipo *Takagi-Sugeno* [10], los cuales están compuestos por un conjunto de reglas *if-then*, cada una de las cuales representa un submodelo lineal. El antecedente o premisa de cada una de las reglas se compone de varias proposiciones simples conectadas mediante operadores lógicos *and*. Las proposiciones simples comparan cada componente del vector antecedente con un cierto valor o conjunto difuso. Y el consecuente o conclusión de cada regla es una combinación lineal de las variables que forman el vector consecuente más un término independiente (submodelo lineal).

Mostraremos a continuación, a modo de ejemplo, sólo las reglas de la salida-1 del modelo fuzzy identificado correspondiente al caso 1 (Tabla 2). Las demás reglas tendrán una estructura similar, pero con coeficientes diferentes y con más o menos componentes para los vectores antecedente y consecuente, como es lógico:

Tabla 2: Modelo *Takagi-Sugeno* para $y_1 = s(k)$

<p>1. if $y_1(k-1)$ is A_{11} and $y_2(k-1)$ is A_{12} and $u_2(k-1)$ is A_{13} and $u_3(k-1)$ is A_{14} and $u_3(k-2)$ is A_{15} then $y_1(k) = (7.10) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (1.13) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (5.50) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (1.27) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (1.39) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) - (1.29) \cdot 10^0$</p> <p>2. if $y_1(k-1)$ is A_{21} and $y_2(k-1)$ is A_{22} and $u_2(k-1)$ is A_{23} and $u_3(k-1)$ is A_{24} and $u_3(k-2)$ is A_{25} then $y_1(k) = (5.91) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (9.77) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.48) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (4.93) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (3.41) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (5.84) \cdot 10^0$</p> <p>3. if $y_1(k-1)$ is A_{31} and $y_2(k-1)$ is A_{32} and $u_2(k-1)$ is A_{33} and $u_3(k-1)$ is A_{34} and $u_3(k-2)$ is A_{35} then $y_1(k) = (9.33) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (6.05) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.47) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (1.07) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (1.01) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (7.27) \cdot 10^0$</p> <p>4. if $y_1(k-1)$ is A_{41} and $y_2(k-1)$ is A_{42} and $u_2(k-1)$ is A_{43} and $u_3(k-1)$ is A_{44} and $u_3(k-2)$ is A_{45} then $y_1(k) = (8.98) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (3.73) \cdot 10^{-2} \cdot y_2(k-1) + (3.11) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (5.23) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (5.64) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (6.39) \cdot 10^1$</p> <p>5. if $y_1(k-1)$ is A_{51} and $y_2(k-1)$ is A_{52} and $u_2(k-1)$ is A_{53} and $u_3(k-1)$ is A_{54} and $u_3(k-2)$ is A_{55} then $y_1(k) = (1.50) \cdot 10^0 \cdot y_1(k-1) + (5.37) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) - (3.48) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (1.90) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (8.47) \cdot 10^{-3} \cdot u_3(k-2) - (1.39) \cdot 10^{-1}$</p> <p>6. if $y_1(k-1)$ is A_{61} and $y_2(k-1)$ is A_{62} and $u_2(k-1)$ is A_{63} and $u_3(k-1)$ is A_{64} and $u_3(k-2)$ is A_{65} then $y_1(k) = (9.65) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (5.22) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.98) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (1.93) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (2.89) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) - (3.43) \cdot 10^{-1}$</p>
--

Cada una de las reglas representa un submodelo lineal y las componentes del vector consecuente indican las dependencias del submodelo. En nuestro caso de estudio, el vector antecedente coincide con el vector consecuente y consideraremos un vector $\mathbf{x}_a = \mathbf{x}$, común a ambas salidas, constituido por: $[y_1(k-1), y_2(k-1), u_1(k-1), u_2(k-1), u_2(k-1), u_2(k-2)]$. La expresión numérica global para cada una de las dos salidas del modelo fuzzy se obtendrá combinando todas las reglas y aplicando un método de cómputo numérico, como el método del centroide, que tiene en cuenta los consecuentes de todas las reglas, con la ponderación adecuada. Se concreta matemáticamente esta idea en la expresión (1):

$$\tilde{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jp_i}}(x_{ap_i}) \phi_{ij}(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jp_i}}(x_{ap_i})} \quad (1)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

y con las siguientes funciones de pertenencia:

$$\beta_{ij}(x_a) = \frac{\mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jp_i}}(x_{ap_i})}{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jp_i}}(x_{ap_i})} \quad (2)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

la expresión numérica de la salida quedará así:

$$\tilde{y}_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij}(x_a) \phi_{ij}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

3.3 FORMALIZACIÓN EN EL ESPACIO DE ESTADOS

La reformulación de las reglas fuzzy en forma de ecuaciones de estado supondrá la ventaja de poder manipularlas de manera analítica, pudiendo realizar el cálculo de predicciones del algoritmo de control predictivo y expresar la ley de control en forma explícita, que es una de las principales aportaciones de nuestro trabajo, siguiendo la línea iniciada previamente por otros autores [3]. Resumiremos a continuación lo más relevante del correspondiente desarrollo, ya presentado y descrito en [11].

3.3.1 Modelo fuzzy en el espacio de estados

Realizando las adecuadas definiciones matemáticas previas, podemos agrupar conjuntamente las reglas de nuestros modelos fuzzy tipo *Takagi-Sugeno* en las siguientes Ecuaciones de Estado (matriciales):

$$\mathbf{z}_m(k+1) = \bar{\mathbf{A}}_m \mathbf{z}_m(k) + \bar{\mathbf{B}}_m \mathbf{u}_a(k) + \bar{\mathbf{R}}_m \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = \bar{\mathbf{C}}_m \mathbf{z}_m(k) \quad (5)$$

siendo las *Matrices de Estado* y los coeficientes matriciales:

$$\bar{\mathbf{A}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(x_a) \mathbf{A}_{m_j}); \quad \bar{\mathbf{B}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(x_a) \mathbf{B}_{m_j}); \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{C}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_{j12}(x_a) \mathbf{C}_{m_j}); \quad \bar{\mathbf{R}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(x_a) \mathbf{R}_{m_j}) \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_{m_j} = \begin{pmatrix} a_{j1} & a_{j2} & 0 & b_{j2} \\ 0 & a_{j2}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{mr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{mr} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_{m_j} = \begin{pmatrix} b_{j3} & b_{j4} \\ b_{j3}^* & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_{m_j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}_{m_j} = \begin{pmatrix} r_j \\ r_j^* \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.3.2 Dependencia temporal de los coeficientes de las ecuaciones de estado

Una particularidad importante de las ecuaciones de estado obtenidas es que los coeficientes matriciales $\bar{\mathbf{A}}_m$, $\bar{\mathbf{B}}_m$, $\bar{\mathbf{C}}_m$ y $\bar{\mathbf{R}}_m$ dependen del vector antecedente

x_a (a través de $\beta_j(x_a)$) y, por tanto, también dependen del instante de tiempo k -ésimo, porque x_a depende del tiempo. Será necesario, por tanto, recalcular tales coeficientes en cada iteración o período de simulación, tras haber actualizado el vector antecedente x_a y también $\beta_j(x_a)$. El comportamiento de nuestro sistema multivariable no lineal identificado mediante un modelo fuzzy ha quedado finalmente representado por un sistema de ecuaciones de estado con coeficientes dependientes del tiempo. En [3] se citan dos referencias teóricas sobre la asociación de sistemas que tengan dinámicas no lineales con sistemas lineales variantes en el tiempo (Leith, D.J., Leithead, W.E., 1998 y 1999).

4 EXPERIMENTOS DE CONTROL PREDICTIVO (FMBPC)

La estrategia de control predictivo empleada consiste en deducir una ley de control analítica y explícita, haciendo uso de las ecuaciones de estado detalladas en (4) y (5) e imponiendo para cada una de las dos salidas la restricción del seguimiento de sendas trayectorias de referencia para un cierto horizonte de predicción. No es posible incluir aquí el desarrollo matemático realizado, por lo que nos centraremos en presentar los resultados de los experimentos en los que se ha usado la ley de control deducida.

4.1 SIMULACIÓN

Los experimentos de control predictivo en simulación han sido desarrollados en el entorno *Matlab & Simulink*. El soporte principal ha sido un diagrama de bloques de *Simulink*, siendo los bloques más significativos el del controlador predictivo y el de la depuradora. El funcionamiento del bloque controlador se ha basado en una *s-function* de *Simulink*, en la que se ha escrito en *Matlab* el código necesario para realizar los cálculos del algoritmo de control predictivo basado en la ley de control analítica obtenida (entre ellos, la actualización en cada iteración de los coeficientes de las ecuaciones).

4.2 RESULTADOS

Se hicieron numerosas pruebas, con distintas perturbaciones de entrada y diferentes referencias de las salidas, para el horizonte de predicción (H) y para otros parámetros. Resumiremos los resultados obtenidos presentando las gráficas de la evolución temporal de las variables controladas, es decir, de la concentración de sustrato en el efluente, s (mg/l) y de la concentración de biomasa en el reactor, x (mg/l), así como la gráfica de la evolución temporal de la variable de control, es decir, la del caudal de recirculación, q_r (m³/h), que estará determinado por el

algoritmo de control predictivo. Se incluyen también, en las gráficas de s y x , las evoluciones de las perturbaciones (caudal de entrada, q_i (m³/h) y concentración de sustrato en la entrada, s_i (mg/l)). En las pruebas llevadas a cabo se consideraron diferentes valores de referencia para las dos salidas, estando principalmente tales valores en el intervalo de 45 mg/l a 60 mg/l para s_{ref} y en el de 700 mg/l a 2000 mg/l para x_{ref} . El intervalo de tiempo de simulación elegido fue de 0 a 166 horas. En ninguno de los casos seleccionados fue necesario imponer cotas al incremento de la acción de control. Sin embargo, hay casos en los que sí sería preciso hacerlo para evitar inestabilidades, pero el análisis de tal problema requiere un estudio más amplio. También sería necesario un estudio complementario para el horizonte de predicción (parámetro muy importante en control predictivo). Se indican los horizontes de predicción usados para los resultados mostrados.

4.2.1 Modelo identificado en 3.1.1, con $H=6$

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

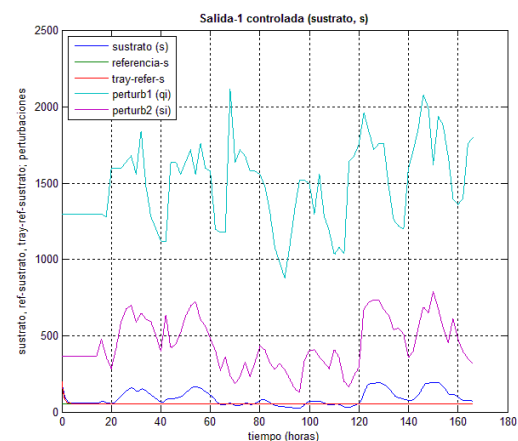


Figura 7. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.1)

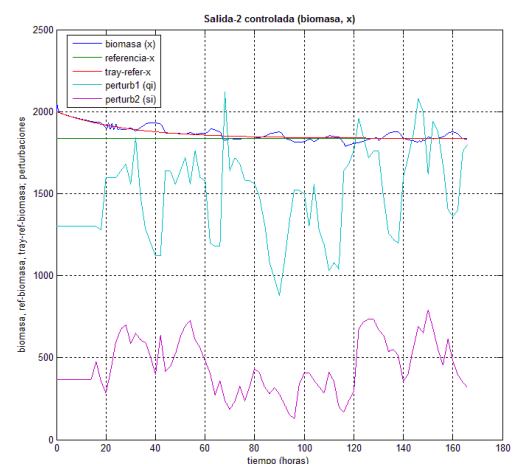


Figura 8. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.1)

Acción de control predictivo fuzzy:

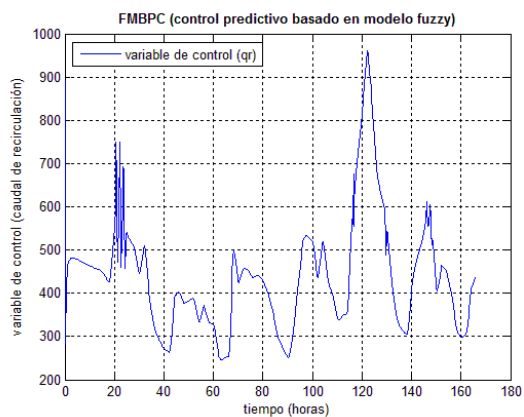


Figura 9. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.1)

Acción de control predictivo fuzzy:

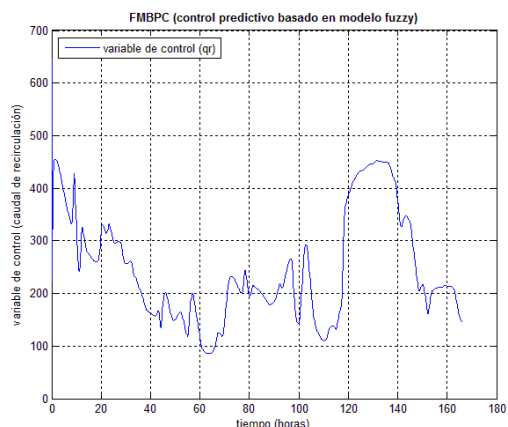


Figura 12. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.2)

4.2.2 Modelo identificado en 3.1.2, con H=3

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

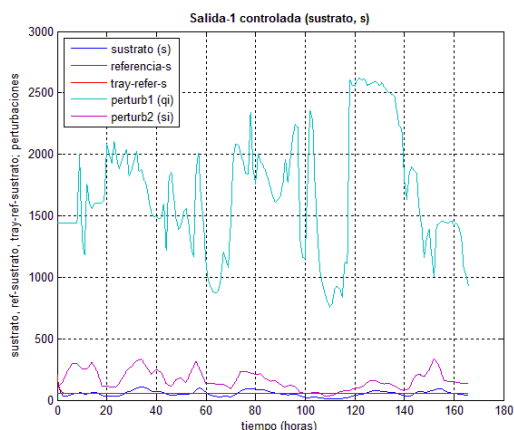


Figura 10. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.2)

4.2.3 Modelo identificado en 3.1.3, con H=250

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

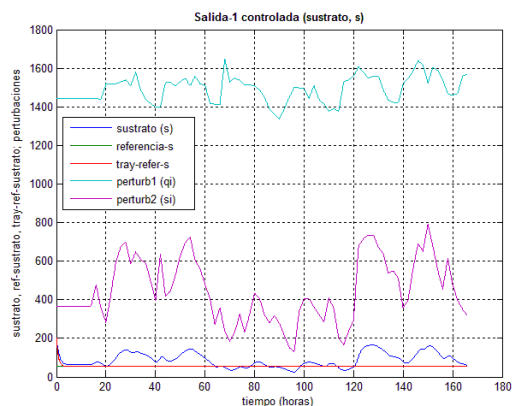


Figura 13. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.3)

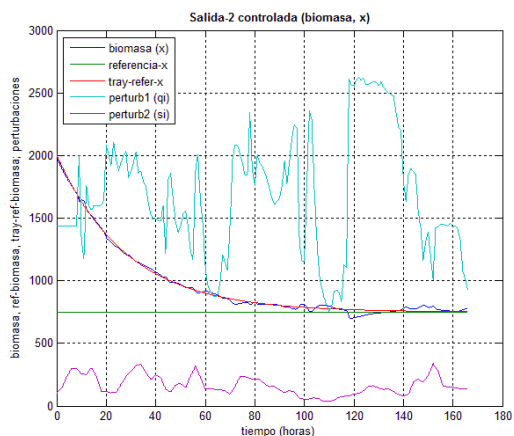


Figura 11. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.2)

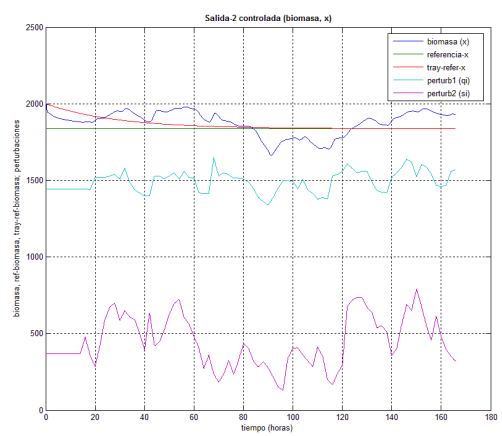


Figura 14. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.3)

Acción de control predictivo fuzzy:

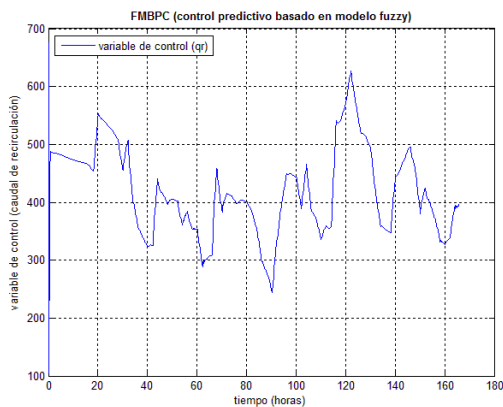


Figura 15. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.3)

5 CONCLUSIONES

En los experimentos realizados se ha aplicado una particular metodología de control predictivo fuzzy a un proceso con dinámica compleja, expresando la ley de control en forma analítica y explícita. En todos los casos presentados, la respuesta del sistema controlado (variables s y x) parece razonablemente satisfactoria, teniendo en cuenta la gran dificultad que supone controlar un sistema multivariable, altamente no lineal y de carácter biológico. Además, se ha extendido a un caso multivariable y con perturbaciones, un método de obtención de la ley de control predictivo en forma analítica y explícita, probado previamente para un sistema no multivariable, sin perturbaciones y no tan complejo.

En el proceso de estudio e investigación que precede a la presentación de este artículo se han seguido y se siguen varias líneas de estudio, tanto relativas a la *realizabilidad* y utilidad, para sistemas complejos, de los métodos y algoritmos aquí propuestos, como a la influencia de diversos factores, como las características dinámicas del modelo identificado, el horizonte de predicción o la interrelación entre las referencias de las salidas (sistema multivariable con salidas acopladas), entre otros. Así mismo, se evalúan actualmente posibles estudios complementarios o mejoras del algoritmo propuesto, incorporando restricciones en el cálculo de la ley de control, a satisfacer mediante optimización, con el objetivo de evitar inestabilidades.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MINECO del Estado Español la financiación del proyecto DPI2015-67341-C02-01, en el marco del cual se lleva a cabo esta investigación.

Referencias

- [1] Babu ka, R. (1998-2001). Fuzzy Modeling and Identification Toolbox (FMID)-User s Guide.
- [2] Babu ka, R. (1998). Fuzzy Modeling for Control. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- [3] Bla ic, S., and krjanc, I. (2007). Design and Stability Analysis of Fuzzy Model-based Predictive Control—A Case Study. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 49, 279–292.
- [4] Camacho, E.F., y Bordons, C. (1998). Model Predictive Control. Springer, Great Britain.
- [5] Francisco, M., y Vega, P. (2006). Diseño Integrado de procesos de depuración de aguas utilizando control predictivo basado en modelos. *RIAI-Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, ISSN: 1697-7912, 3(4), 88-98.
- [6] Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, W, Marais, G v R & Matsuo, T., 1987. Activated Sludge Model No. 1. IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1. London, UK.
- [7] Mollow, S., 2002. Fuzzy Control of Multi-Input Multi-Output Processes. PhD dissertation. Delft University of Technology (Netherlands).
- [8] Moreno, R. (1994). Estimación de Estados y Control Predictivo de Proceso de Fangos Activados. Tesis Doctoral. Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona (Spain).
- [9] Roubos, J.A., Mollov, S., Babu ka, R., Verbruggen, H.B., (1999). *Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models*. *International Journal of Approximate Reasoning*, 22(1-2), 3-30.
- [10] Takagi, T., Sugeno, M., (1985). *Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 15 (1), 116–132.
- [11] Vallejo, P. y Vega, P. (2017). Proceedings del XV Simposio CEA de Ingeniería de Control. Universidad de Salamanca, 9-10 de febrero de 2017, Salamanca (Spain).
- [12] Zadeh, and Lotfi A., (1990). Fuzzy Sets and Systems. *International Journal of General Systems*, 17 (2), 129-138.