

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García 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>	

Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel

Antonio J. Gallego, Mario de la Rosa, Eduardo F. Camacho
 Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Avenida de los descubrimientos s/nº 41092 (Sevilla)
 agallego2@us.es, mardeltri@gmail.com, efcamacho@us.es

Resumen

Uno de los recursos más importantes para mejorar la eficiencia en los sistemas de energía solar, es el control avanzado. En general, con el uso de estrategias de control convencionales no se obtienen buenos desempeños en todo el rango de operación debido a la dinámica fuertemente no lineal de este tipo de sistemas, así como las múltiples fuentes de perturbaciones. En este trabajo se desarrolla un control predictivo basado en el espacio de estados para controlar un captador solar tipo Fresnel. Su comportamiento es analizado sobre el modelo de parámetros distribuidos no lineal de dicho captador.

Palabras clave: energía solar, colector Fresnel, control predictivo, observador LMI

1. Introducción

La necesidad de reducir el impacto de las fuentes de energía fósil tales como el carbón o el petróleo, produjo un gran interés en las fuentes de energía renovables a mediados de los 70. En los últimos 30 años, el uso de la energía solar ha experimentado un gran impulso, desde el punto de vista de la investigación y construcción de plantas comerciales. Una de las ventajas de la energía solar con respecto a otros tipos de energía renovables es la posibilidad de usar almacenamiento térmico [1].

Múltiples trabajos de investigación se llevaron a cabo en la planta experimental ACUREX en la plataforma Solar de Almería [2] y [3]. Desde el punto de vista de plantas comerciales, cabe citar las 13 plantas termosolares de tecnología cilindro-parabólica (CCP) de Abengoa solar operativas en España (50 MW cada una) [4].

En general, el objetivo de control en plantas termosolares es mantener la temperatura de salida en torno a un punto de funcionamiento. Sin embargo, esto no es tarea sencilla debido a que hay múltiples fuentes de perturbaciones tales como la radiación solar, temperatura de entrada, eficiencia óptica, etc. La fuente de perturbación más importante es la radiación solar, cuya variación a lo largo de un

día puede ser muy brusca [5].

Se han realizado múltiples pruebas de control en el campo del control de sistemas solares. Por ejemplo, en [6], se propone un control predictivo no lineal basado en un redes neuronales. En [7], se propone un MPC robusto basado en tubos para seguimiento de referencias. Estos dos controladores fueron probados en la planta experimental ACUREX. En [8], se propone un control predictivo combinado con un filtro de Kalman unscented para estimar estados y parámetros. En [9], se propone un método para hallar el punto óptimo de operación en plantas de tecnología CCP.

En este artículo, se propone un control predictivo en el espacio de estados el cual se aplica al captador solar tipo Fresnel ubicado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. El diseño del controlador es similar al propuesto en [10]. El observador de estado elegido, es un observador de Luenberger debido a que, por su planteamiento de diseño, se pueden imponer restricciones de comportamiento y estabilidad, las cuales se pueden resolver mediante un LMI con restricciones politópicas en el plano discreto [11]. La ventaja de este esquema es que, la estrategia de control final puede plantearse como un problema lineal cuadrático (QP) y resolverse de manera rápida y eficiente.

El artículo se organiza del siguiente modo: en la sección 2, se presenta el modelo matemático del captador. En la sección 3, se explica la estrategia de control. En la sección 4, se muestran algunos resultados de simulación y, en la sección 5, se muestran las conclusiones.

2. Descripción del modelo matemático del captador solar Fresnel

El captador solar usado en este trabajo, pertenece a la planta de refrigeración solar ubicada en la terraza de la Escuela de Ingenieros de Sevilla. Esta está formada por el captador solar Fresnel, una máquina de absorción de doble efecto y un sistema de almacenamiento basado en materiales de cambio de fase [12] y [13].



Figura 1: Campo de colectores Fresnel

El captador solar Fresnel está formado por 11 líneas de colectores Fresnel con una superficie total reflectante de 352 m². Los colectores concentran la radiación solar en un tubo de metal de 64 m de longitud (Figura 1), calentando el agua a presión que circula por él y, de este modo, alimentando la máquina de absorción. Si hay más energía de la que la máquina de absorción puede usar, esta puede ser almacenada en el tanque de almacenamiento.

Con respecto al modelo matemático, se pueden usar dos enfoques: el modelo de parámetros concentrados y el modelo de parámetros distribuidos. El modelo de parámetros concentrados proporciona una descripción puntual del captador Fresnel [14]. Es una descripción más simple que el modelo de parámetros distribuidos.

La ventaja del modelo de parámetros distribuidos es que, además de considerar la distribución espacial de la temperatura del fluido, modela la transmisión de calor metal-fluido. En este trabajo se usa el modelo de parámetros distribuidos para realizar simulaciones y evaluar el desempeño del controlador propuesto. El modelo de parámetros distribuidos se puede describir con dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales [15] del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \rho_m C_m S_m \frac{\partial T_m}{\partial t} &= IK_{opt} n_o G - H_l G (T_m - T_a) \\ &\quad - l_p H_t (T_m - T_f) \\ \rho_f C_f S_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial l} &= l_p H_t (T_m - T_f) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde los subíndices m y f indican metal y fluido respectivamente. En el cuadro 1, se listan los parámetros del modelo y sus unidades.

La eficiencia óptica K_{opt} está formada por factores como la reflectividad, absortancia del tubo, factor

Símbolo	Descripción	Unidades
t	Tiempo	s
l	Espacio	m
ρ	Densidad	kgm ⁻³
C	Capacidad calorífica	JK ⁻¹ kg ⁻¹
S	Área de la sección transversal	m ²
$T(x, y)$	Temperatura	K, °C
$q(t)$	Caudal	m ³ s ⁻¹
$I(t)$	Radiación Solar	Wm ⁻²
n_o	Eficiencia Geométrica	-
K_{opt}	Eficiencia óptica	-
G	Apertura del colector	m
$T_a(t)$	Temperatura ambiente	K, °C
H_l	Coefficiente de pérdidas térmicas	Wm ⁻² °C ⁻¹
H_t	Coefficiente de transmisión de calor metal-fluido	Wm ⁻² °C ⁻¹
l_p	Perímetro mojado	m

Cuadro 1: Descripción de los parámetros del modelo

de forma, etc. La eficiencia geométrica depende del ángulo de incidencia del sol y el factor de sombra [14].

La sistema de ecuaciones se resuelve dividiendo el tubo en 64 segmentos de 1 m de longitud y un tiempo de integración de 0.5 s.

El coeficiente de transmisión de calor H_t depende tanto de la temperatura como del caudal [16]. El valor de los otros parámetros se puede hallar en [17].

3. MPC en el espacio de estados

En esta sección se describe el MPC implementado en este trabajo. Las matrices para el modelo en el espacio de estados se obtienen a partir de las ecuaciones del modelo de parámetros distribuidos (ecuación (1)). Con el objetivo de reducir la carga computacional del controlador, el modelo lineal se obtiene dividiendo el tubo en 4 segmentos en lugar de los 64 requeridos en el modelo completo.

El objetivo de control de un sistema de energía solar como el captador Fresnel, es mantener la temperatura de salida en torno a una referencia deseada, usando para tal fin, el caudal como variable manipulable.

Debido a que solo las temperaturas de entrada y salida son accesibles, el resto de temperaturas deben ser estimadas. Para ello, se ha diseñado un observador de estado cuya ganancia es calculada por medio de un problema de asignación de polos

robusto, cuya solución puede ser obtenida mediante LMIs. Se considera incertidumbre politópica en la dinámica de la planta [11].

En primer lugar, se presenta el procedimiento de obtención de las matrices del modelo lineal y, posteriormente, se describe el método para computar la ganancia del observador de Luenberger.

3.1. Obtención de las matrices del modelo lineal

En esta subsección se describe el procedimiento de obtención de las matrices lineales. El modelo lineal del sistema de ecuaciones diferenciales (ecuaciones (1)), está formado por un conjunto de matrices que dependen de las entradas y los estados del sistema. Sea x el vector de estados formado por las temperaturas de los 4 segmentos del metal y del fluido, T_{in} es la temperatura de entrada, q el caudal de agua, $I_e = IK_{opt}n_o$ es la radiación solar efectiva y T_a es la temperatura ambiente.

El modelo lineal, en tiempo continuo se puede computar usando (2):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) \\ u(t) &= q \quad d(t) = [T_{in} \quad I_e \quad T_a]^\top \end{aligned} \quad (2)$$

Las matrices lineales se puede obtener del siguiente modo:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{-H_l G - l_p H_t}{\rho_m C_m S_m} & P_1 &= \frac{l_p H_t}{\rho_m C_m S_m} \\ P_2 &= \frac{l_p H_t}{\rho_f C_f S_f} & P_3 &= \frac{q}{S_f \Delta l} \\ P_4 &= -P_2 - P_3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ P_2 & 0 & 0 & 0 & P_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & P_4 & P_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & P_4 & P_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 4} & \frac{1}{S_f \Delta l} & \dots & \frac{1}{S_f \Delta l} \end{bmatrix}^\top \quad (5)$$

$$B_{Tin} = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 4} & \frac{q}{S_f \Delta l} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}^\top \quad (6)$$

$$B_{Ie} = \begin{bmatrix} 1_{1 \times 4} \cdot \frac{G}{\rho_m C_m S_m} & 0_{1 \times 4} \end{bmatrix}^\top \quad (7)$$

$$B_{Ta} = \begin{bmatrix} \frac{H_l G}{\rho_m C_m S_m} & \dots & \frac{H_l G}{\rho_m C_m S_m} & 0_{4 \times 1} \end{bmatrix}^\top \quad (8)$$

$$B_d = [B_{Tin} \quad B_{Ie} \quad B_{Ta}]^\top \quad (9)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (10)$$

Es importante resaltar que A y B_{Ta} depende de los estados del sistema y de sus parámetros; B_{Tin} es función del caudal de agua u . Como ha sido comentado en la sección 2, los parámetros H_l , p_f , C_f y H_t dependen de la temperatura y del caudal de agua, mientras que ρ_m , C_m , S_f , S_m y G son constantes. El modelo lineal se discretiza con un tiempo de muestreo de 20 s. A partir de ahora, nos referiremos a las matrices discretas cuando hablemos de A , B y B_d .

3.2. Formulación del MPC en el espacio de estados

Desde los años 80, el control predictivo basado en modelo (MPC), ha experimentado un importante impulso en el campo de la investigación y de las aplicaciones industriales tales como plantas químicas y refinerías de petróleo.

Básicamente, la estrategia de un esquema de control MPC consiste en los siguientes 3 pasos [18],[19]:

- El uso de un modelo matemático para predecir la evolución futura del proceso en un intervalo de tiempo (horizonte).
- Calcular una secuencia de acciones de control que minimizan una función objetivo.
- Aplicar solo la primera acción calculada (horizonte deslizante), y recalculer la secuencia en cada periodo de muestreo.

La principal diferencia en las diferentes estrategias de control predictivo, es la tipología del modelo: lineal o no lineal. Si el modelo es lineal, el problema de optimización asociado puede ser resuelto eficientemente y se puede alcanzar el óptimo global [20]. Si el modelo es no lineal, el problema de optimización requiere la resolución de un problema de programación no lineal, el cual es computacionalmente más costoso de resolver y alcanzar el óptimo global no está asegurado. Particularmente en un proceso como el sistema de energía solar de este artículo, para poder resolver el problema no lineal en el tiempo de muestreo requerido, es necesario elegir horizontes pequeños [15].

Por otra parte, el uso de estrategias de control lineal en una planta donde la dinámica es muy no lineal, tiene algunos inconvenientes. El desempeño

de los controladores lineales se deteriora si el sistema evoluciona lejos del punto de funcionamiento de diseño. En los sistemas de energía solar, la dinámica de la planta deviene muy lenta con grandes retardos a bajos caudales [21]. Para tratar de solucionar este problema, en este artículo, las matrices del modelo de predicción del MPC cambian con el punto de funcionamiento.

Ante la dificultad de predecir la evolución de algunas entradas del sistema tales como la temperatura de entrada T_{in} , y la radiación efectiva I_e y la temperatura ambiente T_a , la evolución de estas variables a lo largo del horizonte de predicción se consideran constantes.

Dado que la variable manipulable es el caudal, dos restricciones son tenidas en cuenta:

- caudal de agua entre 2 y 13 m³/h.
- variación máxima de la señal de control en cada periodo de muestreo de ± 2 m³/h.

La bomba de agua se modela como un sistema de primer orden con una ganancia unitaria y una constante de tiempo de 6 segundos. El controlador MPC requiere la solución de un problema QP, resuelto con el toolbox de optimización de Matlab.

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u} J = & \sum_{k=0}^{N_y} (y(t+k|t) - y_{ref}(t+k))^T Q (y(t+k|t) - y_{ref}(t+k)) \\ & + \sum_{k=0}^{N_c} \Delta u^T(t+k) R \Delta u(t+k) \end{aligned}$$

s.t:

$$\begin{aligned} \Delta u_{min} &\leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{max}, \quad k = 1, \dots, N_c \\ u_{min} &\leq u(t+k|t) \leq u_{max}, \quad k = 1, \dots, N_c \\ u(t+k|t) &= u(t+k-1) + \Delta u(t+k-1), \quad k = 1, \dots, N_c \\ x(t+k|t) &= Ax(t+k-1|t) + Bu(t+k-1|t) + B_d d(t) \\ y(t+k) &= Cx(t+k), \quad k = 1, \dots, N_y \end{aligned} \quad (11)$$

N_y y N_c son el horizonte de predicción y de control respectivamente.

3.3. Obtención de la ganancia de observación L

Tal como se ha mencionado anteriormente, solo algunas variables son directamente medibles. El resto de estados deben ser estimados mediante un observador. El observador elegido en este trabajo es un observador de Luenberger, cuya ganancia es calculada mediante una ubicación de polos robusta. Este enfoque permite que el problema pueda ser planteado como un conjunto de LMIs y resuelto mediante un toolbox de resolución de LMIs.

Para el diseño de este observador se imponen ciertos requisitos de desempeño en todo el rango de operación de la planta. Para cubrir todo el rango de operación, se ha empleado un politopo de 4 vértices (LDI) que representa el comportamiento en el rango de variación esperado en la temperatura y en el agua, variables de las cuales depende la dinámica del sistema. Las ecuaciones que describen la dinámica del observador de estado son:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A(k, x, u)\hat{x}(k) + Bu(k) + B_d d(k) + \\ & L(\hat{y}(k) - y(k)) \\ \hat{y}(k+1) &= C\hat{x}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde $A(k, x, u) \in \mathbf{Co}\{A_1, \dots, A_4\}$.

El error de estimación se define como $e(k) = \hat{x}(k) - x(k)$ y su dinámica viene dada por la siguiente ecuación:

$$e(k+1) = (A(k, x, u) + LC)e(k) \quad (13)$$

El objetivo del problema LMI que se formula en este artículo, es hallar una ganancia de observación L de modo que $e(k)$ converja a 0 para $k \rightarrow \infty$ para el sistema descrito por el politopo LDI. Los requerimientos de diseño se imponen mediante restricciones en la ubicación de polos, es decir, no solo los polos deben estar dentro del círculo unidad (estabilidad), si no que se impone que su ubicación para los vértices del politopo, esté dentro de un radio máximo. Es interesante hacer notar que, para evitar términos no lineales en el LMI, se formula el problema con $(A(k, x, u) + LC)^T$, dado que los autovalores de una matriz cuadrada, son lo mismos que los de su traspuesta.

Esto, matemáticamente, se expresa del siguiente modo: hallar una matriz W de tal modo que los siguientes LMIs se satisfacen para cada vértice del politopo [22]:

$$\begin{aligned} \min_{W, Y} r \\ A_i^T W + C^T Y + W A + Y^T C > 0 \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{bmatrix} -rW & A^T W + C^T Y \\ WA + Y^T C & -rW \end{bmatrix} < 0 \quad (14b)$$

Con $Y = L^T W$ y $r \in (0, 1)$, corresponden a las siguientes condiciones para la ubicación de polos [11], [23]:

- $\text{Re}(\lambda(A_i + LC)) > 0$
- $|\lambda(A_i + LC)| < r$

Aunque las condiciones impuestas en (14b) son no lineales, realmente son condiciones bilineales, con lo que el problema se puede relajar iterativamente, buscando el valor mínimo de r para el cual el problema LMI mantiene la factibilidad. La matriz de observación obtenida viene dada por:

$$L = \begin{bmatrix} -0,1469 & -0,6427 & -1,1269 & -0,9801 \\ -0,1376 & -0,6004 & -1,0615 & -0,9618 \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

En la figura 2, se muestran los polos para los vértices del LDI, así como el mínimo valor de r obtenido.

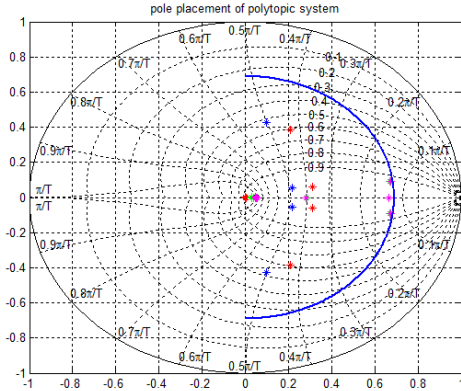


Figura 2: Resultado de la ubicación de polos obtenida resolviendo los LMIs propuestos

3.4. MPC con estimador de perturbaciones

Uno de los problemas que tiene el control predictivo en el espacio de estados es la aparición de un error en régimen permanente si el modelo no es suficientemente exacto. Para paliar este problema, el método propuesto en [24] se usa para compensar las diferencias entre el modelo lineal y la planta. Si consideramos un modelo lineal en el espacio de estados de la forma:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu(k) + B_d d(k) \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (16)$$

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$$

La clave es estimar una señal de control virtual \hat{u}_k que no es necesariamente igual a la señal de control real u_k aplicada a la planta. Cualquier diferencia entre la planta y el modelo es incluida en esta señal virtual, que actúa como integrador de perturbaciones. La formulación final del observador de estados viene dada por (17):

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + B(\hat{u}(k) + \Delta u(k)) + B_d d(k) \\ &\quad + L(\hat{y}(k) - y(k)) \\ \hat{u}(k+1) &= \hat{u}(k) + \Delta u(k) + L_u(y(k) - \hat{y}(k)) \end{aligned} \quad (17)$$

3.5. Esquema final de control

En esta subsección se muestra el esquema de control final. Cada 20 segundos, el sistema de adquisición de datos lee los sensores y el observador de estado calcula los estados estimados. Esta estimación se pasa al bloque de control MPC, que computa las matrices lineales y resuelve el problema de optimización (11). El resultado es la señal q_{pred} , la cual es añadida al controlador feedforward q_{ff} . La suma de ambas es la señal de control aplicada a la planta.

La razón de incluir un controlador feedforward es que ayuda al rechazo de perturbaciones [25]. El feedforward se calcula usando el modelo de parámetros concentrados como sigue [14]:

$$q_{ff} = \frac{IK_{opt} n_o S - H_l S ((T_{ref} + T_{in})/2 - T_a)}{P_{cp}(y_{ref} - T_{in})} \quad (18)$$

Donde y_{ref} es la referencia de temperatura, S es la superficie reflectante de 352 m^2 y P_{cp} es un término que incluye la entalpía del fluido y otros factores geométricos [15]. La figura 3, muestra el esquema de control final:

4. Resultados

Se han realizado dos simulaciones comparando el comportamiento del MPC propuesto con un controlador PI+feedforward. El PI ha sido diseñado usando múltiples simulaciones con diferentes condiciones de radiación y caudal de agua, y sus ganancias se han obtenido mediante un proceso de optimización offline, para asegurar que el comportamiento es adecuado en todo el rango de funcionamiento, evitando inestabilidades. Su expresión viene dada por la ecuación (19)

$$u_{PI}(k) = -0,2546 e(k) - 0,003122 \Sigma_e(k) \quad (19)$$

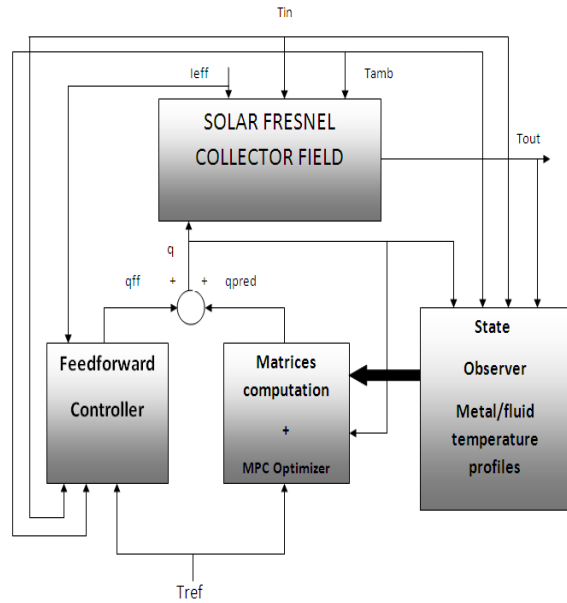


Figura 3: Esquema de control final

Donde $e(k)$ y $\Sigma_e(k)$ son el error y su integral discreta respectivamente. Para el controlador MPC se han elegido los siguientes parámetros: $N_y = 15$, $N_c = 10$, $Q = I$ y $R = 120$.

La figura 4 muestra una simulación de un día claro donde el set-point cambia a lo largo de todo el test. El valor inicial de T_{in} y T_{out} es 90°C y 99°C respectivamente. Como se puede comprobar, el desempeño del PI es similar al del MPC para caudales medios-altos, pero para bajos caudales, el desempeño del PI se deteriora produciendo comportamiento oscilatorio, mientras que el MPC logra desempeños buenos en todo el rango.

En la figura 5 se simula un día con perturbaciones en la temperatura de entrada y en la radiación solar. La temperatura de entrada y la temperatura de salida tienen un valor inicial de 152°C y 159°C respectivamente. A las 12.4 h la temperatura de entrada incrementa su valor hasta los 156°C , que produce un decremento en la temperatura de salida debido a la acción del feedforward, pero ambos controladores recuperan el seguimiento del set-point. A las 13.25 h, debido a nubes dispersas, la radiación cae a 0 y el caudal de agua se viene al mínimo de $2\text{ m}^3/\text{h}$, para minimizar la caída de temperatura. Aun así, en estas condiciones no es posible mantener la referencia de temperatura. Una vez que la nube ha pasado, el MPC recupera el seguimiento de set-point, de manera más suave. Desde 13.8 h hasta las 14.1 h, una segunda nube cubre el campo de colectores y la temperatura de entrada disminuye produciendo otra saturación en la acción de control. La parte final del test consiste en una serie de escalones incrementales en el

set-point. En este punto se puede ver que el PI deteriora su comportamiento en comparación con el MPC. Como se esperaba el desempeño y la robustez del MPC son superiores.

Con respecto al observador de estado, la figura 6 muestra la estimación de los perfiles del metal y del fluido. Como puede verse, los perfiles estimados están cercanos (con las lógicas diferencias) a los valores obtenidos con el modelo no lineal de parámetros distribuidos. El estimador de estado muestra convergencia rápida a pesar de las perturbaciones y cambios de referencia.

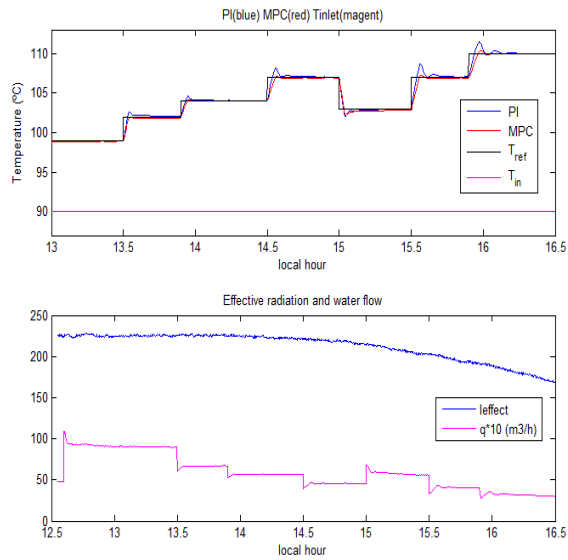


Figura 4: Día claro a baja temperatura. Comparación entre PI y MPC

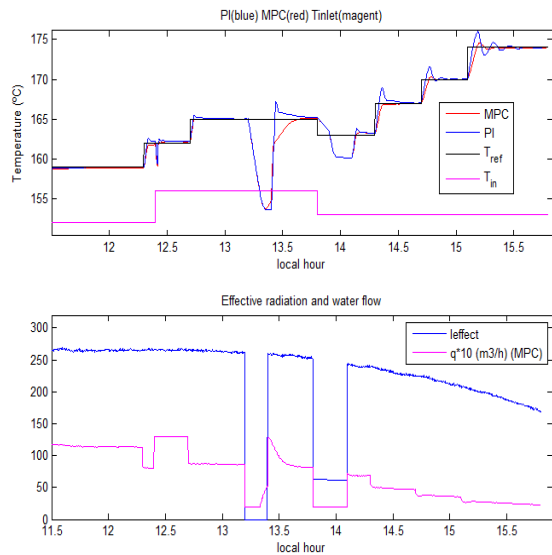


Figura 5: Día claro a alta temperatura. Comparación entre PI y MPC

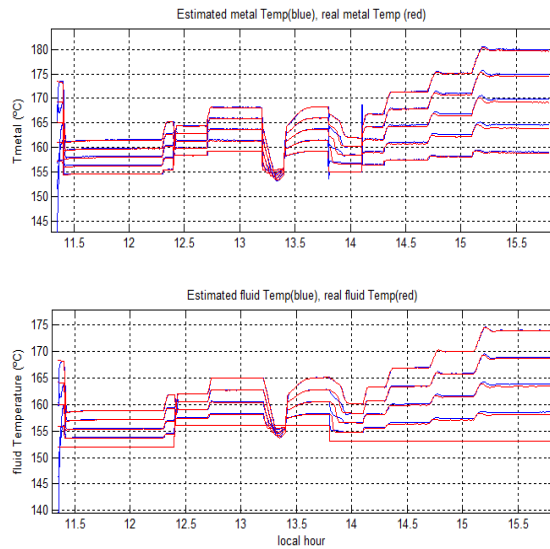


Figura 6: Día claro a alta temperatura: Desempeño del observador de estado

5. Conclusiones

En general, el uso de estrategias de control lineales no es suficiente para garantizar un comportamiento eficiente en todo el rango de operación de las plantas solares. En este artículo, se ha diseñado un MPC basado en observador de estado aplicado a una planta de colectores Fresnel.

El observador de estado ha sido obtenido mediante el planteamiento de varios LMIs, imponiendo restricciones en dinámica y estabilidad. El desempeño del MPC se ha comparado con un PI, cuyos parámetros han sido obtenidos mediante optimización para diferentes condiciones. El desempeño del MPC se ha mostrado superior en las pruebas realizadas.

El observador de estado ha mostrado también rapidez de convergencia y buena estimación en los estados.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la junta de Andalucía y al Ministerio de Educación por financiar el trabajo mediante los proyectos Gestión Óptima de Edificios de Energía Cero (P11-TEP-8129) y Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil (DPI2016-78338-R).

Referencias

- [1] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, and D. Martínez. *Control of Solar Energy Systems*. Springer-Verlag, 2012.
- [2] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel,

and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part I: Modeling and basic control approaches. *Solar Energy*, 81:1240–1251, 2007.

- [3] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part II: Advanced control approaches. *Solar Energy*, 2007b.
- [4] Abengoa Solar. Abengoa solar: Energía solar para un mundo sostenible, 2012.
- [5] A. J. Gallego and E. F. Camacho. Adaptive state-space model predictive control of a parabolic-trough field. *Control Engineering Practice*, 20(9):904–911, 2012.
- [6] P. Gil, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte Ramos, and A. Dourado. Constrained adaptive non-linear neural model-based predictive control of a distributed collector field. *Proc. 2nd IHP Workshop*, 2002.
- [7] D. Limon, I. Alvarado, T. Alamo, M. Ruíz, and E.F. Camacho. Robust control of the distributed solar collector field acurex using MPC for tracking. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pages 958–963, 2008.
- [8] G. Pin, M. Falchetta, and G. Fenu. Modeling and control of concentrating solar power systems: a discrete-time adaptive scheme for temperature control in molten-salt solar collector-fields. *In Solar Collectors: Energy Conservation, Design and Applications*, Series: Renewable Energy: Research, Development and Policies. Nova Publishers:15–39, 2009.
- [9] E. F. Camacho and A. J. Gallego. Optimal operation in solar trough plants: a case study. *Solar Energy*, 95:106–117, 2013.
- [10] A. J. Gallego, F. Fele, E. F. Camacho, and L. J. Yebra. Observer-based model predictive control of a solar trough plant. *Solar Energy*, 97:426–435, 2013.
- [11] Mahmoud Chilali and Pascal Gahinet. H_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 41:358–367, March 1996.
- [12] Pablo Bermejo, Francisco Javier Pino, and Felipe Rosa. Solar absorption cooling plant in seville. *Solar Energy*, 84:1503–1512, 2010.
- [13] A. J. Gallego, A. Ruíz-Pardo, A. Cerezuela-Parish, J. Sánchez Ramos, C. Martín-Macareno, L. F. CabezaCabeza, E. F. Camacho, and E. Oró. Mathematical modeling of

- a pcm storage tank in a solar cooling plant. *Solar Energy*, 93:1–10, 2013.
- [14] María Robledo, Juan M. Escaño, Amparo Núñez, Carlos Bordons, and Eduardo F. Camacho. Development and experimental validation of a dynamic model for a fresnel solar collector. *18th IFAC World Congress.*, October 2010.
- [15] E.F Camacho, F.R Rubio, and M.Berenguel. *Advanced control of solar plants*. 1997.
- [16] Frank Kreith, Raj M. Manglik, and Mark S. Bohn. *Principles of heat transfer*. Cengage Learning, seventh edition, 2011.
- [17] Antonio J. Gallego. *Control Predictivo de sistemas de energía solar distribuidos*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, June 2014.
- [18] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control 2º Ed*. Springer Verlag, 2004.
- [19] J.B Rawlings and D.Q Mayne. *Model Predictive Control: Theory and Design*. Cheryl M. Rawlings, 2009.
- [20] D.Q Mayne, J.B Rawlings, C.V Rao, and P.O.M Scokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36:789–814, 2000.
- [21] Ricardo Carmona. *Análisis, Modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, 1985.
- [22] Stephen Boyd, Laurent El Ghaoui, Eric Feron, and Venkataramanan Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- [23] J.M Gomes da Silva and S.Tarbouriech. Local stabilization of discrete-time linear systems with saturating controls: An lmi-based approach. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 46:119–125, January 2001.
- [24] Urban Maeder, Francesco Borrelli, and Manfred Morari. Linear offset-free model predictive control. *Automatica*, 45:2214–2222, 2009.
- [25] E.F. Camacho, F.R. Rubio, and F.M. Hughes. Self-tuning control of a solar power plant with a distributed collector field. *IEEE Control Systems*, 0272- 1708/92/:72–78, 1992.