

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 Politécnic 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

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 Rodríguez-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	
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 Ruíz, 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>	

Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0

Jesús M. Gómez-de-Gabriel, Ana M. Jiménez Arévalo,
Laura Eiroa Mateo, y Javier Fernández-de-Cañete-Rodríguez

Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Málaga
jesus.gomez@uma.es

Resumen

Este artículo presenta un sistema de automatización de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) mediante tecnologías de Industria 4.0. Se ha implementado un sistema Internet of Things (IoT) para la obtención de los datos de los sensores y envío de consignas a los actuadores. El sistema posee un sistema de control local que, junto con el resto de los componentes, se modelan como un sistema ciberfísico (CPS). Se ha implementado sobre una planta experimental, se ha creado una base de datos con la información histórica de los datos de los sensores y se están creando funciones para analizar la información e identificar el modelo de la planta.

Palabras clave: EDAR, estación depuradora de aguas residuales, IoT, CPS, Industria 4.0.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales generadas por la actividad humana son actualmente un serio problema y uno de los focos de contaminación más importantes para nuestros cauces y acuíferos. Los cada vez mayores volúmenes de aguas residuales con elevadas cargas contaminantes que nuestra sociedad produce hacen necesario un tratamiento más extendido e intensivo de las aguas residuales.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) comprende un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de obtener un agua efluente de mayor calidad en base a ciertos parámetros normalizados, siendo el proceso de lodos activos una de las tecnologías más utilizadas para este propósito y se emplean generalmente para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales [5].

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son integraciones de procesos físicos y de cálculo. Los sistemas de computación y sus redes integradas monitorizan y controlan los procesos físicos, generalmente con bucles de retroalimentación donde los procesos físicos afectan a la computación y viceversa. El diseño de tales sistemas, por lo tanto, requiere



Figura 1: Planta experimental de tratamiento de aguas residuales.

entender la dinámica conjunta de computadores, software, redes y procesos físicos [3].

La aplicación de IoT en la industria tiene su fundamento en la interconexión de todos los dispositivos involucrados en la producción, de forma que puedan enviarse grandes volúmenes de información del proceso en tiempo real, a través de Internet, siendo éstos captados por redes de sensores y configurando así, sistemas con aprendizaje automático o sistemas inteligentes. Gracias a la interconectividad de sensores a través de Internet es posible realizar un control eficaz del proceso industrial a distancia, lo que permite una mayor flexibilidad y optimización de tiempo y costes, utilizándose grandes volúmenes de datos gracias a los conceptos de *cloud storage* y *cloud computing* [1]. De hecho en [9] se plantea el uso de IoT como tecnología que hace posible una optimización de la recuperación de energía del agua de desecho de edificios residenciales, y en [2] se describe el diseño de un sistema de automatización de bajo coste de una EDAR utilizando una red de sensores Zigbee (IEEE STD 802.15.4).

El trabajo presentado describe la aplicación de IoT a una planta experimental EDAR (Véase Figura 1 y su conexión mediante protocolos de conexión a un servidor que almacena los datos históricos de operación. Se han creado unos sistemas ciberfísicos que permiten interactuar desde la red con cualquier componente de planta a diferentes

niveles. Asimismo se hace una revisión de las tecnologías que forman parte de la cuarta revolución industrial (industria 4.0), presentada en [6] que nos permitan la adquisición y almacenamiento de datos de la planta en tiempo real para su posterior análisis.

Este documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se introducen las tecnologías que forman parte de la Industria 4.0 que se han aplicado. En la sección 3 se describen la planta experimental objeto del estudio y su sistema de sensores así como el desarrollo del sistema de monitorización y control a través de IoT. Posteriormente, en la sección 4 se describen los experimentos realizados y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se incluyen conclusiones y se plantean trabajos futuros a realizar.

2. TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA 4.0

2.1. Internet de las Cosas

El *Internet de las Cosas* (IoT) consiste en la conexión a Internet de muchos millones de dispositivos, que recogen información del mundo real remotamente, y que puede ser compartida con otros sistemas y dispositivos. IoT se basa fundamentalmente en dispositivos (sensores, actuadores y controladores embebidos) identificados y conectados a Internet.

Gartner, Inc. prevé que en 2016 se estarán usando más de 6.400 millones de cosas conectadas, un 30 % más que en 2015, y que alcanzarán los 20.800 millones en 2020. En 2016, cada día se conectan 5.5 millones de nuevas cosas. El gasto esperado será de \$235.000 millones en 2016, un 22 % más que en 2015, en contratos de instalación y mantenimiento, pero sobre todo en servicios de conectividad.

Sus aplicaciones industriales IoT abarcan prácticamente todos los sectores, entre ellos la industria de automoción, servicios y productos, gestión ambiental, *smart cities*, etc.

2.2. Industria 4.0

Industria 4.0 o cuarta revolución industrial [8] pretende permitir una mayor adaptabilidad a los procesos de producción recogiendo datos a través de las máquinas y haciendo así más eficiente el uso de los recursos y por tanto dando paso a procesos más rápidos, más eficientes y con mayor flexibilidad, todo ello con un costo más reducido. Gracias a internet, se está haciendo posible la conexión entre máquinas y humanos en sistemas ciberfísicos a

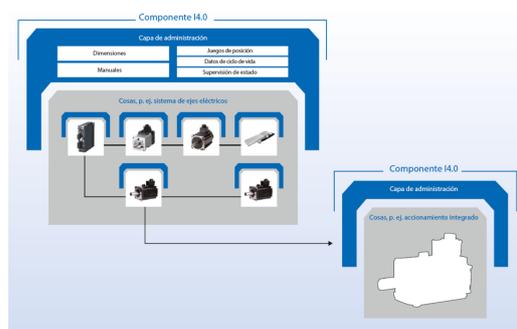


Figura 2: Esquema general de un CPS donde se muestra su capa de administración y su distribución jerárquica.

través de las redes.

2.3. Sistemas ciberfísicos

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son sistemas híbridos compuestos por una parte física (que conecta con el mundo real a través de sensores y actuadores), y una parte virtual o de la información. Están compuestos por componentes (software, sensores, actuadores, sistemas de control embebido, ...) que colaboran para conseguir un comportamiento global. A diferencia del IoT, los CPS se basan en la relación entre computación y el mundo físico, en lugar de considerar el dispositivo físico.

Podemos considerar un componente físico combinado con su representación virtual digital como un ejemplo de un sencillo sistema ciberfísico (CPS) o el tipo de “componente de Industria 4.0” más simple. La representación virtual digital de ese componente puede contener tanto información general del tipo de dispositivo como información y servicios del componente concreto.

A los CPS se accede a través de su capa de administración, tanto de manera directa como indirecta si estos son componentes a su vez de otros CPS. En la figura 2 se muestra un esquema que muestra esta jerarquía. Los CPS pueden incluir componentes de diferentes fabricantes o proveedores, y formar parte de otros.

La construcción de un CPS plantea nuevos problemas, ya que se basan en diferentes tecnologías emergentes y engloba diferentes áreas de conocimiento y dominios técnicos, que requieren de nuevas disciplinas de ingeniería de sistemas: monitorización y control; sistemas complejos y de gran escala; sistemas tolerantes a fallos; interacción con el usuario; optimización; adaptación, gestión de cambios y resiliencia; control en tiempo real; sistemas distribuidos y sistemas de sistemas.

Existen plataformas de desarrollo y lenguajes de

modelado para el desarrollo de CPS mediante diseño basado en modelos (MBD). Se han construido diversos lenguajes de modelado de dominio específico (DSL) que permiten desarrollar CPS a partir de modelos gráficos, para supervisión de redes de suministro eléctrico.

2.4. Big data

El uso de IoT [12] produce una enorme cantidad de datos. Esos datos pueden ser procesados para extraer patrones, utilizables por otras aplicaciones y servicios como sistemas de salud, sistemas públicos de información, gestión de ciudades, eficiencia energética, gestión de residuos, gestión del agua. Estos servicios necesitan procesar la información en un servidor local o en la nube (*cloud computing*). Se crean así nuevos servicios como *smart cities*, *smart mobility*, *smart economy*, etc.

2.5. Controlando a través de IoT

En los sistemas de control convencionales, se asume que las redes de comunicaciones son deterministas y fiables. Los sistemas de tiempo real se basan en planificación estática de los tiempos de cómputo y comunicaciones [11]. Ahora algunos sistemas de control se efectúan a través de Internet, aunque a nivel supervisor en sistemas de distribución eléctrica o depuradoras de agua, y otros. La automatización en bucle cerrado, en muchos casos requiere de un controlador in-situ dedicado. Cerrar el bucle en IoT requiere resolver una serie de problemas que no se encuentran normalmente: control en redes no deterministas; retardo y *jitter*; ancho de banda; seguridad; interoperabilidad entre sensores y algoritmos.

Entre los avances que se espera que hagan posible cerrar el bucle de control en IoT se encuentran las comunicaciones celulares 5G, redes inalámbricas de baja latencia (*Tactile Internet*) [4] y las redes intermedias próximas a los sensores y actuadores (*Fog Computing*).

2.6. Seguridad

En las aplicaciones industriales, la seguridad es un factor muy importante. En [10] se plantea el problema de la seguridad en una red IoT superpoblada de dispositivos. Estudia la seguridad de diversos sistemas (SCADA, sistemas de control de tráfico, cámaras web, impresoras, etc.) y los ratios de vulnerabilidad van desde un 0.44% hasta un 40%.

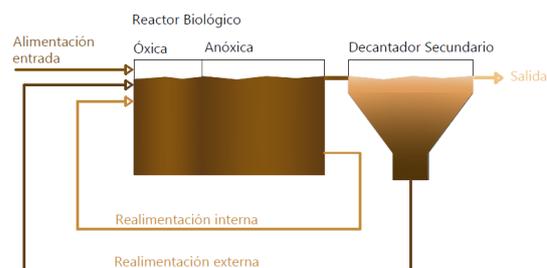


Figura 3: Esquema general de una depuradora de tipo nitrificación - desnitrificación.

3. PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las plantas de depuración de aguas residuales de tipo nitrificación-desnitrificación (NDN), tienen como función la eliminación del nitrógeno del agua residual mediante un proceso micro-biológico de oxidación del amonio mediante bacterias. El nitrato es reducido por bacterias a gas nitrógeno molecular, que es un componente de la atmósfera. El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración de nitrificación - desnitrificación representado en el esquema 3. En la cámara óxica se produce la nitrificación en el que el amoníaco es oxidado a nitritos y nitratos. En la zona anóxica se produce la desnitrificación, esto es, los nitratos y los nitritos son utilizados por bacterias heterótrofas como aceptores de electrones produciendo nitrógeno gas y un consumo de carbono orgánico biodegradable. El proceso se muestra en el esquema de la Figura 3

En esta trabajo se ha empleado un reactor biológico de lodos activos experimental, formada por el tanque de alimentación, el reactor biológico, un decantador secundario y un tanque de salida de agua clarificada mostrada en la figura 1.

El tanque de alimentación de entrada tiene una capacidad de 300 litros de agua sintética elaborada y dispone de los sensores necesarios para la medida de parámetros del agua residual. Los parámetros medidos en el tanque de entrada son:

- Concentración de materia orgánica.
- Concentración de nitrato.
- Concentración de amonio.
- PH
- Turbidez

En el interior del tanque de alimentación hay un agitador para evitar decantaciones en el mismo. Por otro lado, se dispone de bomba de alimentación de entrada para impulsar el agua sintética a cabecera del reactor biológico controlada mediante un controlador PID.

El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración NDN mostrado en la Figura 3.

Tanto en la zona anóxica como en la zona aerobia se instalan sensores de medida de oxígeno disuelto y sensores REDOX. Contiene un agitador en cada zona para evitar decantaciones en el reactor biológico. Para mantener el nivel de oxígeno disuelto en la zona aerobia se instala bomba soplante mediante difusores controlado por un controlador PID desde el PLC.

En el decantador secundario tiene lugar la precipitación de los flocúlos generados en el reactor. En esta zona se instalan sensores para la medida de concentración de materia orgánica, concentración de nitrato y amonio y turbidez. El agua clarificada en la parte superior del decantador es conducida mediante gravedad hacia el tanque de salida.

Esta planta contiene una recirculación interna desde zona aerobia hacia cabecera del reactor biológico (zona óxica) para completar el proceso de nitrificación - desnitrificación. Por otro lado, dispone de realimentación externa para recircular fangos desde decantador secundario hacia reactor biológico. Ambas recirculaciones son controladas mediante un bucle de control PID implementado en el PLC.

3.1. Implementación de IoT

Para la obtención de las señales del proceso de EDAR y supervisión mediante IoT, ha sido necesario realizar una comunicación de intercambio de señales entre el PLC y el PC usando el protocolo de comunicaciones *Modbus* TCP/IP.

En [13] se plantea el uso de este protocolo basado en publicadores y suscriptores, para obtener información de diferentes elementos e incluso realizar procesos de control, empleando un broker o servidor local o remoto para controlar el intercambio de información. En este caso, se implementa el protocolo MQTT para realizar la conexión de las variables del PC con un servidor IoT público que permite el acceso remoto a modo de demostración.

Se han conectado las siguientes señales del proceso a modo de supervisión desde servidor remoto:

- Nivel de amonio tanque de alimentación

EDAR.

- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.

Por otro lado, desde un servidor remoto se controla la orden de marcha/paro del agitador de la zona óxica del reactor biológico. Además, se regula el régimen de funcionamiento y la orden de marcha/paro de la bomba de alimentación de entrada.

Desde el sistema de control del PLC se han modificado las librerías de motor, incorporando un modo de operación de equipos a nivel remoto. Una vez seleccionado el modo de control remoto externo IoT, queda anulado el control local desde HMI o desde SCADA.

Posteriormente, se deseaba emplear una base de datos para almacenar los históricos del sistema. Basándonos en el lenguaje SQL, se decidió emplear la base de datos *SQLite* que tal y como se describe en [7] permite crear tablas organizadas en su interior y cuenta con un gran tamaño de almacenamiento.

Con la base de datos seleccionada, se ha empleado el broker local *Mosquitto* de MQTT para almacenar los históricos en la base de datos *SQLite*. Inicialmente se extraen los valores de las variables por medio del protocolo *Modbus* TCP/IP haciendo uso de un script de *Python* con el que se publicarán los valores obtenidos en el servidor local de *Mosquitto*, tal como se muestran en la Figura 4.

De manera independiente, se crea la base de datos mediante otro script de *Python* pudiendo indicar el nombre, tipo y número de variables a almacenar. Finalmente, se creará un último script a modo de suscriptor encargado de almacenar los datos publicados en el servidor IoT en la base de datos. Este sistema cuenta con la ventaja de permitir crear y rellenar la base de datos desde un PC independiente al conectado al PLC de la planta.

Se han almacenado los siguientes históricos en la base de datos:

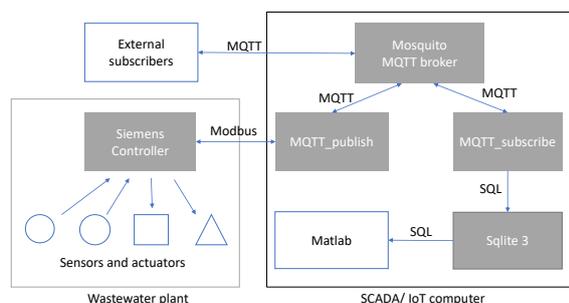


Figura 4: Esquema de la conexión de la planta de depuración de aguas residuales con su controlador existente a una red IoT mediante un servidor local que almacena la historia de las lecturas en una base de datos

- Nivel de amonio tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Temperatura tanque de alimentación EDAR.
- Nivel pH tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de turbidez taque alimentación EDAR.
- Caudal bomba alimentación de entrada.
- Oxígeno disuelto en cámara anóxica del reactor biológico.
- Redox en cámara anóxica del reactor biológico.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.
- Redox en cámara óxica del reactor biológico.
- Caudal bomba de recirculación interna de la cámara óxica a la cámara anóxica.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Nivel de turbidez en decantador secundario.
- Caudal bomba recirculación externa del decantador secundario a la cámara anóxica.
- Fecha de generación de históricos.
- Hora de generación de históricos.

Cabe destacar la existencia de otros servidores IoT públicos como *HiveMQ* o *Kafka* que también utilizan el protocolo MQTT, así como otras posibles bases de datos.

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se realiza la puesta en marcha de EDAR con alimentación continua de entrada con agua residual sintética. Posteriormente, se ha adoptado la siguiente configuración de consignas de funcionamiento:

- Caudal de entrada = 8-10 l/h.
- Recirculación externa = 100 % del caudal de entrada.
- Recirculación interna = 150-200 % del caudal de entrada.
- Consigna *setpoint* oxígeno disuelto en cámara óxica = 1.5-2 mg/l.
- Agitador zona anóxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador zona óxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador tanque de alimentación de entrada = funcionamiento en continuo.

Durante el proceso de depuración se han obtenido resultados de rendimiento satisfactorios considerando la reducción de materia orgánica disuelta, así como reducción de turbidez a la salida y reducción del nivel de amonio a la salida.

No obstante, durante la puesta en marcha han aparecido no conformidades que se han detectado y solucionado, como la agitación ineficiente de la zona anóxica o la aparición de flóculos sobrenadantes en la superficie del decantador secundario produciendo la obturación del tubo de salida del decantador secundario.

La supervisión de variables de proceso desde el servidor remoto IoT es fluida, permite supervisar las curvas de tendencia en tiempo real y el almacenamiento de los datos es posible exportarlo a ficheros *.csv*. Al ser un servidor remoto IoT a modo demostración tiene un límite de variables a intercambiar.

Se ha puesto en marcha el almacenamiento de históricos empleando un subscriptor tanto en el propio ordenador conectado al PLC como uno independiente. En ambos casos, el almacenamiento se ha realizado de manera satisfactoria y a una velocidad elevada permitiendo adquirir nuevos datos en cuestión de segundos.

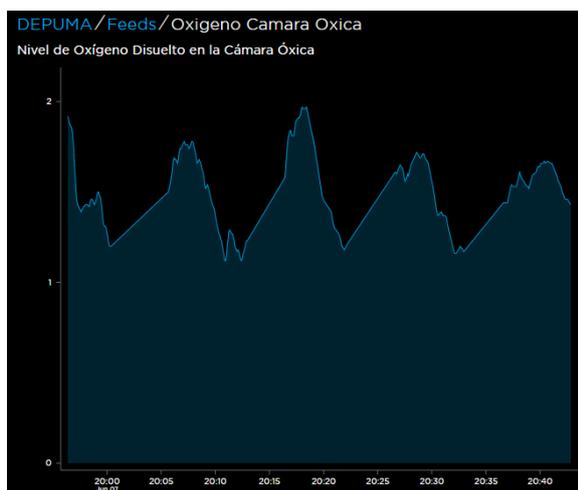


Figura 5: Curva tendencia Oxígeno Disuelto en Cámara Óxica con datos almacenados en servidor IoT de Adafruit.

Mediante el uso del servidor local, evitamos la limitación de variables a intercambiar, permitiendo almacenar todos los elementos que intervienen en el proceso. De igual forma, las bases de datos SQLite permiten almacenar hasta un total de 2 terabytes permitiendo almacenar datos a largo plazo.

Finalmente, se han representado gráficamente los valores almacenados en la base de datos mediante el uso de un script de *Matlab* y se ha implementado un sistema que permite el arranque y reinicio automático de los servicios del sistema de información.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se comprende la necesidad de la instalación de EDAR en los núcleos urbanos e industriales para garantizar el cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE y el Plan Nacional de Calidad de las Aguas.

Desde un punto de vista de las comunicaciones, se han conectado las variables de proceso con servidor remoto IoT para supervisión y control de la EDAR. Esto ha permitido dar un paso hacia el concepto *Industry 4.0* gracias a la interconexión digital de objetos y procesos con Internet mediante IoT.

Para futuras líneas de trabajo, la planta podrá estar comunicada con otros equipos o bases de datos que permitan la identificación de cada uno de los procesos físico - químicos, a partir de los cuáles generar modelos matemáticos.

La identificación futura del proceso podrá plantear

nuevos bucles de control de equipos desde servidores IoT externos que se anticipen con el fin de optimizar el rendimiento de la EDAR. Por otro lado, el almacenamiento masivo de datos en bases de datos SQL permitirá el análisis mediante algoritmos de predicción.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Puente B.2. "Desarrollo de Técnicas de Control y Estimación Neurogenéticas para Operación Óptima de Reactores Biológicos de Lodos Activos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" de la Universidad de Málaga.

Referencias

- [1] Chhatwal, A., Shukla, K., and Pathak, A. (2012). Application Development for the Internet of Things: Observations and Challenges.
- [2] Davies, R. (2015). Briefing Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. Technical report, EPRS — European Parliamentary Research Service.
- [3] Derler, P., Lee, E. A., and Vincentelli, A. S. (2012). Modeling Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*, 100(1):13–28.
- [4] Fettweis, G. P. (2014). The Tactile Internet: Applications and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):64–70.
- [5] Haandel, A. C. v. and Lubbe, J. G. M. v. d. (2012). *Handbook of biological wastewater treatment : design and optimisation of activated sludge systems*. IWA Pub.
- [6] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Technical report, National Academy of Science and Engineering.
- [7] Kreibich, J. A. (2010). *Using SQLite*. O'Reilly Media, Inc., 1st edition.
- [8] Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- [9] Lynggaard, P. and Skouby, K. (2016). Complex IoT Systems as Enablers for Smart Homes in a Smart City Vision. *Sensors*, 16(11):1840.
- [10] Patton, M., Gross, E., Chinn, R., Forbis, S., Walker, L., and Chen, H. (2014). Uninvited Connections: A Study of Vulnerable Devices on the Internet of Things (IoT). In *2014 IEEE Joint Intelligence and Security Informatics Conference*, pages 232–235. IEEE.

- [11] Samad, T. (2014). The Web of Things and Cyberphysical Systems: Closing the Loop. In *W3C Workshop on the Web of Things, Berlin, June 2014*, Berlin.
- [12] Skouby, K. E. and Lynggaard, P. (2014). Smart home and smart city solutions enabled by 5G, IoT, AAI and CoT services. In *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, pages 874–878. IEEE.
- [13] Stanford-Clark, A. and Truong, H. L. (2013). MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification.