

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un 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>	

Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte

J.M. Bravo, M.J. Vasallo y E. Cojocarú

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva
email:{caro,manuel.vasallo}@uhu.es

T. Alamo

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
email:talamo@us.es

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de construir un modelo predictor. Dicho modelo debe ser capaz de predecir la salida futura de un sistema dinámico, haciendo uso de información pasada guardada en históricos. Este trabajo se centra en el estudio de modelos predictores que proporcionan una predicción de tipo intervalar. Una predicción intervalar está compuesta por un límite inferior y otro superior. La salida del sistema debe estar comprendida entre ambos límites del intervalo. Dado un conjunto de datos obtenidos del sistema dinámico, la predicción intervalar se calcula utilizando hiperplanos soporte a dichos datos. Cualquier punto dentro del intervalo se puede utilizar como predicción puntual. En concreto, en este trabajo se propone la utilización del punto central entre hiperplanos soporte. La principal bondad del predictor propuesto es su capacidad de proporcionar predicciones donde el tamaño del intervalo y el error de la predicción puntual están balanceados. Un parámetro de diseño incluido en el predictor permite compensar dichos objetivos. Además el trabajo propone una metodología basada en validación cruzada para realizar el ajuste de dicho parámetro. El trabajo incluye un ejemplo con datos reales con el fin de ilustrar el comportamiento del predictor.

Palabras clave: Predicción, error acotado, identificación de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los métodos de predicción se basan en un modelo matemático del sistema. Este modelo se puede obtener aplicando los principios físicos que definen el funcionamiento del sistema. Sin embargo, el modelado de un sistema requiere los conocimientos de un experto y el ajuste de los parámetros que se incluyan en el modelo. Otra opción es aplicar técnicas de identificación de sistemas [13]. Los métodos de identificación de sistemas infieren modelos dinámicos a partir de datos. Uno de los métodos más utilizados es el basado en error de predicción. Dada una familia de mo-

delos parametrizada y un conjunto de datos, estos métodos seleccionan el valor de los parámetros que minimizan cierto criterio, por ejemplo, el error cuadrático de predicción. Una vez identificado el modelo, aplicando nuevas medidas se pueden obtener predicciones del futuro comportamiento del sistema. Nótese que con este esquema de trabajo, una vez seleccionado el modelo de sistema, el conjunto de datos usado para la identificación ya no es necesario para realizar las predicciones.

Una alternativa a lo expuesto en el párrafo anterior son los métodos no paramétricos [9]. Cuando se necesita una predicción, los métodos paramétricos acceden al conjunto histórico de datos del sistema y lo utilizan para construir la predicción requerida. En este contexto se han propuesto predictores basados en los vecinos más cercanos, linealización local o funciones kernel [8].

Los sistemas de control automático utilizan sistemas predictores para optimizar su rendimiento. Ejemplos en este sentido los podemos encontrar en los sistemas de control predictivo [5] y en los sistemas de detección y diagnosis de fallos [11]. Una extensión interesante de los sistemas de predicción son los predictores intervalares. Dichos predictores proporcionan una predicción intervalar basada en una cota inferior y otra superior. La predicción intervalar acota externamente el futuro comportamiento del predictor teniendo en cuenta perturbaciones, ruido o dinámicas no modeladas. Además, un punto del intervalo se puede utilizar como predicción puntual. Los predictores intervalares son componentes importantes de sistemas de control robusto [3] o sistemas de detección de fallos en presencia de incertidumbres [10, 6].

Una forma de obtener predictores intervalares es utilizar métodos de identificación de sistemas basados en error acotado [14]. En este caso se considera que la salida del sistema está contaminada por un ruido desconocido pero acotado. Teniendo en cuenta una familia paramétrica de modelos, un conjunto de medidas y la acotación del ruido, estos métodos obtienen el conjunto de parámetros que es consistente con las medidas, la familia de modelos y el error acotado. Para acotar dicho conjunto de parámetros se han utilizado diferen-

tes figuras geométricas. Elipsoides, paralelotos y zonotos son las más conocidas [7, 16, 1]. Los métodos de acotación también se pueden formular desde el punto de vista no paramétrico. En [15] se asume que el modelo pertenece a un conjunto de funciones con constante de Lipschitz acotada. En [4] se propone una familia de predictores intervalares que utiliza datos almacenados y norma-1 para acotar la predicción.

En este trabajo se propone un predictor intervalar basado en el concepto de hiperplano soporte. Dado un conjunto de datos, el predictor calcula planos soporte superior e inferior a dicho conjunto y los utiliza para proporcionar la predicción intervalar. Dichos planos se obtienen resolviendo un problema de optimización con restricciones convexo. El predictor incluye un parámetro que permite balancear su rendimiento. En un límite del valor del parámetro, el método proporciona la predicción intervalar de menor anchura proporcionada por los hiperplanos soporte. En el límite opuesto, el predictor minimiza los errores cuadráticos de la predicción puntual. Valores intermedios generan predicciones compensadas entre dichos extremos. En el artículo se propone una metodología basada en validación cruzada para estimar el valor adecuado de dicho parámetro.

El método propuesto presenta una serie de ventajas respecto a otros métodos conocidos para obtener predictores intervalares. A diferencia de los métodos basados en error acotado, no es necesario conocer a priori una cota del error en las medidas. Tampoco es necesario asumir como conocida la distribución estadística del error asociado a las medidas, información sí necesaria para obtener intervalos de confianza en el contexto estocástico. Finalmente, el método propuesto está relacionado con la regresión cuantil [12]. En regresión basada en cuantiles, se resuelve un problema de optimización que pondera la penalización de errores de signo positivo o negativo. La principal ventaja del método propuesto respecto a la regresión cuantil, es la posibilidad antes comentada de poder balancear el rendimiento de la predicción puntual y la intervalar.

En la Sección 2 se formular el problema. El predictor propuesto se presenta en la Sección 3. Algunas consideraciones prácticas se pueden consultar en la Sección 4. La Sección 5 muestra un ejemplo que ilustra el método propuesto. Finalmente algunas conclusiones y trabajo futuro se pueden ver en las Secciones 6 y 7.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese un sistema dinámico en tiempo discreto. En el instante de tiempo k , $y_k \in \mathbb{R}$ denota una salida medida del sistema y $x_k \in X \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$, siendo X un conjunto compacto, un vector de medidas del sistema. Este vector puede incluir, por ejemplo, medidas pasadas de entradas y salidas del sistema. La formulación matemática que relaciona y_k y x_k es desconocida. Dado el vector x_k , el problema planteado en este trabajo es obtener un intervalo $IP_{\mathcal{D}}(x_k) = [\underline{y}_k, \bar{y}_k]$ tal que $\underline{y}_k \leq y_k \leq \bar{y}_k$.

El predictor intervalar propuesto se basa en tomar un conjunto \mathcal{D} de datos de entrada y salida del sistema e identificar un modelo de predicción. La Hipótesis 1 establece la necesidad de disponer de dicho conjunto.

Hipótesis 1 *Se dispone de un conjunto $\mathcal{D} = \{(x_i, y_i), \text{ con } i = 1, \dots, N\}$ de medidas del sistema obtenido con un nivel de excitación adecuado.*

La futura capacidad de predicción del modelo está relacionada con la similitud del comportamiento futuro y pasado del sistema al que se aplica. Todo sistema de inferencia se basa en ese principio. Por ejemplo, si estamos en el contexto estocástico, se asume que las propiedades de dos muestras aleatorias de una misma variable deben ser muy similares. En el presente trabajo, la Hipótesis 2 concreta el concepto de similitud que se asume a la hora de aplicar el predictor intervalar propuesto.

Hipótesis 2 *Sean \mathcal{D}_A y \mathcal{D}_B dos conjuntos de datos de entrada-salida obtenidas del sistema a partir de una excitación adecuada. La envolvente convexa del conjunto \mathcal{D}_A tiende a ser la misma que la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D}_B cuando el número de muestras crece.*

3. PREDICTOR PROPUESTO

Tal y como se comentó en la Introducción, el predictor intervalar se basa en el concepto de hiperplano soporte [2].

Definición 1 (Hiperplano soporte) *Dado un conjunto \mathcal{C} y un punto $z_o \in \text{bd}\mathcal{C}$ en la frontera de \mathcal{C} . Si $\beta \neq 0$ satisface $\beta^T z \leq \beta^T z_o$ para todo $z \in \mathcal{C}$, entonces el hiperplano $\{z : \beta^T z = \beta^T z_o\}$ es un hiperplano soporte a \mathcal{C} en el punto z_o .*

Existen muchas formas de obtener un hiperplano soporte a un conjunto dado. En la siguiente definición se establece un tipo de hiperplano que tal y como se muestra en la Propiedad 1 es soporte al

conjunto \mathcal{D} . Este hiperplano soporte es una de las ideas en las que se apoya el predictor intervalar desarrollado.

Definición 2 Dado el conjunto \mathcal{D} se define el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ como

$$\mathcal{H}_{\mathcal{D}} = \{[x^T \ y]^T : [x^T \ 1]\theta^* - y = 0\}$$

donde θ^* se obtiene resolviendo el problema de optimización

$$\begin{aligned} \min_{\theta} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\theta)^2 \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\theta \leq y_i \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

Propiedad 1 Una propiedad interesante del hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ es que es un hiperplano soporte a \mathcal{D} .

Prueba. Para realizar la demostración hay que probar que el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ incluye al menos uno de los puntos del conjunto \mathcal{D} y que el resto de puntos están en uno de los semiespacios creados por el hiperplano. Se procede a la demostración por reducción al absurdo. Supongamos que θ^* cumple las restricciones del problema y no contiene a ningún punto. Esto es equivalente a decir que las restricciones del problema de optimización se cumplen de forma estricta: $[x_i^T \ 1]\theta^* < y_i, i = 1, \dots, N$. Esto se puede expresar diciendo que $[x_i^T \ 1]\theta^* = y_i - \epsilon_i$, donde $\epsilon_i > 0, i = 1, \dots, N$. Entonces, tomando $s = \arg \min_{i=1, \dots, N} \epsilon_i$, se puede definir

$$\hat{\theta} = \theta^* + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \epsilon_s.$$

Por definición:

$$\begin{aligned} [x_i^T \ 1]\hat{\theta} &= [x_i^T \ 1]\theta^* + \epsilon_s \\ &= y_i - \epsilon_i + \epsilon_s \leq y_i - \epsilon_i + \epsilon_i = y_i. \end{aligned}$$

De lo anterior se deduce que $\hat{\theta}$ es una solución factible al problema. Por otro lado, nótese que

$$\begin{aligned} (y_i - [x_i^T \ 1]\hat{\theta})^2 &= (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^* - \epsilon_s)^2 \\ &= (\epsilon_i - \epsilon_s)^2 \\ &< \epsilon_i^2 \\ &= (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^*)^2. \end{aligned}$$

Finalmente sumando la anterior desigualdad desde $i = 1$ hasta $i = N$ obtenemos que:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\hat{\theta})^2 < \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^*)^2.$$

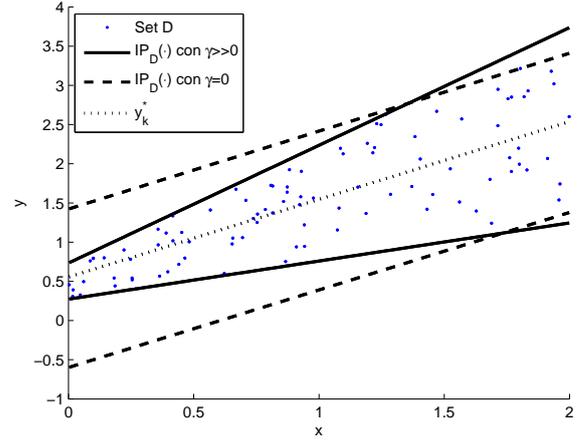


Figura 1: Ejemplo de aplicación de $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$.

Pero esto contradice la optimalidad de θ^* . Se ha demostrado pues que

$$[x_i^T \ 1]^T \theta^* \leq y_i, i = 1, \dots, N.$$

donde la desigualdad se hace igualdad al menos en un índice s . Es decir, existe s tal que $[x_s^T \ 1]\theta^* = y_s$. Si restamos esta igualdad a las desigualdades anteriores obtenemos

$$[(x_i - x_s)^T \ 0]^T \theta^* \leq y_i - y_s, i = 1, \dots, N.$$

Denotando ξ^* a las primeras n componentes de θ^* se obtiene

$$(x_i - x_s)^T \xi^* \leq y_i - y_s, i = 1, \dots, N.$$

Finalmente hacemos

$$\beta = \begin{bmatrix} \xi^* \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Con esta definición

$$[x_i^T \ y_i]\beta \leq [x_s^T \ y_s]\beta, \quad i = 1, \dots, N.$$

■

Observación 1 Por definición se tiene que $[x_i^T \ 1]\theta^* \leq y_i$ para $i = 1, \dots, N$. Por tanto, el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ acota inferiormente a la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D} en la componente y . Además, por la Propiedad 1, esta cota es ajustada pues existe un índice s tal que $[x_s^T \ 1]\theta^* = y_s$.

El problema de optimización (2) se puede modificar para obtener un hiperplano que acote superiormente el conjunto \mathcal{D} en la componente y . Bastaría con cambiar el sentido de las desigualdades,

esto es, $[x_i^T \ 1]\theta \geq y_i$ con $i = 1, \dots, N$. Esta idea nos permite proponer un predictor intervalar para la salida del sistema. El predictor obtiene sendos hiperplanos que acotan superiormente e inferiormente la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D} en la componente y .

Definición 3 Dado un vector x_k se define el predictor intervalar $IP_{\mathcal{D}}(x_k) = [\underline{y}_k, \bar{y}_k]$ donde

$$\underline{y}_k = [x_i^T \ 1]\underline{\theta}^* - \underline{\alpha}^*$$

$$\bar{y}_k = [x_i^T \ 1]\bar{\theta}^* + \bar{\alpha}^*$$

y siendo $\underline{\theta}^*, \bar{\theta}^*, \underline{\alpha}^*$ y $\bar{\alpha}^*$ las soluciones óptimas de los problemas de optimización

$$\begin{aligned} \min_{\underline{\theta}, \underline{\alpha}} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\underline{\theta})^2 + \gamma \underline{\alpha} \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\underline{\theta} \leq y_i + \underline{\alpha} \quad i = 1, \dots, N \\ & \underline{\alpha} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \min_{\bar{\theta}, \bar{\alpha}} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\bar{\theta})^2 + \gamma \bar{\alpha} \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\bar{\theta} \geq y_i - \bar{\alpha} \quad i = 1, \dots, N \\ & \bar{\alpha} \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

donde $\gamma > 0$ es un parámetro de diseño. Así mismo se propone como predicción puntual

$$y_k^* = \frac{1}{2} [x_k^T \ 1] (\bar{\theta}^* + \underline{\theta}^*).$$

En la figura 1 se muestra un ejemplo numérico del predictor propuesto. El conjunto de puntos representa el conjunto \mathcal{D} . Las acotaciones intervalares obtenidas para $\gamma = 0$ y $\gamma \gg 0$ se muestra con líneas discontinuas y continuas respectivamente. La línea central punteada es la predicción puntual obtenida con $\gamma = 0$.

Observación 2 Nótese que las variables $\bar{\alpha}, \underline{\alpha}$ son redundantes en (2) y (3), ya que aplicando las igualdades $\bar{\alpha} = \max_{i=1, \dots, N} \{0, y_i - r_i^T \bar{\theta}\}$ y $\underline{\alpha} = \max_{i=1, \dots, N} \{0, r_i^T \underline{\theta} - y_i\}$ es posible reformular los problemas de optimización (2) y (3) como problemas de optimización convexos pero sin restricciones. En este caso, es sencillo ver que cuando $\gamma = 0$, los problemas de optimización (2) y (3) son equivalentes a un solo problema de optimización lineal cuadrático sin restricciones. Por otro lado, las formulaciones (2) y (3) son muy cercanas a la formulación estándar de los problemas de optimización QPs, lo que facilita su implementación en un computador.

El predictor propuesto tiene un conjunto de características que se comentan a continuación. Lo primero que hay que destacar es que se puede considerar que la Definición 3 proporciona una familia de predictores intervalares parametrizada en γ . Si $\gamma = 0$ entonces $\underline{\theta}^* = \bar{\theta}^* = \theta^{LS}$ donde $\theta^{LS} = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T Y$ con $\Omega = [r_1 \ r_i \ \dots \ r_N]^T$, $r_i = [x_i \ 1]$, $i = 1, \dots, N$ y $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]$. De lo anterior se deduce que cuando $\gamma = 0$, la predicción puntual y_k^* es óptima desde el punto de vista del error cuadrático de predicción, de hecho, es la predicción obtenida mediante mínimos cuadrados. Así mismo, teniendo en cuenta que $\underline{\alpha}^* = \max_{i=1, \dots, N} \{0, r_i^T \theta^{LS} - y_i\}$ y $\bar{\alpha}^* = \max_{i=1, \dots, N} \{0, y_i - r_i^T \theta^{LS}\}$, se tiene que $\bar{y}_k - \underline{y}_k \geq \underline{\alpha}^* + \bar{\alpha}^*$. Esta propiedad es importante porque se garantiza que para todo $x_k \in X$ siempre existe un valor de $\gamma \geq 0$ tal que $\underline{y}_k \leq y_k^* \leq \bar{y}_k$, asegurándose de esta forma la consistencia de los límites en la predicción.

Por otro lado, cuando $\gamma \rightarrow \infty$ se tiene que $\underline{\alpha}^*, \bar{\alpha}^* \rightarrow 0$. La consecuencia es que los problemas de optimización (2) y (3) pertenecen a la clase presentada en la Definición 2. Por tanto, las soluciones óptimas $\underline{\theta}^*$ y $\bar{\theta}^*$ proporcionan sendos hiperplanos soporte que acotan externa y ajustadamente el conjunto \mathcal{D} . En este caso la predicción intervalar tiende a ser más ajustada que cuando $\gamma \rightarrow 0$, pero se pierde la optimalidad de la predicción puntual.

Como resumen de lo expuesto anteriormente, el predictor intervalar propuesto incluye un parámetro γ a definir por el usuario que permite balancear el tamaño del intervalo obtenido y el error de la predicción puntual. En la siguiente sección se proporciona un método empírico que permite ajustar dicho parámetro a partir del conjunto de datos \mathcal{D} .

4. Consideraciones Prácticas

El predictor intervalar propuesto $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$ asume el contenido de la Hipótesis 2. Sin embargo, al igual que en cualquier sistema de inferencia, la comprobación de las hipótesis de trabajo no es sencilla. Sin embargo, hay otra forma de proceder. Dado un conjunto de datos, lo que sí se puede comprobar es si dichos datos son compatibles con las hipótesis asumidas. En este artículo se propone un esquema de trabajo basado en validación cruzada que permite rechazar la validez de lo asumido. El esquema de chequeo se basa en la \mathcal{D}^μ -consistencia del parámetro de diseño γ . Básicamente la idea es, fijado un valor de γ , comprobar qué número de salidas y_i del conjunto de datos \mathcal{D} se predicen de forma correcta, esto es $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$, utilizando el predictor propuesto y el conjunto de puntos $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$. Nótese que la pareja (x_i, y_i)

se ha eliminado del conjunto \mathcal{D} para realizar la validación cruzada. La Definición 4 formaliza esta idea.

Definición 4 Dado el predictor intervalar $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$ y un valor $\mu \in [0, 1]$, el parámetro γ es \mathcal{D}^μ -consistente si

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}_{\{IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)\}}(y_i) \geq \mu$$

donde

$$\mathbb{I}_{\{A\}}(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } y \in A \\ 0 & \text{si } y \notin A \end{cases}$$

es la función indicador y $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$.

La comprobación de la \mathcal{D}^μ -consistencia de cierto valor del parámetro γ se puede realizar mediante el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: \mathcal{D}^μ -consistencia(\mathcal{D}, γ, μ)

```

cont = 0;
for i = 1:N
    Obtener  $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$ 
    if  $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$ 
        cont = cont+1
    endif
endfor
if  $\frac{cont}{N} \geq \mu$ 
    return true
else
    return false
endif

```

End

Nótese que un valor γ que sea \mathcal{D}^1 -consistente implica que para todas las medidas y_i del conjunto \mathcal{D} se cumple que $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$. Sin embargo, exigir $\mu = 1$ puede ser demasiado estricto para ciertos problemas, provocando una degradación de los resultados. Por ejemplo, puede haber dinámicas puntuales no recogidas por el modelo, o bien, los datos pueden tener valores extraños, outliers, que invaliden las predicciones intervalares. Este problema u otros similares se pueden atenuar permitiendo valores de μ menores a 1.

Por último, el usuario debe seleccionar un valor concreto de γ . Una leve ampliación del Algoritmo 1 nos puede permitir realizar dicha elección. Fijado un valor μ , se puede tomar como γ el valor \mathcal{D}^μ -consistente que proporcione el mejor rendimiento en algún sentido. Por ejemplo se puede tomar el valor de γ que sea \mathcal{D}^μ -consistente y minimice el tamaño medio de la anchura de la predicción intervalar. En este artículo se propone la utilización de un valor de γ que balancee el tamaño del intervalo y el error de la predicción puntual. En la siguiente sección se presenta un ejemplo de dicha elección.

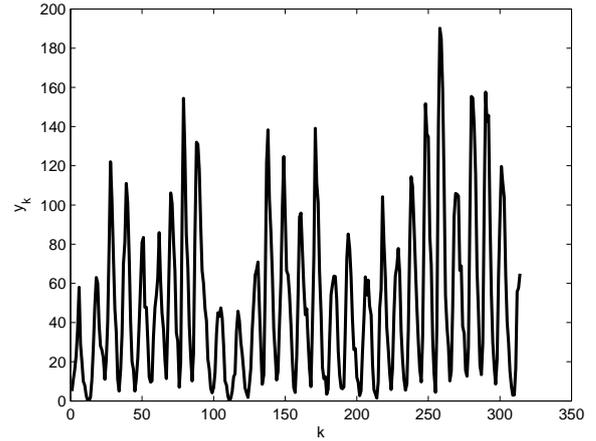


Figura 2: Serie Temporal Sunspot Numbers.

5. Ejemplo

Para ilustrar el nuevo predictor intervalar se ha considerado el problema de predecir una serie temporal denominada Sunspot Numbers (ver Figura 2). Esta serie temporal es interesante ya que es un ejemplo del mundo real, los datos son públicos y su predicción es relevante en muchos campos de aplicación. La serie está compuesta por 314 datos, desde el año 1700 hasta 2013 y reflejan el número de manchas solares presentes. Los primeros 219 datos se han utilizado para construir el conjunto \mathcal{D} . Los restantes 70 datos se han incluido en un conjunto de test. Se ha considerado un predictor a un paso donde $x_k = [y_{k-1} \ y_{k-2} \ \dots \ y_{k-9}]^T$.

En la Sección 4 se ha propuesto un método para estimar el valor del parámetro γ a utilizar. Con el fin de comprobar la efectividad del método se utilizará el conjunto \mathcal{D} y el método basado en validación cruzada presentado en la Sección 4 para estimar el parámetro γ . Finalmente se probará el rendimiento de diferentes valores de γ en el conjunto de test y se comprobará que el mejor valor de γ es muy cercano al estimado mediante validación cruzada y \mathcal{D} .

Se propone una primera métrica que mide el error cometido por la predicción puntual al predecir la serie real, se utiliza la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*).

$$RMSE_\gamma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2}. \quad (4)$$

Por otro lado se considera una segunda métrica que mide la anchura de los intervalos de predicción

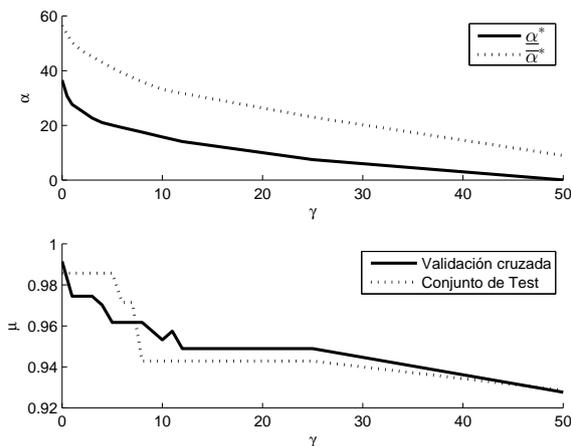


Figura 3: Coeficiente α^* y parámetro μ .

obtenidos. El índice INT se define mediante

$$INT_\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \underline{y}_i).$$

Se propone una métrica BM_γ que mide el rendimiento balanceado de las dos métricas INT_γ y $RMSE_\gamma$. Esta métrica viene definida por la expresión :

$$BM_\gamma = \left(\frac{INT_\gamma - \underline{INT}}{\overline{INT} - \underline{INT}} + \frac{RMSE_\gamma - \underline{RMSE}}{\overline{RMSE} - \underline{RMSE}} \right)$$

donde \overline{INT} , \underline{INT} , \overline{RMSE} y \underline{RMSE} son los valores máximo y mínimo alcanzado por las métricas INT_γ y $RMSE_\gamma$.

En la Figura 3 superior se puede ver las evoluciones de los coeficientes óptimos $\underline{\alpha}^*$ y $\overline{\alpha}^*$ respecto los posibles valores de γ . Cuando $\gamma = 0$, $\underline{\alpha}^*$ y $\overline{\alpha}^*$ tienen su valor máximo pues en ese caso la predicción puntual viene dada por $\underline{\theta}^* = \overline{\theta}^* = \theta^{LS}$ y son $\underline{\alpha}^*$ y $\overline{\alpha}^*$ quienes definen la anchura del intervalo. En el otro extremo $\underline{\alpha}^*$ y $\overline{\alpha}^*$ tienden a cero y son los vectores óptimos $\underline{\theta}^*$ y $\overline{\theta}^*$ quienes definen el intervalo de predicción. En la Figura inferior se representa el valor μ máximo alcanzado para cada valor de γ . Se puede observar que el perfil obtenido por validación cruzada en \mathcal{D} y el obtenido en el conjunto de test es muy parecido. Por otro lado, al incrementarse γ , la predicción intervalar se ajusta más por lo que normalmente se decremanta la \mathcal{D}^μ -consistencia obtenida.

En la Figura 4 se comparan las métricas INT_γ y $RMSE_\gamma$ obtenidas por validación cruzada en \mathcal{D} y las obtenidas en el conjunto de test. Como se puede apreciar los perfiles son muy parecidos. Por otro lado es normal que los valores obtenidos en el conjunto de entrenamiento \mathcal{D} sean mejores que los obtenidos en el conjunto de test, a pesar de usar

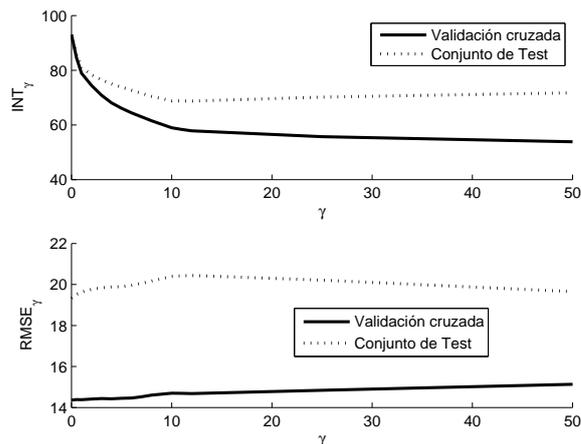


Figura 4: Métricas INT_γ y $RMSE_\gamma$.

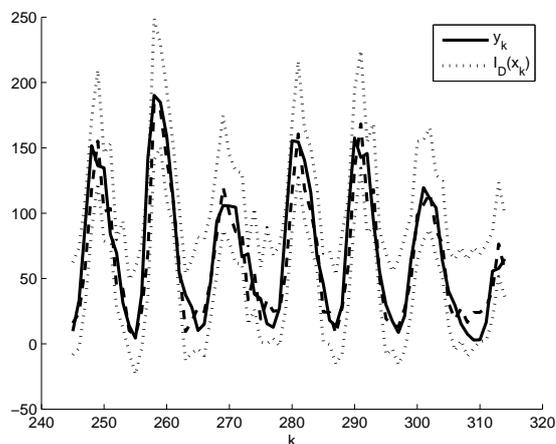


Figura 5: Predicción intervalar con $\gamma = 4$.

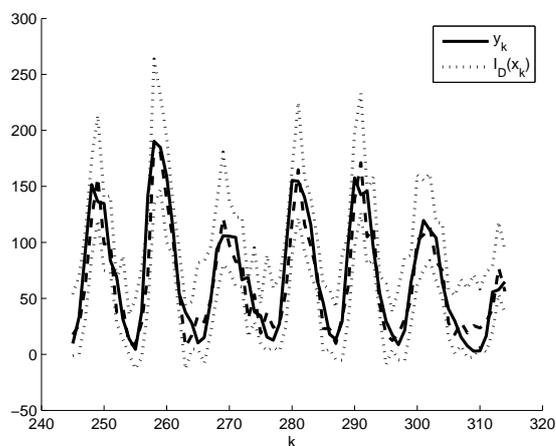
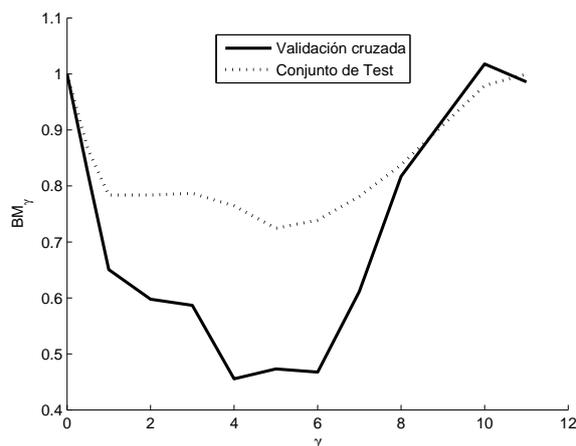


Figura 6: Predicción intervalar con $\gamma = 11$.

Figura 7: Métrica BM_γ .

validación cruzada en entrenamiento. También parece razonable que cuando el parámetro de diseño γ crece, la métrica INT_γ mejora y por otro lado $RMSE_\gamma$ empeora. Con el fin de balancear el comportamiento de ambas métricas, se propone BM_γ . Nótese que la métrica $RMSE_0$ sería la obtenida por un modelo autoregresivo AR(9) ajustado mediante mínimos cuadrados.

Fijado $\mu = 0,95$, en la figura 7 se compara la métrica BM_γ obtenida por validación cruzada en \mathcal{D} y las obtenidas en el conjunto de test para los valores $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistentes de γ . Como se puede observar el mínimo se obtiene para $\gamma = 4$ en validación cruzada, siendo ese valor también muy cercano al mínimo en el conjunto de test. Por tanto se pueden extraer dos conclusiones. El mejor valor de γ para obtener un balanceo óptimo es un valor intermedio (en este caso γ en torno a 4) y por tanto queda justificado el predictor propuesto. Y la segunda conclusión es que el esquema de validación cruzada propuesto en este artículo, se puede utilizar en este ejemplo para inferir un buen valor de γ .

En la Tabla 1 se muestran los valores extremos de INT_γ y $RMSE_\gamma$ en validación cruzada y test para los valores $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistentes de γ .

Cuadro 1: Valores extremos

	\overline{INT}	\underline{INT}	\overline{RMSE}	\underline{RMSE}
V.C.	92.8	58.35	14.69	14.36
Test	93.0	68.7	20.42	19.33

Finalmente, en las figuras 5 y 6 se pueden observar las predicciones intervalares (líneas punteadas) obtenidas en el conjunto de test para el valor óptimo $\gamma = 4$ asociado a BM_γ y el valor $\gamma = 11$ que está cerca del límite de la $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistencia. Co-

mo se puede observar la predicción intervalar para $\gamma = 11$ tiene menor anchura a costa de incluir cierto desvío en la predicción puntual (líneas discontinuas). Los valores reales se muestran en líneas continuas.

6. Conclusiones

Este trabajo ha presentado una nueva metodología para diseñar predictores intervalares que permitan acotar externamente la salida futura de un sistema dinámico. El método está basado en el concepto de hiperplano soporte. La predicción intervalar se obtiene aplicando un modelo de predicción que se ha identificado resolviendo un problema de optimización convexo. El método incluye un parámetro que permite balancear el tamaño de la predicción intervalar y el error de la predicción puntual. El valor de dicho parámetro se puede estimar utilizando validación cruzada en un conjunto de datos obtenidos del sistema. Como ventajas objetivas del método presentado frente a otras metodologías, se tiene que no es necesario conocer a priori una cota máxima del ruido asociado a una medida, ni tampoco asumir ciertas funciones de distribución aleatorias en dicho ruido. Es importante indicar que ese conocimiento a priori condiciona claramente los resultados obtenidos en esas metodologías alternativas. Finalmente indicar que el método incluye la identificación de modelos lineales mediante mínimos cuadrados como caso particular.

7. Trabajo futuro

En esta sección se establecen algunas líneas de trabajo futuras para mejorar el funcionamiento del predictor. Una primera línea sería incluir pesos en la función de coste de los problemas de optimización (2) y (3). El objetivo de los pesos es obtener planos soporte ajustados en un entorno al vector de interés x_k . La ventaja de esa ampliación sería un mejor ajuste de la predicción intervalar, siendo la principal desventaja el tener que resolver los problemas de optimización (2) y (3) cada vez que se realiza una predicción. Este esquema de trabajo no captura comportamientos locales cuando el conjunto de puntos no es convexo. En ese caso se puede añadir a las variables $\underline{\alpha}$ y $\overline{\alpha}$ un componente local del tipo $\|x_i - x_k\|$ que permite ajustar los planos soporte localmente a zonas de interés. Por otro lado, si se conoce una cota superior del posible ruido presente en las medidas y_i , se puede añadir dicha cota al predictor intervalar para obtener planos soporte más robustos y por tanto ampliar las predicciones intervalares. Estas ampliaciones y otras serán abordadas en próximos

trabajos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por DPI2013-48243-C2-2-R, DPI2016-76493-C3-1-R y DPI2016-76493-C3-2-R del MEC de España.

Referencias

- [1] T. Alamo, J. M. Bravo, and E. F. Camacho. Guaranteed state estimation by zonotopes. *Automatica*, 41(6):1035–1043, 2005.
- [2] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] J. M. Bravo, T. Alamo, and E. F. Camacho. Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on approximated reachable sets. *Automatica*, 42(10):1745–175, 2006.
- [4] J. M. Bravo, T. Alamo, M. Vasallo, and M. E. Gegundez. A general framework for predictors based on bounding techniques and local approximation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, In press, 2017.
- [5] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer Verlag, 2 edition, 1999.
- [6] Christophe Combastel. An extended zonotopic and gaussian kalman filter (ezgkf) merging set-membership and stochastic paradigms: Toward non-linear filtering and fault detection. *Annual Reviews in Control*, 42:232–243, 2016.
- [7] E. Fogel and Y. F. Huang. On the value of information in system identification - bounded noise case. *Automatica*, 18(2):229–238, 1982.
- [8] L. Györfi, M. Kohler, A. Krzyzak, and H. Walk. *A Distribution-Free Theory of Nonparametric Regression*. Springer, 2002.
- [9] W. Härdle. *Applied Nonparametric Regression*. Cambridge University Press, 1992.
- [10] A. Ingimundarson, J.M. Bravo, V. Puig, T. Alamo, and P. Guerra. Robust fault detection using zonotope-based set-membership consistency test. *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, 23:311–330, 2009.
- [11] Rolf Isermann. *Fault-Diagnosis systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer, 2006.
- [12] Roger Koenker and Jr. Gilbert Bassett. Regression quantiles. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, pages 33–50, 1978.
- [13] L. Ljung. *System Identification*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [14] M. Milanese, J. Norton, H. Piet-Lahanier, and E. Walter. *Bounding Approaches to System Identification*. Plenum Press, New York, 1996.
- [15] M. Milanese and C. Novara. Set membership prediction of nonlinear time series. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11):1655–1669, 2005.
- [16] A. Vicino and G. Zappa. Sequential approximation of feasible parameter sets for identification with set membership uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(6):774–785, 1996.