

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
*Comité Español
de Automática*

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

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 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 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	
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>	

Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim

Enrique Teruel

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, eteruel@unizar.es

Rosario Aragüés

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, raragues@unizar.es

Resumen

El aprendizaje, en particular de materias técnicas como la simulación de sistemas dinámicos, requiere que los estudiantes desarrollen casos de diverso nivel de complejidad, desde pequeños ejemplos didácticos hasta proyectos de cierta envergadura. Para ello es ineludible el uso de herramientas profesionales accesibles, lo que es prácticamente sinónimo de código abierto. En este artículo informamos de nuestra experiencia con JaamSim, un paquete de simulación que incluye una interfaz “arrastrar-y-soltar”, gráficos interactivos, procesamiento de entradas y salidas, y herramientas de desarrollo de modelos. El grado de madurez de la herramienta, y su comunidad de usuarios, nos parece más que suficiente para sustituir con ventaja otras opciones propietarias o con licencias de estudiante limitadas, si bien JaamSim todavía debe seguir evolucionando, sobre todo en aspectos de usabilidad, para lo que la contribución de los usuarios es fundamental. Una ventaja de algunas populares herramientas propietarias es la existencia de material didáctico, pero consideramos que puede suplirse ventajosamente compartiendo en abierto material didáctico análogo, especialmente ejemplos y casos desarrollados, por lo que contribuimos con el material de nuestro curso, que esperamos aumentar y perfeccionar en sucesivas ediciones.

Palabras Clave: Simuladores, Lenguajes de simulación, Sistemas de eventos discretos, Educación, Herramientas software.

1 INTRODUCCIÓN

A la hora de diseñar una asignatura, y sus procesos de enseñanza-aprendizaje, nos parece primordial centrarse en el trabajo que harán los estudiantes en las sesiones prácticas y por su cuenta, pues como mejor se aprende es haciendo (Brown *et al.*, 2014), poniendo en práctica los conceptos explicados y usando herramientas de nivel profesional. Esto es más cierto si cabe cuando la modalidad de enseñanza no es plenamente presencial, y los estudiantes deben realizar su aprendizaje

práctico autónomamente, algo que se ha revelado de forma acuciante tras la aparición de cursos masivos en línea (MOOC's), donde predominan las versiones de código abierto como herramientas para todo tipo de materias, especialmente aquéllas en las que, al igual que en la simulación, se requiere ponerse manos a la obra para aprender y compartir (Conole, 2013).

Este era el reto al que nos enfrentábamos al rediseñar la asignatura de Simulación de Sistemas Dinámicos en el grado de Ingeniería Electrónica y Automática de la Universidad de Zaragoza, que se imparte en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, en Zaragoza, y en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, donde se está planteando la conveniencia de ofrecer el curso en modalidad semi-presencial. Previamente la asignatura se impartía utilizando Arena para la simulación de eventos discretos y Matlab-Simulink para la simulación de sistemas continuos e híbridos. Desgraciadamente, estas herramientas sólo estaban disponibles en los laboratorios, pues ambas tienen costes de licencia elevados. En realidad de la primera hay una versión para estudiantes gratuita pero, como suele suceder en estos casos, está drásticamente limitada. Tras un análisis de alternativas más accesibles, idealmente de código abierto, nos decantamos por sustituirlas con JaamSim y OpenModelica, respectivamente. En este artículo nos centramos en el caso de la simulación de eventos discretos, con JaamSim (JaamSim Development Team, 2017), pues la disponibilidad de herramientas de código abierto para simulación de eventos discretos es relativamente reciente y todavía escasa (Dagkakis y Heavey, 2016), mientras que el uso de Modelica (Mattson *et al.*, 1998), un lenguaje estándar de modelado, abierto y con otras ventajas fundamentales para el modelado de sistemas dinámicos, consideramos que está más extendido y documentado (Fritzson, 2015; Tiller, 2014; Martín *et al.*, 2005). No obstante, todo el material del curso se deja accesible en abierto, también el cubierto por OpenModelica (herramienta de código abierto basada en Modelica), que consiste en un “OpenModelica Notebook” adaptado de “DrModelica”, basado en (Fritzson, 2015), incluyendo numerosos ejemplos de (Tiller, 2014), y con algunas contribuciones originales.

El material en abierto, accesible a través de (Teruel, 2017), de libre distribución (bajo licencia CC-BY-SA), es prácticamente el mismo que se pone a disposición de los estudiantes, y consiste en presentaciones y otros documentos y archivos compartidos en Google Drive, incluyendo ejemplos realizados con las herramientas. Aunque sea muy brevemente, queremos destacar la conveniencia de la plataforma Google Drive (en nuestro caso dentro del programa Google Apps for Education, suscrito por nuestra Universidad, y combinada con nuestra plataforma LMS, que está basada en Moodle). Los estudiantes pueden acceder a las presentaciones completas, con sus animaciones y anotaciones, y enlaces al material complementario desarrollado (modelos, hojas de cálculo, etc), y para los profesores supone un considerable ahorro de tiempo a la hora de editar y compartir el material.

Tras una primera edición del curso consideramos que nuestros objetivos se han cumplido muy satisfactoriamente, lo que nos ha motivado a poner en común la experiencia para que pueda ser reutilizada y enriquecida por nuestros colegas. Pensamos, además, que muchas de las ideas metodológicas y logísticas pueden aprovecharse igualmente en otras disciplinas, en particular las hemos puesto también en práctica en una asignatura básica de Sistemas Automáticos (en el grado de Ingeniería Mecánica) donde nos hemos apoyado en Scilab/Xcos como alternativa a Matlab-Simulink.

2 DISEÑO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Tras una introducción general a la simulación, que podría definirse como experimentación con modelos (típicamente, aunque no exclusivamente, matemáticos-informáticos), el curso se divide en dos partes, una dedicada a los sistemas de eventos discretos y otra a los sistemas continuos e híbridos. Dado que el contexto de la asignatura es un grado de ingeniería electrónica y automática, el énfasis se pone en sistemas de producción y logísticos, y en sistemas técnicos automatizados, aunque esta disciplina interesa a otros perfiles, y de hecho se imparte en numerosas universidades también a estudiantes de la rama económica-empresarial, de la rama informática, o de la rama científica.

2.1 ¿LENGUAJE DE PROPÓSITO GENERAL, LENGUAJE DE SIMULACIÓN, O SIMULADOR?

El perfil de los estudiantes motiva una de las primeras decisiones a tomar en el diseño: usar como herramienta o vehículo un lenguaje de programación

de propósito general, un lenguaje de simulación, o un simulador. Es un debate que se ha recogido en la literatura (Leemis y Park, 2006), y en el que, a nuestro juicio, la respuesta más apropiada es diferente para cada perfil: mientras para los estudiantes informáticos, o para los más interesados en construir simuladores específicos, la opción preferente será un lenguaje de propósito general, para los estudiantes con perfil de gestión es preferible un simulador capaz y amigable. En nuestro caso, entre ambos extremos, pensamos que deben mostrarse las bases para la programación de simuladores, pero conviene usar un lenguaje de simulación de alto nivel que permita desarrollar y analizar desde el principio ejemplos gradualmente más complejos, punto de vista que coincide con (Law y Kelton, 2000), que es uno de los libros seleccionados como referencia básica. Sin embargo, a diferencia de (Kelton *et al.*, 2015), preferimos una herramienta de código abierto, de forma que los estudiantes no vean limitada su capacidad de modelado (cosa que sucede en la versión para estudiantes de Arena), y a la vez tengan la posibilidad de acceder al código fuente, para adaptarlo o para aprender sobre la construcción de un simulador profesional.

2.2 BIBLIOGRAFÍA Y HERRAMIENTA RECOMENDADA

La decisión sobre el tipo de herramientas a usar para construir modelos de simulación condiciona la bibliografía básica a recomendar, que en nuestro caso han sido los libros de Law y Kelton (2000) y de Altiok y Melamed (2007), este último por consideraciones de disponibilidad para nuestros estudiantes (nuestra biblioteca dispone de la versión electrónica, luego todos los estudiantes pueden disponer de él), a falta de un buen texto con acceso abierto, o/y de un texto que se apoyase en JaamSim.

El programa resultante (sobre simulación de eventos discretos) ha sido:

- Introducción a la simulación de eventos discretos
- Lenguajes de simulación y simuladores. Introducción a JaamSim
- Modelado y simulación de sistemas de producción y logísticos
- Técnicas estadísticas
- Desarrollo de casos

Con algo de inspiración “flipped-classroom” nuestra intención era dedicar las clases (unas veinte horas para esta parte) a presentar e ilustrar los conceptos siempre sobre ejemplos lo bastante “ricos”, de forma activa y participativa, y no para explicaciones que pueden, o deben, leerse/verse fuera de clase.

Esto conduce a la tercera decisión, que fue seleccionar y desarrollar en JaamSim ejemplos, en general tomados de los textos de referencia, y dejarlos a disposición de los estudiantes, tanto por el

interés conceptual que tienen los sistemas modelados y analizados como por la utilidad para aprender por imitación/inspiración las técnicas básicas de modelado.

2.3 UN REPOSITORIO DE EJEMPLOS

Nuestra intención es desarrollar y ampliar un conjunto variado de ejemplos, bien documentados. Probablemente incorporaremos el resultado de los mejores trabajos de nuestros estudiantes. Inicialmente se han desarrollado los siguientes ejemplos, adaptados a partir de la literatura recomendada, donde se discuten o ilustran con otras herramientas, típicamente Arena:

- Un ejemplo introductorio básico (servidor-cola), adaptado de la Sección 5.2 de (Altiok y Melamed, 2007) y la Sección 3 del manual de usuario de JaamSim (JaamSim Development Team, 2017) que se desarrolla paso a paso a la vez que se presentan conceptos fundamentales sobre modelado y análisis de simulaciones de Montecarlo.
- Una línea de producción, adaptado del Cap. 11 de (Altiok y Melamed, 2007).
- Un sistema de fabricación flexible con AGV's para transporte entre células, adaptado de la Sec. 13.5 de (Law y Kelton, 2000).
- Un ejemplo sobre políticas Push, Pull y Kanban, inspirado en el ejemplo "Kanban Game. Making Robots" de la colección de The Big Lean Simulation Library (JaamSim Development Team, 2017).
- Dos ejemplos de cadena de suministro, adaptados del Cap. 12 de (Altiok y Melamed, 2007).
- Un ejemplo de un peaje, adaptado de la Sec. 13.4 de (Altiok y Melamed, 2007).

Estos ejemplos se usan en clase para presentar los conceptos a la vez que se enseña a modelar y analizar, y varios se trabajan en las clases prácticas, cuyo contenido puede verse en el documento "Cuestionarios" de (Teruel, 2017), en tareas de modelado, depuración de errores y verificación o de análisis y optimización de prestaciones. También sirven como inspiración para los estudiantes en el momento de realizar sus trabajos de asignatura, que constituyen la principal actividad evaluable, y que este primer curso hemos tomado de los "Arena Contest Problems" de (Kelton *et al.*, 2015).

Las primeras versiones de algunos de estos ejemplos han sido compartidas en la comunidad de usuarios de JaamSim, donde hemos sugerido que se centralice la puesta en común de experiencias docentes (tema que se fijó como cabecera) y en particular que se favorezca y ordene la compartición de ejemplos. Los ejemplos que hemos compartido en la comunidad han resultado indudablemente de interés. En concreto, el ejemplo de un sistema de

fabricación flexible, del que se habla más adelante, ya ha sido recomendado por algunos usuarios para responder a preguntas de otros sobre el modelado de sistemas análogos.

Dado que los estudiantes desarrollan sus propios ejemplos en las clases prácticas y, sobre todo, en los trabajos, nuestra intención es ir aumentando este repositorio inicial, y mejorar su documentación. Esto permitirá que en sucesivas ediciones del curso, en lugar de "partir de cero", algunos estudiantes puedan profundizar o sofisticar casos disponibles, que es una situación con la que frecuentemente se encontrarán en su actividad profesional.

2.4 EJEMPLO DE EJEMPLO

A modo de ejemplo de lo que contiene un ejemplo, tomamos el Sistema de Fabricación Flexible con AGV's. Consta de cinco estaciones de trabajo, cada una con varias máquinas idénticas, a través de las cuales pasan los productos, de diferentes tipos (con diferentes planes de trabajo). El movimiento entre unas estaciones y otras lo hace uno o varios AGV's, y se consideran las alternativas de servicio al siguiente (FIFO) o al más próximo (Nearest). En la carpeta del ejemplo (Teruel, 2017) se encuentra una presentación, la versión de JaamSim con la que se desarrolló, varios modelos con distintas variantes, y archivos y hojas de cálculo con los datos de salida y su análisis. La Figura 1 muestra un pantallazo de dicha carpeta, una hoja de cálculo con resultados, y el modelo, en el que no se ha pretendido hacer una representación "física" del lay-out, sino "funcional": las estaciones se modelan mediante entidades Resource, los tiempos de proceso mediante entidades Delay, y los AGV's mediante entidades de tipo Container que "cargan" una entidad que modela un producto y atraviesan dos entidades Delay, una modelando el tiempo para ir a recoger el producto y otra para modelar el tiempo de llevarlo a su destino. En la Figura 1 tenemos, por ejemplo, tres productos siendo procesados por sendas máquinas en la primera estación, mientras uno espera a que quede una máquina libre. En la estación 3 las cinco máquinas están ocupadas, y tiene otros cuantos esperando (la evolución de la longitud de las colas de las estaciones 2 y 3 se representa dinámicamente en el gráfico de la derecha). Los dos AGV's están ocupados, uno yendo a buscar un producto y otro transportando otro producto a la estación que le corresponde. Los distintos tiempos de proceso y transporte y los detalles de la lógica del modelo están especificados en las diversas distribuciones, asignaciones de atributos, evaluación de expresiones, etc, que normalmente se ocultarían en un modelo de animación, pero en este caso está todo a la vista, pues de lo que se trata es de revisar cómo está construido el modelo, y luego hacer las simulaciones necesarias para analizar y optimizar el sistema. Para facilitar el

análisis en sus primeras fases es muy conveniente la posibilidad de mostrar en la pantalla de animación cuadros de texto y gráficos con los valores de las medidas de prestaciones de interés, en este caso los tiempos de espera (lead times) y sus diversas componentes, la productividad (throughput), la longitud de las colas, las utilidades, etc.

3 VALORACIÓN DE JaamSim

Tras una exploración de herramientas disponibles, tanto propietarias como sobre todo de acceso abierto (Dagkakis y Heavey, 2016), seleccionamos JaamSim por tratarse de una aplicación relativamente madura, potente y usable, que se deriva de una amplia experiencia, desde 2002, en proyectos industriales de simulación programada directamente en Java (King y Harrison, 2010). A partir de esta experiencia, sus desarrolladores empezaron a construir una

herramienta que pudiera ser alternativa a los paquetes comerciales (King y Harrison, 2013). Al principio los propios autores consideraban JaamSim especialmente orientada a programadores, que encontrarían ventajas programando en Java y usando JaamSim frente al uso del lenguaje propio de aplicaciones, cuando éste se requería extensivamente, pero reconocían que era todavía insuficientemente versátil y usable para usuarios no programadores. A nuestro juicio, a la vista de la trayectoria seguida desde que la empezamos a usar en 2016, la aplicación ya ha alcanzado, o está alcanzando, el nivel de desarrollo y usabilidad que la hace atractiva también como paquete de simulación alternativo a los comerciales, para usuarios de todo tipo, y ha seguido y sigue mejorando en este sentido.

Siguiendo las recomendaciones de (Law y Kelton, 2000), los puntos a valorar en un paquete de simulación son los siguientes:

- Capacidades generales, incluyendo flexibilidad



Figura 1: Ejemplo de Sistema de Fabricación Flexible con AGV's. Carpeta, hoja de cálculo con resultados y modelo funcional en JaamSim.

en el modelado, facilidad de uso, rapidez y coste. En esta categoría JaamSim es más que satisfactoria, incluso aventaja a los paquetes comerciales más conocidos en rapidez de ejecución y tamaño de los sistemas que puede manejar, además de, obviamente, en coste. Permite simular múltiples réplicas de diversos escenarios utilizando un número arbitrario de índices en “Multiple Runs”. También tiene la capacidad de modelar subsistemas continuos, útil para simular procesos híbridos como una bodega (proceso continuo hasta llegar al embotellado y empaquetado), aunque no hemos usado esta característica dado que hay otra parte de la asignatura centrada en ella. La facilidad de uso y flexibilidad de modelado son muy destacables, aunque hay margen de mejora, en particular convendrá dotar de capacidades para el modelado jerárquico, necesarias para grandes modelos con reutilización de submodelos (que ahora no puede hacerse en la interfaz gráfica, sí mediante programación), y también mejorar la usabilidad de la edición de expresiones (prevista a lo largo de los próximos meses, aunque en la situación actual se puede trabajar cómodamente con un poco de disciplina, editando fuera de JaamSim las expresiones y cortando-pegando).

- Requisitos informáticos. Son muy moderados, simplemente tener instalado Java. La instalación más conveniente, en cualquier entorno, es directamente descargar y ejecutar un “archivo Java” (.jar). No hemos tenido problemas con Windows (7 a 10) ni Ubuntu, aunque algún estudiante ha detectado fallos en MacOS. Ninguna otra herramienta, y no digamos las de código abierto más académicas, resulta tan fácil de poner en marcha, lo cual es una gran ventaja en general y más en el contexto en que nos movemos, en el que deseamos que los estudiantes trabajen con ella desde el primer día.
- Animación, y gráficos. En esta categoría las capacidades de JaamSim son sobresalientes. La animación, que puede incluir gráficos dinámicos, se puede acelerar con respecto a tiempo real, hacerse todo lo rápida que permita la máquina, u ocultarse para acelerarla aún más. Una característica muy útil, sobre todo en las etapas tempranas de modelado y verificación, es que muchos resultados estadísticos son directamente accesibles “en caliente”, durante la animación, sin tener que esperar a que ésta termine. Además, es muy sencillo incorporar datos y gráficos de interés en la ventana de animación, como se ha ilustrado en el ejemplo.
- Características estadísticas, y salidas. Están disponibles las distribuciones más frecuentes, y bloques estadísticos para facilitar un análisis más que básico de las salidas, que por supuesto se puede/debe completar a partir de datos

exportados, usando otras herramientas específicas. Una característica muy conveniente, para la comparación de alternativas, es la generación de números aleatorios comunes utilizando un único parámetro, “GlobalSubstreamSeed”.

- Soporte y documentación. La documentación (para usuarios y programadores) es suficiente, aunque convendrá incorporar ejemplos de mayor complejidad en algún repositorio bien organizado, como los que nosotros podemos contribuir. El soporte es el típico de una comunidad, a través de un foro, en el que nuestra experiencia durante los últimos meses ha sido extraordinariamente positiva. Seguramente, si la comunidad crece más, habrá una atención menos directa por parte del equipo de desarrollo, pero más rica por parte del resto de usuarios.

Siguiendo las recomendaciones del modelo de calidad para evaluar software educativo libre (Touron *et al.*, 2015), valoraríamos JaamSim positivamente en todos las características que contempla dicho modelo, considerando que conviene seguir mejorando la confiabilidad y comunidad, ambas inter-relacionadas: durante nuestra experiencia como usuarios participando en la comunidad hemos podido detectar algún fallo así como proponer mejoras y nuevas funcionalidades, obteniendo siempre respuesta eficaz y a tiempo.

4 VALORACIÓN DE LA EXPERIENCIA, Y CONCLUSIONES

Consideramos que la experiencia ha cumplido con nuestros objetivos: los estudiantes han podido aprender simulación de eventos discretos trabajando directamente sobre modelos de diversa complejidad, los vistos en clase y otros desarrollados por ellos mismos, con un entorno de simulación fácil de instalar y usar, y a la vez suficientemente potente, sin ningún tipo de limitación. No era nuestro objetivo extraer conclusiones “objetivas”, dado el reducido número de estudiantes en una sola edición del curso. Los resultados de las encuestas de calidad son muy positivos, en línea con los de otras asignaturas o los de anteriores ediciones de ésta, pero tampoco nos parecen significativos, por su carácter genérico y el reducido tamaño de la muestra. Para nuestra valoración u opinión positiva nos basamos en:

- La realimentación informal de los estudiantes, pues por desgracia ha sido imposible conseguir una realimentación más formal, mediante encuestas de satisfacción y valoración del esfuerzo requerido sobre las actividades específicas, que se les pidió que respondieran de forma voluntaria. Aunque en algunos casos

requería algo de trabajo extra, éste era mínimo, así que pensamos que la baja participación es más bien sistémica.

- La observación de su trabajo, cada vez más autónomo e interesado, especialmente desde el momento en que disponían del enunciado de su trabajo. Pronto dejaron de usar los ordenadores del laboratorio en las sesiones prácticas para usar los propios, cosa que también podían hacer en clase, y eso permitió disolver las fronteras entre las clases “de teoría” y “de prácticas”, a menudo incómodas e inconvenientes. Esta observación nos sugiere adelantar el curso que viene la entrega de los enunciados de trabajo, de modo que casi desde el principio puedan y quieran ponerse a trabajar por su cuenta.
- La calidad de los trabajos prácticos realizados, cubriendo en general todas las fases de un proyecto de simulación, desde el planteamiento y definición de alcance y objetivos hasta el análisis estadístico de resultados y planteamiento de recomendaciones, pasando por el desarrollo de modelos y animaciones. Estos son todos los aspectos requeridos en un proyecto de simulación profesional, según (Altiok y Melamed, 2007; Law y Kelton, 2000). Varios grupos obtuvieron la máxima calificación, al haberlos cubierto todos excelentemente, a partir de un enunciado del tipo “blueprint” tomado directamente de los “Arena Contest Problems” de (Kelton *et al.*, 2015). En ediciones anteriores sólo se cubrían parcialmente, y sobre casos más simples y menos variados. Gracias a este tipo de evaluación, exigente e integradora, se ha considerado que esta asignatura contribuye a alcanzar la competencia transversal “Capacidad para combinar los conocimientos generalistas y los especializados de Ingeniería para generar propuestas innovadoras y competitivas en la actividad profesional”, en un proyecto de “Planificación de las competencias transversales en los Grados de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura” realizado este mismo curso.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido del Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza, a través del proyecto PIIDUZ-16-031.

Referencias

- Altiok, T. y Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Academic Press.
- Brown, P., Roedeiger III, H. y McDaniel, M. (2014). *Make It Stick. The Science of Successful Learning*. Harvard University Press.
- Conole, G. (2013). Los MOOCs como tecnologías disruptivas: estrategias para mejorar la experiencia de aprendizaje y la calidad de los MOOCs. *Campus Virtuales. Revista Científica Iberoamericana de Tecnología Educativa*, 2(2), 16-28.
- Dagkakis, G. y Heavey, C. (2016). A review of open source discrete event simulation software for operations research, *Journal of Simulation* (10), 193-206.
- Fritzon, P. (2015). *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach*. Wiley.
- JaamSim Development Team (2017). *JaamSim: Discrete-Event Simulation Software (v.2017-03)*. *JaamSim User Manual (v.2016-21)*. Abierto en línea en <http://jaamsim.com/>
- Kelton, D., Sadowski y R., Zupick, N. (2015). *Simulation with Arena*. McGraw-Hill.
- King, H. y Harrison, H. (2010). Discrete-event simulation in Java: a practitioner's experience, *Proc. Conference on Grand Challenges in Modeling & Simulation*, 436-441.
- King, H. y Harrison, H. (2013). Open-source simulation software: JaamSim, *Proc. 2013 Winter Simulation Conference*, 2163-2171.
- Law, A. y Kelton, D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- Leemis, L. y Park, S. (2006). *Discrete-Event Simulation: A First Course*. Pearson.
- Martín, C., Urquía, A. y Dormido, S. (2005). Modeling of Interactive Virtual Laboratories with Modelica, *Proceedings of the 4th International Modelica Conference*, 159-168.
- Mattsson, S., Elmqvist, H. y Otter, M. (1998). Physical system modeling with Modelica. *Control Engineering Practice* (6), 501-510.
- Teruel, E. (2017). *Simulación de Sistemas Dinámicos*. Abierto en línea, a través de Internet Archive <https://archive.org/details/Teruel2017SimulacionSistemasDinamicos>
- Tiller, M. (2014). *Modelica by example*. Abierto en línea en <http://book.xogeny.com>
- Tourón, M., Plaza, I., Igual, R., Sainz, E. y Arcega, F. (2015). Modelo de calidad para evaluar software educativo libre, *Proc. III Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad*, 585-590.