

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES

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

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva
 emails: manuel.vasallo@diesia.uhu.es, caro@uhu.es, emiliangelu.cojocarú@alu.uhu.es, gegundez@uhu.es

Resumen

Se presenta una estrategia basada en control predictivo para resolver la planificación de la producción en plantas termosolares con almacenamiento térmico participando en el mercado diario de electricidad. Mediante esta estrategia, la producción de electricidad es actualizada regularmente haciendo uso del estado actual de la planta y de las más recientes predicciones para el precio de la energía y el recurso solar. La estrategia propuesta se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de predicción perfecta de precios y participación en el mercado diario español. Se ha analizado un caso de estudio basado en un periodo de cuatro meses con el propósito de abarcar una gran variedad de condiciones meteorológicas. Se han empleado valores reales para los precios de la energía, los costes de penalización, el recurso solar y su predicción. Los resultados muestran una mejora económica significativa frente a la tradicional estrategia a un día vista.

Palabras clave: Operación óptima de sistemas de potencia. Auto-programación de la producción. Integración en el mercado de la energía. Control predictivo basado en modelo. Modelado y simulación de sistemas de potencia.

1 INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica de concentración (CSP, *concentrating solar power*) es una prometedora tecnología que ha despertado mucho interés en países como España y Estados Unidos, donde su desarrollo ha sido promovido gracias a políticas de subsidios. El interés en la tecnología CSP se basa en su carácter semi-gestionable cuando disponen de almacenamiento térmico (TES, *thermal energy storage*) y/o sistemas de respaldo basados en combustibles fósiles. Esta característica facilita su participación en el mercado eléctrico gracias a, entre otros factores, su capacidad para trasladar la producción hacia las horas con precios más al-

tos. Es posible, por tanto, plantear el problema de la planificación óptima de la producción (también llamada *auto-programación óptima*). En un mercado desregularizado, los propietarios de las plantas de potencia tienen por objetivo maximizar sus beneficios a partir de las ventas de energía. Por otra parte, deben ofrecer al mercado su programa diario de producción con antelación. En consecuencia, se necesitan predicciones de precios de la energía y meteorológicas (en caso de productores de energía renovable) para resolver el problema de optimización.

Uno de los primeros trabajos sobre operación óptima en plantas CSP es [11]. Se utilizaron dos modelos, la herramienta SAM [2] y un modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta (MILP, *mixed integer linear programming*). Otros ejemplos con planteamientos MILP pueden encontrarse en [12] and [6].

Como consecuencia de errores en la predicción de irradiancia directa normal (DNI, *direct normal irradiance*), los propietarios de plantas CSP corren el riesgo de sufrir penalizaciones económicas por desvíos respecto al programa comprometido con el mercado. Con objeto de reducir el mencionado riesgo, los autores de este trabajo propusieron en [13] una estrategia de control predictivo (MPC, *model-based predictive control*) basada en programación entera mixta (MIP). Esta estrategia fue usada para la reprogramación de la producción y para el desarrollo del programa para el día siguiente. El control MPC es una estrategia ampliamente extendida en la industria y en el mundo académico dada su habilidad para tratar con modelos dinámicos y restricciones complejas (ver [10, 4]).

Este trabajo se inspira en la siguiente cuestión: ¿cuál es el impacto económico producido al usar la estrategia MPC en la auto-programación de plantas CSP? En este sentido, se ha desarrollado y probado una versión económica de la estrategia a partir del enfoque MPC general presentado en [13]. Esta versión se basa en definir una función de coste donde la información sobre precios y costes de penalización se ha añadido con objeto de establecer un seguimiento económicamente óptimo

del programa comprometido. De esta forma, la estrategia MPC busca compensar, al menos parcialmente, la penalización por desvíos mediante el incremento de los ingresos. La estrategia propuesta se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de predicción perfecta de precios y participación en el mercado diario español.

En la Sección 2 se describe de forma genérica la estrategia MPC propuesta. En la Sección 3 se describen el caso de estudio y sus resultados. Las conclusiones se recogen en la Sección 4.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRATEGIA MPC DESARROLLADA

Se asume la participación en el mercado diario de electricidad y la imposibilidad del productor de influir en los precios (dado su pequeño volumen de producción). El objetivo de la estrategia MPC es doble: 1) el seguimiento periódico y conveniente desde el punto de vista económico del programa comprometido con el mercado y 2) el desarrollo del programa óptimo de producción para el día siguiente en el momento previsto para ello. Este doble objetivo requiere que la ventana deslizante del MPC esté compuesta de dos intervalos de tiempo (ver Fig. 1): el intervalo para el seguimiento del programa comprometido (IS) y el intervalo para la generación del nuevo programa (INP). La reprogramación llevada a cabo por la estrategia MPC tiene por objeto el seguimiento durante el intervalo IS del programa comprometido. Al mismo tiempo debe tenerse en cuenta la maximización de los ingresos futuros dentro del intervalo INP. En el instante previsto para ello, el perfil de producción obtenido para el intervalo INP es entregado al mercado como plan de producción para el próximo día. A continuación se definen algunas variables y parámetros relacionados con la ventana deslizante:

- $t(i) = i\Delta t_w$ donde $i = 0, 1, \dots$ son los instantes de tiempo en los que el control MPC genera salidas. El instante inicial de la ventana deslizante cuando esta está en la posición i es referido como $t(i)$. El caso $i = 0$ se refiere al instante 0.0h del día actual D. Δt_w es el paso de actualización del control MPC.
- $t_{schedule_del}$ es la hora límite durante el día D a la que hay que entregar el programa de producción para el día D+1. Esta hora depende del mercado de cada país.
- $t_{schedule_end}$ es el instante final del plan de

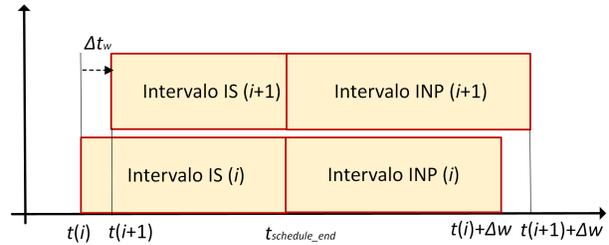


Figura 1: Ventana deslizante de la estrategia MPC

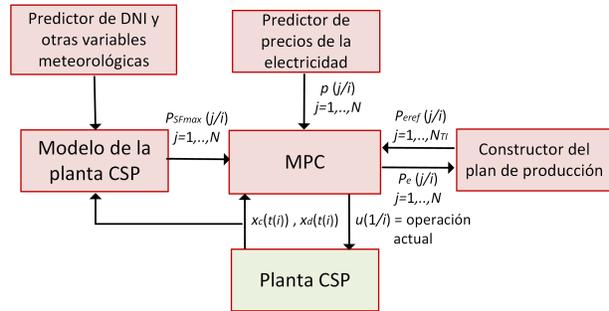


Figura 2: Diagrama de bloques de la estrategia MPC

producción comprometido. Si el instante actual no supera $t_{schedule_del}$, $t_{schedule_end}$ es 24.0h del día D. En caso contrario, $t_{schedule_end}$ es 24.0h del día D+1 porque el nuevo plan ya ha sido entregado.

- Δw es la longitud de la ventana deslizante.

Los extremos de los intervalos IS e INP pueden observarse en la Fig. 1, en coherencia con las anteriores definiciones. Obsérvese que la longitud de la ventana deslizante es constante, no así la de ambos intervalos.

Cuando $t(i) = t_{schedule_del}$, el programa de producción resuelto por el control MPC para el intervalo INP hasta las 12.0h del día D+1 puede entregarse como plan de producción para ese día.

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del control MPC. En cada posición i de la ventana deslizante, el control MPC recibe la siguiente información:

1. El valor actual del estado continuo de la planta ($x_c(t(i))$), por ejemplo el nivel de energía del almacenamiento y el estado térmico del campo solar (*solar field*, SF).
2. El valor actual del estado discreto de la planta ($x_d(t(i))$), por ejemplo las fases de operación en SF, TES o turbina.

3. Predicciones del precio de la energía realizadas el instante $t(i)$ ($p(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$), donde j indica cada paso en el modelo MPC, $N = \Delta w / \Delta t_o$ es el número de pasos en la ventana deslizante y Δt_o es el paso del modelo MPC expresado en horas.
4. Predicciones realizadas el instante $t(i)$ para el valor medio de la máxima potencia térmica disponible en SF ($P_{SFmax}(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). El término 'máximo' se añade para indicar que un desenfoco parcial de los colectores del SF puede conllevar un decremento de la potencia disponible. Un modelo de la planta, predicciones para DNI y otras variables meteorológicas, y las condiciones iniciales $x_c(t(i))$ y $x_d(t(i))$ son elementos usados para generar estas predicciones.
5. Plan de producción comprometido aún por ejecutar ($P_{eref}(j/i)$, para $j = 1, \dots, N_{TI}$), expresado en valores medios brutos de potencia eléctrica, donde $N_{TI} = (t_{schedule_end} - t(i)) / \Delta t_o$ es el número de pasos en el intervalo IS.

Como resultado de la optimización en la posición i , se generan las siguientes salidas:

1. Variables de decisión ($u(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). Sólo las variables de decisión $u(1/i)$ se aplican en la planta como es habitual en el control MPC.
2. Valores medios brutos de la potencia eléctrica generada por la turbina calculada en el instante $t(i)$ ($P_e(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). Cuando $t(i) = t_{schedule_del}$, el nuevo plan de producción se construye con los valores dentro del intervalo INP hasta las 24.0h del día D+1 ($P_{eref}(j/i) = P_e(j/i)$, para $j = N_{TI} + 1, \dots, N'_{TI}$, donde $N'_{TI} = N_{TI} + 24 / \Delta t_o$ es el nuevo número de pasos del intervalo INP).

La función objetivo a minimizar se expresa mediante la ecuación (1)

$$\begin{aligned}
 J(i) = & -\Delta t_o \sum_{j=1}^{N_{TI}} [p(j/i)P_{enet}(j/i) \\
 & - \phi(j/i)(P_{erefnet}(j/i) - P_{enet}(j/i)) - f_{cost}(\cdot)] \\
 & - \Delta t_o \sum_{j=N_{TI}+1}^N [p(j/i)P_{enet}(j/i) - f_{cost}(\cdot)] \\
 & - s(E(N+1/i))
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde $\phi(j/i)$ es una estimación del coste de penalización por kWh de desviación durante la hora

j , $P_{enet}(j/i)$ es la potencia eléctrica neta generada por la turbina, $P_{erefnet}(j/i)$ es la potencia eléctrica neta comprometida, $f_{cost}(\cdot)$ representan los costes de generación y $s(E(N+1/i))$ es un elemento de valor terminal aplicado al nivel final de energía en TES. Nótese que la función $-J(i)$ representa la suma total de beneficios a lo largo de la ventana deslizante. En este trabajo se asume que la producción de electricidad no supera el valor comprometido. En consecuencia, el término $\phi(j/i)$ sólo hace referencia a desvíos negativos.

3 CASO DE ESTUDIO

En esta sección, la estrategia MPC propuesta en este trabajo se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico. Además, dicha estrategia se compara con una estrategia de planificación a día vista (*day-ahead scheduling*, DAS). La estrategia MPC usa el modelo MIP-MPC (ver Subsección 3.1), replanificación horaria, predicción solar a corto plazo actualizada cada hora y realimentación horaria del estado de la planta. La estrategia DAS se caracteriza por lo siguiente:

1. El plan para el día D+1 se genera el instante $t_{schedule_del}$ del día D. En este instante, las condiciones iniciales para el día D+1 se estiman empleando el estado actual de la planta, la predicción a un día vista y el plan de producción comprometido aún por ejecutar.
2. El plan de producción es ejecutado sin ninguna replanificación. Es decir, la producción cada hora es el valor máximo posible que no supere el valor comprometido.

El modelo de optimización empleado por la estrategia DAS es referido en este trabajo como modelo MIP-DAS (ver Subsección 3.1). La tabla 1 resume toda la información sobre las estrategias de planificación estudiadas y sus modelos de optimización.

La planta CSP analizada en este caso de estudio se basa en el modelo presentado en [5], y también usado en [13], que describe la planta *Andasol 2* en Granada, España. Algunas características de este modelo (adaptadas a este caso de estudio) pueden consultarse en la tabla 2.

A continuación se describen las principales características del escenario de simulación desarrollado para este caso de estudio. Se ha considerado un periodo de tiempo suficientemente largo (desde 01/02/2013 hasta 31/05/2013) con el propósito

Tabla 1: Descripción de las estrategias de planificación analizadas

Estrat.	Modelo	Replanif.	Predic. a corto plazo	Realim. del estado de la planta
MPC	MIP-MPC	Horaria	Horaria	Horaria
DAS	MIP-DAS	No	No	Diaria

Tabla 2: Características de la planta CSP

Capacidad bruta de turbina	52.5 MW-e
Capacidad de SF	250 MW-t
Capacidad térmica en modo sólo solar	140 MW-t
Capacidad térmica en modo sólo TES	119 MW-t
Múltiple solar	1.8
Capacidad de TES (modo sólo TES)	8 hours
Eficiencia de turbina (plena carga)	38%
Sin generación eléctrica con calderas	

de testear una gran variedad de condiciones meteorológicas. Se asume la participación en el mercado diario de electricidad, la imposibilidad del productor de influir en los precios (dado su pequeño volumen de producción) y predicción perfecta para los precios de la energía (obtenidos de la web del operador del mercado ibérico OMIE [1]). No se considera ninguna prima para la producción renovable. Los costes de penalización por MWh desviado respecto al plan comprometido son obtenidos del operador el sistema (Red Eléctrica de España). Por otra parte, los costes de generación se han supuesto despreciables por simplicidad. Las resoluciones del plan de producción y del modelo MIP-MPC son horarias. La frecuencia de replanificación es también horaria. Por tanto, $\Delta t_o = \Delta t_w = 1.0$ h (ver Fig. 1). El parámetro $t_{schedule.del}$ se considera igual a 10.0 h (mercado español en 2013). El parámetro Δw se fija a 48h. En consecuencia, la duración del intervalo INP a las 10.0h es 34 h, es decir, un esquema intermedio entre las planificaciones a un día vista y a dos días vista [14]. Para generar las predicciones $P_{SFmax}(j/i)$ (ver Fig.2), se usa el modelo detallado en [13]. El DNI y la temperatura ambiente son las únicas variables meteorológicas consideradas y la predicción de temperatura ambiente se supone perfecta y se crea mediante datos TMY2 [3]. La planta CSP se representa mediante un modelo de resolución horaria para evitar un alto tiempo de simulación, al igual que en [7, 8]. Particularmente, se emplea un modelo MIP derivado del propio modelo MIP-MPC. Por lo tanto, las diferencias de producción sólo se deben a errores de predicción del DNI. Este modelo se denomina en este trabajo modelo MIP-plant. Se dispone de un conjunto de predicciones a un día vista de radiación solar obtenidas por el modelo *Integrated Forecast System* (IFS) del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a

Mediano Plazo (ECMWF). Además, también está disponible un conjunto de medidas de radiación solar. Ambos conjuntos se convierten a potencia térmica máxima disponible en SF mediante simulación con el modelo detallado de la planta CSP. En este estudio también se tienen en cuenta las predicciones a corto plazo de DNI. Se pueden consultar varios métodos en [9]. En ausencia de datos de predicción a corto plazo, se ha desarrollado un predictor sintético, que trabaja directamente con la variable $P_{SFmax}(j/i)$ para evitar la conversión de valores DNI. La ecuación (2) describe el predictor sintético a corto plazo utilizado.

$$P_{SFmax_STF}(k/i) = P_{SFmax_actual}(k/i) + r(k)(P_{SFmax_DA}(k/i) - P_{SFmax_actual}(k/i)) \quad (2)$$

para $k=1$ to $N_{STF}+1$; donde N_{STF} es el horizonte (horas) de la predicción a corto plazo; $r(k)$ es una función lineal con el índice k , $r(1) = 0$; $r(N_{STF} + 1) = 1$; $P_{SFmax_STF}(k/i)$, $P_{SFmax_actual}(k/i)$ y $P_{SFmax_DA}(k/i)$ son las máximas potencias térmicas disponibles en SF predichas a corto plazo, real y predichas a un día vista, respectivamente. Obsérvese que el porcentaje de error en la predicción a un día vista añadido al valor real para generar la predicción a corto plazo de la primera hora es 0. Este porcentaje crece linealmente con el tiempo hasta llegar a 100% cuando $k = N_{STF} + 1$, es decir, fuera del horizonte de predicción a corto plazo. Valores típicos para N_{STF} son 5 o 6 horas [9, 8].

Los modelos MIP se describen en la Subsección 3.1. La Subsección 3.2 presenta las propiedades de los siguientes datos de entrada: recurso solar, su predicción a un día vista y coste de penalización por kWh de desviación. Finalmente, los resultados y las conclusiones se exponen en la Subsección 3.3.

3.1 MODELOS MIP

En esta subsección se describen los tres modelos MIP, todos de resolución horaria. Los modelos MIP-DAS y MIP-plant se derivan del modelo MIP-MPC. La formulación de los tres modelos MIP para este caso de estudio no conllevó el empleo de elementos no lineales, excepto las variables binarias. Por lo tanto, son modelos MILP.

Es importante hacer una aclaración en este momento: se supone que el operador y los sistemas de control de la planta toman decisiones basadas en dos objetivos con diferente prioridad [13]. El objetivo de alta prioridad es minimizar el error de producción. Una vez que se cumpla este objetivo, la prioridad es minimizar la potencia térmica desenfocada en SF. Por lo tanto, la planta en estudio

tiene una única variable de decisión independiente en relación con el reparto de potencia, por ejemplo, la consigna para la generación de electricidad. Por tanto, la acción del MPC $u(1/i) = P_{e_SP}(1/i)$. Se usa la ecuación $P_{e_SP}(1/i) = P_e(1/i)$ para obtener la consigna, donde $P_e(1/i)$ es un valor generado por el control MPC.

3.1.1 Modelo MIP-MPC.

El conjunto de ecuaciones y desigualdades que compone el modelo MIP-MPC, junto con los valores de los parámetros presentes, se puede consultar en [13]. La función objetivo a minimizar se muestra en la expresión (3), que es un caso específico de la función objetivo en la Sección 2.

Minimize

$$J(i) = \begin{aligned} & -\Delta t_o \sum_{j=1}^{N_{TI}} [p(j/i)P_{enet}(j/i) \\ & -\phi(j/i)(P_{erefnet}(j/i) - P_{enet}(j/i))] \\ & -\Delta t_o \sum_{j=N_{TI}+1}^N (p(j/i)P_{enet}(j/i)) \\ & -KE(N+1/i) \end{aligned} \quad (3)$$

En esta función objetivo, no se tienen en cuenta los costes de generación y $KE(N+1/i)$ es el elemento de valor terminal, formado por un valor proporcional al nivel final de energía en TES, con la constante K definida por la ecuación $K = \eta p_{vlow}$, donde η es un factor de eficiencia para convertir energía almacenada en energía eléctrica neta y P_{vlow} es un valor muy inferior al precio mínimo de la electricidad durante el periodo simulado. De esta manera, el elemento de valor terminal hace que la energía térmica desenfocada sea tan baja como sea posible una vez se han maximizado los beneficios económicos (sin tener en cuenta el elemento de valor terminal). En el mercado español, la desviación sobre la producción comprometida, en caso de que requiere la intervención del operador del sistema, genera costes de penalización. Estas sanciones están asociadas con los costos incurridos para estabilizar el sistema, y no siguen ninguna función preestablecida. Por lo tanto, estos costes son difíciles de estimar. Un valor promedio de $\phi(j/i)$ se supone en la subsección 3.2.

3.1.2 Modelo MIP-DAS.

El modelo MIP-DAS es un modelo de optimización que genera el plan de producción para el día D+1 cuando $t(i) = t_{schedule_del}$ durante el día D cuando la estrategia DAS se está ejecutando. El modelo MIP-DAS se deriva del modelo MIP-MPC de la siguiente manera: el intervalo IS se elimina y el intervalo INP comienza la hora 0 del día D+1. Los valores iniciales para el instante previo a la hora 0 del día D+1 se estiman en $t_{schedule_del}$ del

día D utilizando el estado actual de la planta, la predicción a un día vista y el plan comprometido aún por cumplir.

3.1.3 Modelo MIP-plant.

Para evitar un tiempo de computación elevado, la representación de la planta CSP se realiza mediante un modelo MIP de resolución horaria. Se compone de dos modelos consecutivos de optimización derivados del modelo MIP-MPC. Los dos objetivos con diferente prioridad que guían las decisiones del operador de la planta y los sistemas de control (ver el comienzo de la sección 3.1) explican este esquema. Este modelo recibe cada hora la consigna generada a partir de las estrategias MPC o DAS. A continuación, se obtiene la evolución de la generación eléctrica y el estado de la planta en base a esta actualización horaria del punto de consigna, el valor real del recurso solar y los objetivos mencionados anteriormente.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA

En esta subsección se describen las características del recurso solar, su predicción a un día vista y los costos de penalización por MWh de desviación para el período de tiempo estudiado. La Fig. 3 muestra los valores promedio horarios de la potencia térmica máxima disponible en SF, $P_{SFmax_actual}(j)$, que se han obtenido usando datos de radiación solar y el modelo detallado de la planta CSP. Como puede observarse en la figura, a medida que avanzan los días, el perfil de $P_{SFmax_actual}(j)$ aumenta en intensidad y longitud. Además, aproximadamente los primeros setenta días presentan una alta variabilidad meteorológica, mientras que la estabilidad aumenta durante los últimos cincuenta días.

Una variable que puede influir en el desempeño de las estrategias de planificación es, evidentemente, el error de predicción de la máxima potencia térmica disponible en SF. En general, el error de predicción aumenta con la variabilidad meteorológica, es decir, los días de invierno presentan errores de predicción más altos que los días claros de verano. Con el fin de caracterizar el error de predicción a un día vista, la tabla 3 muestra algunas métricas a escala mensual, donde se han excluido las horas nocturnas. La media de la máxima potencia térmica disponible en SF se denomina \bar{P}_{SFmax_actual} . El error absoluto medio relativo y el error de sesgo medio relativo se denotan por $rMAE$ y $rMBE$ respectivamente, (vea [7] para las expresiones de estas métricas). Algunas comentarios pueden realizarse. La media de la máxima potencia térmica disponible en SF

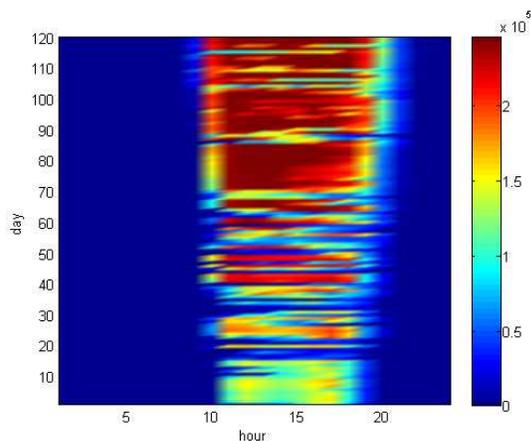


Figura 3: Valores medios horarios de la máxima potencia térmica disponible en SF (kW)

Tabla 3: Métricas de la predicción a un día vista para la máxima potencia térmica disponible en SF

Mes	$P_{SF_{max_actual}}$ (MW)	$rMAE$ (%)	$rMBE$ (%)
Feb.	82.5	32.1	3.8
Mar.	87.6	52.8	8.4
Abr.	152.4	25.7	-5.3
May.	164.4	17.8	10.6

aumenta cerca del 100% de Febrero a Mayo. El error relativo es mayor en los meses de invierno. De hecho, Marzo ha sido particularmente malo en el período estudiado. Finalmente, el error de sesgo puede variar ampliamente.

La estrategia MPC propuesta emplea un valor $\phi(j, i)$ constante. Concretamente, $\phi(j, i) = \bar{\phi}$, donde $\bar{\phi} = 7.69$ Euros/MWh es el valor medio de los costes de penalización durante el primer período de seis meses de 2013.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta subsección se muestran y comentan los resultados de la simulación. Es importante remarcar que hay muchos factores que afectan los resultados económicos de las estrategias de planificación, por ejemplo, las normas regulatorias del mercado de la electricidad, el clima local de la planta, las predicciones, el diseño de la planta, las hipótesis de simplificación aplicadas y los modelos utilizados [8]. Por tanto, las conclusiones extraídas de este caso de estudio podrían ser diferentes en otros escenarios. A continuación, se realizan los siguiente análisis: (1) comparación económica entre las estrategias MPC y DAS; (2) cálculo mensual del porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC respecto a la estrategia de DAS; y (3) análisis energético de ambas estrategias.

La tabla 4 muestra los resultados económicos totales de las estrategias DAS y MPC, donde puede

Tabla 4: Resultados económicos de las estrategias DAS y MPC

	DAS	MPC
Ingresos (Euros)	2148321	2228481
Penalizaciones (Euros)	38969	58949
Beneficios (Euros)	2109352	2169532

Tabla 5: Porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC respecto a la estrategia DAS

Febrero	Marzo	Abril	Mayo
4.4%	7.3%	3.4%	0.9%

apreciarse la mejora de la estrategia MPC en relación a los beneficios finales.

La tabla 5 muestra, para cada mes, el porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC con respecto a la estrategia DAS. Como puede observarse, la estrategia MPC obtiene mejoras sustanciales cuando la inestabilidad meteorológica está presente. De hecho, el mejor resultado se obtiene en marzo, es decir, el mes con peor predicción para la máxima potencia térmica disponible en SF. En este sentido, la estrategia MPC puede compensar situaciones de baja calidad en la predicción.

La tabla 6 muestra algunos resultados energéticos de las estrategias DAS y MPC. Se observa que la generación es ligeramente inferior cuando se ejecuta la estrategia MPC. Además, los valores asociados con la estrategia MPC para la desviación y la energía desenfoada son también peores. La mejora económica de la estrategia MPC queda reflejada en el parámetro *Precio de venta equivalente*. Este parámetro se define como la relación entre los beneficios totales y la generación total. Los peores resultados energéticos de la estrategia MPC se explican por su capacidad para admitir desviaciones con objeto de poder reservar energía para posibles mayores ingresos futuros, como su mayor nivel medio de energía en TES confirma. Esta capacidad se basa en el deslizamiento horario de la ventana MPC, que va incorporando nueva información (precisa o no). En cualquier caso, aunque la desviación total puede ser mayor con la estrategia MPC, esta estrategia la distribuye aprovechando las horas más favorables obteniendo una mejora de 2,33 % en el precio de venta equivalente. La Fig. 4 muestra la distribución de la generación eléctrica en relación con intervalos de precios para ambas estrategias. Se puede observar el desplazamiento de la generación de la estrategia MPC hacia precios altos en comparación con la estrategia DAS.

Las siguientes conclusiones pueden extraerse de-

Tabla 6: Resultados energéticos de las estrategias DAS y MPC

Valor medio horario	DAS	MPC	%
Generación (MWh-e)	12.42	12.37	-0.43%
Desviación (MWh-e)	1.46	1.76	20.68%
Energía desenf. (MWh-t)	4.26	4.39	3%
Nivel de energía en TES (%)	23.29	28.04	20.37 %
Prec. venta equiv. (Euros/MWh-e)	64	65.49	2.33%

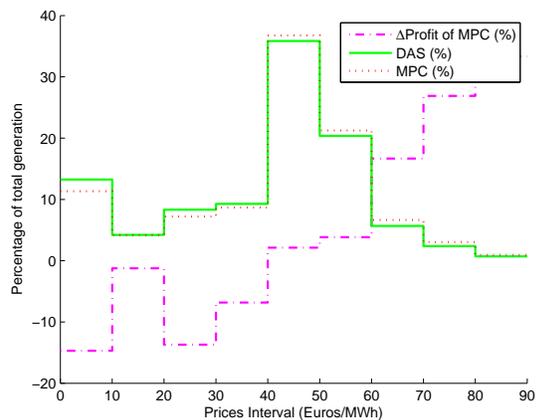


Figura 4: Distribución de la generación respecto a intervalos de precios para las estrategias DAS y MPC (%)

spués de analizar los resultados:

1. La estrategia MPC obtiene mayores beneficios totales que la estrategia DAS durante el período de cuatro meses.
2. La mejora en los beneficios de la estrategia MPC en relación con la estrategia DAS es mayor en períodos con baja calidad en la predicción del recurso solar. En este sentido, el porcentaje de mejora durante Marzo es superior al 7%.
3. La mejora de la estrategia MPC se basa en la replanificación horaria, que se adapta a la situación actual y desplaza la generación a horas de alto precio.

En opinión de los autores, la estrategia MPC propuesta podría alcanzar mejores resultados en las siguientes situaciones:

1. En el caso real de predicción imperfecta del precio de la energía, la estrategia MPC podría superar más claramente a la estrategia DAS gracias al conocimiento perfecto de los precios del día actual a partir de una hora determinada.
2. En escenarios con un mayor nivel de costes de penalización, el desempeño de la estrategia MPC puede tener más importancia.

3. Se pueden evaluar modelos más complejos para el término de penalización en la función de optimización.
4. Otros aspectos como analizar el efecto de la longitud de la ventana deslizante, o incluir términos robustos en el problema de optimización, son interesantes para investigar.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una estrategia MPC para abordar la planificación óptima de producción en plantas CSP con TES. Uno de los principales obstáculos presente en esta clase de problemas es el coste de penalización que aplica el mercado cuando se produce una desviación respecto al plan de producción comprometido. La existencia de este desvío se debe principalmente a la predicción limitada del recurso solar. El enfoque propuesto aborda este problema mediante dos actuaciones: (1) la replanificación periódica de la producción en busca de una solución más ventajosa económicamente haciendo uso de información actualizada de la predicción solar y el estado de la planta, y (2) el desarrollo, en el instante previsto para ello, de un plan de producción para el día siguiente más fácil de ejecutar gracias al uso de una mejor estimación para las condiciones iniciales del día siguiente. Para realizar las actuaciones anteriores, la función objetivo del MPC se construye con términos económicos en los que se emplean precios predichos de la electricidad y estimaciones de los costes de penalización. La estrategia propuesta se ha aplicado, en un contexto de simulación, a una planta CSP de 50 MW basada en colectores cilindro-parabólicos con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de participación en el mercado diario español de la electricidad y una perfecta predicción de precios. Este caso de estudio se basa en un período de cuatro meses para probar varias condiciones meteorológicas. El enfoque propuesto se ha comparado con una estrategia de referencia basada en una planificación a día vista. El análisis comparativo abarca resultados económicos y energéticos. Se observa una mejora económica significativa, especialmente en períodos con malas predicciones de recurso solar. Finalmente, se han indicado varias líneas de investigación futuras: 1) análisis de escenarios con predicciones imperfectas de los precios de la electricidad o niveles más altos de penalización, 2) desarrollo de métodos más complejos para estimar el costo de la penalización, y 3) provisión de robustez para el enfoque propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto

DPI2016-76493-C3-2-R del Ministerio de Economía y Competitividad (España).

Referencias

- [1] OMIE. Last access: 28.04.17. <http://www.omie.es/>, 2017.
- [2] The SAM website. Last access: 28.04.17. <https://sam.nrel.gov/>, 2017.
- [3] User's manual for TMY2s. Last access: 28.04.17. <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/>, 2017.
- [4] José Manuel Bravo, T. Alamo, and E. F. Camacho. Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on approximated reachable sets. *Automatica*, 42(10):1745 – 1751, 2006.
- [5] Isabel Llorente Garcia, Jose Luis Alvarez, and Daniel Blanco. Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar Energy*, 85(10):2443 – 2460, 2011.
- [6] Christoph Kost, Christoph M. Flath, and Dominik Most. Concentrating solar power plant investment and operation decisions under different price and support mechanisms. *Energy Policy*, 61(0):238 – 248, 2013.
- [7] Birk Kraas, Marion Schroedter-Homscheidt, and Reinhard Madlener. Economic merits of a state-of-the-art concentrating solar power forecasting system for participation in the Spanish electricity market. *Solar Energy*, 93(0):244 – 255, 2013.
- [8] Edward W. Law, Merlinde Kay, and Robert A. Taylor. Calculating the financial value of a concentrated solar thermal plant operated using direct normal irradiance forecasts. *Solar Energy*, 125:267 – 281, 2016.
- [9] Edward W. Law, Abhnil A. Prasad, Merlinde Kay, and Robert A. Taylor. Direct normal irradiance forecasting and its application to concentrated solar thermal output forecasting — A review. *Solar Energy*, 108(0):287 – 307, 2014.
- [10] David Q. Mayne. Model predictive control: Recent developments and future promise. *Automatica*, 50(12):2967 – 2986, 2014.
- [11] R. Sioshansi and P. Denholm. The value of concentrating solar power and thermal energy storage. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 1(3):173–183, Oct 2010.
- [12] J. Usaola. Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets. *Renewable Power Generation, IET*, 6(1):59–66, January 2012.
- [13] Manuel Jesús Vasallo and José Manuel Bravo. A MPC approach for optimal generation scheduling in CSP plants. *Applied Energy*, 165:357 – 370, 2016.
- [14] Michael Wittmann, Markus Eck, Robert Pitz-Paal, and Hans Muller-Steinhagen. Methodology for optimized operation strategies of solar thermal power plants with integrated heat storage. *Solar Energy*, 85(4):653 – 659, 2011. SolarPACES 2009.