

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch

Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado, Francisco Vázquez Serrano
Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales,
Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España,
e-mail: p12laorm@uco.es, juan.garrido@uco.es, fvazquez@uco.es

Resumen

Entre las fuentes renovables existentes, la energía eólica está alcanzando importantes tasas de producción dentro del escenario energético mundial. Dado que el control de los generadores eólicos es una disciplina muy técnica, las metodologías de enseñanza práctica son de especial relevancia y disponer de equipos que emulen el comportamiento de los sistemas reales es todo un reto. En este trabajo, se implementa el emulador de una turbina eólica utilizando generador eléctrico de inducción con doble alimentación (DFIG) de pequeña potencia, cuyo eje de rotación es solidario con un servomotor brushless de corriente continua que actúa de motor de arrastre simulando el par aerodinámico. Este servo está controlado por ordenador, que permite reproducir mediante simulación toda la componente aerodinámica y mecánica de la que carece la planta experimental, incluyendo el comportamiento del viento. Este trabajo presenta por una parte, la descripción de una planta de laboratorio que permite emular el funcionamiento de un aerogenerador de velocidad variable, y por otra, una búsqueda de control óptimo sobre el par aerodinámico a través del ángulo de paso de pala dentro de la zona nominal.

Palabras Clave: control de par, velocidad variable, paso variable, aerogenerador experimental, DFIG.

1 INTRODUCCIÓN

La energía eólica se ha convertido en la tecnología de generación eléctrica renovable más prometedora. En la Unión Europea, desde 1990 se ha mantenido un crecimiento anual del 20% en la producción de energía eólica (Boukhezzar, 2007). En España, la energía procedente por parte del viento supone un 19,54% de la cobertura de la energía actual, situándose incluso por delante de energías tradicionales como el carbón [1].

Para que esta fuente alternativa de energía siga siendo viable, es necesario que los generadores

eólicos continúen mejorando y también sus sistemas de control. En general, estos sistemas tratan de conseguir una generación eficiente de electricidad, suponiendo condiciones ambientales cambiantes que consisten en variaciones importantes tanto en la magnitud como en la dirección del viento. Esto no es nada fácil, ya que son sistemas multivariables con fuertes no linealidades y considerables restricciones como se muestra en la bibliografía [2].

Disponer de un sistema que represente un aerogenerador sin depender físicamente de los recursos naturales del viento y de una turbina real, resulta esencial [3]. Por ello, es necesario desarrollar equipos de ensayo en los que testear diferentes estrategias de optimización y control, así como para formar a futuros ingenieros que puedan integrarse en empresas del sector. Especialmente adecuada puede ser la emulación de las características aerolásticas de estos procesos, pues resultan especialmente difíciles de reproducir en laboratorios convencionales.

En los últimos años, ha habido un avance importante en el desarrollo de emuladores eólicos [4], [5]. La mayoría de ellos reproducen bastante bien el comportamiento mecánico de los sistemas de ángulo de paso de pala. Los motores de corriente continua son la elección más habitual para proporcionar una salida de par variable, puesto que éste es proporcional a la corriente de armadura del motor y mediante convertidores de potencia esta corriente puede ser modificada.

La tecnología predominante en la industria eólica es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). En este trabajo se presenta un emulador de planta eólica de velocidad variable basado en este tipo de generadores. En ellos, el estator funciona a la frecuencia de la red eléctrica y el rotor es alimentado por un convertidor electrónico de potencia a la frecuencia de la red multiplicada por el deslizamiento.

La planta experimental con la que se ha trabajado está dotada de una componente eléctrica que reproduce con gran fidelidad los principales aspectos de los aerogeneradores de gran potencia mediante el

uso del DFIG y su convertidor de potencia. Sin embargo, carece de toda la parte aerodinámica-mecánica de los aerogeneradores reales.

Para paliar esta carencia se ha desarrollado una capa software adicional implementada en Simulink, la cual permite emular el comportamiento mecánico del aerogenerador. Esta capa alberga todo el modelo matemático de la parte aerodinámica y del mecanismo de transmisión y permite reproducir la característica de extracción de energía mediante la representación del coeficiente de potencia. Esta capa además dota de versatilidad a la planta al poder parametrizar el modelo matemático con diferentes valores.

El objetivo de la planta es servir de banco de pruebas realista para estudio de diferentes metodologías de control y optimización sobre diferentes escenarios de aerogenerador.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: Primero se comentan los principios básicos de un aerogenerador y los distintos puntos de operación en los que suelen trabajar. Después se describen de forma resumida los distintos componentes que integran la planta y la red de comunicación que se ha diseñado para trabajar con la planta. Finalmente se describe el modelo diseñado en Simulink tanto del aerogenerador como del controlador para el pitch y se muestran algunos ensayos y pruebas realizadas.

2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN SISTEMA EÓLICO

Los componentes principales de un sistema de conversión de energía eólica son fundamentalmente el rotor, el sistema de transmisión y la unidad generadora de potencia.

El rotor comprende las palas, que es lugar donde se produce la conversión aerodinámica y el eje, que enlaza las hélices a la transmisión y a los servomotores de actuación sobre el ángulo de paso.

El sistema de transmisión transfiere la potencia mecánica capturada por el rotor hacia el generador eléctrico. Está compuesto por los ejes de alta y baja velocidad, la caja de cambios y los frenos. La caja de cambio incrementa la velocidad rotórica a valores más adecuados para el funcionamiento del generador.

El generador eléctrico es el elemento que convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica. Sus terminales están conectados a la red de consumo, o como en el caso de sistemas de velocidad variable, a un convertidor de frecuencia intermedio.

La figura 1 muestra un esquema del sistema eólico, así como de la estructura del sistema de control que se puede encontrar en diversas fuentes bibliográficas como [6]. El movimiento de la hélice es consecuencia de la fuerza del viento, que genera un par T_a que hace girar el mecanismo de rotación con una velocidad angular ω_r . Esta velocidad angular es proporcional a la velocidad del viento v .

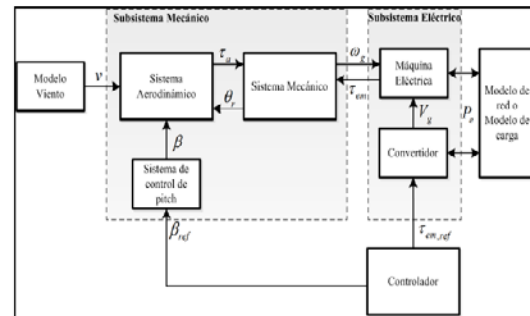


Figura 1: Estructura general de un sistema de conversión de energía eólica

Generalmente, para que la energía eléctrica se produzca de manera eficiente, es necesario que la velocidad rotórica sea aumentada antes de ser transmitida al eje del generador eléctrico. Por lo que es necesario un sistema de transmisión de engranajes, en cuya salida se obtiene la velocidad angular del eje de alta ω_g que es N veces mayor que la velocidad angular de eje de baja ω_r , lo que permite alcanzar magnitudes próximas al valor nominal requerido por el generador eléctrico.

La característica aerodinámica de la hélice puede ser modificada a través del sistema de control de posición, que hace girar cada pala un ángulo β sobre su propio eje. Este sistema permite adecuar la velocidad angular ω_r en función de las condiciones de viento.

El par en la salida del generador T_g es fruto de la velocidad angular en su eje. Este par es proporcional al par electromagnético del generador T_{em} dependiendo de la relación de transmisión entre engranajes N . T_{em} se controla a través de un convertidor de potencia.

2.1. REGIONES DE OPERACIÓN

El modo de funcionamiento de todo aerogenerador es dependiente de la intensidad de la velocidad del viento. Fundamentalmente se distinguen tres regiones de operación, como se muestra en la Figura 2.

En la región I (carga parcial) el aerogenerador opera a potencia mecánica subnominal y el objetivo es extraer toda la energía posible con objeto de mejorar la eficiencia.

En la región III (plena carga) el viento ha alcanzado una velocidad lo suficientemente alta para que la potencia producida se encuentre en niveles nominales. El objetivo en esta zona es mantener ese nivel de producción energética ante cualquier perturbación del viento para evitar posibles sobrecargas y fatigas estructurales. La región II es una región de transición entre ambas zonas.

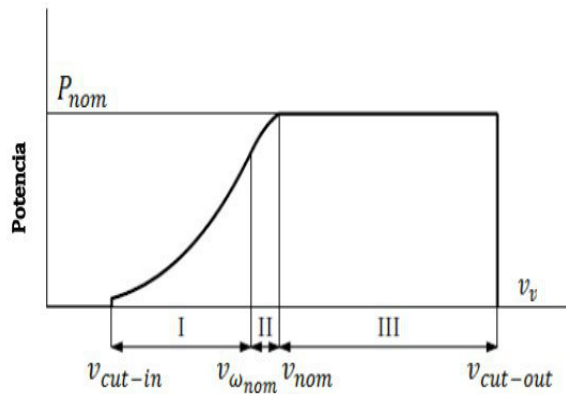


Figura 2: Regiones de operación en función de la velocidad del viento

3 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EXPERIMENTAL

La planta experimental que se utiliza a lo largo de este trabajo es un pequeño generador eólica de la empresa italiana De Lorenzo. En concreto el modelo elegido es el DL WPP. En la Figura 3 se muestra una imagen del mismo.

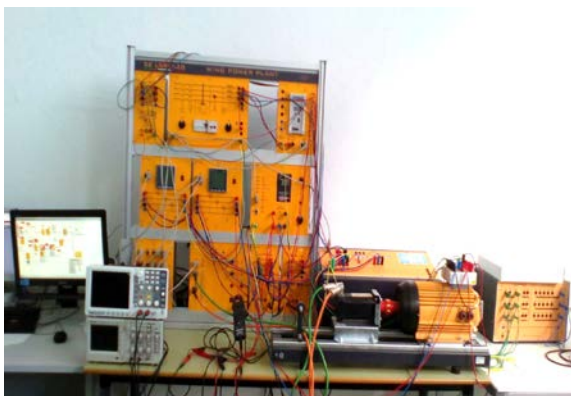


Figura 3: Planta eólica experimental

Esta planta permite estudiar diferentes situaciones de operación de un sistema aerogenerador con la actual topología de un DFIG y un convertidor de potencia back-to-back incluido entre el rotor de la máquina y la red eléctrica.

Concretamente, la planta consta de:

- Un servomotor brushless de corriente continua (potencia de 1 kW) con su correspondiente controlador, a través del cual se reproduce el par T_a obtenido de la parte mecánica-aerodinámica emulada.
- Un motor de inducción con devanados trifásicos tanto en el estator como en el rotor (DFIG) de un 1 kW de potencia nominal.
- Un rectificador AC-DC con entrada de línea trifásica y salida en un bus de corriente continua.
- Un inversor para motores trifásicos de inducción.

También consta de otros elementos que complementa a la planta, como son analizadores de red, interruptores, un módulo de alimentación trifásica, un relé combinado de sobrecorriente y falla de tierra y un transformador.

A la planta se le han añadido los sistemas necesarios para establecer la comunicación y control de los distintos dispositivos gracias a:

- Un hub para comunicación Modbus.
- Una pasarela de comunicación TCP/IP MODBUS

El flujo de información se transmite entre los diferentes elementos a través de un bus interno de comunicación bajo el protocolo Modbus RTU. Este bus de comunicación también se utiliza para la transmisión de los datos hacia un SCADA abierto sobre el que se pueden realizar modificaciones.

3.1. RED DE COMUNICACIÓN

La comunicación establecida consta de un ordenador (en el que se encuentra el SCADA), otro PC donde se desarrolla la capa de emulación programada con la planta experimental y los distintos módulos de la planta (motor brushless, analizadores de red, inverter, etc). Ambos ordenadores se comunican con los diversos módulos de la planta a través de una pasarela de comunicación Modbus RTU-TCP/IP. Por lo tanto se trata de una comunicación híbrida, en la que por un lado, los dos ordenadores actúan como maestros TCP/IP conectados a la pasarela se encargada de hacer de semáforo, y por el otro, los módulos de la planta desempeñan el papel de esclavos Modbus RTU.

En concreto los esclavos están distribuidos a través de dos tipos redes de comunicación independientes: RS-485 y RS-232. La Figura 4 muestra la solución establecida a través de una pasarela Modbus RTU-TCP/IP

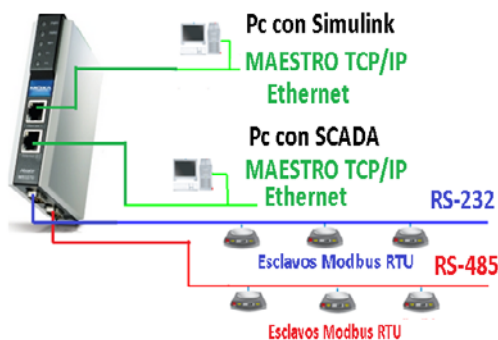


Figura 4: Comunicación establecida

Los datos procedentes de Modbus TCP/IP hacia el Pc y viceversa, se transmiten y reciben desde Simulink a través de funciones .m, donde se encapsulan las tramas basado en el entramado según protocolo Modbus.

4 EMULACIÓN DE LA COMPONENTE MECÁNICA Y AEROLÁSTICA

4.1. MODELO MATEMÁTICO

La potencia mecánica extraída del viento por parte de un aerogenerador se puede expresar como:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

donde, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), A es el área efectiva de la turbina (m^2), v es la velocidad del viento (m/s) y C_p es definido como el coeficiente de potencia que depende a su vez del coeficiente de velocidad específica (λ) y del ángulo de paso de pala o pitch (β). Éste representa la eficiencia de la turbina.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

donde ω_r es la velocidad angular del rotor y R es el radio del rotor.

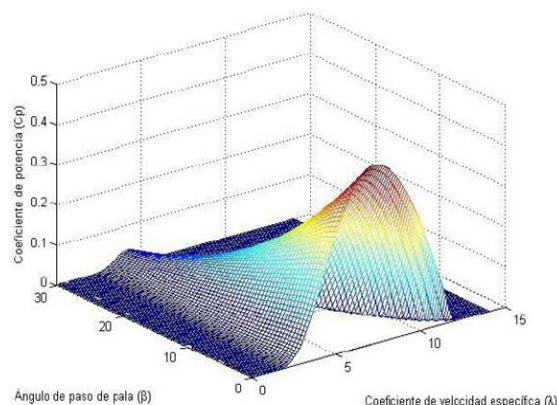
Como se muestra en [7], el coeficiente de potencia se puede aproximar a través de las expresiones analíticas (3) y (4).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \beta^{C_5} - C_6 \right) e^{-\frac{C_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

$$\lambda_i = \left[\left(\frac{1}{\lambda + C_8 \beta} \right) - \left(\frac{C_9}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

La Figura 5 representa el coeficiente de potencia con los coeficientes $C_1=0.73$, $C_2=151$, $C_3=0.58$,

$C_4=0.002$, $C_5=2.14$, $C_6=13.2$, $C_7=18.4$, $C_8=-0.02$, $C_9=-0.003$.


 Figura 5: Curvas de superficie de los coeficientes de potencia C_p frente a λ y β

4.2. MODELO SIMULINK

Como se ha comentado anteriormente, se ha desarrollado una capa software adicional implementada en Simulink con la parte aerodinámica-mecánica necesaria. Esta capa incorpora las expresiones (1)-(4), que junto a las ecuaciones del sistema mecánico de un aerogenerador expresada por (5)-(9) permite simular y transferir la consigna de par aerodinámico sobre el motor de arrastre. La consigna de par depende de ciertos parámetros del aerogenerador emulados, como pueden: el radio del rotor, el ángulo de paso de pala, la velocidad del viento, etc.

$$J_t \frac{d\omega_r}{dt} = T_a - B_t \omega_r - T_{em} \quad (5)$$

$$J_t = J_r + N^2 J_g \quad (6)$$

$$B_t = B_r + N^2 B_g \quad (7)$$

$$T_g = N T_{em} \quad (8)$$

$$N = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (9)$$

Se ha concebido esta capa software como algo versátil, que permita parametrizar un modelo con diferentes valores de un aerogenerador que sean coherentes con la potencia nominal del generador eléctrico.

En una búsqueda bibliográfica [8], [9] y a modo ilustrativo se han obtenido los parámetros de un aerogenerador de pequeña potencia de 1kW.

La Tabla 1 y Tabla 2 recogen los principales parámetros aerodinámicos y mecánicos, respectivamente. El coeficiente de potencia elegido es el mismo que el representado en la Figura 1.

Tabla 1: Parámetros aerodinámico de la turbina

Parámetros	Valor
Velocidad nominal del viento v	8.7 m/s
Rango de velocidad de la turbina ω_r	190-410 rpm
Radio de las palas R	1.45 m
Coefficiente de velocidad específica λ_{opt}	7.2
Máximo coeficiente de potencia $C_{p,max}$	0.44
Densidad del aire ρ	1.1225 kg/m ³

Tabla 2: Parámetros mecánicos del sistema

Parámetros	Valor
Inercia del eje de baja velocidad J_r	0.028 kg/m ²
Coefficiente de fricción viscosa en los cojinetes del rotor (eje de baja velocidad) B_r	0 N·m·seg/rad
Inercia del mecanismo en la parte de alta velocidad J_g	0.0001 kg/m ²
Coefficiente de fricción viscosa en los cojinetes del generador (eje de alta velocidad) B_g	0 N·m·seg/rad

El bloque diseñado en Simulink, dispone de tres entradas (velocidad del viento, par electromagnético y pitch), una salida (par aerodinámico). Además contiene una máscara para definir los parámetros que caracterizan el modelo del sistema aerodinámico

En el interior del bloque principal se encuentran tres estructuras. La primera de ellas realiza un filtrado de las señales de velocidad del viento y del ángulo de paso de pala, la segunda realiza el cálculo del coeficiente de potencia a través del coeficiente de velocidad específica y la tercera obtiene los valores del par aerodinámico y velocidad angular del generador.

A través de la comunicación establecida, con los bloques de Simulink TCP/IP Receive y TCP/IP Send se envía al motor brushless consignas de par que emulan el par aerodinámico provocado por el viento y se reciben valores como la velocidad angular a la que está girando el motor gracias a la lectura de un encoder que tiene integrado.

4.3. CONTROL DEL DFIG

Actualmente, gracias al sistema de comunicación implantado en el entorno Simulink, la planta permite el funcionamiento completo como un aerogenerador DFIG. En la Figura 6 y 7 se muestran los diferentes lazos de control implementados según la región de

funcionamiento, que depende de la velocidad del viento.

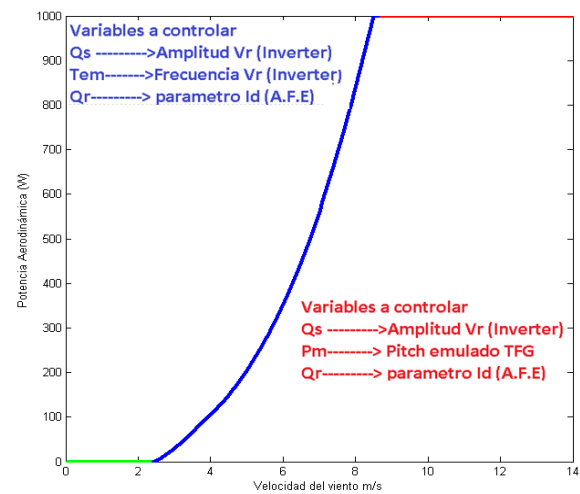


Figura 6: Lazos de control a implementar sobre la planta en función de la zona de operación

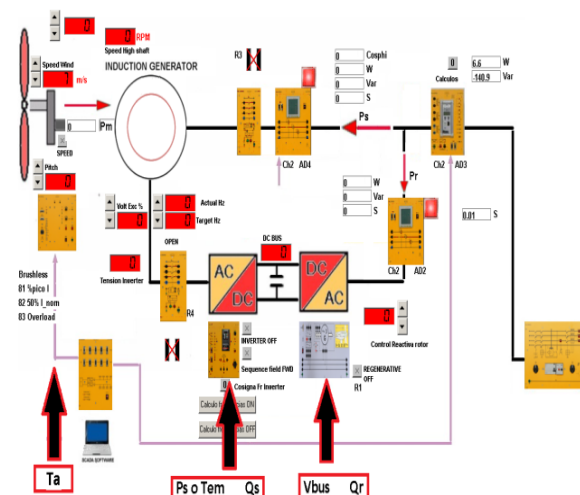


Figura 7: Esquema de control implantado en la planta WPP_DL

En la Figura 6 y 8 se muestran el diseño de los distintos puntos de trabajo de la planta, obtenidos a partir de una función en Matlab que permite obtener las distintas curvas características del modelo elegido. Concretamente se realiza un barrido de velocidad angular de la turbina y velocidad de viento para un pitch de 0 grados ($C_{p,max}$), obteniendo para cada velocidad de viento la potencia aerodinámica máxima y la velocidad angular de la turbina necesaria para ello.

Dentro de la región I, para obtener cada punto de máxima potencia es necesario un par T_{em} que la capa software debería imponer a través del controlador del lado del rotor (RSC, inverter) para extraer la máxima potencia.

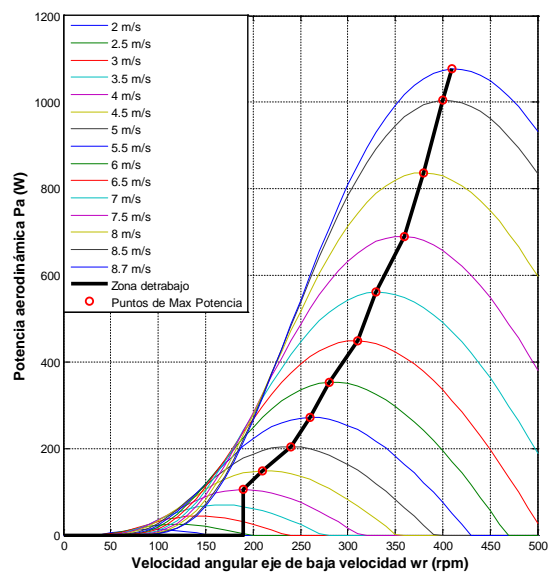


Figura 8: Curva potencia-velocidad de turbina

5 CONTROL DEL PAR AERODINÁMICO

5.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

El modelo de planta diseñada puede operar en dos zonas de trabajo, que se distinguen en función de la velocidad del viento:

- Velocidades de viento inferiores a 8.7 m/s (zona de seguimiento de puntos de máxima potencia).
- Velocidades de viento superiores a 8.7 m/s (zona nominal).

Como podemos ver en la figura 8, para vientos superiores a 8.7 m/s el aerogenerador no debe generar más potencia siendo el valor del ángulo de paso de pala, en ese momento 0 grados, el cuál comienza a ascender conforme aumenta la velocidad del viento. El valor de velocidad angular en el eje de baja velocidad es de 413 rpm, la de alta es de 3100 rpm (controlado por el par electromagnético (T_{em}) y el par aerodinámico $T_a=25$ N·m. En estos valores debe permanecer el aerogenerador aunque la velocidad del viento experimente crecimiento. Mediante la variación del ángulo de paso de pala se mantiene el par aerodinámico T_a a su valor nominal. Este es el objetivo del control que se va a realizar.

5.2 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL PAR AERODINÁMICO EN LA REGIÓN NOMINAL

Como primera prueba de control sobre la planta emuladora, se establece un control de par

aerodinámico en la región nominal manipulando el ángulo de paso de pala virtual.

Previo al diseño e implementación del controlador se establece un análisis e identificación de la dinámica del par aerodinámico frente a cambios en el ángulo de paso de pala y viento.

La identificación de la dinámica de la velocidad se lleva a cabo en la región 3. Esta región se alcanza para una velocidad de viento de 8.7 m/s y un pitch de 0°. Se han utilizado varios puntos de identificación para diferentes velocidades de viento comprendidas entre los 8.7 m/s y los 14 m/s. Para cada velocidad del viento, a su vez, se han establecido diferentes rangos de identificación de ángulo de paso de pala, desde 0° hasta 12°

Recurriendo a la función de linealización de Matlab, se han obtenido varios modelos de espacio de estado lineal en tiempo continuo alrededor del punto de operación que se ajustan a dinámicas de primer orden. Se observan pequeñas variaciones tanto en la ganancia como en la constante de tiempo del modelo para diferentes pitch y velocidades de viento.

Finalmente se decide elegir una dinámica intermedia (10) de entre las distintas obtenidas, en concreto la obtenida para con el punto de operación a una velocidad de 9.5 m/s y un valor de ángulo de pala de 3.6 grados.

$$T_a(s) = \frac{-7.632}{s+4} Pitch(s) + \frac{2.0711}{s+0.25} v(s) \quad (10)$$

5.3 IMPLEMENTACIÓN

Actualmente los tipos de control de pitch más utilizados en el ámbito de los aerogeneradores son el típico PI como en [10], [11]. Por dicho motivo, para la elección del controlador de par aerodinámico a través del pitch se decide utilizar estos controladores. Cuando se realiza la optimización de sistemas de control se pueden considerar diferentes índices de control óptimo como ISE (Integral Square Error), IAE (Integral Absolute Error), ITAE (Integral of Time Absolute Error), ITSE (Integral of Time Weighted Squared Error). En este caso se usará el índice IAE.

Con la aspiración de encontrar los valores de los parámetros del PI que proporcionen el IAE más bajo posible frente a perturbación del viento, se ha utilizado en un primer momento la herramienta PID Tuner de Matlab, la cual permite obtener un diseño de forma sencilla fijando la robustez (margen de fase) y modificando la frecuencia de cruce de ganancia o viceversa. Al ser esto último una tarea tediosa de parametrizar manualmente, se decide además utilizar la toolbox de Matlab llamada

Optimtool, con la cual mediante algoritmos genéticos se ajustan los mejores parámetros del PI que proporcionen el IAE más bajo. El controlador PI se ha implementado en Simulink mediante un bloque Embedded Matlab Function. Se ha usado una estructura convencional PI no interactiva con anti-windup.

El uso de control feedforward o control anticipativo ya se viene utilizando de diversas formas en el control de los aerogeneradores DFIG, como podemos observar en trabajos como [12], [13]. El control feedforward se puede combinar con un control PID de forma que se sumen las ventajas de cada uno. La unión de los dos controles puede mejorar significativamente el desempeño del sistema en aquellos casos en los que una perturbación puede ser medida antes de que afecte a la salida del proceso. Gracias a esto, el controlador PID encontrará un error menor que corregir.

6 SINTONÍA FINAL Y RESULTADOS

Se implementan los controladores PI y PI con feedforward en Simulink, buscando la mejor parametrización posible de los parámetros K_p , T_i que obtengan un índice IAE lo más bajo posible, gracias a la utilización de la herramienta PID Tuner de Matlab y de los algoritmos genéticos de la toolbox de Matlab Optimtool.

Como primer método de sintonía del PI se realizan diversos diseños a partir del modelo obtenido (10) con la herramienta PID Tuner, que después son implementados en el modelo no lineal ante un viento creado con una función.m que consta de un valor inicial promedio de 9.5 m/s y una componente sinusoidal de 0.5 m/s durante 900 segundos. Se obtienen los parámetros variando el margen de fase entre 80, 82, 84, 86, 88 y 90 grados y dejando constante la frecuencia de cruce de ganancia en 13.3 rad/s, la cual corresponde a un tiempo de respuesta de 0.15 segundos (tiempo de muestreo).

Como segundo método de sintonía del PI se realizan múltiples búsquedas con el modelo no lineal utilizando algoritmos genéticos, buscando los parámetros que obtienen un IAE más bajo ante un viento con las condiciones de la parametrización anterior. Estos resultados son mejores que los obtenidos manualmente con la herramienta PID Tuner.

Se escogen los controladores que obtienen un IAE más bajo y se prueban ante un viento aleatorio fuera del punto de operación en el que fueron diseñados (Figura 9). En concreto se trata de un viento con un valor inicial promedio de 9.5 m/s, una componente

sinusoidal de 0.5 m/s, una componente turbulenta con desviación típica de 1 m/s, una componente rampa de +3 m/s (400-500 s) y una componente ráfaga de -2 m/s (700-800 s).

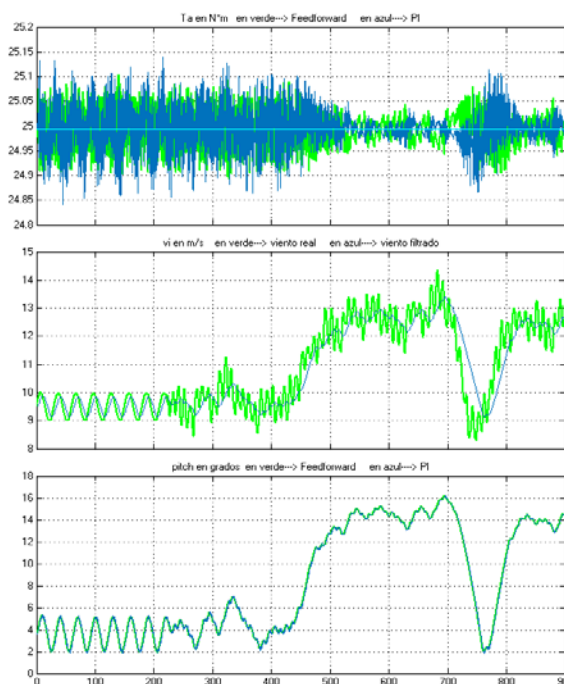


Figura 9: Señales ‘y’, ‘perturbación’ y ‘u’ para PI con y sin feedforward ante viento aleatorio fuera del punto operación

Tabla 1: Parámetros de los controladores

Controlador PI			
Con feedforward	Kp -0.896	Ti 0.231	IAE 16.54
Sin feedforward	Kp -1.189	Ti 0.124	IAE 23.28

Como se observa en la tabla 1, se ha obtenido un IAE de 16.54 con margen de fase de 88 grados, margen de ganancia infinito y frecuencia de cruce de ganancia de 6.98 rad/s para el controlador PI con feedforward y un IAE de 23.28 con margen de fase de 73.5 grados, margen de ganancia infinito y frecuencia de cruce de ganancia de 10.7 rad/s para el controlador PI sin feedforward.

Como podemos observar, ambos controladores consiguen mantener el valor de la señal ‘y’ (T_a) muy próximos al valor de referencia deseado y existe muy poca diferencia respecto a la señal de control ‘u’ (pitch). Se puede apreciar como el control PI sin feedforward presenta algunos picos más abruptos a la hora de controlar la señal ‘y’. Además se puede percibir como el controlador PI con feedforward detecta la variable perturbadora y toma la acción

correctiva antes de que la variable controlada se desvíe de su punto de referencia.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha construido un banco de pruebas que permite emular el funcionamiento de un aerogenerador VS-VP experimental de tecnología similar a los equipos de mediana y gran potencia, y sobre el cual es posible aplicar diferentes estrategias de control y extrapolar los resultados hacia otros equipos de mayor potencia.

Se ha implementado un controlador para la región de funcionamiento nominal, en la que se controla el par aerodinámico al valor nominal del DFIG a través del ángulo de paso de pala. Tras sintonizar los parámetros de los controladores (PI, PI con feedforward) individualmente a través de algoritmos genéticos con la toolbox de Matlab Optintool, queda de manifiesto que para el aerogenerador diseñado, el mejor controlador que obtiene un IAE más bajo es el PI con feedforward optimizando en un 29% dicho índice.

Como trabajo futuro se plantea el estudio de técnicas de minimización de interacción entre variables de control a través de redes de desacoplo. Así mismo se plantea trabajar con software de diseño aerolástico, en concreto FAST, habitualmente utilizado por las compañías de ingeniería eólica, como IBERDROLA o GAMESA, con el objetivo de unir este software de simulación a la planta eléctrica, de forma que se realice el mismo tipo de estrategias: simulación de la parte aerolástica y experimentación real con equipo eléctrico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Excelencia P10-TEP-6056 Junta de Andalucía.

Se agradece a la Universidad de Córdoba por la beca concedida a Manuel Lara para el desarrollo de este trabajo "II Becas Semillero de Investigación".

Referencias

- [1] AEE (2015), Eólica'15, Asociación Empresarial Eólica
- [2] Nagai Baku M, Ameku Kazumasa, Roy Jitendro Nath. Performance of a 3 kW wind turbine generator with variable pitch control system. *Appl Energy* 2009:1774–82
- [3] J. Vaheeshan, V. Vihirthanath, S.G. Abeyaratne, A. Atputharajah, G. Ramatharan

(2011) Wind Turbine Emulator, 6th International Conference on Industrial and Information Systems, Sri Lanka.

- [4] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Elect. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, May 1996.
- [5] A. Sajadi, à. Rosáaniec, M. Káos, P. Biczel, and K. A. Loparo, "An emulator for fixed pitch wind turbine studies," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 391-402, 2016
- [6] Gonzalo Abad, Jesús López, Miguel A. Rodríguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski. "DOUBLY FED INDUCTION MACHINE". JOHN WILEY & SONS. 2011
- [7] F. Vázquez, M. González, J. Garrido, and F. Morilla, "Control Multivariable: aplicación al control de un aerogenerador," presentado en el X Simposio CEA de Ingeniería de Control. 2012.
- [8] AEOLOS WIND TURBINE <http://www.windturbinestar.com/Aerogenerador-1kw.html> (Último acceso el 01/06/2017).
- [9] ENAIR <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/E30PRO> (Último acceso el 01/06/2017).
- [10] M. Q. Duong, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, and E. Ogliari, "Pitch angle control using hybrid controller for all operating regions of SCIG wind turbine system," *Renewable Energy*, vol. 70, pp. 197-203,2014.
- [11] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, and X. Fu, "Pitch angle control for variable speed wind turbines," in *Deregulation, Restructuring, and Power Technologies*, Nanjing China, 2008, pp. 2691-2696.
- [12] K. Selvam, S. Kanev, J. v. Wingerden, J. Engelen, and M. Verhaegen, "Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 19, pp. 72-91. 2009.
- [13] Chengyuan Yu, Dongdong Li "Fuzzy-PI and feedforward control strategy of DFIG wind turbine," 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia 2012, art. no. 6303299.