

# 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 Politécnica de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

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

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

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

---

<b>Ingeniería de Control</b>	
<hr/>	
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/> <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 Rodríguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES .....	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches .....	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN .....	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> <b>Control Inteligente</b> <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/> <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>	
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>	

# ESTUDIO DE LOS PATRONES DE MARCHA PARA UN ROBOT HEXÁPODO EN TAREAS DE BÚSQUEDA Y RESCATE

Jorge De León and Antonio Barrientos  
CAR UPM-CSIC

jorge.deleon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

## Resumen

*En este artículo se profundiza en el estudio de los patrones de marcha para robots hexápodos con extremidades denominadas C-legs. En el estudio se analizan varios modos de marcha que distintos tipos de seres vivos emplean para desplazarse por el medio terrestre, y otros nuevos que se plantean al ver las limitaciones que presentan los existentes en la actualidad. Todo el estudio se ve reforzado con una serie de simulaciones realizadas donde los resultados obtenidos se analizan para seleccionar cuál es el mejor modo de marcha para una situación en concreto.*

**Palabras clave:** Robots hexápodos, C-legs, patrones de marcha, búsqueda y rescate.

## 1. Introducción

La realización de este trabajo pretende dar un nuevo enfoque a la robótica de búsqueda y rescate (USAR), en especial a los robots terrestres que en ella se emplean.

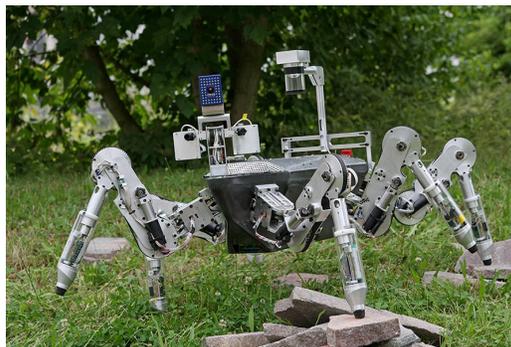
Lamentablemente la mayoría de los robots terrestres convencionales son incapaces de lograr sus objetivos ya que su modo de locomoción, la rueda o la oruga, es incapaz de solventar los obstáculos que se presentan. El nuevo diseño que aquí se presenta pretende servir de guía para nuevos desarrollos de robots bioinspirados, y reducir, de esta forma, los porcentajes de fracaso.

De todos los robots desarrollados mediante técnica de bioinspiración, un alto porcentaje están basados en la fisionomía de los hexápodos. La clase de los hexápodos es la clasificación de los artrópodos que más especies agrupa, incluyendo en ellos a los insectos. Estos, a su vez se pueden clasificar según su sistema de locomoción sea terrestre o aéreo. Sin embargo, los robots inspirados suelen imitar a los de locomoción terrestre debido a que su adaptación al ámbito de la ingeniería es más sencillo.

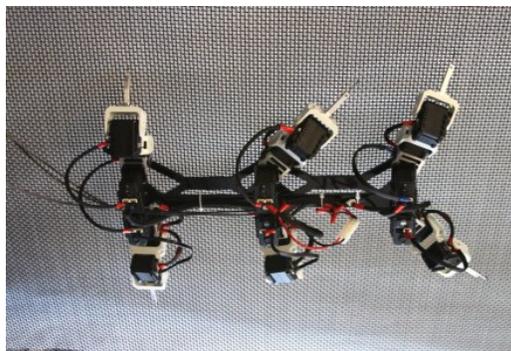
El FZI (Research Center for Information Technology) en Karlsruhe, Alemania, ha creado la familia LAURON, cuyo desarrollo va por la quinta gene-

ración (figura 1a). Este robot está dotado de diferentes modos de marcha y es capaz de mantener la estabilidad incluso en terrenos con numerosos obstáculos.

Otro ejemplo es el robot DIGbot, diseñado por la Case Western Reserve University, en Cleveland, Estados Unidos, y cuyo diseño de patas hace posible que pueda avanzar por troncos de árboles y paredes verticales, figura 1b.



(a) Robot LAURON IV



(b) Robot DIGbot

Figura 1: Ejemplos de robots hexápodos

Pero a pesar de que la cinemática de este tipo de robots está muy estudiada y resulta muy sencilla de implementar, la implementación mecánica y su control es muy complejo [6], por ello, se han desarrollado una nueva serie de robots que siguen siendo hexápodos pero presentan una nueva fisionomía en sus extremidades.

Estas nuevas extremidades tienen forma de letra *C* y permiten a este tipo de robots desplazarse

con unas velocidades mucho mayores y con unos requisitos mecánicos menores. Una ventaja de este tipo de robots es, entre otras, su capacidad de lo que se conoce en la literatura como "locomoción sin patas", por la cual los robots pueden superar obstáculos cuando ninguna de sus patas toca el suelo [1].

Un robot que describe este tipo de diseño es el RHex desarrollado bajo la financiación del DARPA en Estados Unidos, figura 2.



Figura 2: Robot RHex

A pesar de la gran proliferación de este tipo de robots, no se han realizado estudios que profundicen en el estudio cinemático de las patas de los mismos [4], [7], [9]. Sin embargo, este estudio es fundamental para este tipo de robots, condicionando el proceso de diseño y construcción de los mismos.

En este artículo se realiza el estudio de diversos modos de locomoción para este último tipo de robots y cuyos resultados han sido validados mediante simulaciones con un resultado correcto.

La estructura del artículo comienza con esta pequeña introducción, para continuar con el modelo del robot. Posteriormente, se procede a la definición de modos de marcha y, por último, se encuentran las pruebas y simulaciones realizadas, para terminar con las conclusiones del análisis.

## 2. Modelado del robot y sus patas

El robot que se ha empleado es un prototipo desarrollado por el grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid ([7], [8]).

Este robot se ha diseñado con una serie de especificaciones para poder realizar tareas de búsqueda y rescate (USAR [5]) y también protección robotizada de infraestructuras críticas (PRIC [3]) en entornos que presentan distintos obstáculos como pueden ser edificios, complejos industriales, ... donde un robot convencional con ruedas no puede des-

plazarse por todo el área a vigilar.



Figura 3: Render del robot diseñado

El primer requisito de diseño es poder superar una escalera, para ello según las conclusiones de los trabajos analizados es necesario que el diámetro de la pata sea igual o superior a la altura del escalón. Por lo que se ha seleccionado un tubo de acetal de 200mm de diámetro, con 4,5mm de espesor de pared y una anchura de 50mm y que son cortados en forma de  $C$ .

Con esta imposición de diseño, aparece una nueva restricción, la dimensión mínima del robot, que es la suma de los tres radios de las patas más el espesor de las mismas.

$$largo_{robot} > 3 \cdot (diámetro_{patas} + espesor_{patas}) \quad (1)$$

$$largo_{robot} > 613,5mm \quad (2)$$

Además de estas dos restricciones, existe otra que es que pueda clasificarse como un robot man-portable o man-packable.

Con esto, el diseño resultante es el que se puede observar en la figura 3.

## 3. Definición y evaluación de los patrones de marcha

Todos los hexápodos caminantes muestran la característica de ser estables; es decir que con las seis extremidades que poseen tienen buen apoyo sobre el terreno, de esta forma al retirar el apoyo de una, dos o tres extremidades, las cinco, cuatro o tres patas restantes siguen dando sustento; lo que significa que el hexápodo tiene ventajas en comparación con los bípedos y los cuadrúpedos al tener más puntos de apoyo y dar buen soporte al momento de generar los distintos modos de caminar.

### 3.1. Patrones de locomoción en la naturaleza

En base a la observación de la naturaleza, se pueden distinguir 3 tipos de marcha para los hexápo-

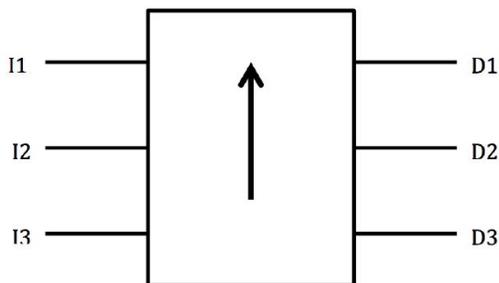


Figura 4: Esquema de la posición y definición de las patas de nuestro hexápodo

dos: de trípode alterno, tetrápoda y de onda, cuyos patrones de marcha se pueden observar en la figura 5.

**Trípode alterno:** Se mueven simultáneamente las extremidades I1, D2, e I3 durante un lapso de tiempo (ya sea hacia delante o hacia atrás) en el aire, área de negro; mientras que las extremidades D1, I2 y D3 permanecen en contacto con el suelo teniendo un movimiento contrario a las anteriores, área de blanco.

**Tetrápoda:** Se mueven por parejas de extremidades opuestas. Esto es, I1 y D3 se mueven (ya sea hacia delante o hacia atrás), áreas de negro, mientras que el resto permanece en el suelo. Dentro del lapso que dura su ciclo entra en acción la extremidad D2 de igual forma que en el anterior. A continuación las extremidades I3 y D1 hacen la misma acción que las anteriores pero durante su ciclo de trabajo. Y, por último, realiza el movimiento I2.

**Onda:** En este tipo de caminar las extremidades son independientes, cada una se mueve durante un lapso de tiempo (ya sea hacia delante o hacia atrás) y continúa la extremidad contigua.

### 3.2. Nuevos patrones de locomoción

Sin embargo, tal y como se ha demostrado a lo largo de la historia, el ser humano puede llegar a ser capaz de desarrollar cosas que la naturaleza no ha sido capaz. Por eso, en esta sección se van a presentar dos modos de marcha novedosos que no se han encontrado en ningún estudio biológico hasta la fecha.

El primero de ellos (*modo nuevo 1*) se podría definir como una variante de la marcha tetrápoda, pero en este caso la combinación de patas no presenta una transición suave. En lugar de establecer la marcha con una suave transición entre pares de

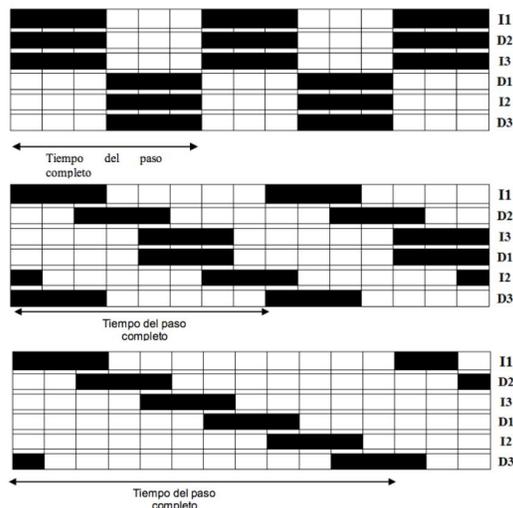


Figura 5: Modelos de marcha. (De arriba a abajo: Trípode, tetrápoda y onda)

patas, se generara un patrón de movimiento en el que en cada secuencia siempre se moverá un par de patas, primero el delantero, luego el intermedio y por último el trasero, y de nuevo volverá a empezar el patrón.

Al implementar este modo se tendrá que realizar un buen cálculo de los pares y esfuerzos generados en el par que actúa, ya que en este tipo de movimiento no se presenta un apoyo tan grande como en otros movimientos.

El segundo movimiento diseñado (*modo nuevo 2*) puede parecer bastante rudimentario pero no por ello dejar de ser menos efectivo, está pensado para terrenos muy irregulares. En este caso todas las patas del robot se moverán conjuntamente en cada ciclo, es decir, pasará de estar totalmente apoyado a no presentar ningún apoyo y caer sobre el suelo.

Este movimiento puede presentar el inconveniente de ser agresivo con el robot por la gran cantidad de impactos que reciba en cada transición, pero no por ello se debe dejar de plantear.

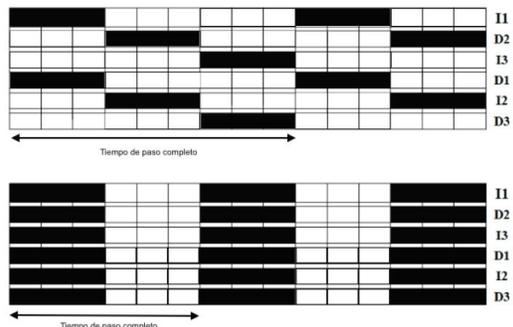


Figura 6: Nuevos modelos de marcha.

## 4. Simulaciones realizadas y resultados

Para poder obtener un análisis completo de los modos de marcha se han realizado una serie de pruebas donde se ponen a prueba todos los modos de marcha en condiciones diferentes. Las pruebas se han realizado en la plataforma virtual de programación de robots, ROS (Robot Operating System), y el simulador Gazebo.

Como en todo proceso de diseño, la parte de simulación proporciona muchos datos de interés sobre todo para detectar posibles elementos que han sido mal diseñados (tanto de hardware como de software).

En el caso que se aborda se ha diseñado un set de cuatro pruebas donde se pondrán a prueba los algoritmos de marcha que se han programado. La primera es una prueba de desplazamiento sobre un terreno vacío, sin pendientes ni obstáculos; la segunda es una prueba de superación de una escalera; la tercera simula un terreno abrupto y la última es la superación de un plano inclinado.

Como la simulación en un ordenador se puede considerar una simulación en un entorno controlado y, por tanto, si siempre se realiza bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos serán idénticos, al principio de cada prueba el robot se verá afectado por una perturbación provocada adrede por el sistema. De esta forma se intenta exponer al robot a distintos casos en cada repetición de las pruebas.

Cada prueba se repetirá un total de 100 veces para tener una muestra amplia y poder obtener unos resultados más concluyentes. Además, en cada una se recogen una serie de datos para su análisis, éstos son: tiempo de la prueba, distancia recorrida, velocidad media, cuerpos/segundo, posición inicial (x,y), posición final (x,y) y altura media del centro del robot.

### 4.1. Prueba 1: Desplazamiento rectilíneo

El objetivo de la primera prueba es analizar si todos los modos de marcha son capaces de realizar un desplazamiento de por lo menos un cuerpo por segundo, lo que significaría que superan en esta habilidad a numerosos robots hexápodos ya construidos. A parte de esa cualidad, se pretende analizar cual es la velocidad máxima que es capaz de alcanzar cada modo, para lograrlo se irá aumentando sucesivamente la velocidad del robot hasta que sea incapaz de recorrer una distancia de  $X$  metros con un error en el eje transversal menor al diez por ciento de la distancia recorrida (figura 7). La duración de la prueba es de 60 segundos.

En el cuadro 1 se pueden observar los resultados obtenidos.

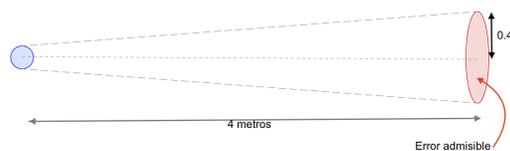


Figura 7: Error máximo permitido en la prueba 1.

Cuadro 1: Resultados de la primera prueba.

Modo	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Cuerpos	Pos. Final (x,y)	Altura media (m)
Tripode	4,5	0,075	2,16	-4,5;0,066	0,0971
Tetrápoda	7,53	0,125	3,62	6,95;-2,9	0,093
Onda	4,45	0,074	2,13	-0,05;-4,45	0,088
Onda V2	5,57	0,093	2,68	5,46;1,12	0,088
Nuevo Modo 1	4,15	0,069	1,99	3,98;-1,19	0,085
Nuevo Modo 2	12,07	0,201	5,79	12,02;1,16	0,062

De la prueba número 1 se desprenden numerosos datos de interés, el primero se puede obtener del análisis de las velocidades experimentadas por el robot, el modo de marcha nuevo 1 ha triplicado en velocidad casi al resto de modos de marcha, el segundo que más velocidad media ha tenido es el modo de marcha que imita a los tetrápodos, pero muy por debajo. Aunque las velocidades puedan parecer bajas, son todo lo contrario, en robótica se considera excelente que un robot móvil pueda alcanzar una velocidad de un cuerpo por segundo. En el cuadro 2 se puede observar una comparación con el resto de robots diseñados hasta la fecha.

Cuadro 2: Comparativa de desplazamiento con otros robots.

Robot	Longitud (m)	Masa (kg)	Velocidad (m/s)	Cuerpos/segundo
CW Robot	0,5	1	0,0833	0,16
Dante II	3	770	0,017	0,006
Atilla	0,36	2,5	0,03	0,083
ASV	5	3200	1,1	0,22
Boadicea	0,5	4,9	0,11	0,22
Sprawlita	0,17	0,27	0,42	2,5
Robot	0,48	9,5	12,07	5,79

En la figura 8 se puede observar las distintas trayectorias que ha realizado cada uno de los robots. Destaca, en color blanco, el recorrido del modo 3, realizando casi un medio giro, para intentar resolver este error cometido por el patrón programado se cambió la secuencia de movimiento de las patas (figura 9) y cuyo resultado se puede ver en color amarillo.

Otro dato que se desprende de los datos es que solo el modo en tripode alterna es capaz de mantener una marcha más o menos rectilínea, el resto de modos se ven afectados por los desequilibrios que se producen en algún punto de las transiciones al no encontrarse el centro de gravedad dentro del margen de estabilidad o por el desfase que se produce en el primer paso.

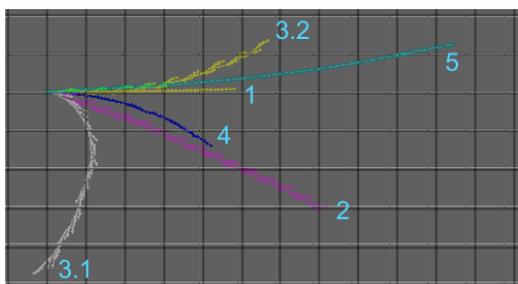


Figura 8: Trayectorias seguidas por los distintos modos de marcha.

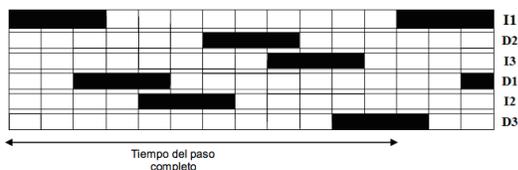


Figura 9: Nuevo modo de onda diseñado.

La comparación de la altura del centro de masas del robot también resulta interesante (figura 10). Se aprecia como algunos modos de marcha mantienen una altura más constante mientras que otros están constantemente subiendo y bajando, esto puede convertirse en un punto determinante a la hora de seleccionar el modo de marcha según la superficie donde se vaya a actuar.

#### 4.2. Prueba 2: Superación de una escalera

La segunda prueba busca averiguar que tipos de marcha son capaces de superar una escalera. Esta prueba es una característica importantísima que debe tener el robot pues una de las principales limitaciones que tienen los robots USAR actuales es la incapacidad de subir escaleras, por tanto, lograr que el robot sea capaz de superar esta prueba se convierte en un objetivo esencial a superar.

La escalera diseñada para la prueba está diseñada según los estándares en arquitectura [2], donde se exige que la huella sea como mínimo de 28cm. y la contrahuella en el intervalo 13 a 18cm, cumpliendo la siguiente relación:

$$54 < 2 \cdot \text{contrahuella} + 1 \cdot \text{huella} < 70 \quad (3)$$

En el caso abordado, la contrahuella tiene una altura de 17cm y la huella 34cm, dando un resultado de 68cm (figura 11).

En este caso el modo nuevo 2 fue capaz de superar el obstáculo aunque con dificultades, el robot tenía que estar perpendicular al peldaño que iba a subir, en caso contrario no lo superaba y debía

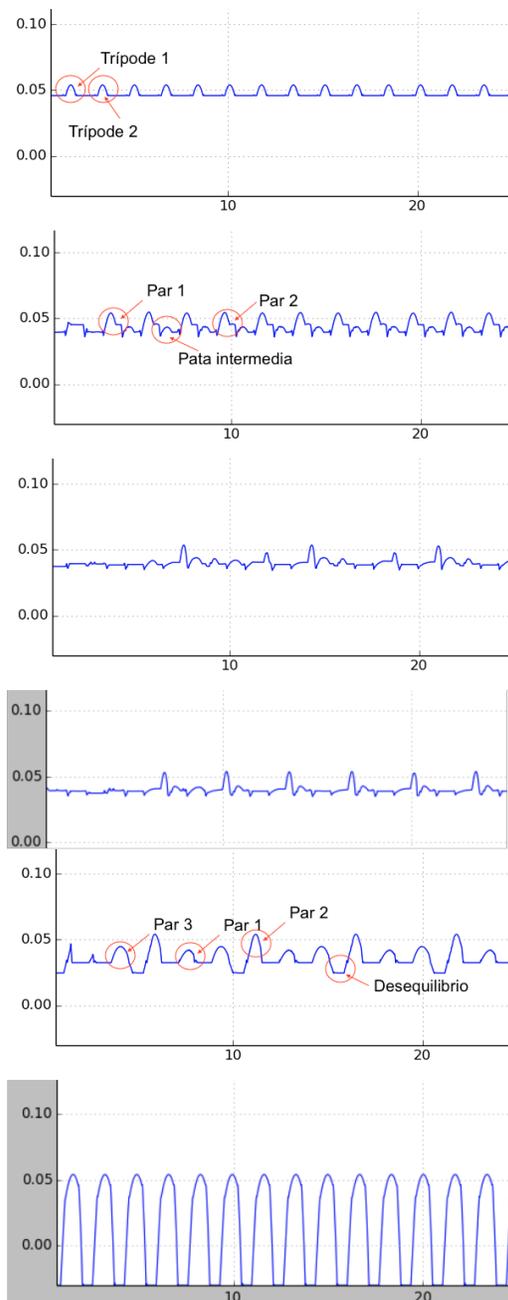


Figura 10: Altura del centro de masa en cada tipo de marcha.

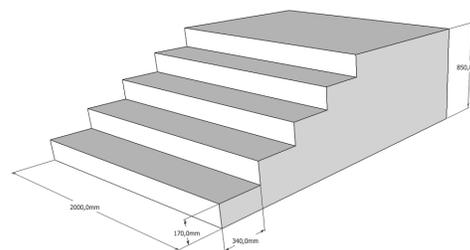


Figura 11: Modelado de la escalera para la prueba 2.

recolocarse, sin embargo, si no se producía ninguna desviación en la trayectoria es capaz de subir toda la escalera de una vez. También logró el objetivo el modo nuevo 1 pero siempre que estuviese colocado en la misma posición que el modo anterior y además, solo lo superó si el movimiento de las patas se realizaba par delantero. Los resultados de los dos modos que superaron la prueba se detallan en la figura 12, donde se aprecia que el modo nuevo 2 es mucho más rápido a pesar de presentar un mayor número de intentos para subir cada escalón. Por su parte, el modo nuevo 1 presenta esa lentitud debido a que en cada escalón que supera, tiene que esperar a que la secuencia de movimiento llegue de nuevo al par delantero.

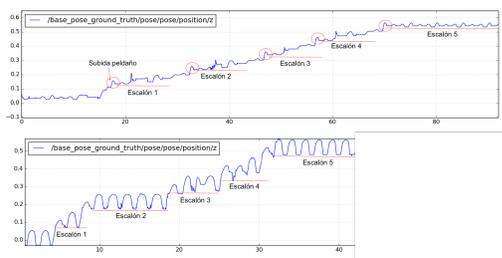


Figura 12: Resultados de la prueba 2.

Como el resto de modos de marcha seguían sin poder subir la escalera se decidió realizar un cambio en la estrategia de control, ya que uno de los motivos por los que no podían subir la escalera es la falta de par contra el escalón. Para ello, se rediseñó el algoritmo para que realizase un control de secuencias en intervalo de tiempo, el lado positivo de este control es que cuando una pata hiciese fuerza contra un escalón, transcurrido el intervalo de tiempo definido, entraría en acción la segunda pata delantera, ayudando a solventar el obstáculo. La consecuencia de emplear este modo de marcha es que se pierde la sincronización entre patas.

La conclusión de esta prueba indica claramente que la superación de obstáculos presenta dos factores claves, el primero es la relación entre el diámetro de la pata y el escalón, donde el segundo no puede ser mayor que el primero; y el segundo significa que el modo de marcha empleado debe de aplicar un par con las dos patas delanteras simultáneamente para poder superar el obstáculo.

#### 4.3. Prueba 3: Navegación por terreno abrupto

Los robots USAR suelen ser diseñados para desplazarse en este tipo de terreno, pero como ya se analizó en el estado del arte, al final, un gran número son incapaces de superar este obstáculo. La prueba no trata de averiguar solo quien es capaz de superar el terreno abrupto sino también

realizarlo de una manera más rápida.

El terreno modelado para la prueba se observa en la figura 13 según el modo de marcha que se seleccione el robot seguirá la trayectoria según el par que pueda aplicar en cada secuencia y las posibles colisiones entre el terreno y el cuerpo (figura 14).

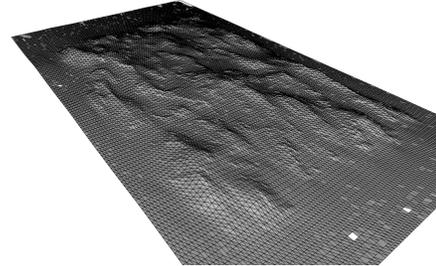


Figura 13: Modelado del terreno de la prueba 3.

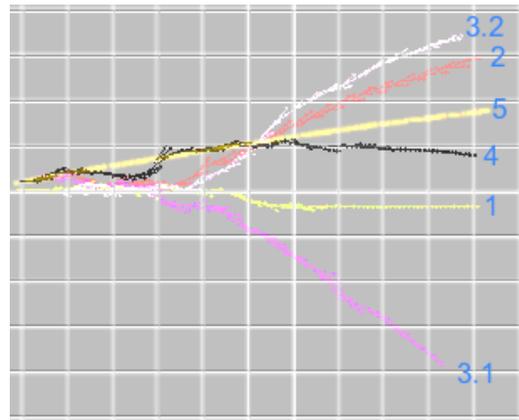


Figura 14: Resultados de la prueba 3.

Como se puede apreciar en los resultados de esta prueba, los modos de marcha de trípode alterno y el nuevo modo 1, son los que han seguido una trayectoria más rectilínea, esto se puede deber a dos factores principales, que tienen una altura media respecto al suelo superior a los demás modos, con lo que han podido superar obstáculos que los otros modos han debido de rodear. O, que las secuencias de movimiento son capaces de generar más par para superar los obstáculos.

Por último, en la figura 15 se puede apreciar el perfil de la ruta seguida por cada modo.

#### 4.4. Prueba 4: Pendiente máxima

Resulta frecuente que tras los terremotos o derrumbes de edificios, se encuentren paredes derribadas pero formando planos inclinados, o bien que haya que acceder al interior de una vivienda a través del tejado, tal y como ocurre cuando hay deslizamientos de tierra que sepultan viviendas.

Esta prueba se ha diseñado para simular estas si-

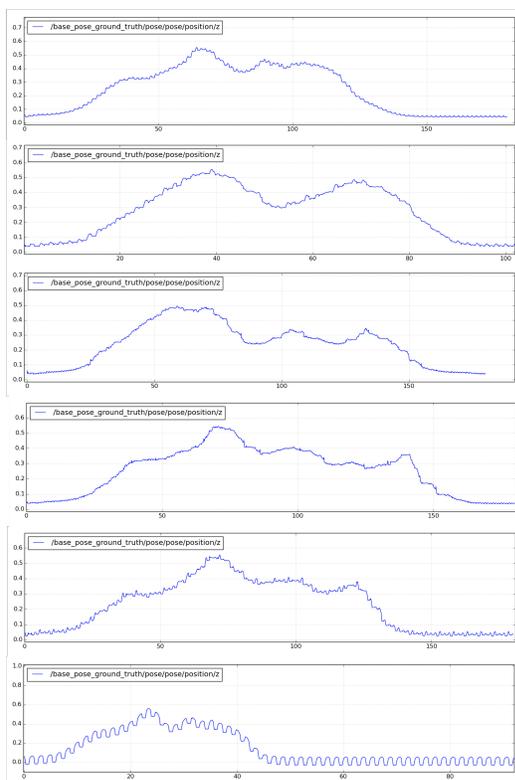


Figura 15: Perfil de la ruta seguido por cada modo de marcha en la prueba 3.

tuaciones y averiguar que secuencia de movimientos es capaz de superar un plano más inclinado. Se empezó probando a los robots con una pendiente constante del 10 % con una longitud de 4 metros en la proyección horizontal, para posteriormente ir aumentando la inclinación hasta alcanzar una pendiente máxima del 50 %. Los resultados obtenidos en esta prueba han sido muy satisfactorios, todos los robots han sido capaces de superarla sin ningún inconveniente. En la tabla 4.5 se muestran el tiempo empleado por cada modo en una pendiente del 50 %.

Cuadro 3: Resultados de superación de la prueba 4 para una pendiente del 50 %.

Modo	Tiempo (s)
Trípode Alterno	80
Tetrápodo	51
Onda	79
Modo Nuevo 1	71
Modo Nuevo 2	20

## 5. Conclusiones

Cabe resaltar los resultados obtenidos por los dos nuevos modos de marcha ideados, en especial el

segundo de ellos, modo nuevo 2. Quizás hasta la fecha nadie se había planteado analizarlo por la poca naturalidad del movimiento que realiza, incluso en este trabajo se dudó desde el principio de su eficacia. Sin embargo, mucho más allá de lo esperado, ha sido con creces el movimiento que más versatilidad ha ofrecido, siendo capaz de superar todas las pruebas casi sin inconvenientes.

También se ha observado que el trípode alterno es que es capaz de realizar unas trayectorias más rectilíneas y manteniendo una altura más constante, es por ello que es el que predomina en los seres vivos hexápodos.

Sería muy interesante el poder analizar un comportamiento mixto, que en terrenos donde los obstáculos sean fáciles de esquivar o con un tamaño menor a la mitad del diámetro de la pata se emplee el trípode alterno y cuando haya que superar un obstáculo elevado se cambie el modo de marcha al modo nuevo 1 o modo nuevo 2.

Queda, por tanto, demostrada la importancia del estudio realizado en este trabajo, abriendo nuevas vías de desarrollo a robots terrestres de rescate, donde se han superado los elementos que hasta la fecha han limitado a los robots que se desplazan mediante ruedas convencionales y orugas.

## Agradecimientos

Esta investigación ha recibido fondos del proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea, y del proyecto DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

## Referencias

- [1] R. Balasubramanian. Legless locomotion: Concept and analysis. Technical report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, May 2004.
- [2] Gobierno de Espana. Codigo tecnico de la edificacion. db-si. Technical report, Gobierno de Espana.
- [3] Juan Jesús Roldán Gómez, Mario Garzón Oviedo, Jorge de León Rivas, David Alfredo Garzón Ramos, Andrés Martín Barrio, Silvia Terrile, Pablo García Auñón, Jaime Del Cerro Giner, Claudio Rossi, and Antonio Barrientos Cruz. Proyecto pric: Protec-

- ción robotizada de infraestructuras críticas. In *Libro de actas de las Jornadas Nacionales de Robótica 2017*, volume 1, pages 1–6, Valencia, Junio 2017. CEA-IFAC. Robótica y Cibernética RobCib.
- [4] E. Z. Moore. Leg design and stair climbing control for the rhex robotic hexapod. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering McGill University, January 2002.
- [5] Robin R. Murphy. *Disaster Robotics*. The MIT Press, 2014.
- [6] Chenghui Nie, Xavier Pacheco Corcho, and Matthew Spenko. Robots on the move: Versatility and complexity in mobile robot locomotion. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(4):72/82, December 2013.
- [7] Jorge De Leon Rivas. Definición y análisis de los modos de marcha de un robot hexapodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Escuela Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Madrid, October 2015.
- [8] Jesus Tordesillas. Diseño y simulación del sistema de locomoción de un robot hexapodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, July 2016.
- [9] Jesus Tordesillas, Jorge De Leon, Jaime Del Cerro, and Antonio Barrientos. Modelo cinemático de un robot con c-legs. *Jornadas de Automática*, pages 267–275, September 2016.