

# 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](mailto:servipub@uniovi.es)

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

## Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

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

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



## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

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

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarreño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/>	
<b>Automar</b>	
<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/> <b>Bioingeniería</b> <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/>	
<b>Control Inteligente</b>	
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/> <b>Educación en Automática</b> <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>	
<b>HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO .....</b>	<b>793</b>
<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>	
<b>SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS .....</b>	<b>806</b>
<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>	
<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....</b>	<b>821</b>
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
<b>INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>829</b>
<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>	
<b>DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO .....</b>	<b>844</b>
<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>	
<b>CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....</b>	<b>852</b>
<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, Dario 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>	

# AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL

Marina P. Portilla, José A. Somolinos, Amable López

E.T.S.I. Navales, U. Politécnica de Madrid. {marinap.portilla; joseandres.somolinos; amable.lopez}@upm.es

Rafael Morales, Eva Segura

E.I. Industriales de Albacete, U. de Castilla-La Mancha. {rafael.morales; eva.segura}@uclm.es

## Resumen

*En los últimos años ha habido una gran evolución en los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las mareas y corrientes marinas. Los dispositivos cuya profundidad de operación no excede de los 40 metros, denominados TECs de primera generación, suelen fijarse al fondo marino mediante una estructura de obra civil, por lo que requieren que sus góndolas sean extraídas de sus bases para realizar las operaciones de mantenimiento. Actualmente se necesitan buques de muy altas prestaciones muy costosos para realizar las operaciones de extracción de las góndolas. La automatización de estas maniobras de emersión e inmersión de las góndolas conducirá, sin duda, a una importante reducción de costes, precisando buques de menores prestaciones para llevar a cabo estas tareas. En este trabajo se presenta un modelo dinámico simple, de dos grados de libertad, para un TEC de primera generación, además de un sistema de control de profundidad y/u orientación mediante actuadores pasivos, utilizando un sistema de agua de lastre interno a la góndola. Por último, se presentan diferentes simulaciones numéricas, tanto de la maniobra de emersión para proceder a las tareas de mantenimiento generales, como de la maniobra para la limpieza de palas, con el fin de poder juzgar la eficacia del modelo dinámico y del regulador diseñado.*

**Palabras clave:** Convertidores de energía de las corrientes marinas, energía renovable marina, modelado dinámico, control no lineal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía de las mareas y corrientes marinas es una fuente renovable que puede ayudar a alcanzar los objetivos de cambio climático marcados por la UE además de aportar un valor adicional en un mercado energético futuro con respecto a otras fuentes de energía renovable gracias a su alta previsibilidad ([3] y [6]). Es por esto que varios fabricantes están desarrollando dispositivos para su aprovechamiento en áreas donde la profundidad no excede los 40 metros ([2], [1], [13], [7]), como el mostrado en la figura 1.

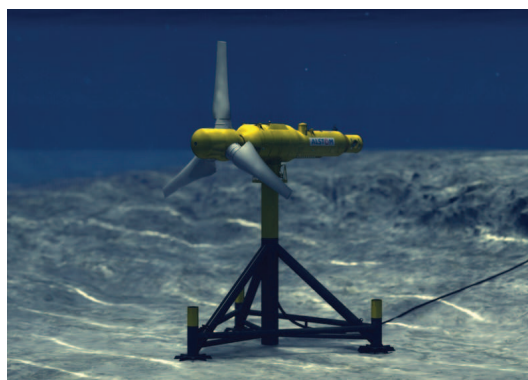


Figura 1: TEC de primera generación

Al tratarse de dispositivos completamente sumergidos, las tareas de mantenimiento de las unidades principales de potencia requieren de su extracción del lecho marino [10], [12]. Estas maniobras se realizan utilizando buques especiales, de muy altas prestaciones, equipados con posicionamiento dinámico, grúas, etc. además realizarse durante una ventana temporal apropiada, lo que da como resultado un alto costo en estas tareas. En la figura 2 se muestra un ejemplo de buque necesario para el manejo de la unidad de potencia principal de un TEC de primera generación.



Figura 2: Buque sofisticado manejando una unidad de generación de energía

Para promover la viabilidad de este tipo de dispositivos resulta primordial la reducción de costos [11], ya sean de instalación, operación o de mantenimiento. La reducción de estos últimos pasa por la realización de maniobras de emersión y de inmersión de manera automática ([4], [8]). Esto puede llevarse a cabo mediante un sistema de las-

tres que, generando únicamente fuerzas verticales, permita controlar sus movimientos de emersión y de inmersión. Esta automatización permitirá reducir el número y duración de los procedimientos de instalación, reducirá el coste de la energía produciendo un aumento en la rentabilidad del proyecto, además de ser precisa una menor intervención humana, maximizando las ventanas temporales favorables y sustituyendo los buques altamente especializados por buques de propósito general, y por tanto menos costosos, como remolcadores, para llevar a cabo estas tareas. (Ver figura 3, de [9]).



Figura 3: Ejemplo de maniobra de inmersión automatizada con control de agua de lastre

Este trabajo presenta un modelado dinámico muy simple para un TEC de primera generación, cuya forma ha sido adaptada para incluir los tanques de lastre necesarios. Se presenta también un sistema de control no lineal basado en un término de desacoplamiento y compensación de términos no lineales, para el control en bucle cerrado de la profundidad y/u orientación del dispositivo, asegurando un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emersión e inmersión manejando actuadores que generan fuerzas únicamente hidrostáticas.

## 2. Modelo Dinámico

El TEC presentado en este trabajo ha sido diseñado para realizar maniobras de emersión/inmersión automáticas. Para ello se ha tenido que alargar la góndola e incluir los tanques de lastre ([5]) tal y como muestra la figura 4.

Para el diseño del modelo para control se utilizan dos sistemas de referencia, por un lado un sistema de referencia fijo, denominado  $S_0$  y un sistema de referencia local, denominado  $S$ . Las coordenadas del dispositivo se definen con respecto a  $S_0$ , cuyo eje  $x$  es perpendicular al plano del dispositivo, horizontal y sigue la dirección de la corriente, el eje  $z$  es vertical con orientación ascendente; y el eje  $y$  conforma un sistema dextrógiro. El origen de  $S_0$  está situado sobre la vertical del dispositivo y en el nivel nominal del mar.

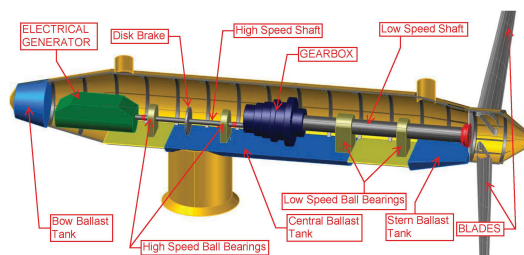


Figura 4: Aspecto de la góndola central modificada del TEC de primera generación

Para la obtención del modelo dinámico para control, de dos grados de libertad (la profundidad,  $z(t)$ , y la rotación alrededor del  $y$ ,  $\theta(t)$ ) se utilizan únicamente dos masas concentradas [9] tal y como se ve en la figura 5, donde se representa su posición así como las fuerzas hidrostáticas aplicadas y el criterio de signos. En esta figura se puede ver la existencia de un pequeño desplazamiento vertical  $\epsilon_z$  de  $m_2$  con el que se modela que el centro de gravedad del dispositivo está por debajo de su centro de carena para asegurar su estabilidad.

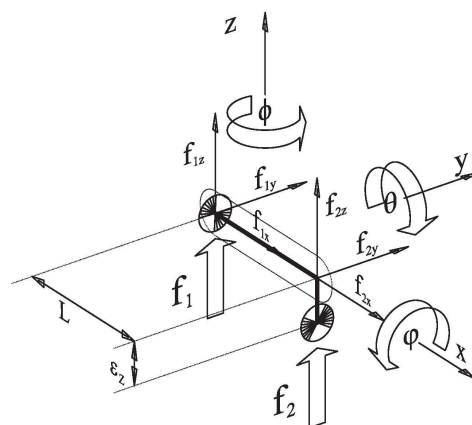


Figura 5: Modelo dinámico de dos masas concentradas

Se consideran por separado la dinámica de traslación según el eje  $z$  y la dinámica de rotación con respecto al eje  $y$ , un ángulo  $\theta$ . Comenzando por la dinámica de traslación vertical se tiene:

$$(m_1 + m_2 + m_{Add}) \ddot{z} + \nu_z \cdot \text{sign}(\dot{z}) \cdot \dot{z}^2 = f_g + f_b \quad (1)$$

donde los subíndices  $i = 1, 2$  representan la masa a la que hacen referencia,  $m_{Add} = m_{Add}(z(t), \theta(t))$  expresa la masa añadida, el coeficiente  $\nu_z$  denota el coeficiente de fricción y  $f_g$  y  $f_b$  son respectivamente las fuerzas de gravedad y de empuje, que se calculan como:

$$\begin{aligned} f_{ig} &= -m_i \cdot g \\ f_{ib} &= V_i(t) \cdot \rho_w \cdot g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \frac{1}{2} \cdot [V_0 + V_{Compr}] - V_{Buoy-i} + \Delta V_{u-i} \\ V_{Buoy-i}(t) &= V_{Buoy-i}(z(t), \theta(t)) \\ V_{Compr}(t) &= \gamma_0 \cdot z(t) \end{aligned}$$

donde  $f_g = f_{1g} + f_{2g}$  y  $f_b = f_{1b} + f_{2b}$ ,  $g$  es la constante de la gravedad,  $V_i(t)$  expresa el volumen sumergido,  $V_0$  representa el volumen nominal del dispositivo por lo que  $m_1 + m_2 = \rho_w \cdot V_0$ ,  $V_{Buoy-i}$  es la pérdida de empuje que se produce cuando el dispositivo no está completamente sumergido,  $\gamma_0$  denota el coeficiente de compresibilidad,  $\Delta V_{u-i}(t)$  es el volumen de control,  $V_{Compr}(t)$  expresa la pérdida de volumen debido a la compresibilidad,  $\rho_w$  es la densidad del agua del mar, considerada constante.

En lo relativo al movimiento de rotación se tiene:

$$(I_{yy} + I_{yy-Add}) \ddot{\theta} + \nu_\theta \cdot \text{sign}(\dot{\theta}) \dot{\theta}^2 = (f_1 - f_2) \frac{LC_\theta}{2} + f_2 \epsilon_z S_\theta$$

$$I_{yy} = (m_1 + m_2) \frac{L^2}{4} + m_2 \epsilon_z^2 \quad (3)$$

donde  $S_\theta \equiv \sin \theta$ ,  $C_\theta \equiv \cos \theta$ ,  $I_{yy}$  es el momento de inercia en el eje  $y$ ,  $I_{yy-Add}$  representa el efecto de la masa añadida,  $\nu_\theta$  es el coeficiente de fricción,  $L$  indica la eslora nominal del cilindros y  $\epsilon_z$  denota el desplazamiento vertical de  $m_2$  comentado anteriormente.

Finalmente se define la matriz de desacoplamiento que relaciona las fuerzas  $f_z$  y momentos  $\Gamma_y$ , con los volúmenes de control  $V_{u-i}(t)$ :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix}}_{\Xi} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_w \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u,1} \\ \Delta V_{u,2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (4)$$

Se observa que la matriz  $\mathbf{M}$  es invertible para todo el rango deseado de  $-\pi/2 \leq \theta \leq 0 \text{ rad}$  debido al desplazamiento  $\epsilon_z$ , incluido en el modelo.

Finalmente, el modelo dinámico en forma matricial, se expresa como (donde  $\mathbf{q}(t) = [z(t) \ \theta(t)]^T$ ):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix}}_{\Xi} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_w \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u,1} \\ \Delta V_{u,2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (5)$$

### 3. Esquema de Control

La figura 6 muestra el esquema de control propuesto de dos grados de libertad para un TEC de primera generación. El regulador, con realimentación no lineal,  $\mathbf{q}(t) = [z(t), \theta(t)]^T$ , cumple:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{q}(t)] \cdot [\mathbf{B} \cdot \mathbf{\Gamma}(t) + \mathbf{V}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))] \quad (6)$$

donde  $\mathbf{\Gamma}(t)$  es:

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q(t)] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q] d\tau \quad (7)$$

siendo  $\mathbf{e}_q(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}^*(t)$  y  $\mathbf{K}_P$ ,  $\mathbf{K}_I$  y  $\mathbf{K}_D \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$  matrices diagonales definidas positivas.

Como se puede observar en la figura 6, el esquema de control está compuesto por un término de compensación y una matriz de desacoplamiento, basado en el modelo dinámico del TEC propuesto, que obtiene una relación entre entrada/salida lineal y desacoplada; y un bucle externo, basado en una acción de control lineal estabilizante. Los términos,  $\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}(t))$  y  $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(t)$ , son computados en línea, ya que las matrices que componen el bucle de realimentación dependen de los valores actuales de las variables internas del sistema  $\mathbf{q}$  y  $\dot{\mathbf{q}}$ . Por otro lado, el objetivo principal del bucle exterior es estabilizar el sistema global. Hay que reseñar que se está operando con un sistema multivariable, y dependiente del tiempo de  $2 \times 2$ .

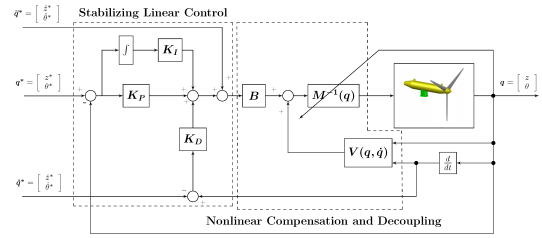


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control no lineal propuesto

Sustituyendo las expresiones (6) y (7) en la ecuación obtenida del modelo dinámico diseñado, se tiene:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q(\tau)] d\tau \quad (8)$$

La señal del error en bucle cerrado,  $\mathbf{e}_q$  evoluciona según la siguiente ecuación diferencial de  $2 \times 2$ , de tercer orden:

$$\mathbf{e}_q^{(3)}(t) + \mathbf{K}_D \ddot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_I \mathbf{e}_q(t) = 0 \quad (9)$$

Las matrices del regulador,  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  deben diseñarse de modo que se ajuste al siguiente polinomio de  $2 \times 2$ , matricial, complejo y diagonal,  $\mathbf{p}(s)$ , definido como:

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} s^3 + \mathbf{K}_D s^2 + \mathbf{K}_P s + \mathbf{K}_I = 0 \quad (10)$$

como polinomios Hurwitz de tercer grado. La estabilidad de la expresión (9) puede estudiarse utilizando el criterio de Routh-Hurwitz. Teniendo en cuenta que las matrices  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  son diagonales, la estabilidad de  $\mathbf{e}_q(t) = [e_z(t); e_\theta(t)]^T = [z(t) - z^*(t); \theta(t) - \theta^*(t)]^T$ , puede estudiarse de forma independiente. Aplicando el criterio de Routh-Hurwitz se obtienen las siguientes condiciones de



estabilidad: (i)  $K_{D_i}, K_{P_i} > 0$ ; (ii)  $0 < K_{I_i} < K_{D_i} K_{P_i}$  para  $i = z, \theta$ .

$$\mathbf{p}^{\text{des}}(s) = (\mathbf{I}^{2 \times 2} s^2 + 2\zeta_c \omega_c s + (\omega_c)^2) \cdot (\mathbf{I}^{2 \times 2} s + \mathbf{p}_c) \quad (11)$$

donde  $\zeta_c$ ,  $\omega_c$  y  $\mathbf{p}_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  son matrices diagonales definidas positivas. Los valores de las ganancias se obtienen identificando los términos de la expresión (10) con los de (11). El valor de las matrices de las ganancias del regulador,  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  del controlador no lineal propuesto, queda como:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_D &= 2\zeta_c \omega_c + \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_P &= (\omega_c)^2 + 2\zeta_c \omega_c \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_I &= (\omega_c)^2 \mathbf{p}_c \end{aligned} \quad (12)$$

## 4. Simulaciones

Se han realizado diferentes simulaciones numéricas para verificar el comportamiento del regulador en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión, convergencia rápida de los errores de seguimiento, respuestas transitorias suaves, bajo esfuerzo de control y robustez respecto a las incertidumbres paramétricas del modelo. Los valores de los parámetros físicos del TEC de primera generación utilizados son:  $m_1 = m_2 = 38545$  [kg],  $m_{Add} = 55119$  [kg],  $L = 16,8$  [m],  $\rho_W = 1025$  [kg/m<sup>3</sup>],  $g = 9,81$  [m/s<sup>2</sup>],  $I_{yy} = 5439470,4$  [kgm<sup>2</sup>],  $I_{yy}^{Add} = 3889197$  [kgm<sup>2</sup>],  $\nu_z = 24830$  [kg/m],  $\nu_\theta = 18204$  [kgm] y  $\epsilon_z = 0,1$  [m]. Además hay que mencionar que, debido a la dificultad de modelar adecuadamente todos los términos dinámicos, se han incluido errores del 10% en todos los términos que componen las matrices  $\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))$  y  $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}(t))$ . Los valores de  $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$  se calcularon según el procedimiento explicado en la sección anterior, considerando raíces reales puras y teniendo en cuenta la evolución deseada del vector de error de seguimiento  $\mathbf{e}_q(t)$ . Los valores de las matrices del vector polinómico de Hurwitz deseado, se han fijado como  $\zeta_c = \text{diag}(1,2,1,2)$ ,  $\omega_c = \text{diag}(0,15,0,15)$  y  $\mathbf{p}_c = \text{diag}(2,2)$ . El tiempo de muestreo utilizado en las simulaciones es de 0,2s.

### 4.1. Tarea general de mantenimiento

La saturación de los actuadores utilizados para producir fuerzas verticales limita la posibilidad de realizar maniobras de emersión/inmersión. En esta simulación, se mantiene la orientación del TEC y se diseña una trayectoria de tipo lineal con tramos polinómicos de orden 6 para la profundidad, asignando un perfil de velocidad cuasi trapezoidal, una velocidad de crucero y una desaceleración constante.

En la figura 7 se puede ver la evolución de los estados dinámicos del sistema no lineal obtenida para

cada uno de los movimientos independientes del TEC. El sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones. Como se puede ver la góndola está en todo momento completamente sumergida mientras que una fracción de la hélice permanece fuera del mar. La figura 8 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. Finalmente, en la figura 9 se muestra la secuencia realizada, donde se puede comprobar como la orientación del dispositivo se mantiene todo el tiempo prácticamente constante, a pesar de la pérdida no lineal de flotabilidad causada por la hélice.

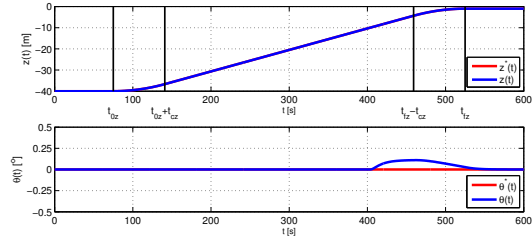


Figura 7: Maniobra de emersión. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

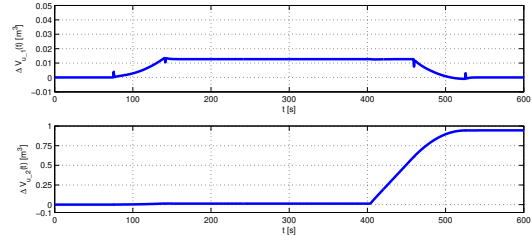


Figura 8: Maniobra de emersión. Evolución de los volúmenes de control

### 4.2. Tareas de mantenimiento de limpieza de palas

En este caso, se necesita variar de forma simultánea tanto la profundidad, como la orientación, partiendo de una posición del TEC horizontal para terminar en vertical con las palas hacia arriba facilitando así la tarea de mantenimiento. En la figura 10 se muestra la evolución tanto de la profundidad como de la orientación. Al igual que en el caso anterior, el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin presentar sobreoscilación. La figura 11 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. En ella se

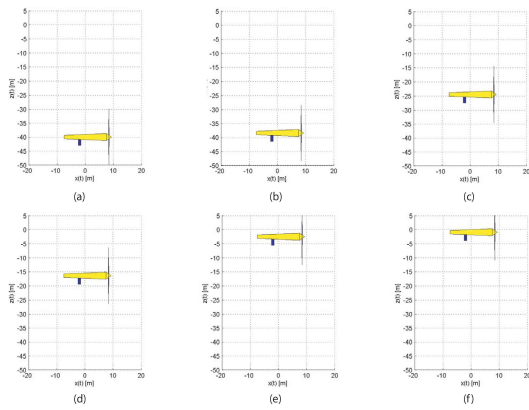


Figura 9: Secuencia visual de la maniobra de emersión: (a)  $t = 0s$ , (b)  $t = 120s$ , (c)  $t = 260s$ , (d)  $t = 340s$ , (e)  $t = 480s$  y (f)  $t = 600s$

observa un aumento considerable de los volúmenes de control cuando la orientación del sistema es cercana a  $90^\circ$ , debido a que el sistema está cerca de una configuración singular, aunque  $M(\mathbf{q})$  sigue siendo no singular. Por último, la figura 12 muestra la secuencia de emersión para la realización de la tarea de mantenimiento de limpieza de palas.

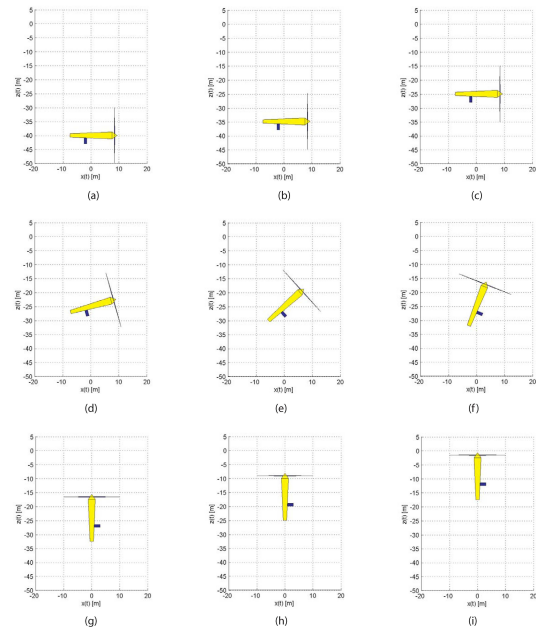


Figura 12: Secuencia visual de la maniobra de emersión para limpieza de palas: (a)  $t = 0s$ , (b)  $t = 60s$ , (c)  $t = 160s$ , (d)  $t = 230s$ , (e)  $t = 275s$ , (f)  $t = 320s$ , (g)  $t = 400s$ , (h)  $t = 480s$  e (i)  $t = 600s$

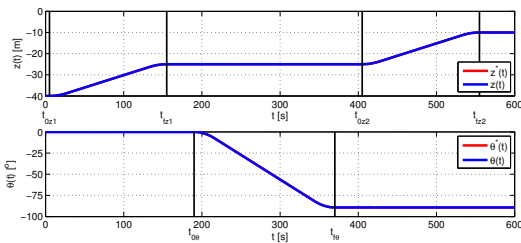


Figura 10: Maniobra de emersión para limpieza de palas. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

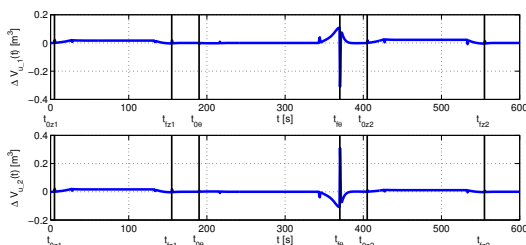


Figura 11: Maniobra de emersión para limpieza de palas. Evolución de los volúmenes de control

## 5. Conclusiones

La explotación de energías renovables de mareas y corrientes oceánicas cuando la columna de agua es inferior a 40 metros permite la instalación de

los denominados dispositivos de primera generación. Se buscan nuevas soluciones para la automatización de las maniobras de emersión/inmersión del TEC para mejorar su competitividad económica, ya que se disminuirían enormemente los costos de mantenimiento. El rendimiento de estas maniobras automatizadas se basa en el correcto control en bucle cerrado del agua de lastre utilizada como actuador hidrostático para producir fuerzas verticales. Se han rediseñado algunos aspectos de la góndola con el fin de incluir los tanques de lastre.

Este artículo propone un modelo dinámico muy simple, que puede ser utilizado para controlar un TEC de primera generación, concebido para aprovechar la energía de las corrientes marinas. El modelo dinámico, de dos grados de libertad se obtiene de únicamente dos masas concentradas, colocadas en un plano. El control de estos dos grados de libertad se realiza únicamente por control de agua de lastre. También se ha presentado una ley de control no lineal, para asegurar un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emersión e inmersión. El esquema de control está compuesto por un término de compensación de la fricción y una matriz de desacoplamiento basados en el modelo dinámico del TEC de primera generación y un bucle de realimentación, basado en una acción de control lineal estabilizante que opera con el vector de error de seguimiento. El método de control propuesto es simple, computacio-

nalmente eficiente y fácilmente implementable en un sistema basado en microprocesador. Finalmente, se han llevado a cabo diferentes simulaciones numéricas verificando el buen comportamiento del regulador diseñado en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión con actuadores hidrostáticos (o pasivos), convergencia rápida de los errores de seguimiento en el entorno del cero, respuestas transitorias suaves, el bajo esfuerzo de control y la robustez en el caso de las incertidumbres paramétricas del modelo. Se han diseñado diferentes secuencias de emersión para mostrar la capacidad del TEC para realizar diferentes maniobras, manteniendo la orientación o tareas de mantenimiento para la limpieza de palas con cambio simultáneo de profundidad y orientación. Los resultados obtenidos muestran que el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones incluso cuando el dispositivo no está completamente sumergido y tiene una fuerte interacción con la superficie libre.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, bajo los Proyectos Nacionales DPI2014-53499R y TEC2016-80986R. Los autores agradecen a Lorenzo Fernández la realización de las simulaciones gráficas.

#### Referencias

- [1] Alstom Tidal Turbines Web Page. Disponible online: <http://alstomenergy.gepower.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/ocean-energy/tidal-energy/tidal-power/index.html>.
- [2] Andritz Hydro Hammerfest. How it Works. Disponible online: <http://www.andritz.com/hy-hammerfest.pdf>.
- [3] Brito, A; Villate, J.L., (2014) Implementing Agreement on Ocean Energy Systems. Annual Report; The Executive Committee of Ocean Energy Systems: Lisbon, Portugal.
- [4] Carbon Trust, (2011) "Accelerating Marine Energy: The Potential for Cost Reduction Insights from the Carbon Trust Marine Energy Accelerator". Disponible online: <https://www.carbontrust.com/media/5675/ctc797.pdf>.
- [5] Espín, G. Montserrat, M., (2015) "Modelado Dinámico y Control de Maniobras de Dispositivos Submarinos." Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [6] Hardisty, J., (2009) *The Analysis of Tidal Stream Power*; Wiley: Hoboken, NJ, USA.
- [7] López, A.; Núñez, L.R.; Somolinos, J.A., (2011) "Modelado energético de convertidores primarios para el aprovechamiento de las energías renovables marinas", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol 11, pp 224-235.
- [8] López, A., Núñez, L.R., Somolinos, J.A., Valle, J., (2011) "Dynamic behavior of a second generation hydrokinetic converter." *Proceedings IEEE International Conference on Oceanic Engineering (OCEANS 11)*, Santander, España, 6-9 de junio de 2011.
- [9] Morales, R.; Fernández, L.; Segura, E.; Somolinos, J.A., (2016) "Maintenance Manuever Automation for an Adapted Cylindrical Shape TEC." *Energies*, 9, 746.
- [10] Nautricity Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.nautricity.com/cormat/>.
- [11] Núñez, L.R.; López, A.; Somolinos, J.A.; Robledo, F., (2012), "Conceptual design of an ocean current turbine for deeper waters" *.Maritime Engineering and Technology*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012, pp 607-612.
- [12] Tocardo Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.tocado.com>.
- [13] Verdant Power. Kinetic Hydropower System (KHPS), (2006). Disponible online: <http://www.verdantpower.com/kinetic-hydropower-system.html>.