

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

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. 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 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>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO

Carlos G. Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez, César de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
C/Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid. {carlos.gomez, jose.pitarch, gloria, prada}@autom.uva.es

Resumen

El diseño de modelos apropiados para la simulación es, normalmente, un proceso largo y tedioso; por ello, no es conveniente utilizar el mismo modelo detallado para control y optimización. En la mayoría de los casos, los modelos necesarios para la optimización pueden ser más sencillos siempre y cuando reproduzcan las características principales de los modelos complejos. En este trabajo se ha diseñado un sistema para obtener modelos algebraicos sencillos a partir de un modelado más complejo desarrollado para la simulación.

Palabras clave: simulación, optimización, EcosimPro, ALAMO, modelo subrogado.

1 INTRODUCCIÓN

En los procesos de simulación actuales se ha estimado que los tiempos dedicados a la codificación del sistema son cuatro veces mayores que los dedicados al modelado en sí. Esto es debido a la falta de especialización de los ingenieros de procesos, que han sido preparados en otros ámbitos [1].

Para ello, se han desarrollado nuevas herramientas de modelado y simulación, que ayudan en la codificación del sistema, incorporando sus propios lenguajes de programación de un nivel mucho mayor que los lenguajes clásicos. Dichas herramientas de modelado y simulación (e.g., EcosimPro, Dymola [2]) se han diseñado buscando un entorno que facilite la creación de modelos estacionarios y dinámicos de manera rápida e intuitiva. Sin embargo, carecen de buenas herramientas de optimización y, en la mayoría de los casos, hay que hacer uso de software externo. Esto conlleva un gran trastorno para el usuario que puede tomar dos caminos: puede volver a generar el mismo modelo en un entorno diferente, que puede no ser posible exactamente por peculiaridades de cada lenguaje; o bien puede crear un nuevo modelo personalizado, que facilita las tareas de codificación, pero añade una nueva etapa necesaria de validación sobre el sistema real.

Hay que tener en cuenta que los modelos apropiados para simulación deben representar fielmente los comportamientos dinámicos de los sistemas, a fin de poder servir como banco de pruebas, y comprender mejor el proceso que se está llevando a cabo.

Por otro lado, los modelos usados en optimización pueden ser juzgados de una manera más laxa en cuanto a similitud con el sistema real, puesto que no es necesario representar todo el proceso, sino únicamente las variables importantes para el estudio, o bien, sólo el comportamiento en estacionario frente a la dinámica total, si el tiempo del transitorio del sistema es muy breve en comparación con la duración del proceso global. Por otro lado, si se busca obtener herramientas de optimización en tiempo real, la ejecución rápida del código debe primar sobre la exactitud en el cálculo.

El resto del artículo se distribuye de la siguiente manera, en la siguiente sección se indican las herramientas externas utilizadas en detalle. En la sección 3 se describe la interfaz diseñada, y en la sección 4 se amplía el diseño inicial incluyendo paralelismo. En la sección 5 se presentan dos casos prácticos de uso. Finalmente, se finaliza el artículo con las conclusiones y posibles líneas de mejora.

2 SOFTWARE EMPLEADO

En este trabajo se han empleado como herramientas software concretas el entorno de modelado y simulación **EcosimPro**, de Empresario Agrupados, y la herramienta de estimación de modelos **ALAMO** [3], desarrollada en la universidad *Carnegie Mellon*.

2.1 EcosimPro

EcosimPro es una potente herramienta de simulación y modelado de sistemas continuos y discretos. Posee su propio lenguaje de programación de alto nivel basado en el paradigma de la orientación a objetos, **EL (EcosimPro Language)**. Además, permite realizar dicha programación tanto en un modo textual como en un modo gráfico. Por otro lado, gracias a la

orientación a objetos, es posible diseñar sistemas complejos usando código programado anteriormente tanto en forma de componentes de un sistema mayor, como en forma de clases con métodos y variables propias. EcosimPro permite su instalación tanto en sistemas operativos Windows como Linux. Reduciendo, o incluso eliminando, las limitaciones para compartir librerías desarrolladas en distintos equipos o en distintas instalaciones. Esto permite además, disponer de equipos de trabajo especializados en el modelado de librerías de bajo nivel, y otros equipos que desarrollan sistemas más complejos que hagan uso o demanden estas.

2.2 ALAMO

Por su parte, ALAMO es un software que busca identificar ecuaciones algebraicas sencillas que relacionen las entradas y las salidas de sistemas de caja negra. Para ello plantea un problema mixto-entero que debe minimizar el error del valor devuelto por la función propuesta frente al valor real de la variable. La ecuación solución consiste en una combinación de funciones algebraicas base.

Para la obtención de la combinación óptima, ALAMO hace uso del software externo GAMS, para la resolución de los problemas de programación mixta-entera lineal y cuadrática planteados. El algoritmo de resolución que se emplea se puede seleccionar, siendo el valor predefinido y aconsejado el algoritmo BARON. En caso de que GAMS no se encuentre disponible en el sistema donde se ejecuta, se utilizarán enfoques enumerativos para la optimización combinatoria. [4], que pueden alargar el tiempo de resolución en problemas de gran escala, y hacer que el modelo subrogado obtenido no sea preciso y/o fiable.

La interfaz de ALAMO es un punto débil importante del programa. Las llamadas tienen que hacerse mediante línea de comandos, mientras que la comunicación de datos de entrada y salida se realiza mediante ficheros de texto plano. Por ejemplo, en el fichero de entrada se debe especificar el número de variables de entrada que tiene el sistema, y el número de salidas que se deben estimar. Además se pueden indicar los nombres de las variables de entrada del sistema y de las variables a calcular. En caso de no indicar los nombres, el programa por defecto etiquetará con una letra "x" seguida de un índice numérico las entradas y con una letra "z" seguida, igualmente, de un índice numérico las salidas.

En el fichero de entrada se deben introducir también las funciones base elegidas, con las que el programa debe intentar ajustar la curva de salida. Una vez ejecutado, ALAMO presenta varias soluciones que disminuyen el error pero incrementan la dificultad

añadiendo más funciones o aumentando la complejidad de éstas.

ALAMO está preparado para el trabajo con datos obtenidos de planta, que deben introducirse en el fichero de entrada en columnas ordenadas donde las primeras columnas serán los valores de las entradas y las siguientes los de las salidas, en el mismo orden que se han indicado los nombres de estas. Sin embargo, también se permite el trabajo con simuladores, que deben responder a una sintaxis muy concreta en la llamada.

3 DISEÑO DE LA INTERFAZ

En esta sección se definirá la interfaz implementada que permite realizar la llamada desde ALAMO empleando los modelos codificados en EcosimPro. Inicialmente se debe desarrollar el modelo completo en EcosimPro, que puede ser tanto dinámico como estacionario, a este modelo se le denomina componente en lenguaje EL. Una vez que se tiene el componente, se definen las llamadas particiones, que son la traducción a lenguaje matemático y conllevan también la obtención de código en el lenguaje C++.

Todas las particiones heredan de una clase padre, por lo que tienen la misma interfaz. Esta ofrece funciones que permiten escribir y leer el valor de variables. También incluye llamadas para indicar tiempos de simulaciones, o el cálculo del estacionario. En nuestro caso se hará uso de este último. Esta implementación de la herencia nos permite minimizar los cambios que se deben realizar en el código por el usuario al mínimo, utilizando punteros a la clase padre e inicializando en cada caso a la partición concreta, como se indica en la Figura 1.

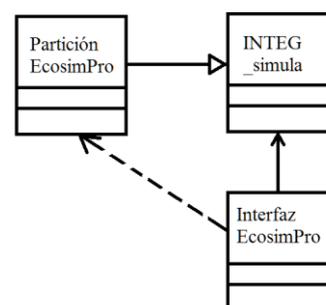


Figura 1. Implementación llamada EcosimPro

Con las particiones iniciadas al modelo concreto, se compila el ejecutable que se ha definido con la interfaz que necesita ALAMO. Este tiene que leer de un fichero de texto que el programa de estimación genera, donde indica una serie de valores que las variables de entrada deben tomar, y genera un fichero de salida con la respuesta del sistema.

Para facilitar el uso por el ingeniero de procesos, se han desarrollado una serie de funciones que permiten la creación del fichero de texto plano de configuración que requiere ALAMO como entrada, desde un experimento de EcosimPro. Más tarde, este fichero de configuración se utilizará para generar el simulador de manera automática y no tener que realizar la introducción de las variables de manera manual en distintos puntos, lo que disminuye la posibilidad de fallos humanos. Del mismo modo, se han implementado funciones de llamada para permitir la ejecución del estimador desde el mismo programa EcosimPro, a fin de poder observar las funciones respuesta sugeridas por el estimador.

4 SIMULACIÓN CONCURRENTE

Gracias a las arquitecturas actuales de los procesadores multinúcleo, que incluso pueden llegar a incorporar varios núcleos lógicos dentro de un mismo núcleo físico, se puede conseguir la ejecución concurrente de procesos. Existen diversos enfoques en la programación paralela: siendo los más usados las llamadas a las instrucciones del sistema operativo; y la utilización de directivas especiales ofrecidas por los compiladores actuales.

Históricamente, la paralelización se basaba en la ejecución multiproceso [5]. En esta versión, es necesaria la existencia de varios núcleos para tener concurrencia real. Cada proceso dispone de su propio espacio en memoria para el almacenamiento del código y de los valores de las variables. Existe un proceso padre que crea tantos procesos hijos como desee, siendo el número máximo adecuado el número de núcleos menos uno. Todos comparten el mismo código, variando en su número de identificación de proceso. Al no tener memoria en común, es importante indicar previamente las zonas de memoria que se deben compartir para el paso de variables, o el acceso a la misma.

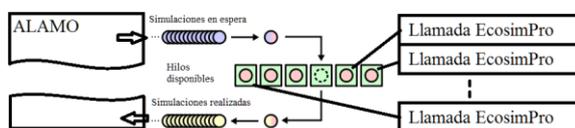


Figura 2. Implementación de la concurrencia

Una versión más actual es la implementación multihilo [6], donde un proceso padre genera tantos hilos como necesite. En este caso todos los hilos comparten la memoria, haciendo más sencillo el paso de parámetros, pero también necesario evitar que varios hilos accedan a la misma variable a la vez. Esto implica la necesidad de implementar algoritmos de reserva de recursos y prioridades, evitando que un dato pueda sufrir accesos concurrentes.

Actualmente se está desarrollando una nueva vertiente denominada paralelización por tareas [7], donde no se impone el código que debe ejecutar cada hilo, sino que se indican las tareas que se pueden realizar de manera concurrente y el número de hilos para ejecutarlas. El sistema repartirá tantas tareas pendientes de la lista como hilos creados haya entre los núcleos lógicos del sistema, cuando un hilo finaliza su ejecución, y en caso de que la pila de tareas pendientes aún no haya finalizado, recibirá otra tarea. De esta manera se pueden conseguir implementar programas paralelos con mayor eficiencia con independencia del número de núcleos disponible en el equipo donde se ejecute, puesto que el número de tareas a distribuir siempre será el mismo, y el de hilos puede llegar a ser máximo admitido por el equipo. Para poder ejecutar este paradigma de programación paralela en el lenguaje C++ es necesario utilizar herramientas externas que implementen a bajo nivel el reparto de los núcleos de los procesadores entre los hilos creados, y asignen las tareas a estos. Dos posibles opciones son la: librería Threading Building Blocks (TBB) desarrollada por Intel [8]; o la biblioteca Qt [9], que ofrece clases especiales, como *QThreadPool*, para codificar dicha implementación.

En el caso de la interfaz presentada, el programa de estimación de modelos da una serie de combinaciones de las variables de entrada y espera recibir sendos valores de las salidas del sistema estimadas. Por lo tanto, es necesario lanzar la simulación ese mismo número de veces. Debido a que cada simulación es independiente de las demás, todas podrían ejecutarse de manera concurrente. Para implementar esta paralelización se ha definido como tarea la ejecución de la simulación, y se ha utilizado el paradigma de la paralelización de tareas. Un pequeño diagrama se puede ver en la Figura 2.

5 RESULTADOS

El enfoque integrado propuesto se ha utilizado en dos ejemplos prácticos para comprobar su eficiencia: inicialmente un modelo de un reactor químico, usado principalmente como banco de pruebas; y posteriormente sobre un modelo más complejo de una planta de evaporación industrial real. La respuesta seleccionada no es en todos los casos la que minimiza el error con la respuesta del sistema¹, en algunos casos se ha balanceado la precisión con complejidad del modelo subrogado.

¹ Aumentar la precisión implica aumentar la complejidad y/o el número de las funciones base seleccionadas por ALAMO, pudiendo reducir la robustez del modelo.

5.1 REACTOR CONTINUO

Se dispone de un reactor químico de flujo continuo, donde un reactivo A se convierte en un producto B mediante una reacción exotérmica. Para mantener el reactor en un estado estable es necesario, por lo tanto, enfriarlo, lo cual se consigue mediante una camisa refrigerante.

5.1.1 MODELO DEL REACTOR

A continuación se presentan las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico de simulación del reactor.

$$V \cdot \frac{dC_A}{dt} = q \cdot (C_{A0} - C_A) - V \cdot k \cdot C_A \quad (1)$$

$$V \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{dT}{dt} = q \cdot \rho \cdot (T_e - T) - V \cdot k \cdot C_A \cdot \Delta H - Q \quad (2)$$

$$V_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot \frac{dT_r}{dt} = F_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot (T_{re} - T_r) + Q \quad (3)$$

$$k = 5,967 \cdot e^{\frac{-826}{T+273,15}} \quad (4)$$

$$Q = U \cdot A \cdot (T - T_r) \quad (5)$$

$$x = \frac{C_B}{C_{A0}} \equiv \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad (6)$$

Donde:

- V : Volumen del reactor (m^3)
- V_r : Volumen de la camisa refrigerante (m^3)
- C_A : Concentración de A en el reactor (kg/m^3)
- C_{A0} : Concentración de A en la alimentación (kg/m^3)
- q : Flujo volumétrico de alimentación (m^3/h)
- F_r : Flujo volumétrico del refrigerante (m^3/h)
- k : Constante cinética de la reacción ($1/h$)
- ρ : Densidad corriente de alimentación (kg/m^3)
- ρ_r : Densidad del refrigerante (kg/m^3)
- C_P : Capacidad calorífica de la mezcla ($kJ/kg K$)
- C_{Pr} : Capacidad calorífica del refrigerante ($kJ/kg K$)
- T : Temperatura del reactor ($^{\circ}C$)
- T_e : Temperatura de entrada de la alimentación ($^{\circ}C$)
- T_r : Temperatura media del refrigerante ($^{\circ}C$)
- T_{re} : Temperatura de entrada del refrigerante ($^{\circ}C$)
- ΔH : Calor de reacción (kJ/kg)
- Q : Calor intercambiado (kJ/h)
- U : Coef. global de transmisión de calor (kJ/hm^2K)
- A : Superf. de transmisión de calor de la camisa (m^2)
- x : Ratio de conversión de A en B (adimensional)

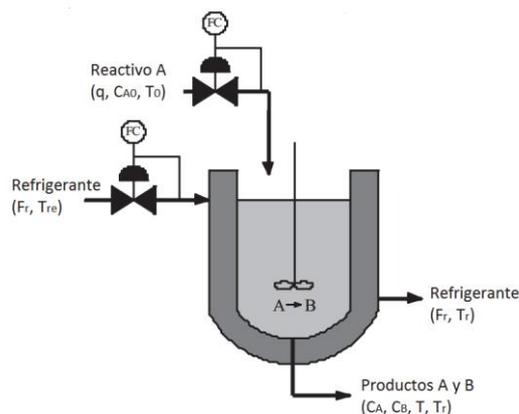


Figura 3. Esquema del reactor

5.1.2 MODELO ESTIMADO

Las variables controlables son el caudal de entrada del reactivo y el flujo del refrigerante, por lo que serán las variables de entrada que se deben indicar a ALAMO. Por otro lado, se desea maximizar la concentración del producto a la salida, manteniendo la temperatura dentro de los límites permitidos. Por consiguiente, las funciones a estimar son el caudal del producto a la salida, y la temperatura en el interior del reactor. Esta solución sirve para buscar el punto de trabajo en el estacionario, dejando de lado el control de la dinámica del sistema que se supone existente. Las respuestas obtenidas se muestran junto a los valores de la simulación en la Figura 4 y la Figura 5, donde en el eje de coordenadas se puede ver el valor de la variable en sí, y el eje de abscisas representa combinaciones de las variables de entrada.

$$C_B = -1,2 \cdot q + 0,21 \cdot q^2 - 0,15 \cdot 10^{-1} \cdot q^3 + 0,18 \cdot 10^{-6} \cdot F_r^{-3} - 0,43 \cdot 10^{-2} \cdot q \cdot F_r + 0,23 \cdot 10^{-5} \cdot (q \cdot F_r)^2 + 14 \quad (7)$$

$$T = 26 \cdot q + 1,9 \cdot \ln(q) - 21 \cdot \ln(F_r) - 0,97 \cdot q^2 + 0,23 \cdot 10^{-2} \cdot F_r^2 - 0,18 \cdot q \cdot F_r + 0,84 \cdot 10^{-4} \cdot (q \cdot F_r)^2 + 100 \quad (8)$$

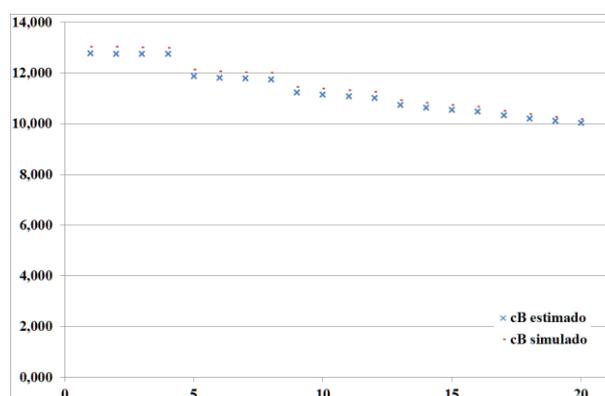


Figura 4. Caudal de producto a la salida

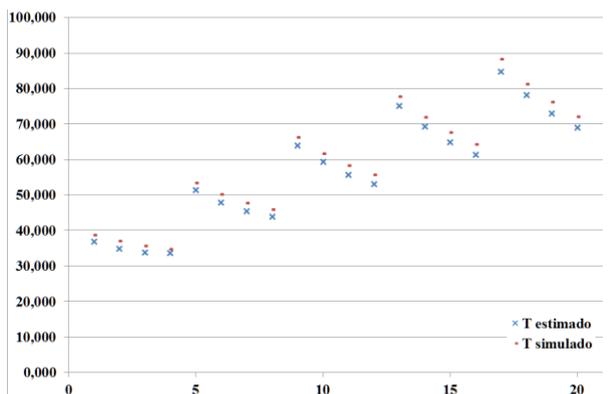


Figura 5. Temperatura del reactor

5.2 PLANTA DE EVAPORACIÓN

El sistema a estimar consiste en una planta de evaporación industrial. El sistema debe evaporar una cantidad fija de agua de una disolución de ácidos y sales, a fin de mejorar la cristalización posterior de dicha disolución. El sistema consta de una serie de intercambiadores de calor iniciales para incrementar la temperatura del líquido y, después, una combinación de cámaras de evaporación. Un pequeño diagrama del sistema se puede ver en la Figura 6. Para calentar el producto se emplea inicialmente el vapor obtenido en las cámaras de evaporación 1 y, en los últimos intercambiadores, vapor vivo, cuyo consumo se desea reducir a fin de economizar el proceso.

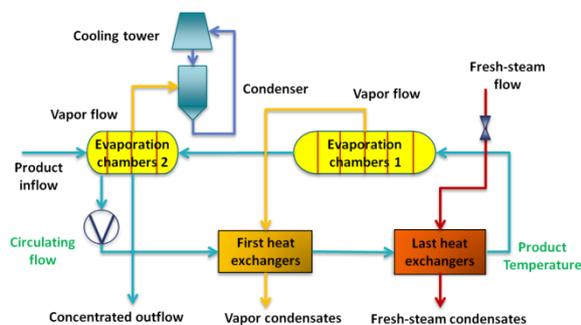


Figura 6. Diagrama de la línea de evaporación

Las variables controladas son la temperatura del producto a la salida de los intercambiadores y el caudal de recirculación. Por lo tanto, dichas variables serán los parámetros de entrada que se indicarán al estimador. Puesto que se desea reducir el consumo de vapor específico, éste, junto con el caudal de agua evaporada, serán las variables que se deben estimar. Igualmente, la solución obtenida sirve para el sistema estacionario, no prestando atención a la dinámica del sistema, mucho más rápida. La comparación entre los valores devueltos por la simulación y los estimados por el modelo subrogado se muestran en la Figura 7 y la Figura 8, donde nuevamente el eje de coordenadas

representa el valor de la variable y en el eje de abscisas se indican las combinaciones de entradas.

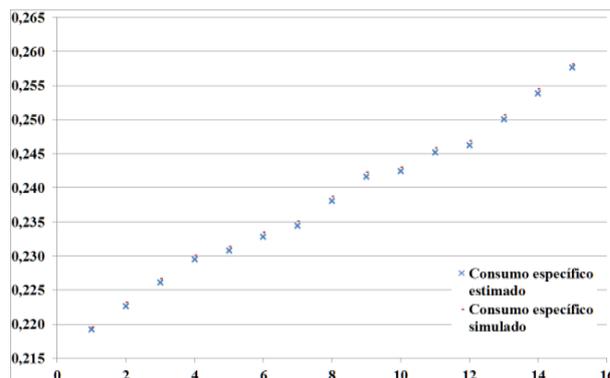


Figura 7. Consumo específico de vapor

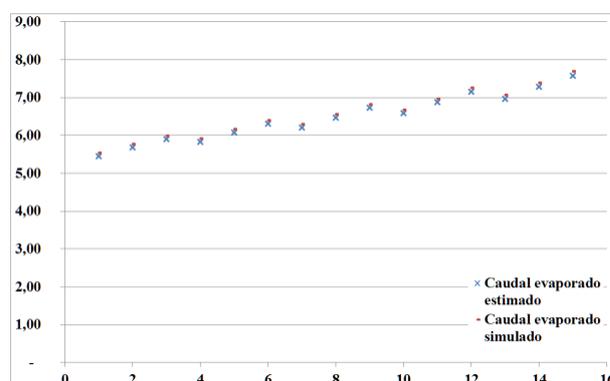


Figura 8. Caudal de agua evaporada

Las ecuaciones del modelo completo han sido omitidas por brevedad. Se emplaza al lector que así lo desee a consultar el modelo completo en [10].

5.2.1 MODELO ESTIMADO

$$SSC = 0,82 \cdot 10^{-3} \cdot R_F + 0,74 \cdot 10^{-2} \cdot \ln(O_T) + 0,38 \cdot 10^{-5} \cdot O_T \cdot R_F \quad (9)$$

$$E_F = 0,34 \cdot 10^{-6} \cdot O_T^3 - 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot R_F^3 + 0,41 \cdot 10^{-3} \cdot O_T \cdot R_F \quad (10)$$

Donde:

SSC: Consumo específico de vapor (adimensional)

R_F : Caudal de recirculación (kg/s)

O_T : Temperatura de salida de los intercambiadores (°C)

E_F : Caudal de evaporación (kg/s)

6 CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Se ha desarrollado una interfaz para la obtención de modelos simplificados adecuados para la optimización partiendo de modelos complejos. Estos modelos se han generado previamente con un enfoque en la simulación de procesos. Además, se ha comprobado su eficacia en varios sistemas.

Se han mejorado los tiempos de cómputo necesarios inicialmente incluyendo una implementación que hace uso de técnicas de paralelismo.

Aunque el sistema es relativamente sencillo de editar, se pretende incorporar una interfaz gráfica que facilite aún más dicha tarea. De esta manera, el operario podrá usar el sistema sin necesidad de utilizar otro programa que el simulador.

También se está trabajando en una versión que permita obtener modelos subrogados de las dinámicas del sistema, lo que implica añadir el tiempo como variable de entrada y el tratamiento de un número mayor de datos y simulaciones. Esta versión del programa permitirá obtener modelos útiles para optimizaciones dinámicas.

Por otro lado, aunque la simulación es el mayor consumidor de tiempo en la ejecución del programa, la lectura de ficheros, también supone un cuello de botella, por lo que la paralelización de tareas se podría aumentar a la lectura del mismo, puesto que las primeras simulaciones no deben esperar a que el fichero se haya terminado de leer para empezar a ejecutarse. Para esto habría que añadir restricciones en el acceso a variables mediante la implementación de semáforos de acceso a un vector con los valores

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa de innovación y desarrollo de la Unión Europea

Horizonte 2020, proyecto CoPro (contrato nº123575) y por el Gobierno de España con fondos MINECO /FEDER (DPI2015-70975-P).

Referencias

- [1] *EcosimPro. Dynamic Modeling & Simulation Tool*. EA International.
<http://www.ecosimpro.com>
- [2] Cellier, F. E. "Dymola: Environment for object-oriented modeling of physical systems." Lund, Sweden: Dassault Systemes AB 2015.
- [3] Cozad, Alison, N. V. Sahinidis, and David C. Miller. "Alamo: Automatic learning of algebraic models for optimization." American Institute of Chemical Engineers, 2013 Annual Meeting, San Francisco. 2013.
- [4] Ibaraki, Toshihide. *Enumerative approaches to combinatorial optimization*. Baltzer, 1987.
- [5] Almasi, George S., and Allan Gottlieb. "Highly parallel computing." 1988.
- [6] Alverson, G. A., Charles, D. C. I., Kahan, S. H., Koblenz, B. D., Porterfield, A., & Smith, B. J. "Synchronization Techniques in a Multithreaded Environment." U.S. Patent No. 6,862,635. 1 Mar, 2005.
- [7] Yang, Gang, Xingshe Zhou, and Huifang Pan. "Feedback-based Framework of Adaptive Threads-pool Management." *Computer Engineering* 21, 2006: 65-67.
- [8] Reinders, James. *Intel threading building blocks: outfitting C++ for multi-core processor parallelism*. "O'Reilly Media, Inc.", 2007.
- [9] Summerfield, Mark. *Advanced Qt Programming: Creating Great Software with C++ and Qt 4*. Pearson Education, 2010.
- [10] Pitarch, J. L., Palacín, C. G., De Prada, C., Voglauer, B., & Seyfriedsberger, G. "Optimisation of the resource efficiency in an industrial evaporation system." *Journal of Process Control* 56, 2017: 1-12.