

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 FOTOBIOREACTORES 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	
<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 Ruiz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.....	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3

Pablo Krupa, Daniel Limón, Teodoro Álamo

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla. España
E-mails: pabkrugar@alum.us.es, dlm@us.es, talamo@us.es

Resumen

En este trabajo se describe la implementación de un Controlador Predictivo (MPC) en un Autómata Programable (PLC) a través de una librería en MATLAB. La librería toma los datos del sistema y los parámetros del MPC y genera con ello el código del controlador de forma que se minimice el uso de memoria del PLC. El código generado se empaqueta en un archivo que puede ser directamente importado al software de control del PLC. El lenguaje de programación de dicho código sigue la normativa IEC 61131-3. En concreto, el controlador está programado con el lenguaje ST.

El controlador incluye un observador de estado y un estimador de perturbaciones, un Steady State Target Optimicer (SSTO), un predictor en bucle abierto y posibilidad de trabajar en modo manual.

Este trabajo proporciona una metodología, basada en el algoritmo FISTA, para resolver el problema de optimización requerido para la implementación del controlador MPC.

En este trabajo también se muestran los resultados de pruebas realizadas sobre el uso de memoria del PLC para sistemas de distintos tamaños, así como un ejemplo de uso del controlador aplicado en el PLC Modicon m340, de la empresa Schneider Electric. El software de control del PLC que ha sido usado, y para el que está programada la librería de MATLAB, es Unity Pro XL.

Palabras clave: Control Predictivo, Autómata Programable, FISTA, IEC 61131-3, Generación de código.

1. Introducción

El Control Predictivo (MPC) es una estrategia de control basada en optimización, que resulta de gran utilidad para el control de sistemas multivariables con restricciones [3]. Esta estrategia de control es usada en numerosos sectores industriales, tales como refinerías de petróleo, plantas eléctricas o la industria química. Sin embargo, su implementación ha estado enfocada a sistemas con muchos recursos, tales como un PC, dada su complejidad

y gran demanda computacional.

En los últimos años la comunidad científica ha hecho avances en la programación de Controladores Predictivos en equipos con menos recursos que un PC, tales como Arduino, FPGA o PLC. Los Autómatas Programables (PLC) son los equipos más extendidos en la industria para la implementación de lazos de control. Se caracterizan por su robustez, fiabilidad, sistema de comunicación integrado y facilidad de programación. Sin embargo, son equipos con limitaciones en cuanto a capacidad computacional o de memoria en comparación con los de un PC. La estrategia de control PID es la que se suele implementar en estos equipos. En [7] y [2] se muestran casos de estudio realistas en los que se implementa un MPC en un PLC, y en [6] se muestran consideraciones prácticas sobre la implementación de un MPC en un PLC.

En [10] se muestra la implementación de un MPC en un PLC haciendo uso de la normativa IEC 61131-3, al igual que en este trabajo. Esta implementación hace uso de funciones que resuelven el problema de optimización del MPC en función de las matrices resultantes del mismo. Este enfoque, a pesar de estar orientado a implementación en un PLC, no aprovecha la estructura del problema para reducir la memoria necesaria, lo cual es de especial importancia en los PLC dadas sus limitaciones de memoria. Para ilustrar esto, mencionar que el tamaño de la memoria dedicada a datos del PLC usado en este trabajo tiene un tamaño de 4Mb.

Uno de los principales avances en la implementación del MPC en sistemas con pocos recursos son los avances en algoritmos que resuelvan de forma rápida y eficiente problemas de programación cuadrática (QP), dado que el problema de optimización del MPC, cuya resolución proporciona la acción de control, es un problema de este tipo. Estos avances han dado lugar a la creación de diversas librerías de generación de código para la resolución eficiente de problemas QP, tales como: FiOrdOs [12], CVXGEN [9] o μ AO-MPC [13]. Este enfoque proporciona un código más eficiente, tanto en memoria como en complejidad, que el enfoque del párrafo anterior.

Sin embargo, las librerías previamente mencionadas generan algoritmos genéricos para la resolución de problemas QP en código C/C++, que no son directamente trasladables a una implementación en PLC. La contribución de este trabajo es la creación de una librería que genera un código específicamente diseñado para optimizar la memoria de la formulación de MPC que se muestra en la Sección 2 y programada en el lenguaje de programación estándar de los autómatas programables ST. Este lenguaje está recogido bajo la normativa IEC 61131-3, que regula los estándares de los lenguajes de programación de los autómatas programables. La librería aprovecha la estructura del problema de optimización que se deriva del MPC y del algoritmo FISTA [1], que es el que se usa para obtener su solución.

Además, la librería genera un controlador que posee una serie de características necesarias para su implementación en el entorno industrial, tales como: control multivariable, modo manual y automático, cancelación de offset, optimización de consigna, restricciones en entrada y estado, realimentación de salida y compensación de retardo de la planta.

La salida de la librería es un archivo de extensión ".XDB" que se puede importar directamente al software de control de PLCs *Unity Pro XL*, de la empresa Schneider Electric, generándose un bloque FBD. Todas las pruebas que se han realizado en este trabajo han sido en este software o directamente en un PLC modelo Modicon m340, de la misma empresa.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: la formulación del MPC se muestra en la Sección 2, el algoritmo FISTA se muestra en la Sección 3, la arquitectura del controlador, incluyendo una breve descripción de cada uno de los elementos auxiliares, se muestra en la Sección 4, la explicación de la librería en MATLAB se encuentra en la Sección 5, un ejemplo de aplicación del controlador se muestra en la Sección 6, los resultados sobre uso de memoria en función del tamaño del problema se muestran en la Sección 7, y la conclusión y comentarios adicionales se muestran en la Sección 8.

2. Formulación del MPC

El MPC controla un sistema modelado por ecuaciones discretas en variables de estado obtenido a partir de la linalización del sistema en torno a un punto de funcionamiento (X_0, U_0, Y_0) .

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (1b)$$

Donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de acciones de control e $y(k) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salidas del sistema. $x(k)$, $u(k)$ e $y(k)$ son variables incrementales respecto al punto de funcionamiento (X_0, U_0, Y_0)

Se definen restricciones en caja para el estado y para las acciones de control de la siguiente forma.

$$LB_x \leq x(k) \leq UB_x \quad (2)$$

$$LB_u \leq u(k) \leq UB_u$$

La ley de control del MPC se deriva de la resolución del siguiente problema de optimización.

$$J^* = \min_u J(x, u, x_r, u_r) \quad (3)$$

$$s.a. \quad x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (3a)$$

$$LB_x \leq x(k) \leq UB_x, \quad (3b)$$

$$LB_u \leq u(k) \leq UB_u, k = 0, \dots, N-1 \quad (3c)$$

$$x(0) = X \quad (3d)$$

$$x(N) = x_r \quad (3e)$$

Siendo $J(x, u, x_r, u_r)$ la función de coste, cuya expresión es la siguiente.

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \|x(i) - x_r\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|u(i) - u_r\|_R^2 \quad (4)$$

donde N es el horizonte de predicción, u es la secuencia de N acciones de control futuras, x la secuencia de N estados futuros predichos del sistema, $x_r \in \mathbb{R}^n$ es el estado de referencia, $u_r \in \mathbb{R}^m$ es la acción de control de referencia, X es el estado leído en el periodo de muestreo actual, y $Q \in \mathbb{R}^{n \times n} \succ 0$ y $R \in \mathbb{R}^{m \times m} \succ 0$ son matrices diagonales que penalizan la discrepancia entre x y x_r , y entre u y u_r , respectivamente.

3. Algoritmo FISTA

Considérese el problema QP siguiente.

$$\min_z \frac{1}{2} z' H z + f' z \quad (5)$$

$$s.a. \quad z \in \mathcal{Z} \quad (5a)$$

$$Az = b \quad (5b)$$

donde $z \in \mathbb{R}^{n_z}$ son las variables de decisión, el conjunto $\mathcal{Z} = \{z \in \mathbb{R}^{n_z} : LB \leq z \leq UB\}$, H es una matriz diagonal definida positiva, $A \in \mathbb{R}^{m_z \times n_z}$, con $n_z > m_z$, y $[A \ b]$ es de rango m_z .

Nótese que el problema de optimización del MPC (3) se puede reescribir de esta forma. Tomando,

$$z = [x(0)', u(0)', \dots, x(N-1)', u(N-1)']'$$

La solución en línea de este problema QP se ha realizado mediante el algoritmo FISTA [1], que es un algoritmo basado en gradiente que resuelve el problema mediante teoría de dualidad. A continuación se muestran los conceptos básicos de este algoritmo y su formulación.

Defínase,

$$J(z) = \frac{1}{2}z'H z + f'z \quad (6)$$

$$L(z, \lambda) = J(z) - \lambda'(Az - b) \quad (7)$$

$$z(\lambda) = \arg \min_{z \in \mathcal{Z}} L(z, \lambda) \quad (8)$$

$$f(\lambda) = L(z(\lambda), \lambda) \quad (9)$$

La función $L(z, \lambda)$ se denomina la función Lagrangiana del problema, λ es el multiplicador de Lagrange y $f(\lambda)$ es la función dual.

Sea z^* la solución óptima del problema original y J^* el coste óptimo, entonces

$$J^* = L(z^*, \lambda) \geq f(\lambda) \quad (10)$$

para todo λ , pues $Az^* - b = 0$. Por lo tanto la función dual es una cota inferior del problema de optimización. El objetivo es pues obtener la mejor cota inferior, maximizando la función dual, es decir, resolviendo el problema

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda} f(\lambda) \quad (11)$$

Definiendo $f^* = f(\lambda^*)$, se puede demostrar que el problema anterior posee la propiedad de dualidad fuerte, es decir, $J^* = f^*$ y $z^* = z(\lambda^*)$.

Para el problema QP (5), en el que H es diagonal y definido positivo, el cálculo de $z(\lambda)$ tiene una solución explícita directa, puesto que es equivalente a la resolución de n_z problemas de optimización desacoplados de una sola variable.

$$z(\lambda) = \arg \min_{z \in \mathcal{Z}} \frac{1}{2}z'H z + (f - A'\lambda)'z \quad (12)$$

El objetivo es obtener la mejor cota inferior de $z(\lambda)$, maximizando la función dual, cuya obtención se basa en la siguiente desigualdad. Esta desigualdad se cumple si $H \succ 0$.

$$f(\lambda + \Delta\lambda) \geq f(\lambda) - \Delta\lambda'(Az(\lambda) - b) - \frac{1}{2}\Delta\lambda'W\Delta\lambda \quad (13)$$

Con

$$W = A'H^{-1}A \quad (14)$$

La obtención de la desigualdad (13) así como su demostración no se detallan en este trabajo. Como

referencia para la obtención de esta desigualdad se citan los trabajos de Rockafellar [11] y Fletcher [5].

Nótese que

$$\arg \max_{\Delta\lambda} -\Delta\lambda'(Az(\lambda) - b) - \frac{1}{2}\Delta\lambda'W\Delta\lambda = \quad (15)$$

$$\arg \min_{\Delta\lambda} \Delta\lambda'(Az(\lambda) - b) + \frac{1}{2}\Delta\lambda'W\Delta\lambda$$

Y, dado que W es invertible, por ser H diagonal y A de rango completo por filas, el óptimo del problema (15) se alcanza en el punto en el que se anula el gradiente, es decir,

$$Az(\lambda) - b + W\Delta\lambda = 0 \quad (16)$$

Llegando finalmente a,

$$\Delta\lambda = -W^{-1}(Az(\lambda) - b) \quad (17)$$

Los pasos del algoritmo FISTA se detallan en Algoritmo 1, donde TOL es un parámetro de entrada del algoritmo.

Algoritmo 1 FISTA

- 1: $k = 1, \lambda_1 = \eta_1 = 0, t_1 = 1$
 - 2: Repetir
 - a: Obtener $z(\lambda_k)$ resolviendo (12)
 - b: $\Delta\lambda = -W^{-1}(Az(\lambda_k) - b)$
 - c: $\eta_k = \lambda_k + \Delta\lambda$
 - d: $t_{k+1} = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + 4t_k^2})$
 - e: $\lambda_{k+1} = \eta_k + \frac{t_k - 1}{t_{k+1}}(\eta_k - \eta_{k-1})$
 - f: $k = k + 1$
 - 3: Hasta que $|Az(\lambda_k) - b| \leq TOL$
-

4. Arquitectura del controlador

El controlador que se muestra en este trabajo obtiene la acción de control a partir del MPC descrito en la Sección 2, pero también incluye una serie de elementos auxiliares que proporcionan al controlador una serie de características adicionales: cancelación de offset, estimación de estado, control de sistemas con retardo, SSTO y modo manual de funcionamiento.

La arquitectura del controlador se muestra en la Figura 1, donde el objetivo de control es llevar la salida del sistema y a la referencia dada y_r .

A continuación se explican cada uno de los bloques auxiliares.

4.1. Observador de estado y estimador de perturbaciones

Con el objetivo de eliminar el error en régimen permanente ante referencias asintóticas a una

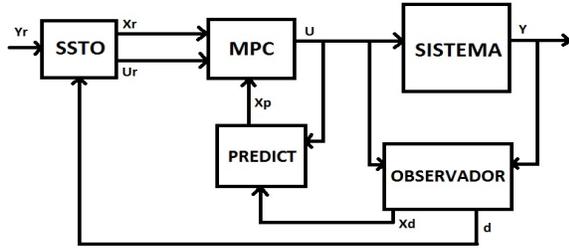


Figura 1: Arquitectura del controlador

constante, se ha incluido un observador de estado de Luenberger y un estimador de perturbaciones, que se usa para estimar y predecir la discrepancia entre la salida medida del sistema y la predicha. De este bloque se obtiene, en cada tiempo de muestreo, un estado estimado $x_d \in \mathbb{R}^n$ y una perturbación estimada $d \in \mathbb{R}^p$, que se usan para iniciar el problema del MPC (3) y el del SSTS (20).

La formulación de este bloque es la siguiente.

$$x_d^+ = Ax_d + Bu + L_x(y - Cx_d - D_d d) \quad (18)$$

$$d^+ = d + L_d(y - Cx_d - D_d d) \quad (19)$$

Donde A , B y C son las matrices del modelo del sistema (1), L_x , L_d y D_d matrices que se eligen para que el estimador sea estable, u la acción de control actual e y la salida medida del sistema.

La demostración sobre la convergencia de la salida del sistema y a la referencia dada y_r se puede ver en [8], donde en este caso se está considerando el caso $n_d = p$ y B_d matriz nula.

En la práctica, se toma $D_d = I_p$ y L_x, L_d de forma que el estado estimado x_d converja en un tiempo significativamente inferior al tiempo característico del sistema.

4.2. Predictor en bucle abierto

Con el objetivo de poder controlar sistemas con grandes retrasos de forma eficiente, es decir, sin tener que aumentar el estado del sistema, se añade un bloque que toma el estado estimado x_d , proporcionado por el observador de estado, y el historial de acciones de control pasadas - en un horizonte igual al retraso del sistema ret , dado en término del número de tiempos de muestreo de retraso - y devuelve el estado predicho x_p en ret tiempos de muestreo.

Por lo tanto, la ecuación (3d) se sustituye por $x(0) = x_p$.

4.3. Steady State Target Optimizer

El Steady State Target Optimizer (SSTS) calcula un punto de funcionamiento de referencia (x_r, u_r) a partir de una referencia en salida y_r , de tal forma que se minimice un cierto criterio. El SSTS transforma una referencia en términos de salida del sistema, que es la más habitual en la práctica, a la mejor referencia alcanzable en términos de estado x_r y acción de control u_r , de tal forma que el conjunto (x_r, u_r) cumple las restricciones del sistema (2).

El conjunto (x_r, u_r) se obtiene en cada tiempo de muestreo de la resolución del problema de optimización (20), que se ha diseñado de tal forma que el hessiano del problema QP que se deriva de él sea diagonal y definido positivo. De esta forma se puede aplicar el algoritmo FISTA (Sección 3) y las mismas técnicas de ahorro de memoria que se han usado para el MPC (Sección 2). El SSTS hace uso de la perturbación estimada por el estimador de perturbaciones (18) y (19). De esta forma la referencia (x_r, u_r) proporcionada por el SSTS será tal que la salida del sistema converja a la referencia dada en régimen permanente, siempre y cuando la referencia converja a un valor constante de forma asintótica.

$$(x_r, u_r) = \arg \min_{x_r, u_r} S(y_r, d) \quad (20)$$

$$s.a. \quad x_r = Ax_r + Bu_r \quad (20a)$$

$$y_r - D_d d = Cx_r + h \quad (20b)$$

$$LB_x \leq x_r \leq UB_x \quad (20c)$$

$$LB_u \leq u_r \leq UB_u \quad (20d)$$

Con

$$S(y_r, d) = \|x_r\|_{Q_r}^2 + \|u_r\|_{R_r}^2 + \|h\|_{T_h}^2 \quad (21)$$

Donde las matrices Q_r , R_r y T_h ponderan el estado de referencia, la acción de control de referencia y la variable de holgura h , respectivamente. Las tres matrices son diagonales y definidas positivas.

4.4. Modo de funcionamiento manual

El controlador posee un modo de funcionamiento manual, en el que la acción de control aplicada sobre el sistema es directamente la proporcionada por el usuario. En caso de estar activo el modo manual, el controlador solo ejecuta el observador de estado y estimador de perturbaciones.

En general, el controlador será iniciado en modo manual, se aplicará una acción de control que lleve al sistema a un punto de equilibrio y una vez que está en dicho punto de equilibrio y el observador de estado haya convergido se activará en modo de control automático.

5. Librería en MATLAB

Como se ha mencionado en la introducción, hay dos enfoques a la hora de implementar un MPC en un PLC. La primera, [10], implementa una función genérica de resolución de problemas QP a la que se le pasan las matrices de dicho problema. Esta solución no optimiza el uso de memoria, por lo que resulta inviable para problemas de gran tamaño. Por otro lado, existen aplicaciones orientadas a resolver problemas QP de forma eficiente a través de generación de código ([12], [9] o [13], por ejemplo). Sin embargo, estas aplicaciones generan código en C/C++ y no están orientadas a ningún problema QP en particular. Además, únicamente resuelven el problema QP, pero no proporcionan un controlador propiamente dicho.

En este trabajo se presenta una librería en MATLAB que genera controladores predictivos aprovechando la estructura que presenta el problema para la formulación del MPC mostrada en la Sección 2 y para el algoritmo FISTA (Sección 3). La especialización de la librería a una formulación concreta permite la optimización del problema QP resultante en mayor medida. Se busca minimizar la cantidad de memoria necesaria así como la cantidad de operaciones que se deben realizar en cada iteración del algoritmo FISTA. Además, se genera un controlador con todos los elementos auxiliares descritos en la sección 4 y programado en el lenguaje ST, según la normativa IEC 61131-3, que es un lenguaje estándar de los PLC.

La librería toma como datos las matrices del modelo del sistema y los parámetros del controlador, realiza una serie de cálculos fuera de línea para la generación de ciertas matrices y parámetros del problema y finalmente genera el controlador en forma de un archivo de extensión “.XDB”. Este archivo contiene la declaración de variables y el código del controlador y puede ser directamente importado a Unity Pro XL. Al ser importado se crea un bloque FBD (Figura 2). Sus entradas son la salida leída del sistema Y_{sys} , la referencia de salida YR , el valor de la acción de control en modo manual UM - en valor absoluto, el Booleano $MANUAL$ para indicar si trabajar en modo manual o automático y el valor del tiempo de muestreo ST . El bloque devuelve el valor de la acción de control del periodo de muestreo actual UK , que se obtiene de la resolución del problema (5).

El ahorro en memoria se obtiene mediante el aprovechamiento de la estructura que presentan las matrices requeridas para la resolución del algoritmo FISTA. Por ejemplo, la matriz A de (5b) presenta una estructura en banda compuesta únicamente por las matrices del modelo del sistema

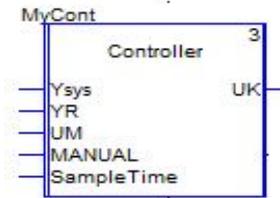


Figura 2: Bloque FBD en Unity Pro XL

(1). Por tanto, no se guarda en memoria la matriz A completa, sino únicamente las matrices del modelo. La multiplicación de A con otras matrices o vectores se realiza mediante bucles que recorren su estructura. Este mismo planteamiento se realiza para el resto de matrices y vectores del algoritmo FISTA: W (14), H , f y b (5).

Como ejemplo del orden de ahorro de memoria véase la matriz A , cuyo número de variables es igual a $N(N+1)n(n+m)$, mientras que el número de variables necesarias usando la librería es $n(n+m)$, ya que únicamente hay que almacenar las matrices A y B del modelo del sistema (1). Esto mismo ocurre de forma muy similar con el resto de matrices y vectores del problema (si bien el contraste no es tan pronunciado en el caso de los vectores).

6. Ejemplo de aplicación

En esta sección se muestra un ejemplo de uso del controlador en *Unity Pro XL*. El sistema a controlar consta de cuatro tanques de agua, dos de ellos situados encima de los dos restantes, de tal forma que los tanques superiores evacuan agua a los inferiores por gravedad. Hay dos fuentes de alimentación de agua, cuyos caudales se pueden controlar con sendas válvulas. Cada fuente alimenta uno de los tanques inferiores y uno de los superiores, tal y como se muestra en la Figura 3. El modelo de la planta consta de cuatro estados, siendo cada uno de ellos el nivel de agua de cada uno de los cuatro tanques. La salida del sistema es la altura de ambos tanques inferiores. El objetivo de control es regular la altura de los dos tanques inferiores. La acción de control es la regulación de las válvulas que controlan el caudal de cada una de las fuentes de agua. Tanto la altura de los tanques como el valor de las acciones de control deben estar contenidas entre un valor superior e inferior, es decir, hay restricciones en caja tanto en el estado como en la acción de control.

Para este sistema $n = 4$, $m = 2$ y $p = 2$. Se toma un horizonte de predicción $N = 30$. Por lo tanto, el número de variables de decisión del problema QP (5) es 180.

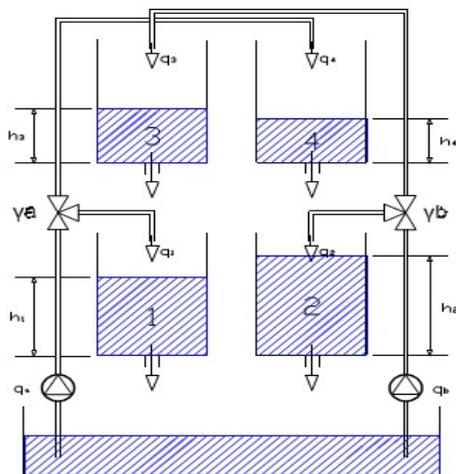


Figura 3: Planta de cuatro tanques de agua

Se han introducido las matrices del modelo del sistema y los parámetros del controlador en la librería de MATLAB, se ha importado en controlador generado en Unity Pro XL y se ha programado en un PLC Modicon m340.

Las figuras 4, 5 y 6 muestran la evolución de la salida del sistema, el estado del sistema y la acción de control, respectivamente. Todas ellas en valor absoluto. Como se puede observar en Figura 4, la salida del sistema converge a la referencia - en líneas discontinuas - a pesar de que se está regulando al planta a un punto distinto del de linealización. Por otro lado, en Figura 5 se puede observar cómo el estado real del sistema no converge al estado de referencia generado por el SS-TO, x_r . Sin embargo, el estado predicho x_p sí lo hace.

En las figuras se representan 10 periodos de muestreo en modo manual, tras los cuales se activa el modo automático del controlado.

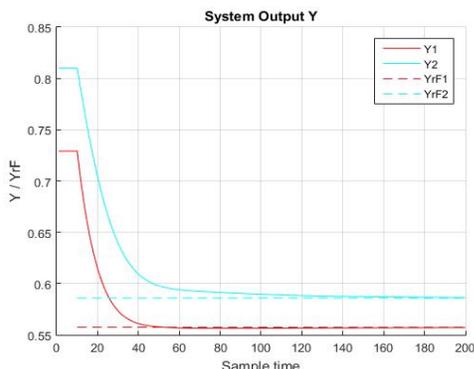


Figura 4: Salida del sistema y referencia en salida

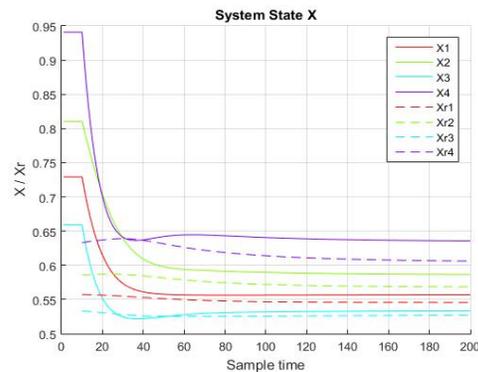


Figura 5: Estado real del sistema y referencia en estado

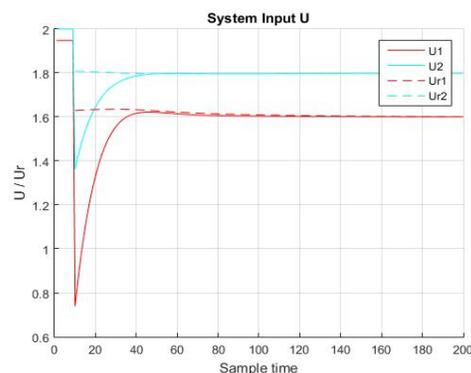


Figura 6: Acción de control aplicada y de referencia

7. Uso de memoria

Se han realizado dos conjuntos de pruebas para estudiar el uso de memoria de los controladores generados en función del tamaño del problema. En concreto, se han realizado dos conjuntos de pruebas, ambos sobre el PLC Modicom m340. En el primer conjunto (Figuras 7 y 8) se han mantenido constantes las matrices del modelo del sistema y se incrementado el valor del horizonte de predicción (N). Los valores de las dimensiones del modelo del sistema son $n = 4$, $m = 2$ y $p = 2$. En el segundo conjunto (Figuras 9 y 10) se han mantenido constantes los parámetros $N = 10$, $m = 2$ y $p = 2$, y se ha incrementado el valor de n .

Se ha medido tanto la memoria usada para almacenar los datos del problema como la memoria del código del programa. Los valores de memoria están expresados en kb.

Como se puede observar, la cantidad de memoria crece de forma lineal con el horizonte de predicción N y de forma cuadrática con el número de estados n . A pesar de que no se representa en este trabajo la evolución de la memoria en función de m o p , dejando el resto constantes, mencionar que

su comportamiento es lineal con m y cuadrático con p . Sin embargo, el parámetro que mayor efecto tiene sobre la memoria es n .

El conjunto de pruebas en las que se ha incrementado N se ha realizado usando el modelo de la planta de cuatro tanques de agua descrito en Sección 6.

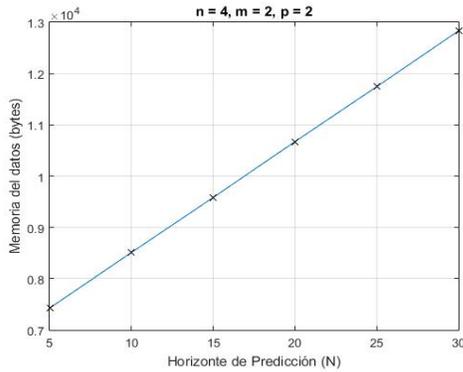


Figura 7: Memoria de datos en función de N

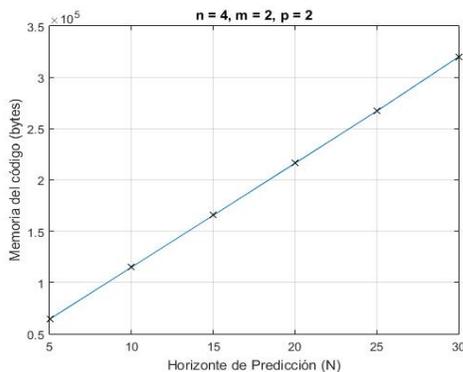


Figura 8: Memoria del código en función de N

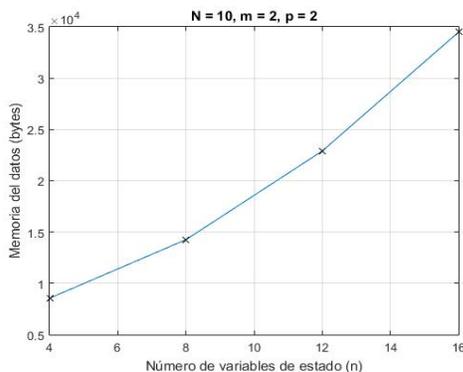


Figura 9: Memoria de datos en función de n

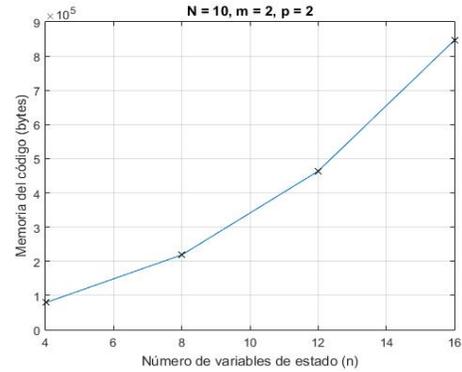


Figura 10: Memoria del código en función de n

8. Conclusiones

La librería propuesta genera el código un controlador predictivo orientado a la implementación en un PLC que aprovecha la estructura de una formulación concreta de MPC y un algoritmo concreto de resolución de problemas QP, FISTA. Esto permite obtener resultados de uso de memoria inferiores a los de otras soluciones ([10]), lo cual es de especial importancia considerando las grandes limitaciones de memoria de los PLC. El código generado está escrito en lenguaje estándar de los PLC, recogido en la norma IEC 61131-3, y puede ser directamente importado a su software de control.

Un objetivo del desarrollo de esta librería es la creación de una herramienta que facilite la implementación de controladores predictivos en autómatas programables. De ahí que se busque que sea fácil de instalar, usar y de introducir el controlador en el autómata. También se busca que el controlador posea todas las garantías y tenga en cuenta todas las consideraciones prácticas que se esperan de un controlador en el ámbito industrial.

Como posibles trabajos futuros se destacan la ampliación de estas garantías y consideraciones prácticas, así como la inclusión de características adicionales que resulten de interés. Como ejemplo se destacan las siguientes: formulación de control robusto, posibilidad de cambios de los parámetros del controlador y de las matrices del modelo del sistema en línea, o generación de código para otros equipos embebidos.

Agradecimientos

A los autores les gustaría agradecer al Mineco y los fondos FEDER por la financiación de los proyectos DPI2013-48243-C2-2-R y DPI2016-76493-C3-1-R que han dado lugar a este trabajo.

Referencias

- [1] A. Beck, M. Teboulle, “A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems”, in *SIAM J. Imaging Sciences*, vol. 2, No.1, pp. 183-202, 2009.
- [2] B. J. T. Binder, D. K. M. Kufoalor, A. Pavlov, and T. A. Johansen, “Embedded Model Predictive Control for an Electric Submersible Pump on a Programmable Logic Controller”, in *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2014.
- [3] E. Camacho, C. Bordons, “Model Predictive Control”, Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] A. Ferramosca, D. Limón, I. Alvarado, T. Alamo, E. Fernández, “MPC for Tracking With Optimal Closed-Loop Performance”, in *Automatica (Oxford)*, vol. 45, pp. 1975-1978, 2009.
- [5] R. Fletcher, “Practical methods of optimization”, 2nd ed. Chichester: New York, 1987.
- [6] B. Huyck, H. J. Ferreau, M. Diehl, J. D. Brabanter, J. F. M. V. Impe, B. D. Moor, and F. Logist, “Towards Online Model Predictive Control on a Programmable Logic Controller: Practical Considerations”, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, pp. 1-20, 2012.
- [7] D. K. M. Kufoalor, S. Richter, L. Imsland, T. A. Johansen, M. Morari, and G. O. Eikrem, “Embedded model predictive control on a PLC using a primal-dual first-order method for a subsea separation process”, in *Proc. 22nd IEEE Mediterranean Conf. Control and Automation (MED 2014)*, Palermo, Italy, 2014.
- [8] U. Maeder, F. Borrelli, M. Morari, “Linear offset-free Model Predictive Control”, in *Automatica*, vol. 45, pp. 2214-2222, 2009.
- [9] J. Mattingley and S. Boyd, “CVXGEN: A Code Generator for Embedded Convex Optimization”, *Optimization and Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1-27, 2012.
- [10] M. Pereira, D. Limon, D. Muñoz de la Peña, T. Alamo, “MPC implementation in a PLC based on Nesterov’s fast gradient method”, in *23rd Mediterranean Conf. Control and Automation (MED)*, Torremolinos, Spain, 2015.
- [11] R. T. Rockafellar, “Convex analysis”, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1970.
- [12] F. Ullmann, “A Matlab toolbox for C-code generation for first order methods”, Master’s thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2011.
- [13] P. Zometa, M. Kögel, and R. Findeisen, “ μ AO-MPC: A Free Code Generation Tool for Embedded Real-Time Linear Model Predictive Control”, in *2013 American Control Conference (ACC)*, Washington, DC, USA, June 2013, pp. 5320-5325.