

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control

Eduardo Montijano*, Carlos Bernal, Carlos Sagüés, Antonio Bono, Jesús Sergio Artal
 Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza
 Contacto: emonti@unizar.es

Resumen

En este trabajo se plantea la utilización de un flotador magnético para implementación, puesta a punto y evaluación de estrategias de control en el ámbito de las asignaturas de control de sistemas. Este sistema flotador presenta varias ventajas didácticas desde el punto de vista del control comparado con la versión más popular y utilizada del levitador magnético, manteniendo bastantes de las propiedades del segundo ejemplo. En el artículo se plantean y comparan los modelos matemáticos de ambos sistemas, demostrando las virtudes pedagógicas del flotador. El artículo también incluye resultados de evaluación de diferentes controladores, así como de estimación de variables del sistema.

Palabras clave: Levitador magnético, flotador magnético, innovación docente, teoría de control.

1. Introducción

La teoría de sistemas y su aplicación al control automático conforman una disciplina con gran presencia en la mayor parte de los estudios de ingeniería. Al tener unos fundamentos fuertemente teóricos, que suelen requerir de un gran nivel de abstracción por parte de los estudiantes, la utilización de ejemplos de control reales se convierte en una necesidad en el ámbito docente para garantizar la correcta asimilación de todos los conceptos. Un sistema ampliamente utilizado a la hora de conseguir este objetivo es el levitador magnético [1].

Así, el método pedagógico utilizado es el “learning by-doing”, una técnica didáctica que aprovecha el método científico y curiosidad de los propios estudiantes para fomentar un aprendizaje más profundo y significativo. La literatura centrada en investigación educativa recoge que en contextos universitarios resulta muy útil incorporar este tipo de metodologías activas como estrategia de aprendizaje para crear una dinámica de juego [2, 3], con el propósito de motivar a los estudiantes y que asimilen conceptos de una forma divertida y amena.

Todo ello se traduce en una mejor asimilación de conocimientos junto con un mayor desarrollo de competencias, habilidades y destrezas en el estudiante [4]. En resumen, conlleva un incremento en la eficacia del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Un posible montaje de levitación magnética se muestra en la Figura 1 y ha sido estudiado, por ejemplo en [5, 6] desde una perspectiva centrada en el control. Consta de una bobina, que genera una fuerza en un imán, que a su vez es detectado por un elemento Hall. El control es digital, mediante un circuito de acondicionamiento, driver de potencia y algoritmo en tiempo real que se diseñan en la misma asignatura.

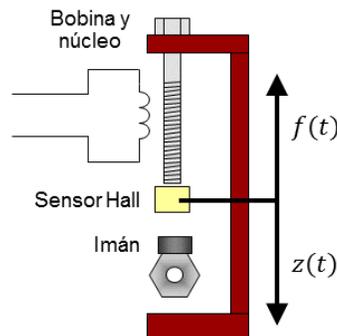


Figura 1: Esquema del levitador magnético

Este levitador presenta dos dificultades desde el punto de vista de su control: la no-linealidad de algunas de sus partes y la inestabilidad. Se trata de un sistema naturalmente inestable, lo que hace que sin la presencia del controlador la tuerca no levite, o se cae al suelo o se pega al imán. Una vez que se resuelve el problema de la inestabilidad también se pueden plantear los objetivos de control en la forma clásica (sobre-oscilación, tiempo de respuesta, error de posición, etc.) o avanzada (capacidad de adaptación, control no-lineal, identificación de sistema, etc.).

Siendo un ejemplo completo, fácil de montar y barato, se ha observado que la inestabilidad del sistema genera muchos problemas de cara a la falta de progresividad en el aprendizaje de los alumnos,

ya que la obtención de los parámetros del modelo es altamente compleja y muy sensible a pequeñas perturbaciones, hecho que complica en gran medida el posterior proceso de control. También dificulta el proceso de evaluación y de laboratorio. Una vez formulado un control resulta complicado para el alumno depurar su funcionamiento, ya que no alcanzar las especificaciones (estabilidad o respuesta) puede ser debido a errores propios conceptuales en el trabajo o a inexactitud en el modelado. Esto ha reducido, en nuestra opinión y experiencia, el aprovechamiento del trabajo práctico y la eficiencia de aprendizaje.

Para poder resolver en parte la falta de progresividad del levitador, la principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un sistema diferente, que se muestra en la Fig. 2 y que llamaremos flotador. Se construye a partir del levitador, invirtiendo el orden de los elementos: arriba sensor, tubo con imán y bobina con un imán polarizador. La alteración en la dirección de las fuerzas hace del flotador un sistema naturalmente estable, lo que simplifica el modelado, la implementación y visualización de las virtudes de diferentes controladores. En el documento se han enfatizado las oportunidades educativas que proporciona este sistema, así como el incremento en la participación e interacción de los estudiantes en el aula [7, 8, 9]. El modelo desarrollado ha sido simulado, posteriormente ensamblado, testeado y validado de manera experimental.

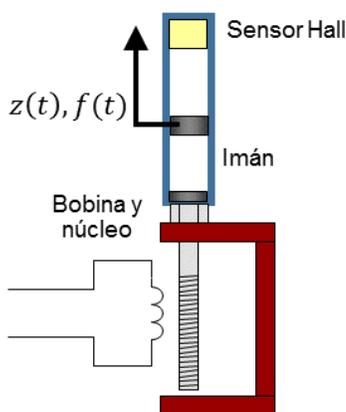


Figura 2: Esquema del flotador magnético

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 describe la asignatura en la que se ha implantado este sistema, Diseño Electrónico y Control Avanzado. La sección 3 contiene una descripción más detallada de todas las componentes que forman el flotador. Los modelos matemáticos del levitador y el flotador se comparan en la Sección 4, poniendo de manifiesto las ventajas del

segundo con respecto al primero. En la Sección 5 se muestran los resultados que se obtienen con el flotador al utilizar algunas de las técnicas que se explican en la asignatura basadas en espacio de estados. Por último, las conclusiones y posibles líneas de trabajo futuro se describen en la Sección 6.

2. Descripción de la asignatura

La asignatura de Diseño Electrónico y Control Avanzado [10] es una asignatura multidisciplinar del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza en la que participan profesores del departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones (encargados del diseño electrónico) y del departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (encargados del control avanzado). La asignatura combina la enseñanza de las técnicas modernas de diseño electrónico y programación de microcontroladores con las técnicas avanzadas de control, centradas en el diseño de reguladores para sistemas lineales en espacio de estados.

Como pre-requisitos, el alumno que se matricula en la asignatura ha debido cursar previamente asignaturas relacionadas y posee conocimientos de electrónica digital y de potencia así como de control de sistemas y la automatización. Sin embargo, es posible que su capacidad para trasladar la abstracción matemática del control a los sistemas reales sea un poco limitada. Se trata por tanto de que pueda rápidamente implementar sus conocimientos básicos, así como implementar y evaluar técnicas más avanzadas de estimación y control de sistemas.

Con el objetivo de asimilar los conceptos teóricos, para superar la asignatura los alumnos tienen que resolver un proyecto que abarca las dos partes de la asignatura. El trabajo representa el 60% de la evaluación de la asignatura, lo que lo convierte en el pilar fundamental de la misma. Es por ello, que la elección de un buen sistema es crucial de cara al aprendizaje y la evaluación de los alumnos.

En los primeros años de impartición de la asignatura este proyecto consistió en desarrollar un sistema completo de control de un levitador magnético. Los alumnos se encargaban de hacer el diseño electrónico de una etapa de acondicionamiento para tratar la medida de un sensor Hall y su lectura desde una placa Arduino Due, así como el montaje de un driver PWM sobre la salida correspondiente del microprocesador. Con el modelo del sistema real calculaban algoritmos de control y finalmente los implementaban en el microprocesador utilizando las técnicas de tiempo real y aritmética de computador explicadas en clase. Aunque para el

proceso de aprendizaje la utilidad del levitador ha quedado demostrada, en los dos años que se ha utilizado se han podido observar ciertas limitaciones y dificultades de este sistema. En particular, este es un sistema naturalmente inestable y fuertemente no lineal tanto en el propio sistema como en el sensor Hall. Esto hace que resulte difícil ajustar el funcionamiento estable y robusto de los controladores calculados. Como consecuencia el alumno es incapaz de aislar los elementos y no sabe si los problemas aparecen en el modelado, en la identificación de los parámetros, en sus conocimientos de control o incluso en la propia implementación hardware o software.

Con el objetivo de eliminar algunas de estas limitaciones, aquí se propone la utilización de un sistema alternativo para el trabajo que, por un lado mantenga las propiedades positivas de su predecesor, abarcando todos los elementos trabajados en la asignatura, pero que a la vez elimine los problemas del sistema original. En concreto, la propuesta es utilizar como sistema del trabajo un flotador magnético. Este sistema es no lineal también, lo que permite enfatizar la cruda realidad pero es naturalmente estable, lo cual hace mucho más fácil identificar los parámetros, en las fases iniciales del desarrollo y el aislamiento de cada parte del desarrollo.

3. Descripción del flotador magnético

En la Figura 3 se muestra el sistema del flotador, con todas las circuitos que intervienen en el mismo. Por un lado, en la parte superior de la figura, a la derecha, se encuentra el imán flotando sobre el tubo, que es el elemento que se desea controlar. En el tubo se pega una regla graduada, para poder medir visualmente la altura del imán en cada momento. La parte superior del tubo lleva unido el sensor Hall de tipo lineal y ratiométrico, mientras que en la parte inferior se encuentra la bobina, encargada de generar la fuerza que controla la posición del imán. En la parte inferior del tubo hay otro imán de neodimio (material N35) que genera una polarización, de forma que en reposo se alcanza una altura de equilibrio.

Por otro lado, en la parte inferior de la figura se observa el micro-controlador (un Cortex M3 de Atmel), basado en una placa Arduino Due, y un módulo que incorpora el driver y la etapa de acondicionamiento. En la asignatura también se trata de enseñar a diseñar la electrónica que permite el interface del control con el exterior. La etapa de acondicionamiento, encargada por un lado de transformar las tensiones del sensor Hall a tensiones adecuadas para la placa y por otro lado en-

cargada de suministrar la tensión adecuada a la bobina mediante un convertidor DC-DC basado en un PWM bipolar.

Por último, en la parte posterior de la figura se observa el osciloscopio utilizado para identificar el sistema y depurar el diseño electrónico, y (se ve parcialmente a la izquierda) una fuente de alimentación encargada de suministrar potencia. La programación se realiza mediante el entorno de desarrollo Arduino en el computador y la depuración del software con el propio monitor serie que lleva integrado dicho entorno.

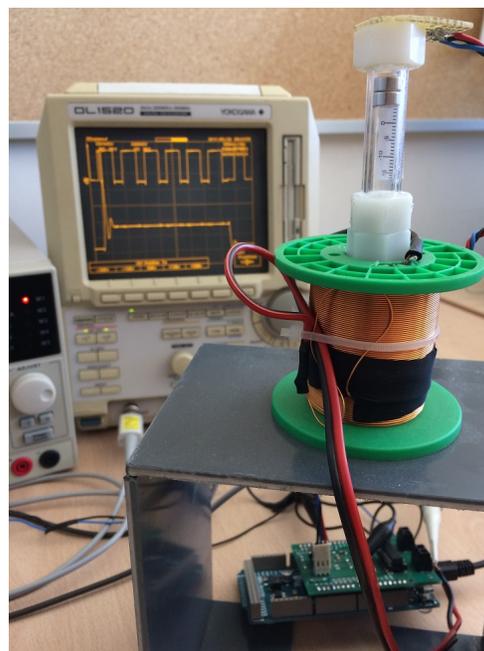


Figura 3: Flotador magnético.

Desde el punto de vista electrónico, es importante notar que el flotador no presenta diferencias significativas respecto a su predecesor. Los dos sistemas utilizan las mismas componentes hardware, por lo que la etapa de acondicionamiento encargada de transformar los niveles de de tensión que proporciona el sensor Hall a niveles compatibles con el micro-controlador, es la misma (una etapa de amplificación diferencial). Esto también hace que la transformación de las medidas del sensor tampoco cambie. Tampoco los conceptos electrónicos que subyacen: aritmética de computador, cuantificación, muestreo y organización de tiempo real de las tareas.

De igual manera, la parte de programación del microcontrolador sigue estando presente sin modificaciones. Todos los problemas relacionados con la división del código del controlador en varias tareas con diferentes prioridades y muestreos, así como los problemas relacionados, tanto del tiempo como de las variables que intervienen en el proceso,

no se ven afectados por el paso de levitación de la tuerca a flotación. Por último, las técnicas de control a utilizar tampoco cambian con el nuevo sistema, ya que se siguen empleando los mismos esquemas de control.

A partir de aquí, todo lo demás son ventajas en el nuevo sistema. Como punto de partida, el flotador es un sistema estable por naturaleza, lo que simplifica en gran medida la obtención de los parámetros del modelo, utilizando las mismas técnicas que anteriormente, además de ser matemáticamente más manejable, como demostraremos en la siguiente sección. Adicionalmente, la comprobación visual de los resultados del control resulta mucho más sencilla e intuitiva. Estos son los aspectos clave e innovadores de cara al aprendizaje del alumno, ya que el nuevo sistema permite a los estudiantes identificar y relacionar de manera muy sencilla los elementos del sistema real con los conceptos estudiados en la asignatura.

4. Modelo matemático

En esta sección se discuten los modelos matemáticos de comportamiento del levitador y el flotador magnético, mostrando los aspectos que tienen en común y las principales diferencias que hacen del segundo un sistema con una mejor cualidad didáctica en el contexto de la asignatura.

El objetivo de ambos sistemas es el mismo, conseguir que una tuerca metálica, o un imán, alcance una distancia deseada (referencia de control) con respecto a un imán cuyo campo magnético es modificado mediante una bobina. La variable de control en ambos sistemas es la misma, la tensión que se alimenta a la bobina mediante un PWM, $u(t)$. Mediante cambios en la tensión, se modifica la intensidad de corriente que circula por la bobina de acuerdo a

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t), \quad (1)$$

donde L representa la inductancia de la bobina y R la resistencia asociada al circuito eléctrico. Variaciones en la intensidad, generan en ambos sistemas una fuerza magnética, $f(t)$, que es la que modifica la posición de la tuerca, $z(t)$.

Sin embargo, los puntos que ambos sistemas tienen en común terminan aquí. Mientras que en el caso del levitador, la fuerza que ejerce la bobina se puede expresar como

$$f(t) = k_0 \frac{(k_1 + i(t))^2}{z^2(t)}, \quad (2)$$

donde k_0 y k_1 son dos constantes del modelo que los estudiantes tienen que ajustar en base a medi-

das que realizan, en el caso del flotador esta ecuación es más sencilla y es razonablemente ajustable con un sólo parámetro,

$$f(t) = k_0 \frac{i^2(t)}{z^2(t)}, \quad (3)$$

desapareciendo la constante k_1 . Lógicamente el alumno ha de identificar en su sistema dichos parámetros para que el controlador calculado en base al modelo se ajuste después a su sistema. Esta simplificación se debe a la estabilidad natural que presenta el flotador. Si no circula corriente por la bobina, la tuerca alcanza una posición de equilibrio cuando la fuerza de repulsión entre los dos imanes es igual al peso de la tuerca, posición de reposo con todas las variables igual a cero.

Por otro lado, aplicando al segunda ley de Newton para considerar el equilibrio de fuerzas, en el flotador obtenemos

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = f(t) - Mg - k_2 \frac{dz(t)}{dt}, \quad (4)$$

con k_2 un coeficiente de rozamiento viscoso que también se tiene que ajustar de manera empírica. En el levitador, la ecuación de equilibrio de fuerzas queda de la siguiente manera:

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = Mg - f(t) \quad (5)$$

Linealizando la fuerza, eq. (2) y (3), en el punto al que queremos que nuestra tuerca se estabilice, obtenemos

$$f(t) \simeq k_i i(t) + k_z z(t), \quad (6)$$

donde ya se ha eliminado el punto de trabajo y $k_i > 0$ y $k_z < 0$ son las constantes obtenidas del proceso de linealización. Si sustituimos esta ecuación en (4) obtenemos una relación entre $z(t)$ e $i(t)$ de segundo orden estable, con una pareja de polos complejos y conjugados con parte real negativa. La misma sustitución en (5) da lugar a un modelo en el que se refleja la inestabilidad del sistema.

Por último, viendo de nuevo la Figura 2, la colocación del sensor Hall en la parte superior del tubo del flotador también simplifica el lazo de realimentación, ya que si $z(t)$ aumenta, también lo hace la tensión que mide el sensor, mientras que en el caso del levitador un aumento de $z(t)$ produce una disminución de la tensión, dando lugar a un signo -1 que todavía confunde más a los alumnos.

En resumen, el flotador es un sistema naturalmente estable que da lugar a un modelo matemáticamente más sencillo en el que resulta más fácil la identificación de los parámetros. Desde una perspectiva puramente didáctica, presenta ventajas

significativas a la hora de mostrar a los estudiantes la aplicación de diferentes técnicas de control sin por ello afectar a la parte relacionada con la electrónica de la asignatura.

5. Ejemplos de control del flotador magnético

En esta sección se ilustran resultados de algunos de los controladores que los alumnos deben plantear en el marco de la asignatura utilizando el flotador magnético. En concreto se plantea la utilización de dos controladores basados en espacio de estados. El primero es un esquema de control con pre-alimentación de consigna y estimación del estado, definido mediante altura, velocidad e intensidad. El segundo esquema de control está basado en el uso de integradores, un único integrador en este caso, también con estimación del estado. Los dos esquemas de control se muestran en la Figura 4, donde los bloques con L representan las leyes de control empleadas.

Al ser un sistema estable, el alumno ajusta las leyes de estimación y control en el propio sistema de una forma más sencilla. Otra ventaja del flotador es la posibilidad de modificar la referencia del sistema. En el caso del levitador, que es un sistema naturalmente inestable, era mucho más complicado. Esto permite ver en el osciloscopio (o en el monitor serie de Arduino) la respuesta transitoria del sistema sin necesidad de preocuparse por congelar la imagen en el instante adecuado. En nuestros experimentos, la referencia alterna entre valores de 0 y 4 milímetros con una frecuencia aproximada de medio Hercio.

La Figura 5 muestra los valores de la altura y de la tensión en la bobina para los dos esquemas de control planteados. En la primera fila de la figura se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina, donde también se observa que la acción calculada por el esquema basado en integradores es más suave. Conviene notar que en ambos esquemas se ha utilizado la misma asignación de valores propios para el cálculo de las matrices con las leyes de control y de observación. De este experimento, los alumnos son capaces de observar las bondades y las limitaciones de dos esquemas de control más avanzados que el clásico PID, que también tienen que implementar en la asignatura.

Para concluir esta sección, la Figura 6 muestra los valores de las 3 variables estimadas por el ob-

servador en el esquema de control basado en pre-alimentación. Al ser capaces de variar la consigna, los alumnos también pueden observar diferencias en las otras variables de estado utilizando el flotador. Por ejemplo, se observan los picos en la variable velocidad cada vez que hay un cambio en la referencia y el imán se desplaza al nuevo punto deseado. En el caso de la altura del imán, los alumnos también comprueban la bondad del observador (o los posibles fallos) comparando la estimación de la altura con la medida (transformada a metros) que proporciona el sensor Hall, o comparando el valor estimado de la intensidad de la corriente que circula por la bobina con el valor que marca la fuente de alimentación.

6. Conclusiones

Este trabajo ha mostrado las ventajas potenciales que presenta la utilización de un flotador magnético como alternativa al uso de un levitador magnético en el ámbito de la docencia en control. Comparado con el levitador, se ha demostrado que el flotador presenta un modelo matemático ligeramente más sencillo, siendo además estable por naturaleza. Adicionalmente, el nuevo sistema no requiere modificaciones significativas en el diseño electrónico ni en la aplicación de las técnicas de control. De esta forma, a nivel didáctico se mejora la comprensión de los aspectos relevantes del control.

En el artículo se han mostrado también ejemplos de algunos de los controladores utilizados en la asignatura de Diseño electrónico y control avanzado integrada en el Master de Ingeniería Industrial, donde se puede observar el comportamiento del flotador con cambios en la referencia. Como trabajo futuro, se plantea realizar un análisis más detallado y sistemático del aprendizaje de los alumnos con esta metodología docente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de innovación docente PIIDUZ_16_074 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

- [1] T. H. Wong. Design of a magnetic levitation control system. *IEEE Transactions on Education*, 29(4):196–200, Nov 1986.
- [2] G. S. Mason, T. R. Shuman, and K. E. Cook. Comparing the effectiveness of an inverted classroom to a traditional classroom in an upper-division engineering course. *IEEE Transactions on Education*, 56(4):430–435, November 2013.

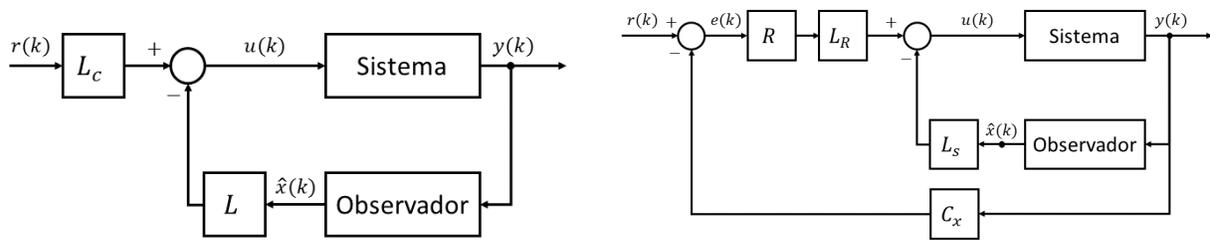


Figura 4: Esquemas de control empleados para probar el flotador.

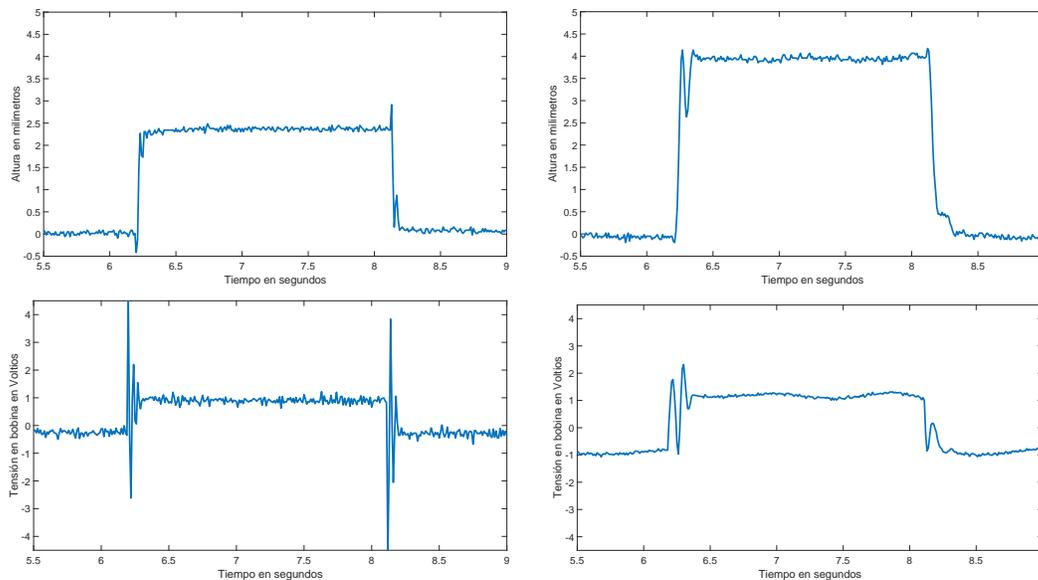


Figura 5: Evolución de la altura y la tensión aplicada a la bobina para el flotador y los dos esquemas de control de la Figura 4. En la primera fila se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina.

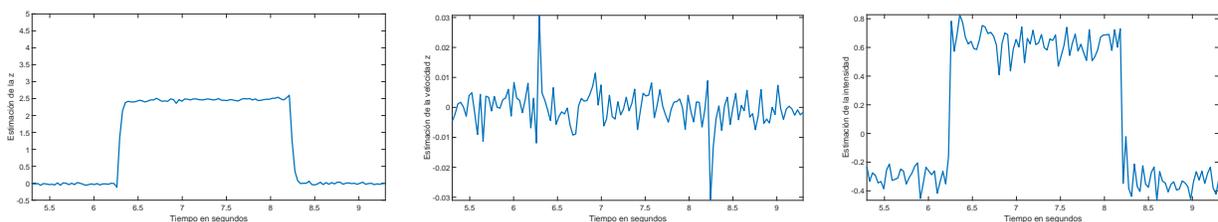


Figura 6: Estimación de las tres variables de estado para el esquema de control basado en prealimentación. De izquierda a derecha: altura, velocidad e intensidad.

[3] L. Moreno, C. González, I. Castilla, E. González, and J. Sigut. Applying a constructivist and collaborative methodological approach in engineering education. *Elsevier Computers & Education*, 49(3):891–915, November 2007.

[4] C. A. Jara, F. A. Candelas, S. T. Puente, and F. Torres. Hands-on experiences of undergraduates students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory. *EL-*

sevier Computers & Education, 57(4):2451–2461, December 2011.

[5] Y. Zi-Jiang and T. Michitaka. Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system. *Automatica*, 37(7):1125–1131, July 2001.

[6] V. S. Bandal and P. N. Vernekar. Design of a discrete-time sliding mode controller for a magnetic levitation system using multirate

- output feedback. In *American Control Conference*, pages 4289–4294, 2010.
- [7] V. A. Oliveira, E. F. Costa, and J. B. Vargas. Digital implementation of a magnetic suspension control system for laboratory experiments. *IEEE Transactions on Education*, 42(4):315–322, Nov 1999.
- [8] R. Galvao, T. Yoneyama, F. M. U. de Araujo, and R. G. Machado. A simple technique for identifying a linearized model for a didactic magnetic levitation system. *IEEE Transactions on Education*, 46(1):315–322, Feb 2003.
- [9] W. Yu and X. Li. A magnetic levitation system for advanced control education. In *International Congress of Federation of Automatic Control*, pages 9032–9037, 2014.
- [10] Guía docente de la asignatura de diseño electrónico y control avanzado. <http://titulaciones.unizar.es/guias16/index.php?asignatura=60805>. Accessed: 2017-05-30.