

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

Núñez, 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 fotobiorreactor 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. Zamarreño, 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 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>	

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN UNA PLANTA PILOTO HÍBRIDA

Maria P. Marcos, César de Prada & José Luis Pitarch

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid, {maria.marcos | prada | jose.pitarch}@autom.uva.es

Resumen

En este trabajo se describe el desarrollo e implementación de un sistema de control de una planta piloto química. Dicha planta piloto tiene la característica de que el componente principal del proceso, la reacción exotérmica, está siendo simulado. Antes de configurar el sistema SCADA, se ha modelado y simulado el proceso, y definido el sistema de control que se llevará a cabo. Destacar que el sistema SCADA además de proporcionar una interfaz gráfica de visualización del sistema, conecta la tarjeta de adquisición de datos de la planta con diferentes módulos externos accesibles como servidores OPC con diferentes funcionalidades: cuatro capaces de realizar cálculos PID y que de forma conjunta constituyen el sistema de control, y uno que funciona como un bloque calculador.

Palabras clave: Planta híbrida, reacción simulada, EcosimPro, SCADA Intouch, S-IMC.

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

En los últimos años se han desarrollado novedosas técnicas basadas en el modelado de procesos con el fin de mejorar la industria de procesos. Sin embargo, la validez de dichas técnicas debe ser corroborada experimentalmente en una planta real. No obstante, la experimentación es una técnica cara que además puede suponer complicaciones añadidas con respecto a la seguridad y al impacto ambiental, por ello se ha decidido llevar a cabo una opción intermedia, construyendo una planta piloto híbrida, es decir, una planta que mantiene su estructura e instrumentación y opera a tiempo real pero donde parte del proceso está siendo simulado.

Esta opción es una alternativa a los laboratorios virtuales [1] [2] los cuales están basados en simulaciones, puesto que, aunque la simulación es una técnica muy avanzada actualmente, la realidad de los procesos siempre presenta inconvenientes adicionales con los que lidiar. Esto se debe a que los modelos empleados en simulación son una aproximación más o menos precisa de la realidad y, por tanto, los resultados derivados de las simulaciones pueden diferir bastante de la realidad experimental.

El interés de proponer una planta piloto híbrida es que se pueda experimentar con ella sin incurrir en los costosos gastos de instrumentación para la medida de concentración de compuestos químicos, adquisición de materias primas, la problemática del tratamiento de residuos, etc., es decir, se obtiene una solución más favorable económica y ecológicamente. Aunque esta forma de operar tampoco reproduce totalmente el comportamiento real del sistema, sí que puede aproximar de una manera muy fiel la realidad además de permitir la experimentación en un rango de operación más amplio.

Un caso conocido es la aplicación de plantas piloto híbridas por la universidad de Santamaría de Valparaíso, Chile en el campo de las columnas de flotación [3]. En la minería, las columnas de flotación son uno de los equipos más utilizados para obtención de minerales valiosos procedentes de la ganga, pero realizar experimentos con estos equipos es costoso debido a sus condiciones de operación. La implementación del sistema híbrido viene dado por la sustitución de la alimentación por agua y la consiguiente simulación de concentraciones de los componentes tanto a la entrada como a la salida.

La finalidad de la planta piloto es que tanto los alumnos como los investigadores de la Universidad de Valladolid puedan experimentar diversas estrategias de control y optimización, modificando la dificultad de las reacciones a simular.

Así pues, este trabajo tiene como objeto configurar el sistema de control y supervisión de una planta piloto química, en la que el componente principal del proceso, es decir, la reacción exotérmica, va a ser simulada con el fin de que se pueda experimentar con ella, actuar sobre el control de las diferentes variables del proceso y observar su dinámica. Para llevar a cabo esta configuración primero se ha modelar el proceso y diseñar y simular el sistema de control que se va implementar.

El resto del trabajo se organiza como sigue. La siguiente sección describe la planta piloto, los diferentes equipos y la instrumentación que la forman, y se comentan las consideraciones que se han de tener en cuenta al realizar un montaje híbrido. En la Sección 3

se muestra el modelo obtenido del proceso y la simulación de dicho modelo para las condiciones del montaje experimental. La Sección 4 se divide en el diseño del sistema de control según los resultados de la sección anterior, y la implementación de dicho sistema mediante un SCADA (“Supervisory Control And Data Acquisition”, supervisión, control y adquisición de datos). Por último, la Sección 5 expone las conclusiones generales a las que se ha llegado junto con las líneas futuras.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El elemento principal de la planta piloto es un reactor continuo de tanque agitado (RCTA) con una camisa refrigerante etiquetado como R-101 en la Figura 1, en el que se quiere llevar a cabo la simulación de la reacción un mol de reactivo A para obtener un mol de producto B.

Una reacción química conlleva altos costes de materia prima, tratamiento de productos, problemas de seguridad e impacto ambiental, etc., por ello se ha decidido que la parte experimental de la reacción sea sustituida por un cálculo en simulación cuyos resultados puedan visualizarse en forma de concentración y aplicar el calor de reacción que se estaría produciendo mediante una resistencia eléctrica variable, cuya potencia corresponda a la cantidad de calor de reacción calculado. Así pues, para simular dicho calor, parte del fluido del interior del reactor se lleva a un tanque (T-102) en el que hay una resistencia calefactora que aumenta la temperatura del fluido, devolviéndose nuevamente al reactor.

Para poder simplificar el comportamiento real del sistema se tienen que tener en cuenta un par de consideraciones:

En primer lugar, para que la hidrodinámica del proceso quede bien representada, las propiedades físicas de los diferentes fluidos del proceso real (densidad, viscosidad, capacidad calorífica, etc. de cada corriente) han de ser prácticamente invariantes con las propiedades que si varían a lo largo del proceso (temperatura y concentración) y así poder sustituir los reactivos y productos por un fluido más manejable, en este caso el agua.

En segundo lugar, puesto que parte del proceso se está simulando, es necesario disponer de modelos matemáticos que permitan calcular de forma precisa las variables que no se pueden medir (debido a que la reacción se está simulando) según las condiciones de operación establecidas.

Consecuentemente, si se dispone de un modelo y la planta piloto puede ser operada utilizando estos fluidos alternativos, se puede desarrollar un sistema híbrido con el que poder experimentar parcialmente. El comportamiento real queda simplificado, pero las características hidrodinámicas y térmicas se mantienen fieles a la realidad. Además, empleando un modelo adecuado, las concentraciones finales del proceso pueden ser calculadas razonablemente (no medidas) en un amplio rango de operación.

Además del reactor y del tanque calefactor, la planta cuenta con diversos equipos auxiliares; tanque de almacenamiento de reactivos (T-101), bomba peristáltica de impulsión de reactivos al reactor (P-101), bomba de diafragma a la salida del reactor (P-102), bomba de diafragma a la salida del reactor (P-102), bomba peristáltica de cabezal doble para extraer (P-103A) e introducir (P-103B) el líquido que se lleva al tanque calefactor, válvula de diafragma que controla el fluido refrigerante (V-101), y unidad de potencia trifásica a tiristores que proporciona la potencia a la resistencia calefactora (J-101).

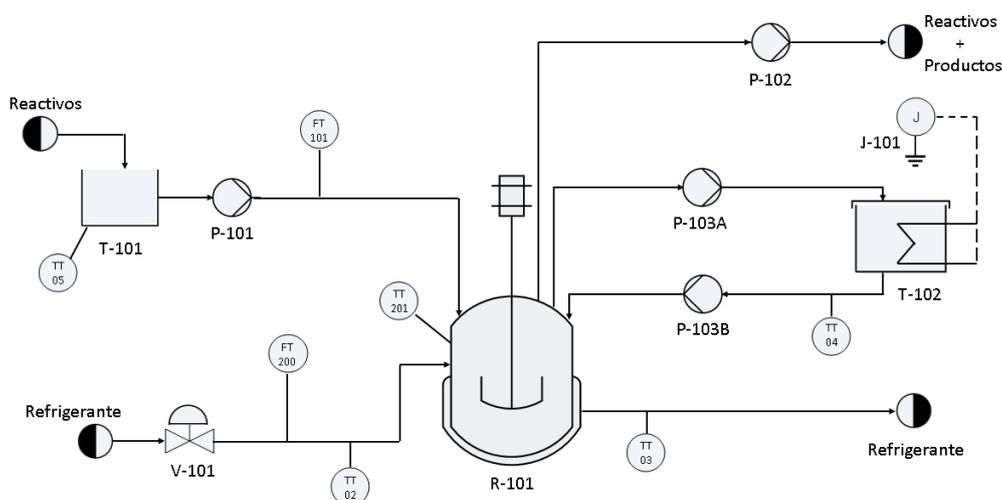


Figura 1 Diagrama del proceso

Como instrumentación para poder implementar el sistema de control se cuenta con: dos caudalímetros electromagnéticos para medir los caudales de alimento al reactor (FT101) y a la camisa refrigerante (FT200) y 5 termorresistencias con su correspondiente transmisor para medir la temperatura en: el tanque de alimentación (TT05), dentro del reactor (TT201), a la entrada (TT02) y salida (TT03) de la camisa y en el tanque calefactor (TT04), todo ello conectado a una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) para poder controlar el sistema mediante el ordenador.

3 MODELADO Y SIMULACIÓN

En primer lugar, se ha desarrollado un modelo matemático del sistema que refleja con precisión las características más importantes del mismo, con el objetivo de simular posteriormente el comportamiento y diseñar el sistema de control.

Para llevar a cabo este modelado se han aplicado los principios de conservación de masa y energía y otras leyes particulares del dominio de aplicación. Además, se ha considerado que en el interior hay un comportamiento de mezcla perfecta, es decir se ha descartado que haya caminos de flujo preferentes o zonas muertas, y se ha considerado que el caudal de entrada es el mismo que el de salida, tanto en el caso del reactor como en la camisa refrigerante.

El modelo obtenido es:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_v}{V} (C_{A0} - C_A) - r_A \quad (1)$$

$$V\rho C_p \frac{dT}{dt} = Q_v(T_i - T) - Q_{int} + Q_{reac} \quad (2)$$

$$V_j \rho_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = Q_{vj}(T_{ji} - T_j) + Q_{int} \quad (3)$$

$$Q_{reac} = \Delta H V r_A \quad (4)$$

$$Q_{int} = UA(T - T_j) \quad (5)$$

$$r_A = K_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} C_A \quad (6)$$

$$X = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} \quad (7)$$

Donde:

- A : es el área de intercambio de calor entre el reactor y la camisa, en m^2 . ($0.1485m^2$)
- C_A : es la concentración del compuesto A en el reactor, en mol/L.

- C_{A0} : es la concentración del compuesto A inicial, en mol/L. (5 mol/L).
- C_p : calor específico del fluido, en $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. ($4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$).
- C_{pj} : calor específico del refrigerante, en $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. ($4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$).
- E_a : es la energía de activación de la reacción, en J/mol . (2420 J/mol)
- ΔH : variación de entalpía de reacción molar, en kJ/mol (20 kJ/mol).
- K_0 : es el factor preexponencial o factor de frecuencia, en min^{-1} (1.38 min^{-1})
- Q_{int} : es el calor intercambiado entre el reactor y la camisa refrigerante, en kJ/min .
- Q_{reac} : es el calor de reacción simulado mediante el amplificador de potencia, en kJ/min .
- Q_v : es el caudal de reactivos, en L/min .
- Q_{vj} : es el caudal de refrigerante, en L/min .
- R : es la constante universal de los gases ideales, en $\text{J/mol}\cdot\text{K}$. ($8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)
- r_A : es la velocidad de reacción, en $\text{mol/L}\cdot\text{min}$.
- T : es la temperatura a la salida del reactor, en $^{\circ}\text{C}$.
- T_i : es la temperatura a la entrada del reactor, en $^{\circ}\text{C}$. (15°C)
- T_j : es la temperatura de la camisa refrigerante a la salida, en $^{\circ}\text{C}$.
- T_{ji} : es el temperatura de la camisa refrigerante a la entrada, en $^{\circ}\text{C}$. (10°C)
- U : es el coeficiente global de transmisión de calor, en $\text{kJ/min}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ ($202,64 \text{ kJ/min}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$).
- V : es el volumen del reactor, en L . (4.67 L)
- V_j : es el volumen de la camisa, en L . (1 L)
- X : es la conversión de la reacción (s/u).
- ρ : densidad del fluido, en kg/L . (1 kg/L)
- ρ_j : densidad del refrigerante, en kg/L . (1 kg/L)

De las diferentes variables que describen el proceso, algunas de ellas son constantes que dependen bien del montaje experimental o de la reacción a simular, y otras son variables de estado del proceso. Por tanto, se puede simular el comportamiento del sistema para un montaje experimental concreto y una reacción determinada.

Para el montaje experimental llevado a cabo se ha realizado una simulación del proceso mediante el entorno de simulación EcosimPro [4] modificando los caudales de alimentación al reactor y de refrigerante. El resultado de dicha simulación puede observarse en la Figura 2.

Los valores de los parámetros que se han utilizado para la simulación (entre paréntesis en la descripción de las abreviaturas) corresponden a los datos del montaje y las temperaturas de entrada a las de la toma de agua de red en Valladolid en marzo.

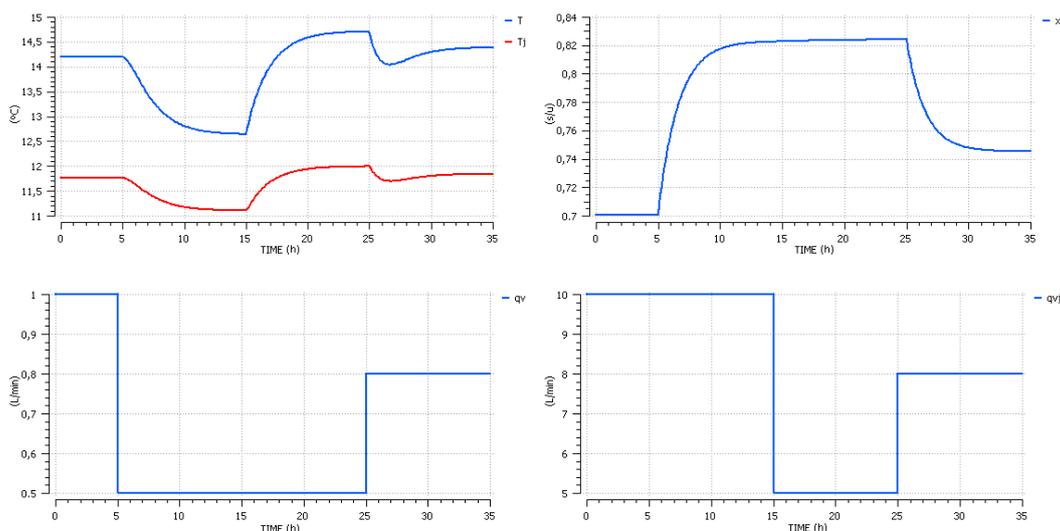


Figura 2. Respuesta dinámica del sistema a) Temperaturas b) Conversión
c) Caudal de refrigerante d) Caudal de alimentación

Partiendo del estado estacionario, se han introducido saltos en el caudal de alimentación a los 5 y 25 minutos (Figura 2.d) y en el caudal de refrigerante a los 15 y 25 minutos (Figura 2.c). Si se analiza la evolución del sistema hasta el equilibrio para las variables más importantes del sistema (conversión y temperatura) se observa que la conversión únicamente se ve afectada positivamente ante una disminución del caudal de alimentación (Figura 2.b), mientras que la temperatura tanto del reactor como de la camisa depende de ambos caudales, pero con dinámicas opuestas: una disminución del caudal de alimentación disminuye las temperaturas (ganancia positiva) mientras que una disminución del caudal de refrigerante las aumenta (ganancia negativa).

Cabe destacar que la ganancia de la temperatura respecto al caudal de alimentación es mayor que la ganancia respecto al caudal de refrigerantes puesto que, como se aprecia en la Figura 2.a, ante un cambio de ambos caudales, las temperaturas se ven más afectadas por el cambio del caudal de alimentación, pese a ser un cambio en menor proporción.

4 SISTEMA DE CONTROL

Existen diferentes estrategias de control que se puede realizar para un mismo proceso según las necesidades que se requieran. En este caso solo se van a establecer dos lazos simples de control, uno para controlar la conversión y otro para controlar la temperatura del reactor. En las siguientes subsecciones se explicará respectivamente, como se ha realizado el diseño de estos controladores y como se ha conectado el sistema de control a la planta real mediante un sistema HMI.

4.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR

En una reacción las dos variables más importantes a controlar son la temperatura que se alcanza en el interior del reactor, sobre todo cuando dicha reacción es exotérmica, y la concentración de producto o conversión de la reacción. Para llevar a cabo este control, las variables manipuladas son el caudal de alimentación al reactor, y el caudal de refrigerante.

A partir del modelo obtenido se han realizado diferentes simulaciones manipulando las entradas del sistema (los diferentes caudales) con el fin de obtener la matriz de ganancias relativas (RGA) y así saber la relación entre las variables manipuladas y las controladas, y poder realizar la sintonía teórica de los controladores PID que controlen el sistema.

Mediante los datos de simulación de los incrementos de las salidas respecto a los saltos introducidos en las entradas se puede calcular una aproximación las ganancias estacionarias de cada par y por tanto la matriz de ganancias estacionarias:

$$\begin{bmatrix} T \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0842 & 0.0651 \\ -1.81 \cdot 10^{-3} & -0.246 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{vj} \\ Q_v \end{bmatrix} \quad (8)$$

Una vez obtenida dicha matriz, para obtener la RGA se han de calcular las diferentes ganancias relativas del sistema [5], donde la ganancia relativa de cada par entrada – salida se calcula a partir de las ganancias estacionarias en los casos extremos de cada lazo, es decir, cuando el resto de lazos del sistema están abiertos y cuando el resto de lazos del sistema están con control perfecto. Sin embargo, puesto que puede demostrarse [5] que, para un sistema de dos entradas con dos salidas, la ganancia estacionaria cuando el resto de lazos

del sistema están controlados depende del resto de ganancias cuando el resto de lazos están abiertos, a partir de los resultados de la matriz de ganancias estacionarias (8), la matriz de ganancias relativas queda tal que:

$$RGA: \begin{matrix} & x & T \\ Q_v & \begin{bmatrix} 0.98 & 0.02 \\ 0.02 & 0.98 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

A la vista de los resultados obtenidos, se establecen dos lazos de control con el siguiente emparejamiento: el lazo 1 que controlará la conversión a partir del caudal de alimentación (Figura 3) y el lazo 2 que controlará la temperatura del reactor a partir del caudal de refrigerante (Figura 4). Además, puesto que los valores de la diagonal son aproximadamente 1 se puede deducir que la interacción entre ambos lazos de control será prácticamente nula.

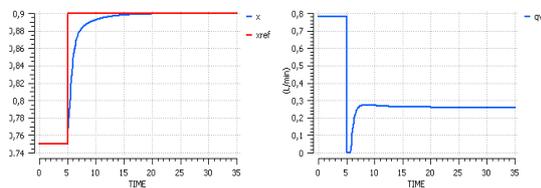


Figura 3. a) SP y PV - Conversión del reactor
b) CV - Caudal de alimentación

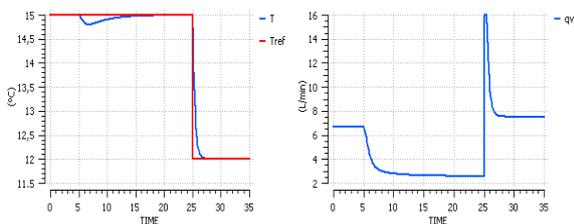


Figura 4. a) SP y PV - Temperatura del reactor
b) CV - Caudal de refrigerante

Se ha de señalar que para realizar la sintonía de los controladores se ha utilizado el método de S-IMC [6]

en lazo abierto, tomando λ igual a 2, para tener un control ni demasiado conservador ni demasiado agresivo.

A partir de la Figura 3 y la Figura 4 se puede apreciar que al modificar los estados de referencia, el sistema responde rápidamente para llegar al nuevo punto de consigna. También cabe destacar que, tal y como se esperaba, hay poco acoplamiento entre lazos pues la temperatura apenas varía ante un cambio de caudal de alimentación y la conversión no varía ante cambios en el caudal de refrigerante.

4.2 IMPLEMENTACIÓN

Una vez diseñado el sistema de control de la planta, se procede a implementarlo, teniendo en cuenta que el caudal de alimentación se controlará con la velocidad proporcionada a la bomba de alimentación (P-101) y el caudal de refrigerante se regulará mediante la válvula V-101. Como no se manipulan directamente los caudales pero sí son medidos, el sistema de control será parecido al obtenido teóricamente pero añadiendo en ambos casos un lazo interno con el que controlar los correspondientes actuadores, es decir, la bomba P-101 y la válvula V-101. Así pues, se establecerán dos lazos en cascada, en el primero el lazo externo controlará la conversión a partir del caudal de alimentación de referencia y el lazo interno comparará dicho caudal de referencia con el caudal real y modificará la velocidad de la bomba. Por otra parte, el segundo lazo en cascada hará lo mismo con la temperatura, el caudal de refrigerante y la válvula respectivamente (Véase Figura 5).

Actualmente mediante el software Intouch de la empresa Wonderware [7] se ha diseñado un sistema SCADA que, por un lado conecta la planta (mediante la tarjeta DAQ) con el sistema de control, y por otro proporciona una interfaz gráfica con la que supervisar y controlar la planta. (Véase Figura 6)

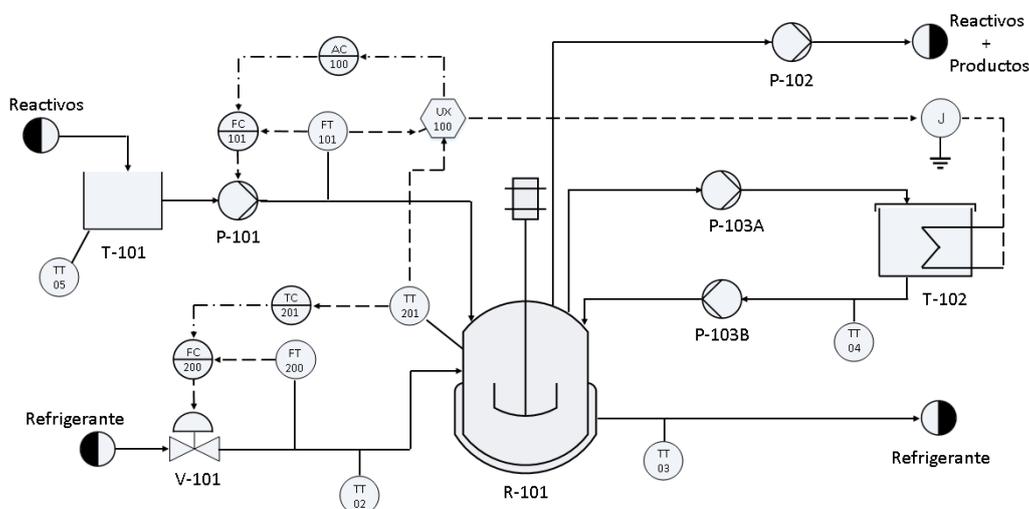


Figura 5 . Diagrama P&I del proceso

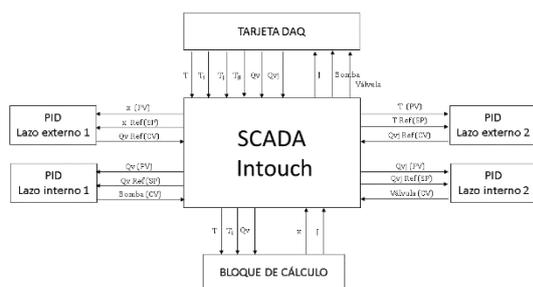


Figura 6. Integración de los diferentes subsistemas

Mediante la tarjeta DAQ se obtienen los valores medidos de las temperaturas tanto del reactor, a la entrada y la salida de la camisa refrigerante, y del tanque de almacenamiento de reactivos, como de los caudales de alimentación y de refrigerante, además de enviar las señales de control a la bomba de alimentación y a la válvula de refrigerante, y la señal correspondiente a la unidad de potencia para que suministre el calor de reacción adecuado.

Por otra parte, el sistema de control se ha implementado utilizando 4 módulos externos accesibles como servidores OPC. Cada uno de estos módulos, desarrollado mediante EcosimPro, actúa como un controlador PID que, tras suministrarle el valor en tiempo real de la variable del proceso que se quiere controlar, el punto de consigna y los parámetros del regulador, calcula la correspondiente variable manipulada [8].

Cabe destacar que para que la planta reproduzca el comportamiento real del sistema, se ha tenido que desarrollar un quinto módulo externo que calcula la conversión y el calor de reacción que se estaría produciendo (y que ha de suministrar la unidad de potencia J-101 para simularlo) a partir de las variables medidas. Es decir mediante EcosimPro, se ha desarrollado un nuevo servidor OPC que actúa como bloque calculador, y en tiempo real, recibe el valor del caudal de alimento que se está midiendo y de la temperatura del reactor, resuelve las ecuaciones (1), (4), (6) y (7), y devuelve cómo salida la conversión y el calor de reacción. A partir del valor de calor de reacción que devuelve el bloque calculador, el sistema SCADA envía la señal correspondiente a la unidad de potencia para suministrar dicho calor a la resistencia calefactora. En el diagrama P&I de la Figura 5 se ha representado este bloque calculador con símbolo de ordenador identificado como UX100.

Por último, la Figura 7 muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica del sistema SCADA que se ha diseñado, en la que se observan los valores en tiempo real de las diferentes variables del proceso. Además, esta pantalla permite encender y apagar la planta, establecer la forma de controlar los diversos lazos de control: forma manual (se ha de establecer el valor deseado de consigna) o automáticamente (se indica directamente la señal de control).

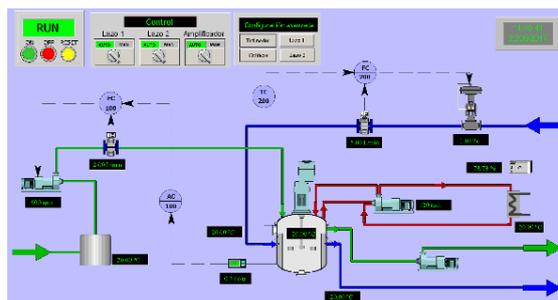


Figura 7. Pantalla principal del HMI

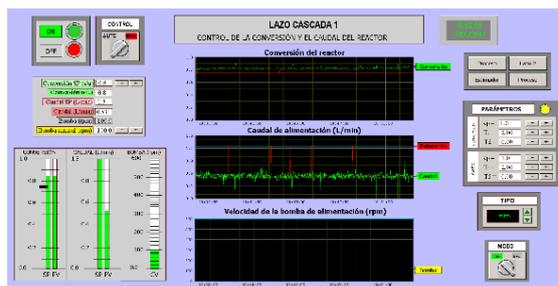


Figura 8. Pantalla de configuración del lazo 1

Además de esta pantalla, se han diseñado otras ventanas donde manipular las características más específicas del sistema de control. Un ejemplo de ello es la Figura 8, donde se muestra la pantalla de la configuración del Lazo 1 de control. Esta pantalla además de permitir visualizar las diferentes variables involucradas en el lazo de control de forma gráfica en tiempo real, muestra los valores numéricamente y en forma de diagrama de barras. También permite, nuevamente, establecer si se quiere utilizar un control manual o automático, elegir el modo de operación de los controladores (ideal o interactivo) y seleccionar el tipo de regulador (PID, PI-D, I-PD o I). Por último, la característica más importante de esta pantalla es que habilita la posibilidad de cambiar la sintonía de los parámetros de cada controlador. Así mismo, se ha diseñado otra pantalla equivalente para la visualización de las características del Lazo 2.

Por último, se han desarrollado otras dos pantallas de configuración avanzada, una para ver gráficas históricas de las diferentes variables involucradas en el proceso, y una que permite especificar los parámetros propios de la reacción que se quiere simular (E_a , ΔH , k_0 , etc.).

5 CONCLUSIONES

Con el trabajo realizado hasta ahora se ha obtenido un buen modelo matemático que simula el comportamiento de la planta piloto que se quiere controlar y se ha diseñado un sistema de control con desacoplamiento estático que permite controlar las variables más importantes del proceso, a ser la conversión de la

reacción y la temperatura del interior del reactor, teniendo poca interacción entre ambos lazos.

Una vez se ajuste la sintonía de los controladores del sistema, se podrá utilizar la planta para simular reacciones de diferente complejidad según se establezcan los parámetros correspondientes desde el sistema SCADA Intouch. Además, desde la interfaz gráfica del sistema SCADA se podrá visualizar la dinámica del proceso y manipular la forma de operar del sistema de control. Es decir, el alumno o investigador que trabaje con la planta podrá experimentar el comportamiento de diferentes reacciones y probar diferentes metodologías de control de forma sencilla manipulando los diferentes parámetros de control desde la interfaz gráfica del sistema SCADA.

Como trabajo futuro se desea implementar un nuevo módulo externo accesible como servidor OPC que realice una optimización del sistema en tiempo real para ajustar las consignas de temperatura y conversión a las condiciones de cada instante, según una función objetivo determinada. Es decir, el plan de futuro es implementar una capa superior de optimización con la que comandar el sistema de control para lograr una operación óptima de la planta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Unión Europea y el Gobierno de España con fondos MINECO/FEDER (DPI2015-70975-P).

Referencias

- [1] J. M. Andújar y T. J. Mateo, «Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un caso Práctico,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 7, nº 1, pp. 64-72, 2010.
- [2] R. Pastor, J. Sánchez y S. Dormido, «Web-based virtual lab and remote experimentation using easy java simulations,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 38, nº 1, pp. 103-108, 2005.
- [3] L. G. Bergh, «A Hybrid Approach to Empirically Test Process Monitoring, Diagnosis and Control Strategies.,» *Thaung K. (eds) Advanced Information Technology in Education. Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 126., 2012.
- [4] EcosimPro, «EcosimPro,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.ecosimpro.com/>.
- [5] S. Skogestad y I. Postlethwaite, «3.4 Relative Gain Array (RGA),» de *Multivariable Feedback Control*, 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, 2005, pp. 82-91.
- [6] S. Skogestad, «Simple analytic rules for model reduction and PID,» *Journal of Process Control*, vol. 13, pp. 291-309, 2003.
- [7] Wonderware, «Wonderware Spain,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.wonderware.es/>.
- [8] J. M. Zamarreño, M. J. de la Fuente y L. F. Acebes, «Desarrollo de un control PID accesible como servidor OPC,» de *Jornadas de Automática*, Bilbao, 2015.
- [1] J. M. Andújar y T. J. Mateo, «Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un caso Práctico,» *Revista Iberoamericana de*