

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES

Eloy Irigoyen, Mikel Larrea

DISA, EIB, UPV/EHU, Alda. Urquijo, S/N, 48013, Bilbao; {eloy.irigoyen; m.larrea}@ehu.eus

A.Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez, José Manuel Andújar
DIESIA, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819, Huelva;
{antonio.barragan; bohorquez; andujar}@diesia.uhu.es

Resumen

A la hora de estudiar un sistema (sistema industrial, biológico, económico, etc.), llegar a enfocar su análisis desde un punto de vista dinámico puede ser de gran utilidad e interés, en función de los requerimientos que condicionen dicho análisis. Mediante un análisis dinámico se puede conocer qué respuesta tendrá un sistema ante determinados estímulos de entrada, cuál es su comportamiento, si es estable en lazo abierto (local y globalmente), incluso si viene afectado por fenómenos no lineales, como bifurcaciones y ciclos límites, por ejemplo. En ocasiones donde el sistema es desconocido o su dinámica es lo suficientemente compleja como para formalizar su análisis dinámico a través de modelos matemáticos, las herramientas basadas en técnicas de Control Inteligente, como son las Redes Neuronales, cobran vital importancia ya que permiten abordar el problema a través de modelos del sistema. La literatura ha demostrado que los modelos neuronales son aproximadores universales tanto de una función como de su derivada, por lo que en base a datos de entrada/salida permiten modelar sistemas no lineales. Considerando que un modelo neuronal es un modelo matemático formalmente hablando, en base al mismo se pueden estudiar aspectos de la dinámica del sistema modelado real, del mismo modo a como se desarrolla en la teoría de control no lineal. Este trabajo presenta una metodología de estudio de los estados de equilibrio de un sistema no lineal, la linealización exacta de su modelo de estado neuronal y el estudio de la estabilidad local de los equilibrios a partir de dicha linealización. A partir de dicha información, es posible estudiar la estabilidad local de los estados de equilibrio, así como la dinámica del sistema en su entorno y la presencia de oscilaciones, obteniéndose una valiosa información del comportamiento dinámico del sistema.

Palabras clave: Análisis dinámico, estabilidad, estado de equilibrio, linealización, modelado neuronal, sistemas dinámicos, red neuronal MLP.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante el análisis dinámico de un sistema se puede conocer su comportamiento y qué respuesta presentará ante diferentes variaciones en su entrada. El análisis formal de dicho sistema se convierte en tarea inalcanzable si no es posible determinar un modelo matemático, bien por ser un sistema desconocido, o parcialmente desconocido, bien porque su dinámica es lo suficientemente compleja [1]. Al no conocerse dicho modelo matemático se puede proceder generando un modelo en base a datos de entrada-salida, y con dicho modelo, realizar un estudio de la dinámica del sistema original.

Tradicionalmente, los métodos de ingeniería de control utilizados en muchas aplicaciones se han basado en enfoques lineales. Esto es debido a que los problemas han podido ser estudiados y resueltos en un ámbito local. Pero sin embargo, hoy en día muchos de dichos problemas se enfocan desde un punto de vista global, lo que lleva al uso de métodos no lineales.

Una de las razones principales que recomienda la utilización de los modelos no lineales es que los modelos lineales no tienen una dinámica suficientemente rica como para presentar una serie de fenómenos que se dan comúnmente en la vida real [2, 3, 4]. El comportamiento dinámico de los sistemas lineales, sin tener en cuenta su orden, está gobernado fundamentalmente por los autovalores de su matriz de estado. Por el contrario, los sistemas no lineales muestran un comportamiento mucho más rico, pudiendo producirse oscilaciones autoexcitadas, conocidas como ciclos límite, un comportamiento aperiódico y críticamente sensible a las condiciones iniciales [5], el caos [6], así como otros fenómenos dinámicos exclusivos de los sistemas no lineales, como la existencia de múltiples estados de equilibrio y bifurcaciones [7], entre otros.

Para el análisis de un sistema no lineal, su representación mediante un modelo matemático, generalmente mediante un modelo de estado, es el planteamiento inicial idóneo. Esto es posible si se dispone de suficiente conocimiento del sistema como para generar sus ecuaciones de estado, siempre y cuando su dinámica no sea excesivamente com-

pleja. Pero la realidad es que en múltiples ocasiones el sistema objeto de estudio puede ser demasiado complejo, ya sea por su dinámica o por su dimensión, o simplemente porque se desconocen las ecuaciones que gobiernan su funcionamiento. Las técnicas procedentes del área del Control Inteligente pueden ayudar a mejorar estos estudios, como es el caso de la Lógica Difusa [8, 9]. De igual modo, en estas situaciones las redes neuronales (RN) son una poderosa herramienta ya que permite modelar sistemas altamente no lineales a partir de datos de entrada-salida. Esta modelización puede ser cualitativa [10, 11, 12, 4] o estrictamente analítica, aprovechando el hecho de que las RN son aproximadores universales tanto de la función [13, 14, 15] como de su derivada [16, 17]. De este modo, aunque el sistema sea desconocido, es posible obtener un modelo neuronal del mismo. Formalmente hablando, un modelo neuronal es un modelo matemático. Por lo tanto, a partir de este modelo es posible estudiar aspectos de la dinámica del sistema real siempre que su precisión sea suficientemente alta. Esta forma de abordar el problema permite enfrentarse a sistemas no lineales, cuya modelización por técnicas matemáticas tradicionales puede resultar realmente difícil.

A la hora de analizar o diseñar una solución de control, el conocimiento de los estados de equilibrio que posee un sistema, así como la estabilidad de dichos estados, son aspectos que resultan de máximo interés. En el caso en el que el sistema es completamente desconocido, esta información puede ayudar a aclarar el funcionamiento del mismo, así como facilitar el diseño de un control adecuado. Es de destacar que, si bien existen trabajos previos que presentan una novedosa metodología de análisis basada en lógica difusa [9, 8], no se ha encontrado ningún trabajo que lo haga desde el punto de vista de las RN.

Este trabajo presenta una metodología para analizar un sistema no lineal bajo un enfoque generalista, el cual es inicialmente desconocido, a partir de un modelo neuronal. En el apartado 2 se introduce la formulación del problema y se ofrecen las ecuaciones que se utilizarán para la representación del modelo del sistema. En el apartado 3 se presenta la linealización exacta de un modelo neuronal general. A continuación, en el apartado 4 se plantea una propuesta de procedimiento para el análisis dinámico del sistema. Finalmente se aplica dicho procedimiento a dos ejemplos y se presentan las correspondientes conclusiones.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Sea n el orden del sistema y m su número de entradas, un modelo neuronal MLP equivalente de un sistema continuo, que estima tanto sus variables de estado, como salida, puede venir representado por [18, 19, 20, 21]:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+1|\theta) &= g[\varphi(t, \theta), \theta] \\ \hat{y}(t|\theta) &= C(\theta)\hat{x}(t|\theta)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\text{siendo } \varphi(t, \theta) = \begin{bmatrix} \hat{x}(t|\theta) \\ u(t) \end{bmatrix},$$

donde $\varphi(t, \theta)$ es el vector de regresión, $u(t)$ las entradas al sistema y θ el vector de parámetros (ω, W) de la RN, los pesos y bias de sus capas.

De esta forma, la salida de una RN con una capa oculta y funciones de activación sigmoideal, junto a una capa de salida lineal, puede calcularse a través de la expresión siguiente, que representa el modelo neuronal de estado del sistema [20]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \equiv \hat{x}(t+1|\theta) = \\ &= \sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0},\end{aligned}\quad (2)$$

donde $W_{i,j}$ son los pesos y bias de la capa de salida, ω_j son los pesos y bias de la capa oculta, n_h el número de neuronas de la capa oculta, $\varphi_l(t)$ es el vector de entrada a la RN en cada instante t y $n+m$ su dimensión. Considerando $neta$ el resultado de la combinación de entradas y pesos a cada neurona y que F_j es la función de activación de las neuronas de la capa oculta, se tiene:

$$neta = \sum_{l=1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \quad (3)$$

$$F_j(neta) = \frac{e^{neta} - e^{-neta}}{e^{neta} + e^{-neta}}, \quad (4)$$

donde F_j representa la función tangente hiperbólica.

3. LINEALIZACIÓN DE UN MODELO NEURONAL DE ESTADO

La linealización es una de las técnicas más utilizadas en el diseño de sistemas de control no lineales. Aunque es una técnica que no se debe emplear en muchos casos, ya que se desprecian los efectos de las no linealidades de los sistemas controlados, sí

que puede ser válida para controlar sistemas no muy complejos, o cuya dinámica se conozca de forma aproximada en regiones donde su comportamiento se acerque mucho a uno lineal.

Aparte de ser utilizada como método de control, la linealización puede emplearse para obtener información de un sistema no lineal. Se puede considerar que, con algunas salvedades, el comportamiento de un sistema no lineal en torno a un estado de equilibrio es muy similar al del sistema linealizado en torno a dicho estado [22, 7, 23]; por lo tanto, la obtención del sistema lineal equivalente de un modelo neuronal no lineal puede ser una herramienta muy útil para obtener información del sistema original.

Sea el modelo de estado genérico de un sistema no lineal dado por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (5)$$

el desarrollo en serie de Taylor hasta orden 1 de dicho sistema en torno a un punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, determina que este se puede aproximar por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) \approx \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\bar{\mathbf{u}}(t) \quad (6)$$

siendo $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ y $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0$, y donde las matrices del sistema lineal se calculan mediante las expresiones (7), (8) y (9).

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \quad (7)$$

$$\dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_q} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q + \sum_{v=n+1}^{n+m} \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_v} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \left[\left. \frac{\partial}{\partial x_q} \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0} \right) \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q \right] \\ + \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\left. \frac{\partial}{\partial u_v} \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0} \right) \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v \right], \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \left[\left. \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial x_q} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q + \right. \\ \left. + \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\left. \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial u_v} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v \right] \right] \quad (12) \end{aligned}$$

Si el punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ es un estado de equilibrio del sistema, la matriz \mathbf{A}_0 será nula, ya que por definición un estado de equilibrio hace nula la ecuación de estado.

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{ccc} \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_1} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} & \cdots & \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_n} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_1} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} & \cdots & \left. \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_n} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \end{array} \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{array}{ccc} \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_1} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} & \cdots & \left. \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_m} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_1} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} & \cdots & \left. \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_m} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \end{array} \right) \quad (9)$$

Si el sistema (5) se representa mediante un modelo neuronal, su equivalente matemático viene dado por (2). Si se linealiza esta expresión en torno al punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, se puede representar el modelo matemático equivalente de un sistema neuronal linealizado (10), donde \bar{x}_q y \bar{u}_v son las componentes de los vectores $\bar{\mathbf{x}}_0$ y $\bar{\mathbf{u}}_0$, respectivamente, los cuales a su vez componen el conjunto de entradas $(n + m)$ a la RN. Operando con la expresión anterior se obtiene (11), que desarrollando se puede expresar como (12).

A continuación, en base a los desarrollos de Pirabakaran y Becerra [10] y su extensión general a problemas de identificación de Larrea [24], junto a la función de activación $F_j(neta)$ de la RN descrita en la ecuación (4), se resolverán independientemente cada una de las derivadas parciales anteriores. En primer lugar, la primera derivada de (12) queda representada por:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial x_q} = \sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,q} \quad (13)$$

donde o_j es la salida de la neurona j de la capa oculta y q toma valores enteros en el intervalo $[1, n]$.

Para el cálculo de la segunda derivada se procede del mismo modo, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial u_v} = \sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,v} \quad (14)$$

donde v toma valores enteros en el intervalo $[n + 1, n + m]$.

Sustituyendo las expresiones (13) y (14) en (12), el modelo matemático equivalente de un sistema neuronal linealizado en torno a un punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ viene dado por la siguiente expresión:

$$\dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,q} \right] \bar{x}_q + \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,v} \right] \bar{u}_v. \quad (15)$$

4. ESTADOS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD LOCAL

Para el procedimiento de análisis, el primer paso a dar va enfocado en la obtención de un modelo neuronal de estado del sistema a analizar, como el dado por (1), mediante alguna de las muchas técnicas de modelado existentes [20], ya sea en línea [25, 26], o fuera de línea [4, 27]. Seguidamente es importante la localización de los estados de

equilibrio del sistema. La búsqueda de los estados de equilibrio de un sistema de control es uno de los primeros problemas que se deben resolver para proceder con el estudio de su dinámica. Como análisis previo al diseño del sistema de control, la obtención de los estados de equilibrio proporciona una valiosa información sobre el comportamiento de este, especialmente si se trata de un sistema no lineal, ya que estos puntos son candidatos ideales para el estudio de estos sistemas mediante técnicas de linealización. Una vez diseñado el controlador, la obtención de los estados de equilibrio del sistema realimentado puede ser útil para comprobar que el diseño se ha realizado adecuadamente, así como para poder aplicar análisis de estabilidad a dichos estados.

Para el caso de los sistemas neuronales, y dada la inherente capacidad de este tipo de modelos para representar dinámicas no lineales, se hace necesaria la utilización de métodos numéricos capaces de resolver el sistema de ecuaciones no lineales que se plantea:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n_h} W_{1,j} F_j(neta_j) + W_{1,0} &= 0 \\ \sum_{j=1}^{n_h} W_{2,j} F_j(neta_j) + W_{2,0} &= 0 \\ &\vdots \\ \sum_{j=1}^{n_h} W_{n+m,j} F_j(neta_j) + W_{n+m,0} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

En el análisis de los sistemas dinámicos no lineales, el cálculo de los estados de equilibrio del sistema puede convertirse en un problema de envergadura. A diferencia de los sistemas lineales que tienen uno o infinitos estados de equilibrio, un sistema no lineal puede tener uno, ninguno, cualquier número finito o infinitos estados de equilibrio. En este trabajo se propone emplear métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones no lineales dado en (16), concretamente el método de Levenberg-Marquardt [28], extendido en el trabajo de Moré [29]. Este algoritmo requiere de un punto inicial para comenzar la búsqueda. Con objeto de maximizar las posibilidades de encontrar todos los estados de equilibrio existentes, se procede a inicializar el algoritmo mediante un barrido de puntos a lo largo de todo el universo de discurso, tanto de las variables de estado, como de las variables de entrada del sistema. Existen otras alternativas tanto dentro del ámbito de los algoritmos numéricos como en el de los bioinspirados para poder realizar esta búsqueda, pero los autores se han decantado por el algoritmo de Levenberg-Marquardt por ofrecer una rápida convergencia y precisión en los resultados [30, 31]. Este algoritmo inicializado en una malla de puntos es capaz de encontrar los

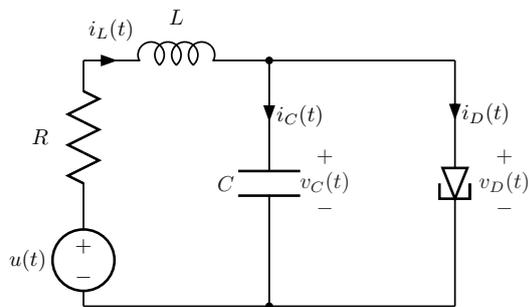


Figura 1: Circuito diodo túnel.

múltiples estados de equilibrio que pueden presentarse en un sistema no lineal con mayor rapidez que los algoritmos genéticos.

El funcionamiento del algoritmo de Levenberg-Marquardt requiere del uso de la matriz Jacobiana del sistema, la cual puede aproximarse o calcularse de forma explícita para mejorar la convergencia. El cálculo de la matriz Jacobiana de un modelo neuronal se ha resuelto de forma general en la sección anterior, por lo que puede incluirse en el algoritmo numérico para mejorar su precisión y velocidad de convergencia.

La misma matriz Jacobiana empleada para la resolución de los estados de equilibrio puede emplearse para linealizar el sistema en cada una de las soluciones obtenidas. De esta forma también es posible estudiar las características de los estados de equilibrio encontrados a partir de los autovalores de la matriz dinámica del sistema linealizado. Este análisis puede ayudar a comprender la dinámica del sistema, su estabilidad local, y a los ojos de un experto, incluso se pueden observar comportamientos más complejos como bifurcaciones o ciclos límite.

5. EJEMPLO

En esta sección se presenta un ejemplo de análisis a partir de su modelo neuronal, para un sistema no lineal que inicialmente se considerará desconocido. El sistema elegido es un caso de estudio ampliamente utilizado en estudios y análisis de sistemas no lineales [9, 8]

Sea el circuito diodo-túnel mostrado en la figura 1, donde $R = 1,5 \text{ k}\Omega$, $C = 2 \text{ pF}$ y $L = 5 \text{ }\mu\text{H}$, $x_1(t) = v_C(t)$, $x_2(t) = i_L(t)$ son las variables de estado del sistema, y $h(v)$ la característica $v_D - i_D$ no lineal del diodo-túnel mostrada en la figura 2 [32].

Suponiendo desconocida la dinámica del sistema, el procedimiento a seguir es obtener un modelo neuronal del sistema a partir de datos de entrada-

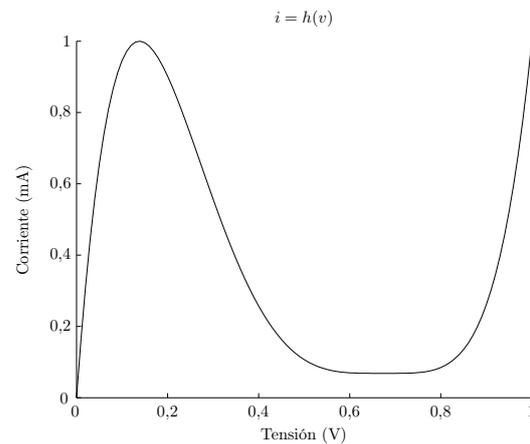


Figura 2: Característica V-I del diodo túnel.

salida, y analizar a continuación dicho modelo con objeto de extraer conclusiones sobre la dinámica del sistema.

Para modelar el sistema se ha empleado un conjunto de 3000 datos distribuidos uniformemente en el universo de discurso $x_1(t) \in [0, 1]$, $x_2(t) \in [0, 2]$ y $u(t) \in [0, 2]$. Realizando el ajuste de los parámetros de la red neuronal MLP, de estructura 3-3-1, mediante un procedimiento de aprendizaje basado en el algoritmo de entrenamiento de segundo orden de Levenberg-Marquardt [28, 33] se han obtenido unos errores cuadráticos medios (MSE) durante la validación con otro conjunto de datos de $0,1147 \text{ V/ns}$ y $3,03 \times 10^{-5} \text{ mA/ns}$, respectivamente.

A continuación se ha empleado el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt [28, 29] para buscar las soluciones al sistema de ecuaciones planteado en (16). Para ello se ha partido de una malla de puntos iniciales cuyos límites coinciden con el universo de discurso de cada una de las variables del sistema, empleando un incremento de 0,05 en todas ellas. En la figura 3 se muestran las soluciones del sistema real junto con las soluciones obtenidas por el algoritmo numérico sobre el modelo neuronal, descartando aquellas que se sitúan fuera del universo de discurso por carecer de validez.

Empleando la linealización exacta desarrollada en este artículo se han obtenido los modelos linealizados en cada uno de los estados de equilibrio mostrados en la figura, y se han caracterizado según su comportamiento (según los tipos de autovalores de la matriz dinámica del sistema linealizado). Como se puede apreciar en la figura, los estados de equilibrios del sistema real han sido hallados con bastante exactitud, incluso su tipo se corresponde con el obtenido a partir del modelo neuronal. Cabe mencionar que el algoritmo numérico ha localizado

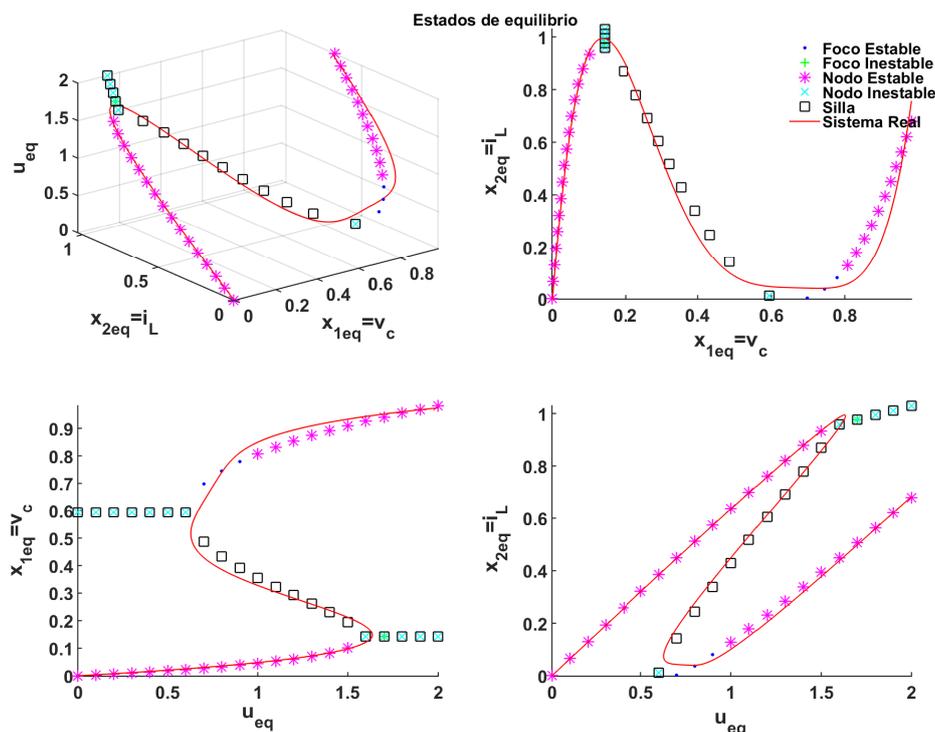


Figura 3: Estados de equilibrio localizados dentro del universo de discurso del modelo neuronal.

una serie de estados de equilibrio en el modelo neuronal que no existen en el sistema real. Este error puede deberse al propio error inherente de modelado o al algoritmo de minimización. Al menos en este caso, estos estados son fácilmente descartables porque, a diferencia del resto, no presentan un tipo de equilibrio coherente entre sí, coincidiendo prácticamente en un mismo punto distintos tipos de estados de equilibrio.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha planteado el análisis dinámico de un sistema desconocido a través de la obtención de un modelo neuronal, basado en una sencilla estructura MLP, a partir de datos de entrada-salida del mismo. Se ha demostrado a través de un ejemplo ampliamente utilizado cómo se puede extraer información muy valiosa únicamente a partir del análisis del modelo neuronal, como la localización de los estados de equilibrio de un sistema y el estudio de su estabilidad local, así como la presencia y estabilidad de oscilaciones en el sistema.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Viceconsejería de Universidades e Investigación, del Departamento de Educación, Política Lingüística y Cultura del Gobierno Vasco, por la ayuda del Programa de Movilidad del Personal Investigador concedida

al Dr.D. Eloy Irigoyen, con número de expediente *MV_2017_1_0032*, la cual ha dado lugar al desarrollo del presente trabajo. También desean agradecer a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación asignada a la Red de Excelencia, con referencia DPI2015-71320-REDT.

Referencias

- [1] S. Chen and S. A. Billings. Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification. *International Journal of Control*, 56(2):319–346, 1992.
- [2] H. J. Marquez. *Nonlinear control systems. Analysis and design*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [3] José Manuel Andújar and José Manuel Bravo. Multivariable fuzzy control applied to the physical-chemical treatment facility of a cellulose factory. *Fuzzy Sets and Systems*, 150(3):475–492, March 2005.
- [4] E. Irigoyen and G. Miñano. A narx neural network model for enhancing cardiovascular rehabilitation therapies. *Neurocomputing*, 109:9 – 15, 2013. New trends on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications.

- [5] H. K. Khalil. *Nonlinear systems*. Prentice-Hall, NJ, 2000.
- [6] Stephen Wiggins. *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*. Texts in Applied Mathematics. Springer, 2nd edition, October 2003.
- [7] S. Sastry. *Nonlinear system: analysis, stability, and control*. Springer, New York, 1999.
- [8] A.J. Barragán, B.M. Al-Hadithi, A. Jiménez, and J.M. Andújar. A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended kalman filter. *Applied Soft Computing*, 18(0):277–289, May 2014.
- [9] A.J. Barragán, B.M. Al-Hadithi, J.M. Andújar, and A. Jiménez. Metodología formal de análisis del comportamiento dinámico de sistemas no lineales mediante lógica borrosa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12(4):434 – 445, 2015.
- [10] K. Pirabakaran and V.M. Becerra. Pid auto-tuning using neural networks and model reference adaptive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1):451 – 456, 2002. 15th IFAC World Congress.
- [11] Nand Kishor, R. P. Saini, and S. P. Singh. Small hydro power plant identification using nnarx structure. *Neural Computing & Applications*, 14(3):212–222, Sep 2005.
- [12] R.K. Al Seyab and Y. Cao. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation. *Journal of Process Control*, 18(6):568 – 581, 2008.
- [13] G. Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2(4):303–314, Dec 1989.
- [14] Kurt Hornik, Maxwell Stinchcombe, and Halbert White. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5):359 – 366, 1989.
- [15] Ken-Ichi Funahashi. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks*, 2(3):183 – 192, 1989.
- [16] Kurt Hornik, Maxwell Stinchcombe, and Halbert White. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 3(5):551 – 560, 1990.
- [17] A. Ronald Gallant and Halbert White. On learning the derivatives of an unknown mapping with multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 5(1):129 – 138, 1992.
- [18] K. S. Narendra and K. Parthasarathy. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1(1):4–27, Mar 1990.
- [19] S. Jagannathan F.L. Lewis and A. Yesildirek. *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*. Taylor & Francis, 1999.
- [20] N.K. Poulsen M. Nørgaard, O. Ravn and L.K. Hansen. *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems: A Practitioner's Handbook*. Springer, 2000.
- [21] S. Jagannathan. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-time Systems*. Francis & Taylor, 2006.
- [22] Henk Nijmeijer and Arjan van der Schaft. *Nonlinear dynamical control systems*. Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [23] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li. *Applied nonlinear control*. Prentice-Hall, NJ, 1991.
- [24] Mikel Larrea. *Estrategia Adaptativa-Predictiva Basada en Redes Neuronales para el Control de Sistemas No Lineales*. phdthesis, (UPV/EHU), December 2014. ISBN-10: 1512179191 ISBN-13: 978-1512179194 Editor: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [25] Qing Song, Yilei Wu, and Yeng Chai Soh. Robust adaptive gradient-descent training algorithm for recurrent neural networks in discrete time domain. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 19(11):1841–1853, Nov. 2008.
- [26] T. Dierks and S. Jagannathan. Output feedback control of a quadrotor uav using neural networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 21(1):50–66, 2010.
- [27] Asier Zubizarreta, Mikel Larrea, Eloy Irigoyen, Itziar Cabanes, and Eva Portillo. Real time direct kinematic problem computation of the 3prs robot using neural networks. *Neurocomputing*, pages–, 2017.
- [28] K. Levenberg. A method for the solution of certain problems in least squares. In *Quart. Appl. Math.*, volume 2, pages 164–168, 1944.

- [29] Jorge J. Moré. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In G.A. Watson, editor, *Numerical Analysis*, pages 105–116. Springer Verlag, Berlin, 1977.
- [30] Zsolt Ugray, Leon Lasdon, John Plummer, Fred Glover, James Kelly, and Rafael Martí. Scatter search and local nlp solvers: A multistart framework for global optimization. *INFORMS Journal on Computing*, 19(3):328–340, 2007.
- [31] Fred Glover. *A template for scatter search and path relinking*, pages 1–51. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [32] Leon O. Chua, Charles A. Desoer, and Ernest S. Kuh. *Linear and nonlinear circuits*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Circuits and systems. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [33] M. T. Hagan and M. B. Menhaj. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6):989–993, Nov 1994.