



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**CEA**

**IFAG**

comité  
español de  
automática

# XXXV alencia

Jornadas de AUTOMATICA  
3- 5 de Septiembre 2014

*- Libro de Actas -*

Actas de las XXXV Jornadas de Automática

3 – 5 de Septiembre de 2014, Valencia

**ISBN-13: 978-84-697-0589-6**

© **Comité Español de Automática (CEA-IFAC)**



## Tabla de Contenidos

<b>PhotoBioLib: una librería de Modelica para el modelado y simulación de fotobiorreactores</b>	1
<i>Agustín Pérez-Castro, José Sánchez, Francisco Gabriel Acién, Ignacio Fernández, José Luis Guzmán</i>	
<b>CONTROL DE UN ASCENSOR COMO CASO PRÁCTICO PARA LA DOCENCIA DE CONTROL AVANZADO</b>	2
<i>Adrián Peidró, Arturo Gil, José María Marín, Luís Payá, Óscar Reinoso</i>	
<b>Planificación de misiones de vehículos aéreos no tripulados con Fast Marching en un entorno 3D</b>	3
<i>Verónica González Pérez, Concepción Alicia Monje Micharet, Carlos Balaguer</i>	
<b>Estudio de la robustez de los metodos de control para exoesqueletos de miembros inferiores</b>	4
<i>Ranko Zotovic Stanisic, Julio Hernando Vargas Riaño</i>	
<b>Helicopter Main Rotor Vibration Analysis with Varying Rotating Speed</b>	5
<i>Salvador Castillo-Rivera, Maria Tomas-Rodriguez, G. Nicolas Marichal Plasencia</i>	
<b>CLASIFICACIÓN DE CAMBIOS DE DIRECCIÓN DURANTE LA MARCHA MEDIANTE EL USO DE SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS</b>	6
<i>Juan F. Abril, Daniel Planelles, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, José M. Azorín</i>	
<b>MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROLLER BASED ON SLIDING MODE APPROACH</b>	7
<i>Maïssa Farhat, Oscar Barambones, Jose A Ramos, Jose M. Gonzalez de Durana</i>	
<b>Comparación de estrategias de control multivariable sobre el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia</b>	8
<i>Sergio Fragoz, Francisco VÁzquez, Juan Garrido, Fernando Morilla</i>	
<b>Casos de uso y mejoras de un robot humanoide de bajo coste</b>	9
<i>Juan Carlos García Sánchez, Javier Felip León, Carlos Veiga Almagro, Pedro J Sanz</i>	

<b>Obtención de los estados de equilibrio de un sistema desconocido mediante su modelado borroso</b>	10
<i>Antonio Javier Barragán Piña, Francisca Segura Manzano, Miguel Ángel Martínez Bohórquez, José Manuel Andújar Márquez</i>	
<b>SUPERVISIÓN, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN MULTI-ETAPA</b>	11
<i>Mario L. Ruz, Sergio Fragoso, David Rodríguez, Francisco Vazquez, Miguel Zamora</i>	
<b>DETERMINACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE MAPAS DE COBERTURA RASANT EN LA ZONA MARÍTIMA DE CANARIAS</b>	12
<i>J. A. Rodríguez, G. N. Marichal, C. Alonso, I. Padrón, E. Melón</i>	
<b>CONTROL FUZZY DE LA VELOCIDAD DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA</b>	13
<i>Jose A. Cortajarena, Oscar Barambones, Patxi Alkorta, Julián De Marcos</i>	
<b>Décodificación de la Marcha Humana Mediante Señales EEG</b>	14
<i>Joaquín Alcázar, Andrés Úbeda, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, Jose M. Azorin, José L. Pons</i>	
<b>Aplicación de ICA para la Eliminación de Artefactos Oculares y Mandibulares en Señales EEG durante la Realización de Tareas Mentales</b>	15
<i>Belén López, Andrés Úbeda, Daniel Planelles, Carlos Perez-Vidal, Eduardo Iáñez, Jose M. Azorin</i>	
<b>Estimación de Altura en Aplicaciones de Navegación Topológicas mediante Apariencia Global de Información Visual</b>	16
<i>Francisco Amorós, Luis Paya, David Valiente, Luis Miguel Jiménez, Oscar Reinoso</i>	
<b>SISTEMA DE CONTROL EN RED (SCR) BASADO EN PREDICTOR-OBSERVADOR. ESTUDIO COMPARATIVO CON OTRAS PROPUESTAS DE SCR</b>	17
<i>Angel Cuenca, Pedro García, Pedro Albertos</i>	
<b>CONTROL DE LA TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA DE UN FILTRO ACTIVO DE TIPO PARALELO</b>	18
<i>José Carlos Alfonso Gil, Carlos Ariño, Carlos Bernad Viciano, Hector Beltrán, Emilio Pérez</i>	

<b>Clasificación de respuestas de pulsos de un ADS por análisis discriminante</b>	19
<i>Fernandez Marron Jose Luis, Blazquez Martinez Juan, Barcala Riveira Jose Miguel</i>	
<b>Estimación del par articular generado por Estimulación Eléctrica Neuromuscular mediante un modelo fisiológico simplificado</b>	20
<i>Elisa Piñuela Martín, Antonio J. Del-Ama Espinosa, Ángel Gil Agudo</i>	
<b>ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES ANTE FALLOS ESPORÁDICOS</b>	21
<i>Manuel Alejandro Hernandez Mejias, Antonio Sala, Andrés Querol, Carlos Ariño</i>	
<b>Control predictivo no lineal del confort térmico y calidad de aire</b>	22
<i>María Del Mar Castilla, José Domingo Álvarez, Julio Elias Normey Rico, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel</i>	
<b>Diseño de circuitos genéticos en Biología Sintética utilizando optimización multi-objetivo</b>	23
<i>Yadira Boada, Alejandra González, Alejandro Vignoni, Gilberto Reynoso-Meza, Jesús Picó</i>	
<b>Estudio de la aplicacion de estimulacion electrica funcional para la mejora del funcionamiento de interfaces cerebro-computadora</b>	24
<i>Inmaculada Ríos, Enrique Hortal, Javier Gimeno, Jose A. Flores, Jose M. Azorin</i>	
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA MOTORES BLDC</b>	25
<i>Diego Pérez Losada, Joaquín López Fernández, María Santos Fernández</i>	
<b>MODELADO CINEMÁTICO DE UN MANIPULADOR BINARIO HIPER REDUNDANTE PARA APLICACIONES EN CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA (MIS)</b>	26
<i>José Luis González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile, David De La Fuente, Rubén Alonso, Fernando Gayubo</i>	
<b>Un método para modelar sistemas no holónomos con rodaduras</b>	27
<i>Francisco Javier Gil-Chica, Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina</i>	

<b>MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PENDULO MOLAR. APLICACIÓN A LA ESTABILIZACIÓN DE SISTEMAS OSCILATORIOS</b>	28
<i>Manuel Pérez-Molina, Manuel Pérez-Polo, Francisco Javier Gil Chica</i>	
<b>MEJORA DEL RENDIMIENTO DE UN REACTOR CONTINUO EN REGIMEN OSCILANTE GENERADO POR CONTROL PI</b>	29
<i>Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano</i>	
<b>CONTROL PID DE UN SERVOMECANISMO NO LINEAL USANDO LA FUNCION DESCRIPTIVA Y LA BIFURCACION DE BOGDANOV-TAKENS</b>	30
<i>Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano</i>	
<b>Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.</b>	31
<i>Stephan Strahl, Attila Husar, Jordi Riera Colomer, Ramon Costa Castelló</i>	
<b>APLICACIONES EN MATLAB Y SIMULINK PARA EL MODELADO Y CONTROL DEL MOVIMIENTO DE UNA ESTACIÓN ABB IRB-120</b>	32
<i>Miguel Mato, Alberto Herreros, Juan Carlos Fraile, José Luis Sanchez, Enrrique Baeyens, Javier Pérez Turiel, Fernanado Gayubo</i>	
<b>DISEÑO DE UN ASISTENTE CAMARÓGRAFO PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA DE PUERTO ÚNICO</b>	33
<i>Irene Rivas Blanco, Belén Estebanez, María Cuevas Rodriguez, Isabel García Morales, Víctor Muñoz</i>	
<b>IMPLEMENTACION DE UNA LIBRERIA EN SIMULINK PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR</b>	34
<i>Alberto León, Enrique Hortal, Alberto Rodríguez, José M. Climent, José M. Cano, Jose M. Azorin</i>	
<b>ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE MERCANCÍAS EN LOGÍSTICA MEDIANTE MÚLTIPLES CÁMARAS DE RANGO</b>	35
<i>Pablo Artaso, Gonzalo López-Nicolás</i>	
<b>VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO DINÁMICO DE UN CUERPO EN MANIOBRAS DE INMERSIÓN</b>	36
<i>Jose A Somolinos, Amable López, Luis Ramón Núñez, Montserrat Espín</i>	

<b>SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA</b>	37
<i>Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, Jesus Fernandez-Lozano, Alfonso García-Cerezo</i>	
<b>FLOTA DE VEHÍCULOS AÉREOS PARA FOTOGRAFIA DE ALTA RESOLUCIÓN EN APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISION. PROYECTO RHEA</b>	38
<i>Jaime Del Cerro, João Valente, David Sanz, Leandro Cancar, Claudio Rossi, Antonio Barrientos</i>	
<b>Locality-Sensitive Hashing for large scale image retrieval</b>	39
<i>Adrian Sanchez, Enrique Alegre, Victor Gonzalez, Diego Garcia</i>	
<b>Tool wear monitoring in milling using aZIBO shape descriptor</b>	40
<i>María Teresa Garcia-Ordas, Enrique Alegre, Joaquín Barreiro, Diego Garcia-Ordas, Victor Gonzalez-Castro</i>	
<b>Mejorando los sistemas de predicción basados en error acotado</b>	41
<i>José Manuel Bravo Caro, Diego Marín, Manuel Emilio Gegúndez, Teodoro Álamo Cantarero</i>	
<b>Tool wear classification using texture descriptors based on Local Binary Pattern</b>	42
<i>Oscar Garcia-Olalla, Enrique Alegre, Joaquín Barreiro, Laura Fernandez-Robles, Maria Teresa Garcia-Ordas</i>	
<b>Mejora de la Estabilidad en Sistemas Takagi-Sugeno mediante la aplicacion del Teorema de Polya con multiíndices</b>	43
<i>Andrés Querol, Carlos V. Ariño, Manuel A. Hernández-Mejías, Antonio Sala</i>	
<b>SISTEMA ROBOTICO DE TIPO EXOESQUELETO PARA REHABILITACION DE LA MANO</b>	44
<i>Samara Enriquez, Yalena Narvaez, Oscar Andres Vivas, Jorge Diez, Francisco J. Badesa, Jose Maria Sabater, Nicolas Garcia Aracil</i>	
<b>Estudio de la navegación de un planeador autónomo submarino</b>	45
<i>Edwin Loeff, Juanma Gimenez Martinez, Emilio Garcia Moreno</i>	

<b>SOLAR DESALINATION MANAGEMENT TO FULFILL GREENHOUSE WATER DEMAND USING PREDICTIVE CONTROL</b>	46
<i>Lidia Roca, Jorge A. Sánchez, Francisco Rodríguez, Javier Bonilla</i>	
<b>Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración</b>	47
<i>José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega, Francisco R. Rubio</i>	
<b>SSS-SLAM: An Object Oriented Matlab Framework for Unverwater SLAM using Side Scan Sonar</b>	48
<i>Daniel Moreno, Antoni Burguera, Gabriel Oliver</i>	
<b>INTEGRACIÓN DE SISTEMAS MULTI-AGENTE EN SISTEMAS EMBEBIDOS CON RECURSOS LIMITADOS PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE COORDINACIÓN Y COOPERACIÓN</b>	49
<i>Ángel Soriano, Leonardo Marín, Ángel Valera, Marina Vallés</i>	
<b>OPTIMIZACIÓN DINÁMICA MEDIANTE DIFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA USANDO ECOSIMPRO Y CASADI</b>	50
<i>Rubén Martí, Tania Rodríguez, José Luis Pitarch, Daniel Sarabia, César de Prada</i>	
<b>INTEGRACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DE ASISTENCIA AL CIRUJANO EN OPERACIONES LAPAROSCÓPICAS DE PUERTO ÚNICO</b>	51
<i>Maria Cuevas-Rodriguez, Belen Estebanez, Enrique Bauzano, Irene Rivas-Blanco, Isabel Garcia-Morales, Victor F. Muñoz, Luis D. Lledo, Jose M. Sabater</i>	
<b>Respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto usando herramientas interactivas</b>	52
<i>Maria Langoyo Menasanch, Ramon Costa Castelló</i>	
<b>Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano</b>	53
<i>Jorge Antonio Díez Pomares, Francisco J. Badesa, Ricardo Morales, Jose Maria Sabater Navarro, Nicolas Garcia Aracil, Luis Daniel Lledó</i>	
<b>Algoritmo de Navegación Autónoma basado en una Arquitectura Distribuida</b>	54
<i>Ángel Soriano, Marina Vallés, Ángel Valera, Pedro Albertos</i>	

<b>MODOS ASUMIDOS Y ELEMENTOS FINITOS: COMPARATIVA DE MODELOS PARA ROBOTS FLEXIBLES</b>	55
<i>Pablo Bengoa, Asier Zubizarreta, Aitziber Mancisidor, Itziar Cabanes, Eva Portillo</i>	
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA AEREA PARA LA CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA</b>	56
<i>Juan Antonio Rodríguez-Haro, Jose Carlos Moreno, Jose Luis Guzman, Fernando Aguilar, Yolanda Cantón</i>	
<b>CONTROL OF OSCILLATING WATER COLUMN (OWC) WAVE ENERGY PLANTS</b>	57
<i>Aitor J. Garrido, Mikel Alberdi, Izaskun Garrido, Modesto Amundarain</i>	
<b>MODELADO MULTIBODY Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO</b>	58
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Charles Pinto, Javier Corral, Itziar Cabanes</i>	
<b>DISEÑO DE UN DISPOSITIVO NEUMÁTICO PARA REHABILITACION DE MANO MEDIANTE FUNDA TERMORETRACTIL</b>	59
<i>Yalena Narváez, Oscar Andrés Vivas, Samara Catalina Enriquez, Jose Maria Sabater-Navarro, Nicolas Garcia, Alvaro Martínez</i>	
<b>Reconstrucción 3D de racimos de uva basada en estéreo-visión</b>	60
<i>Carlos Alberto Molina Toscano, Antonio José Sánchez Salmerón, Eugenio Ivorra Martínez</i>	
<b>CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO</b>	61
<i>Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez, Alfonso García-Cerezo</i>	
<b>CRITERIOS PARA RESOLUCIÓN DE REDUNDANCIA EN CONTROL VISUAL DIRECTO DE MANIPULADORES</b>	62
<i>Javier Perez, Jorge Pomares, Gabriel J. Garcia, Carlos A. Jara, Fernando Torres</i>	
<b>EQUIPO PARA PRÁCTICAS DE FUNDAMENTOS DE AUTOMÁTICA</b>	63
<i>Alfonso V. Poncela Méndez, Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz</i>	
<b>Diseño de un regulador Fuzzy para planta de laboratorio</b>	64
<i>José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Matilde Santos</i>	

<b>CONTROL DE RELOJ DE TORRE CON ARDUINO</b>	65
<i>F. Javier García Ruíz, Eduardo J. Moya de La Torre, Alfonso V. Poncela Méndez</i>	
<b>Reconfiguración de sistemas de control basado en multiagentes</b>	66
<i>Rafael Priego, Unai Gangoiti, Darío Orive, Marga Marcos</i>	
<b>Control de balanceo de carga de un grupo de servidores de red</b>	67
<i>Miquel Talavera-Foix, Carolina Albea</i>	
<b>IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE CONTROL BILATERAL DE 1 GDL CON ARDUINO PARA TELERROBÓTICA</b>	68
<i>Adrián Peidro Vidal, Juan José Rodríguez Gil, José María Azorín Poveda, Oscar Reinoso García</i>	
<b>ARQUITECTURA ABIERTA DE CONTROL VISUAL DIRECTO SOBRE FPGA</b>	69
<i>Aiman Alabdo, Gabriel J. Garcia, Jorge Pomares, Fernando Torres</i>	
<b>PROTOTIPO DE ROBOT DE SERVICIO PARA GUIADO DE PERSONAS POR VISIÓN.</b>	70
<i>Abel Martínez, Houcine Hassan, Carlos Domínguez, Pedro López</i>	
<b>A segmentation approach for evaluating wear of inserts in milling machines with computer vision techniques</b>	71
<i>Guillermo Martínez-San-Martín, Laura Fernández-Robles, Enrique Alegre, Oscar García-Olalla</i>	
<b>Optimización de la producción de biomasa en fotobiorreactores tubulares</b>	72
<i>Gustavo Andrade, Daniel Pagano, José Luis Guzmán, Manuel Berenguel</i>	
<b>Avances recientes en manipulación subacuática en el subproyecto GRASPER</b>	73
<i>Antonio Peñalver, Jose J. Fernández, Javier Pérez, Jorge Sales, Juan C. García, David Fornas, Raul Marín, Pedro J. Sanz</i>	
<b>Printbots: un gran paso hacia adelante</b>	74
<i>Leopoldo Armesto, Andrés Conejero, Miguel Fernández, Pedro Fuentes, David Perry, Enrique Martínez, Vicente Marhuenda, Carles Igual, Carlos De La Fuente, Oihan Elesgaray</i>	

<b>TRANSFERENCIA DE COMPORTAMIENTOS DE NAVEGACION HUMANA A UN PLANIFICADOR LOCAL DE ROBOTS</b>	75
<i>Rafael Ramón-Vigo, Noé Pérez-Higueras, Luis Merino, Fernando Caballero</i>	
<b>DESARROLLO METODOLÓGICO DE SISTEMAS DE CONTROL APLICANDO INGENIERÍA CONDUCTIDA POR MODELOS</b>	76
<i>María Luz Alvarez, Arantzazu Burgos, María Isabel Sarachaga, Elisabet Estévez, Marga Marcos</i>	
<b>Plataforma para la implementación y validación de algoritmos de control de tiempo real en mini-helicópteros de varios rotores</b>	77
<i>Luis Ródenas, Ricardo Sanz, Pablo Albiol, Alberto Castillo, Daniel Verdú, Pedro García</i>	
<b>PLATAFORMA PARA LA FORMACIÓN PRÁCTICA INDIVIDUALIZADA EN FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO</b>	78
<i>Carlos Sánchez Cazorla, David Muñoz de La Peña, Fabio Gómez-Estern</i>	
<b>Primeros resultados de un control genético predictivo sobre maqueta de helicóptero (twinrotor)</b>	79
<i>Asier Gutierrez, Eloy Irigoyen, Ekaitz Larzabal, Juan José Valera, Mikel Larrea</i>	
<b>MODELADO DE MOTORES USM PARA ROBOTICA DE REHABILITACION</b>	80
<i>Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Fernando Martin Monar, Dolores Blanco</i>	
<b>SEMANTIC ENVIRONMENT FORMALIZATION FOR MOBILE ROBOTS NAVIGATION</b>	81
<i>Eduardo Munera Sánchez, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose-Luis Poza-Luján, Jose E. Simó Ten, J. Francisco Blanes Noguera</i>	
<b>Seguimiento de caminos para formaciones de vehículos marinos de superficie</b>	82
<i>Jesus M. de La Cruz Garcia, José A. López-Orozco, Eva Besada-Portas, David Moreno Salinas, Joaquín Aranda Almansa</i>	
<b>SIMULACION DE LA MANO HUMANA MEDIANTE MATLAB/SIMMECHANICS</b>	83
<i>Dorin Sabin Copaci, Juan Carlos Garcia Pozo, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco</i>	

<b>Mejora de la localización de un cuadricóptero mediante la fusión de su sistema de metrología y un GPS</b>	84
<i>José Luis Racero Robles, Santiago Sastre, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó</i>	
<b>Optimización en dos etapas para la gestión energética en edificios</b>	85
<i>Jorn K. Gruber, Francisco Huerta, Pablo Matatagui, Milan Prodanovic</i>	
<b>SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE CREACIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN VISUAL DE UN ROBOT MÓVIL</b>	86
<i>Luis Paya, Francisco Amoros, Arturo Gil, Lorenzo Fernandez, Oscar Reinoso</i>	
<b>CPWalker - Plataforma robótica para la rehabilitación y el entrenamiento de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral</b>	87
<i>Rafael Raya, Óscar Ramírez, María Dolores Del Castillo, José Ignacio Serrano, Angel Iglesias, Ramón Ceres, Eduardo Rocon, Fernando Mollá, Juan Manuel Belda, Rakel Poveda, Amparo López, Ignacio Martínez, Sergio Lerma, Teresa Martín</i>	
<b>Control Supervisor para el Control De Sistemas de Fabricación Reconfigurables</b>	88
<i>Francisco Javier Lastra Santos, Jesús Ángel Trujillo Medina, Elías Revestido Herrero, José Ramón Llata García, Francisco Jesús Velasco González</i>	
<b>Navegación local de un robot móvil con costes sociales aprendidos por demostración</b>	89
<i>Noé Pérez-Higueras, Rafael Ramón-Vigo, Fernando Caballero, Luis Merino</i>	
<b>CONTROLADOR RESETEADO DE DESLIZAMIENTO DE RUEDAS PARA SISTEMAS DE FRENADO</b>	90
<i>Emma Delgado, Antonio Barreiro, Miguel Díaz-Cacho, Pablo Falcón</i>	
<b>GENERACIÓN Y REPRODUCCIÓN DE SOMBRAS EN TIEMPO REAL EN EASY JAVA SIMULATIONS</b>	91
<i>Francisco J. García, Carlos A. Jara, Francisco A. Candelas, Fernando Torres, Francisco Esquembre</i>	

<b>Planificación de rutas para la cobertura de un área en tiempo mínimo mediante un sistema Multi-UAV</b>	92
<i>Ernesto Santana, Romualdo Moreno, Miquel Piera</i>	
<b>Diseño de control no lineal para regulación de tasa de crecimiento en cultivos multi-sustrato</b>	93
<i>Sebastián Nuñez, Fabricio Garelli, Hernán De Battista, Jesús Picó</i>	
<b>Localización de objetos 3D con ambigüedad de vista en tareas de guiado robótico</b>	94
<i>Carlos M. Mateo, Pablo Gil, Fernando Torres</i>	
<b>INTEGRACIÓN DE RECONOCIMIENTO DE ESCENAS Y LOCALIZACIÓN BASADA EN MONTE CARLO</b>	95
<i>Javier Perez, Fernando Caballero, Luis Merino</i>	
<b>DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DISTRIBUIDO EN ROBOTS MÓVILES SOBRE EL MIDDLEWARE DEL NÚCLEO DE CONTROL</b>	96
<i>Josep Tormo, Raúl Simarro Fernández, Eduardo Munera, José E. Simó Ten, Juan-Luis Posadas-Yagüe</i>	
<b>ENFOQUE UNIFICADO DEL DISEÑO DE PID MEDIANTE EL LUGAR DE LAS RAÍCES Y EN FRECUENCIA</b>	97
<i>Roberto Sanchis Llopis, Ignacio Peñarrocha Alós, Julio Ariel Romero Pérez</i>	
<b>HERRAMIENTA DE SIMULACION PARA EL DESARROLLO DE EXOESQUELETOS BASADA EN MATLAB-SIMULINK</b>	98
<i>Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco, Luis Moreno</i>	
<b>Reconstrucción cinemática del brazo humano mediante matrices de transformación</b>	99
<i>José María Catalán Orts, Ricardo Morales Vidal, Luis Daniel Lledó, José María Sabater Navarro, Nicolás García Aracil, Jorge Antonio Díez</i>	
<b>Diseño e implementación de una plataforma experimental para el control de vuelo, gestión y visualización de datos de UAVs</b>	100
<i>Santiago Sastre, José Luis Racero Robles, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó</i>	

<b>Configuración y ejecución de benchmarks de intervención robótica submarina en UWSim mediante herramientas Web</b>	101
<i>Javier Pérez Soler, Jorge Sales, Raul Marín, Enric Cervera, Pedro J. Sanz</i>	
<b>SISTEMA DE CONTROL DE HELICÓPTEROS MEDIANTE FIJACIÓN POR CABLE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE LAS VARIACIONES DE LA GUIÑADA EN VUELO ESTACIONARIO</b>	102
<i>Álvaro Caballero, Manuel Béjar, Aníbal Ollero</i>	
<b>AJUSTE DE CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS POR CUANTIFICACIÓN Y CRUCE DE NIVELES</b>	103
<i>Julio Ariel Romero, Roberto Sanchis Llopis, Ignacio Peñarrocha</i>	
<b>Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Entorno para Usuarios con Parálisis Cerebral</b>	104
<i>Miguel Velasco, Alejandro Clemotte, Rafael Raya, Ramón Ceres</i>	
<b>ESTIMACIÓN DE PARAMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO</b>	105
<i>Elías Revestido Herrero, Francisco Javier Lastra Santos, Francisco J. Velasco González, José María Riola Rodríguez, Juan Jesús Díaz Hernández, Luis Manuel Vega Antolín</i>	
<b>Desarrollo de un sensor subacuático ultrasónico y RF para posicionamiento en tareas de manipulación robótica</b>	106
<i>Diego Centelles, Jorge Sales, Raul Marín, Jose Vte. Martí, David Fornas, Pedro J Sanz</i>	
<b>SLAM VISUAL HÍBRIDO TOPOLÓGICO-MÉTRICO MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL</b>	107
<i>Lorenzo Fernandez, Luis Paya, Arturo Gil, Adrian Peidro, Oscar Reinoso</i>	
<b>NORMA IEC-61499 PARA EL CONTROL DISTRIBUIDO. APLICACIÓN AL CNC.</b>	108
<i>Esteban Querol, Julio A. Romero, Antonio M. Estruch, Fernando Romero</i>	
<b>MPC tuning in a hierarchical control structure for a wastewater treatment process</b>	109
<i>Ignacio Santin, Carles Pedret, Ramon Vilanova</i>	

<b>CONTROL JERÁRQUICO DE PLANTA COMPLETA DE UN CASO DE ESTUDIO DE CRISTALIZACIÓN DE AZÚCAR</b> <i>Rogelio Mazaeda, Smaranda Cristea, César de Prada</i>	110
<b>Analysis of controller performance in wastewater treatment</b> <i>Jean Carlos Malca, Ramon Vilanova</i>	111
<b>Entorno de desarrollo integrado para robots mini-humanoides basado en modelado por componentes</b> <i>Félix R. Cañadillas, Marcos Arjonilla Viñaras, Alberto Jardón Huete</i>	112
<b>Métodos bio-inspirados en el control PID de un motor</b> <i>Jacobo Sáenz Valiente, Matilde Santos Peñas</i>	113
<b>Diseño de una plataforma híbrida aéreo-terrestre para aplicaciones de inspección visual</b> <i>Joan Pep Company, Alberto Ortiz</i>	114
<b>Algoritmo para particionado automático de sistemas con criticidad mixta</b> <i>Emilio Salazar, Alejandro Alonso, Salvador Trujillo</i>	115
<b>ENFOQUE ESTRATÉGICO PARA EL PROBLEMA PEG-IN-HOLE UTILIZANDO PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS</b> <i>Fares Abu-Dakka, Mohamed Abderrahim</i>	116
<b>Gliif: Beyond QR Codes</b> <i>Oscar Deniz Suarez, Jose M. Gutierrez, Jesus Salido, Gloria Bueno, Alan Bologlu</i>	117
<b>VERIFICACION Y VALIDACION DE SISTEMAS DE CONTROL DE VUELO PARA MAV-VTOL BASADAS EN MATLAB STATEFLOW</b> <i>Pablo Rodriguez Diaz, Jesús G. Villagómez, Manuel Vargas Villanueva, Francisco R. Rubio</i>	118
<b>SENSORY PROCESSING OPTIMIZATION IN A SMART DEVICE</b> <i>Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera Sanchez, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Raul Simarro</i>	119

<b>CABEZA MECATRÓNICA CON INTELIGENCIA EMOCIONAL Y ARTIFICIAL</b>	120
<i>Sheila Lucero Sánchez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo</i>	
<b>CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PARA LA DINÁMICA SINÁPTICA DE UN SISTEMA NEURONAL BASADOS EN REDES DE PETRI Y MÁQUINAS DE ESTADOS</b>	121
<i>Martin Bogdan, Karim El-Laithy, Juan Ignacio Latorre, Emilio Jimenez</i>	
<b>ESTIMACIÓN MONOCULAR Y EFICIENTE DE LA POSE USANDO MODELOS 3D COMPLEJOS</b>	122
<i>Antonio Rubio Romano, Michael Villamizar, Luis Ferraz Colomina, Alberto Sanfeliu Cortés, Francesc Moreno Noguer, Adrián Peñate-Sánchez</i>	
<b>Alternativas de biología sintética para el control de rutas metabólicas</b>	123
<i>Pavel Zach, Alejandro Vignoni, Daniel Georgiev, Jesús Picó</i>	
<b>Uso de Simulink y Arduino para Prácticas de Robótica</b>	124
<i>Juan Gil Lozano, Antonio Muñoz Ramírez, Víctor Eugenio Torres López, Jesus Gomez</i>	
<b>CONFIGURATION MODEL FOR CONTROL KERNEL MIDDLEWARE BASED APPLICATIONS</b>	125
<i>Jose L. Beltran, Lorena Calabuig, Eduardo Munera, Jose Simo, Jose-Luis Poza-Luján</i>	
<b>NAVEGACIÓN REACTIVA EN ENTORNOS ESTRECHOS E INTRINCADOS</b>	126
<i>Javier Antich Tobaruela, Alberto Ortiz Rodríguez</i>	
<b>Control de Movimientos mediante Bus EtherCAT y LinuxCNC</b>	127
<i>Ignacio Rosales González, Víctor Eugenio Torres López, Jesus Gomez</i>	
<b>Survey on Progressive Image Compression, Transmission, its application in Underwater Intervention Missions</b>	128
<i>Eduardo Moscoso, Raul Marín, Jorge Sales, Pedro J. Sanz</i>	

<b>MARCO PARA EL ANÁLISIS DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN 3D OBTENIDA CON ESCÁNERES LÁSER</b>	129
<i>Pilar Merchán, Santiago Salamanca, Antonio Adán, María José Gómez</i>	
<b>Implementación de controladores PID y su Optimalidad en el espacio de objetivos</b>	130
<i>Helem Sanchez, Ramon Vilanova</i>	
<b>MÉTODO DE LOCALIZACIÓN PRECISA DE PUPILAS EN IMÁGENES A COLOR</b>	131
<i>J. Enrique Sierra, Matilde Santos</i>	
<b>Octree-Based Subsampling Criteria for Bathymetric SLAM</b>	132
<i>Albert Palomer, Pere Ridao Rodriguez, David Ribas Romagos, Guillem Vallicrosa</i>	
<b>OPERACIÒN OÌPTIMA DE LA PLANTA DE LOS 4 TANQUES</b>	133
<i>Mauricio Alva Howes, Alejandro García Delgado, Néstor García Hidalgo, Ramon Costa Castelló</i>	
<b>Nonlinear Predictive Control for the Four-Tanks Plant Flow Regulation</b>	134
<i>Juan Acevedo, Julio Luna, Noè Rosanas</i>	
<b>Estudio de escenarios de uso para un robot social asistencial para enfermos de Alzheimer</b>	135
<i>Miguel A. Salichs, Esther Salichs, Irene P. Encinar, Álvaro Castro-González, María Malfaz</i>	
<b>Extrusor Multifilamento para Impresión 3D en Color</b>	136
<i>Víctor Andueza García, Jesús Manuel Gómez de Gabriel</i>	
<b>Concurso en Ingeniería de Control 2014. Operación Óptima de la planta de 4 tanques. Control multivariable.</b>	137
<i>Alberto Pajares Ferrando, Francesc Xavier Blasco Ferragud</i>	
<b>CONTROL PREDICTIVO PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS POR LOTES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA</b>	138
<i>Alexander Rodriguez, Luis Felipe Acebes, Cesar De Prada, Rogelio Mazaeda</i>	

<b>DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS MÓVILES UTILIZANDO UN ESCÁNER LÁSER MEDIANTE FILTROS DE KALMAN</b>	139
<i>Marc Bosch Jorge, Angel Soriano, Ángel Valera, Antonio J. Sánchez Salmerón</i>	
<b>Control of a Quadruple Tank Process using a Mixed Economic, Standard MPC</b>	140
<i>Adrià Soldevila, Julen Cayero, Jean Carlo Salazar, Damiano Rotondo, Vicenç Puig</i>	
<b>PROPUESTA DE ONTOLOGÍA PARA EL CONTROL DE ENTORNOS EXTERIORES</b>	141
<i>Miguel Juan-Monter, Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera, Raúl Simarro Fernández</i>	

# IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE CONTROL BILATERAL DE 1 GDL CON ARDUINO PARA TELERROBÓTICA

Adrián Peidró, Juan José Rodríguez, José María Azorín, Óscar Reinoso  
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández  
Avda. Universidad s/n, Edificio Innova  
03202 – Elche (Alicante), España  
adrian.peidro@goumh.umh.es

## Resumen

*Se presenta la implementación de una maqueta de bajo coste para la docencia de Telerrobótica. La maqueta permite realizar experimentos de control bilateral posición-posición sobre un par maestro-esclavo de un grado de libertad. El esquema de control se desarrolla sobre un Arduino Mega 2560 que centraliza el control del maestro y del esclavo. Los movimientos del maestro y del esclavo son gobernados por motores de corriente continua, consiguiendo el seguimiento mutuo entre ambos.*

**Palabras Clave:** Telerrobótica, Arduino, control bilateral, posición-posición, maqueta

## 1 INTRODUCCIÓN

La experimentación práctica con equipos reales además de en simulación es de gran importancia para conseguir que los alumnos asienten los conceptos teóricos impartidos en asignaturas de control automático y robótica. Por ejemplo, muchos estudiantes no comprenden realmente qué es físicamente un PID, ni cuál es su importancia, hasta que no ven uno en funcionamiento en el laboratorio.

Tradicionalmente, los estudiantes han podido experimentar en el laboratorio con equipos didácticos comerciales. En asignaturas de control, existen kits didácticos muy extendidos de sistemas clásicos como el servomotor, el péndulo invertido y el levitador magnético. Dichos kits permiten al estudiante experimentar con el control de tales sistemas a través de los controladores proporcionados por el fabricante o mediante Simulink. En robótica también existen algunos sistemas comerciales expresamente diseñados con fines educativos, como Scorbot [3]. También es una práctica común permitir a los estudiantes realizar experimentos prácticos directamente con robots industriales como el robot IRB-140 de ABB [1].

Desde hace unos años, la enseñanza práctica en asignaturas de automática se ha visto beneficiada por la aparición de sistemas como el kit Mindstorms NXT de robótica de Lego [6] o de plataformas como Arduino [2]. Estos sistemas permiten diseñar de forma muy sencilla y a bajo coste entornos

experimentales muy variados. En el ámbito de la robótica, los kits de Lego permiten construir robots con cualquier arquitectura y programarlos. Por su parte, Arduino permite diseñar experimentos de control realmente sofisticados, donde el alumno puede programar esquemas de control tan complicados como quiera. Hay numerosos y variados ejemplos de proyectos de robótica y control de bajo coste desarrollados con Arduino, como un robot móvil con brazo manipulador [5] y la automatización de instrumentos musicales [7].

La ventaja de sistemas como los descritos en el párrafo anterior es que permiten que sea el propio alumno quien construya la maqueta o sistema con el que experimentará, lo cual le permite adquirir una visión global de los sistemas automáticos: además de diseñar un controlador, el estudiante ha de comprender cómo comunicar de forma efectiva dicho controlador con la planta para leer las variables a controlar y para ejercer su acción de control sobre el proceso a controlar. Como desventaja, la ejecución de tales proyectos integrales requiere tiempo y dedicación que en muchas ocasiones no puede exigirse a los alumnos.

En este contexto, este artículo presenta la implementación de una maqueta de un robot teleoperado de un grado de libertad para la realización de experimentos de control bilateral en asignaturas de Telerrobótica. La maqueta consta de un brazo maestro manejado por el usuario y de un brazo esclavo que se mueve en el entorno remoto siguiendo los movimientos del primero. Ambos brazos están controlados por una tarjeta de Arduino MEGA 2560. La maqueta está integrada por componentes de bajo coste y puede utilizarse para diseñar un entorno experimental con el que el estudiante puede realizar prácticas de Telerrobótica.

El resto de este artículo está organizado como sigue. Primero, en la Sección 2 se revisa la Telerrobótica y su esquema de control bilateral más básico. A continuación, la Sección 3 presenta los componentes de la maqueta diseñada. En la Sección 4 se describe la implementación del algoritmo de control en Arduino, y su interacción con el resto de la maqueta. En la Sección 5 se describe el funcionamiento global de la maqueta, y en la Sección 6 se presentan algunos

experimentos de funcionamiento de la misma. Finalmente, el artículo concluye en la Sección 7, donde también se analizan los trabajos futuros.

## 2 TELERROBÓTICA Y CONTROL BILATERAL

La Telerrobótica estudia los sistemas en los que un robot es operado a distancia por una persona. Estos sistemas disponen de un robot esclavo que se mueve por un entorno en el que no está presente el operario humano, y de un dispositivo maestro que es empleado por el operario para controlar los movimientos de dicho robot.

Una de las metas de la Telerrobótica es lograr que el operario sienta como si estuviera en el entorno del robot esclavo, de forma que las fuerzas ejercidas por el entorno sobre dicho robot se puedan transmitir hacia la persona y que ésta pueda sentir las, por ejemplo cuando el robot colisiona con un obstáculo de su espacio de trabajo o cuando el robot agarra algún objeto del entorno. Los sistemas de control de Telerrobótica en los que se proporciona una realimentación de fuerzas desde el robot hacia la persona que lo controla se denominan **bilaterales** debido a que los comandos de movimiento y fuerza no fluyen sólo del operario al robot, sino que el robot esclavo también refleja fuerzas hacia el operario.

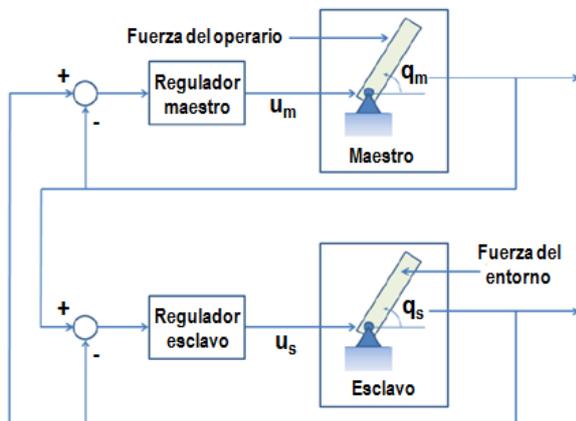


Figura 1: Esquema de control bilateral posición-posición.

El sistema de control bilateral más sencillo en Telerrobótica es el esquema posición-posición, mostrado en la Figura 1. En este esquema, la posición del maestro se emplea como referencia a seguir por el esclavo y viceversa, la posición del esclavo se emplea como posición de referencia a seguir por el maestro, de manera que maestro y esclavo se siguen mutuamente. Virtualmente, maestro y esclavo se comportan como si estuvieran conectados mediante un muelle [4]. Por ejemplo, si el esclavo choca con un obstáculo del entorno y ve impedido su

movimiento, el operario siente una fuerza en el dispositivo maestro al intentar forzar al esclavo a avanzar en la dirección del obstáculo, pues el esclavo no se mueve y el controlador del maestro tiende a llevar a éste hacia atrás, a la posición en la que se quedó atrapado el esclavo.

En el caso más sencillo, los reguladores empleados en la Figura 1 para que maestro y esclavo se sigan mutuamente son reguladores proporcionales, por lo que las leyes de control quedarían como sigue:

$$u_m = K_m(q_s - q_m) \quad (1)$$

$$u_s = K_s(q_m - q_s) \quad (2)$$

Donde  $u_i$  es la acción de control,  $K_i$  es la ganancia proporcional y  $q_i$  la posición angular, denotando el subíndice  $m$  al maestro y el subíndice  $s$  al esclavo.

## 3 COMPONENTES DE LA MAQUETA DE CONTROL

La Figura 2 muestra de forma esquemática la maqueta de control bilateral diseñada, con todos los componentes de la misma y sus relaciones. Los elementos presentes en la maqueta son:

- 2 motores de corriente continua modelo 2342 012 CR de Faulhaber ( $m_m$  y  $m_s$ )
- 2 encoders ópticos incrementales de Avago Technologies, modelo HEDS 5540 A ( $e_m$  y  $e_s$ )
- 2 reductoras formadas por ruedas dentadas de poliacetal (factor de reducción = 6.67) ( $r_m$  y  $r_s$ )
- 2 tubos de aluminio que ejercen los roles de eslabones maestro y esclavo ( $b_m$  y  $b_s$ )
- 2 controladoras ESCON 36/2 de Maxon Motors ( $c_m$  y  $c_s$ )
- Un controlador central formado por una placa Arduino MEGA 2560 y un circuito electrónico de filtrado ( $c_c$ )

Cada eslabón (maestro y esclavo) está accionado por un motor de corriente continua a través de una reductora, que amplifica el par del motor. Las posiciones angulares  $q_m$  y  $q_s$  del maestro y esclavo respectivamente se miden a través de sendos encoders situados en los ejes de los motores. Cada motor está accionado por una controladora ESCON, que actúa a modo de amplificador de potencia de la señal de control calculada por la placa de Arduino, que ejecuta el algoritmo de control posición-posición a partir de la posición leída de los eslabones maestro y esclavo. Seguidamente se describirá este esquema de control más detalladamente.

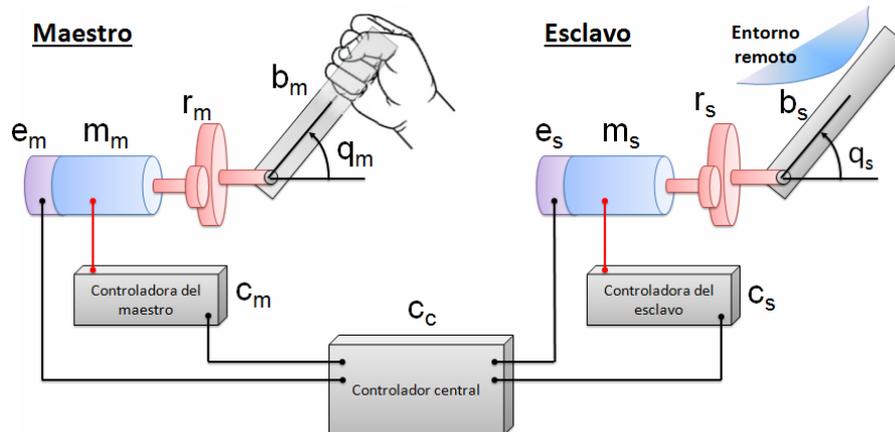


Figura 2: Esquema de la maqueta desarrollada para el control bilateral posición-posición. El subíndice 'm' denota 'maestro', mientras que el subíndice 's' denota 'esclavo'.

## 4 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL

El esquema de control posición-posición presentado en la sección anterior se ha dividido en varias partes: el algoritmo de control ejecutado en la placa Arduino, la etapa de filtrado de la acción de control y la amplificación de dicha acción de control.

### 4.1 ALGORITMO DE CONTROL EJECUTADO EN ARDUINO

En la Tabla 1 se muestra el código del algoritmo de control bilateral posición-posición que se ejecuta cíclicamente en la placa de Arduino MEGA 2560. Dicho código está integrado por cuatro funciones definidas tras la declaración de las variables. Se distinguen las variables enteras que llevan la cuenta de la posición angular del maestro y del esclavo ( $enc\_m\_count$  y  $enc\_s\_count$  respectivamente), las variables que almacenan la diferencia entre la posición deseada y real para el maestro y el esclavo ( $error\_m$  y  $error\_s$  resp.) y las acciones de control en tensión a aplicar a los motores que controlan al maestro y al esclavo ( $u\_m$  y  $u\_s$  resp.).

Tabla 1: Declaración de variables y funciones principales.

Nº	Código
1	<code>#include &lt;avr/interrupt.h&gt;</code>
3	<code>#define enc_s_B 2</code>
4	<code>#define enc_s_A 4</code>
5	<code>#define enc_m_B 3</code>
6	<code>#define enc_m_A 5</code>
8	<code>int enc_s_count = 0, enc_m_count = 0, error_s, error_m;</code>
9	<code>double u_s, u_m;</code>
11	<code>void setup(){</code>
...	...

18	<code>}</code>
20	<code>void loop(){</code>
...	...
55	<code>}</code>
57	<code>void interrupt_s(){</code>
...	...
63	<code>}</code>
65	<code>void interrupt_m(){</code>
...	...
71	<code>}</code>

La función `setup()` es la función de configuración que se ejecuta al arrancar la tarjeta Arduino o al reiniciarla. Sólo se ejecuta al comienzo.

Tabla 2: Función `setup()`.

Nº	Código
11	<code>void setup(){</code>
12	<code>pinMode(enc_s_B, INPUT);</code>
13	<code>pinMode(enc_s_A, INPUT);</code>
14	<code>pinMode(enc_m_B, INPUT);</code>
15	<code>pinMode(enc_m_A, INPUT);</code>
16	<code>attachInterrupt(0,interrupt_s,RISING);</code>
	<code>// la interrupción 0 está asociada a pin 2</code>
17	<code>attachInterrupt(1,interrupt_m,RISING);</code>
	<code>// la interrupción 1 está asociada a pin 3</code>
18	<code>}</code>

Esta rutina configura mediante la función `pinMode()` de Arduino los pines 2, 3, 4 y 5 de la placa como pines de entrada digitales, para leer los canales A y B de los encoders maestro y esclavo. Además, en las líneas 16 y 17 se configuran los pines 2 y 3, asociados a los canales B de los encoders esclavo y maestro respectivamente, como interrupciones. De esta manera, cuando en dichos pines se produzca un flanco de subida debido a un movimiento de los eslabones, se producirá una interrupción y se ejecutará una función asociada para actualizar las

variables que almacenan la posición del eslabón que se ha movido.

Una vez ha saltado la interrupción debido al flanco de subida en el canal B causado por el movimiento del eslabón correspondiente, se ejecuta la función asociada a dicha interrupción (**interrupt\_s** para el esclavo y **interrupt\_m** para el maestro). En dicha función se incrementa o decrementa en una unidad la posición del eslabón dependiendo del estado del canal A cuando se produce el flanco de subida del canal B. Esta función aparece descrita en la Tabla 3 para el esclavo, teniendo la misma forma la función asociada al maestro (pero sustituyendo las variables con subíndice 's' por las variables homólogas con subíndice 'm').

Tabla 3: Función interrupt\_s().

Nº	Código
57	<b>void interrupt_s() {</b>
58	<b>if</b> (digitalRead(enc_s_A) == LOW) {
59	enc_s_count = enc_s_count - 1;
60	} <b>else</b> {
61	enc_s_count = enc_s_count + 1;
62	}
63	}

Esta función implementa un algoritmo elemental que permite conocer en un encoder de 2 canales en cuadratura hacia dónde ha rotado el eje acoplado al encoder. Si cuando se ha producido un flanco positivo en el canal B, el canal A está a nivel bajo, entonces se debe decrementar en una unidad la variable entera enc\_s\_count, que lleva la cuenta de la posición del eje del motor esclavo, en pulsos. En caso contrario (si el canal A está a nivel alto), entonces se debe incrementar dicha variable entera. La Figura 3 muestra de forma gráfica este algoritmo.

Por último, la Tabla 4 muestra el contenido de la función **loop()**.

Tabla 4: Función loop().

Nº	Código
20	<b>void loop() {</b>
21	
22	error_s = enc_m_count - enc_s_count;
23	u_s = error_s/80.0;
24	<b>if</b> (u_s>5){
25	u_s = 5;
26	}
27	<b>if</b> (u_s<-5){
28	u_s = -5;
29	}
30	<b>if</b> (u_s >= 0){
31	analogWrite(6,round(255*u_s/5));
32	analogWrite(7,0);

33	}
34	<b>else</b> {
35	analogWrite(6,0);
36	analogWrite(7,round(255*abs(u_s)/5));
37	}
38	
39	error_m = enc_s_count - enc_m_count;
40	u_m = error_m/80.0;
41	<b>if</b> (u_m>5){
42	u_m = 5;
43	}
44	<b>if</b> (u_m<-5){
45	u_m = -5;
46	}
47	<b>if</b> (u_m >= 0){
48	analogWrite(8,round(255*u_m/5));
49	analogWrite(9,0);
50	}
51	<b>else</b> {
52	analogWrite(8,0);
53	analogWrite(9,round(255*abs(u_m)/5));
54	}
55	}

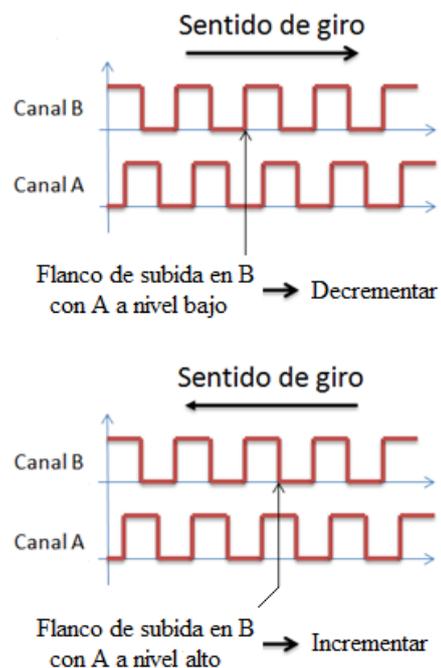


Figura 3: Determinación del sentido de giro mediante los dos canales del encoder.

El código que se escribe dentro de la función **loop()** de Arduino se ejecuta cíclicamente. En esta función se calcula la acción de control a aplicar a cada motor a partir de la posición tanto del maestro como del esclavo, calculadas mediante las interrupciones mostradas anteriormente.

En la línea 22 se calcula el error de seguimiento para el esclavo (**error\_s**). Dicho error es la posición

deseada para el esclavo menos la posición real del esclavo ( $enc\_s\_count$ ). En el esquema de control posición-posición, la posición deseada para el esclavo es la posición del maestro ( $enc\_m\_count$ ), ya que se busca el seguimiento mutuo.

En la línea 23 se calcula la acción de control  $u_s$  a aplicar al motor esclavo para forzarlo a seguir al maestro, de acuerdo con la ley de control (2). Por ensayo y error se ha determinado que como valor adecuado para dicha constante podría tomarse  $1/80$ . La acción de control es saturada a 5 en valor absoluto.

Una vez calculada la acción de control, ésta debe enviarse a los pines de salida de la Arduino como señal analógica. La tarjeta de Arduino no proporciona señales analógicas, luego esta información analógica se debe codificar en el *duty cycle* o ciclo de trabajo de las señales PWM disponibles en la tarjeta (ver Figura 4). Dicha acción de control analógica puede ser reconstruida a partir de la señal PWM empleando un filtro paso bajo, como se describe posteriormente.

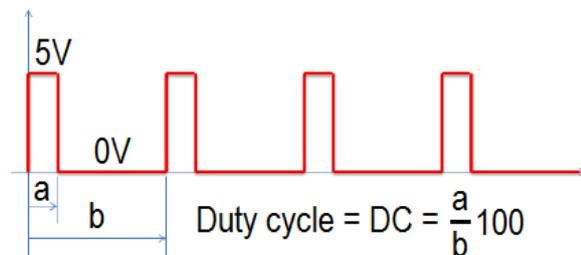


Figura 4: Señales PWM proporcionadas por los pines de Arduino.

De acuerdo a la Figura 4, Arduino sólo genera señales PWM positivas (0V ó 5V) (Figura 5 izquierda). Para conseguir una señal de control negativa, se toma como acción de control la diferencia entre la tensión PWM proporcionada por dos pines de la Arduino (Figura 5 derecha). De esta manera, cuando la acción de control  $u_s$  a aplicar al motor esclavo es positiva, por el pin 6 se envía una señal PWM con el *duty cycle* que corresponda y por el pin 7 se envía un cero, luego la acción de control enviada es igual a la señal PWM del pin 6. Cuando la acción  $u_s$  calculada es negativa, por el pin 6 se envía un cero y por el pin 7 se envía la señal PWM que corresponda, luego la acción de control es igual a la tensión del pin 7 cambiada de signo (líneas 30-37).

La señal PWM se envía por el pin correspondiente mediante la función `analogWrite(PIN, VALOR)`, donde el parámetro VALOR es un entero entre 0 y 255 que especifica el *duty cycle* deseado: un entero 0 se corresponde con un ciclo de trabajo del 0%, mientras que un entero 255 proporciona un ciclo del

100% (señal continua de 5V), obteniéndose los valores intermedios de forma proporcional.

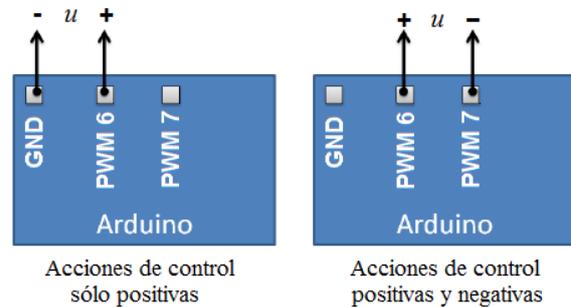


Figura 5: Formas de generar la señal de control  $u$  desde la Arduino, sin signo y con signo.

La acción de control calculada y almacenada en la variable  $u_s$  es directamente el valor de la tensión de salida analógica que se querría tener si Arduino pudiera generar directamente señales analógicas, por eso se ha saturado a 5V en valor absoluto.

Entre las líneas 39 y 54 de la Tabla 4 se realizan las operaciones necesarias para calcular y enviar la acción de control correspondiente para el maestro.

Es importante destacar la necesidad de emplear las interrupciones para contar los cambios de posición de los motores. De forma alternativa, al principio de la función `loop()` y antes de calcular las acciones de control, podrían incluirse sentencias condicionales similares a las de la Tabla 2, de manera que si se detecta un cambio de estado en el canal B del encoder con respecto al ciclo anterior de la ejecución de la función `loop()`, se incremente o decremente el contador de la posición en función del estado del canal A. No obstante, si el eje del motor se mueve lo suficientemente rápido, este método se salta pulsos y el conteo de la posición es incorrecto.

## 4.2 FILTRADO RC PARA SUAVIZAR LAS SEÑALES DE CONTROL PWM

Una vez se ha calculado y generado la acción de control con Arduino, la potencia de dicha acción debe amplificarse antes de poder aplicarse a los motores del maestro y del esclavo. Previamente a dicha amplificación, no obstante, es conveniente transformar las acciones PWM en señales lo más parecido posible a señales continuas. De esta forma se evita el molesto ruido que se produce al introducir una tensión PWM, con frecuencias elevadas, a un motor DC. Dicha transformación o suavizado se ha implementado mediante un simple filtro paso bajo RC como el de la Figura 6.

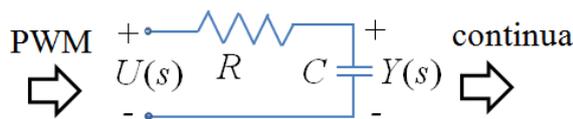


Figura 6: Filtro RC para suavizar las acciones de control PWM.

La función de transferencia de este filtro es:

$$G_F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{RCs+1} \quad (3)$$

La elección de los parámetros  $R$  y  $C$  se ha realizado a través de simulaciones en Simulink, escogiéndose finalmente  $R = 3.3k\Omega$  y  $C = 1\mu F$ . En la Figura 7 se muestra, en simulación, el resultado de introducir a este filtro una señal PWM como la mostrada en dicha figura. La frecuencia de la PWM es de 490 Hz, como en Arduino. Durante el primer tercio del tiempo de simulación, la entrada es una PWM que se generaría en Arduino a partir de una acción  $u_s = 1.25$ , lo cual genera un *duty cycle* del 25% (línea 31 de la Tabla 4). En el segundo tercio de la simulación, la entrada es una PWM que se generaría en Arduino mediante una acción  $u_s = -3.5$ , que se corresponde con un *duty cycle* del 70%. Finalmente, en el tercio final la entrada tiene un *duty cycle* del 100%, es decir, es una señal continua. A la derecha en la Figura 7 se muestra la salida del filtro: en cada tramo se logra reconstruir aproximadamente una señal continua con un nivel medio de tensión igual al valor de la variable  $u_s$  del código de Arduino que genera la PWM introducida al filtro en cada tramo.

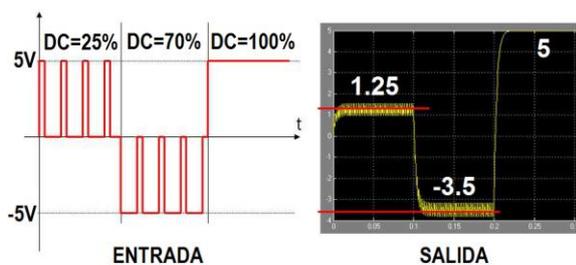


Figura 7: Señal PWM introducida al filtro diseñado y respuesta obtenida. DC = *duty cycle*.

Como puede comprobarse, la señal de salida es aproximadamente continua, salvo que tiene un pequeño rizado acoplado que puede provocar que los motores chirríen ligeramente. En cualquier caso, el comportamiento es mucho mejor que si no se emplea ningún filtro en absoluto. El rizado podría reducirse aún más mediante filtros más sofisticados, pues se ha empleado un sencillo filtro lineal de primer orden.

### 4.3 AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DE CONTROL EN LAS CONTROLADORAS DE LOS MOTORES

El último paso antes de aplicar la acción de control a los motores es amplificar la potencia de dichas señales de control. Los voltajes de control de salida de los filtros no disponen de la potencia suficiente para mover los motores, ya que la Arduino no puede proporcionar tanta corriente por sus pines. Para solucionar esto, la señal de control se introduce a la controladora de cada motor.

Las ESCON 36/2 de Maxon Motors son servo-controladoras muy versátiles para motores de corriente continua de pequeña potencia y fácilmente configurables mediante el software ESCON Studio. Para este artículo han sido configuradas para funcionar como un simple amplificador, de manera que aplican a los motores una tensión proporcional a la que se obtiene a la salida de los filtros RC. De forma alternativa, estas controladoras se pueden configurar para hacer un control en corriente (par) o en velocidad, aunque se ha preferido realizar un control por tensión (controladoras configuradas en lazo abierto) para tener un mayor control sobre el tipo de regulación realizada en cada motor (es decir, así el lazo de control se cierra puramente mediante la Arduino, no hay bucles de control anidados).

El factor de proporcionalidad escogido para las dos controladoras es la unidad, luego la tensión que aplica cada controladora a cada motor es exactamente la tensión obtenida a la salida de los filtros RC. De esta forma, las controladoras actúan únicamente como amplificación de la potencia: aplican la tensión deseada a los motores y les proporcionan la corriente demandada por éstos.

Una ventaja de las controladoras ESCON 36/2 es que pueden configurarse para admitir como acción de control directamente una señal PWM, de forma que aplican al motor una tensión continua que depende del *duty cycle* de dicha señal PWM. De esta manera, el filtro RC no sería necesario y bastaría conectar directamente Arduino con las controladoras. No obstante, para otras controladoras que no admitan esta posibilidad sí es conveniente incluir dicho filtro.

Finalmente, la Figura 8 resume la secuencia de operaciones a realizar para transformar una acción de control almacenada en una variable de tipo *double* en Arduino en la tensión eléctrica aplicada en los bornes de uno de los motores de corriente continua del sistema.

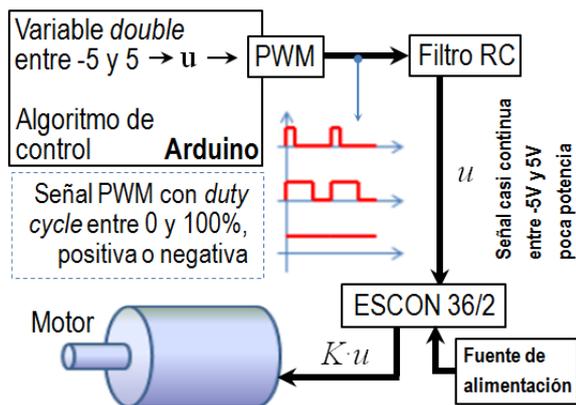


Figura 8: Secuencia de operaciones para transformar una acción de control de tipo *double* almacenada en Arduino en una tensión analógica.

## 5 FUNCIONAMIENTO DEL ESQUEMA COMPLETO

En este apartado se resume detalladamente el funcionamiento de la maqueta de control completa mostrada de forma esquemática en la Figura 9, que incluye todas las conexiones entre los componentes. Seguidamente se describe el funcionamiento de la maqueta y las relaciones entre sus componentes:

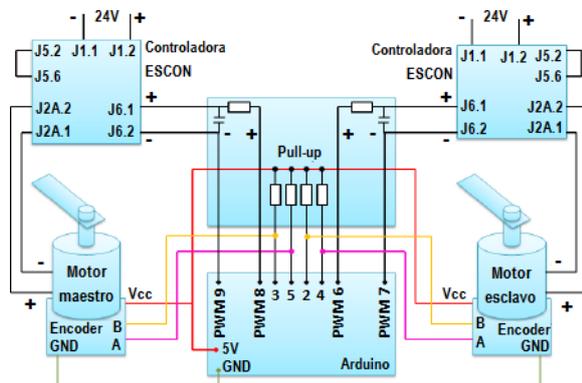


Figura 9: Esquema de control bilateral posición-posición.

- 1) La posición del eslabón maestro se mide a partir del encoder conectado al motor que lo impulsa, introduciéndose el canal B de dicho encoder por el pin digital 3 de la Arduino (correspondiente a la interrupción 1) y el canal A por el pin digital 5.
- 2) De forma similar, La posición del eslabón esclavo se mide introduciendo el canal B de su encoder por el pin 2 de la Arduino (interrupción 0) y el canal A por el pin digital número 4.
- 3) Los encoders van alimentados por la placa Arduino, que proporciona 5V. Dicha tensión también se utiliza para habilitar las señales digitales de los

canales A y B de ambos encoders por medio de 4 resistencias pull-up de 3.3k $\Omega$ .

4) La placa Arduino ejecuta el sencillo algoritmo de control descrito en la Sección 4.1, que calcula la acción de control para cada motor como el error de seguimiento multiplicado por una constante. A continuación proporciona la tensión de control PWM entre los pines PWM 8 y 9 para el maestro, y entre los pines PWM 6 y 7 para el esclavo.

5) Cada señal de control PWM se pasa por el filtro RC descrito en la Sección 4.2 para transformarlas en señales aproximadamente continuas entre -5 y 5V.

6) Acto seguido, las señales de control casi-continuas se introducen a las controladoras, las cuales aplican a los motores voltajes iguales a las acciones de control. Los motores pueden tomar la corriente necesaria de las controladoras mientras no sobrepasen el límite máximo de corriente de éstas (2A en continuo y 4A de forma transitoria) y de la fuente que las alimenta.

## 6 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Se ha comprobado mediante experimentos el correcto funcionamiento de la maqueta de control bilateral. Al mover uno de los eslabones, el eslabón maestro y el esclavo se siguen mutuamente con una respuesta rápida. Dado que se ha diseñado todo el sistema de forma simétrica, además, el funcionamiento es el mismo independientemente de qué eslabón se tome como maestro y cuál se considere esclavo. Por otra parte, cuando se está moviendo uno de los eslabones como maestro, puede sentirse en él la inercia del eslabón esclavo como una resistencia adicional, siendo éste uno de los principales problemas del esquema de control bilateral posición-posición: la fuerza transmitida al maestro no es puramente la de interacción del esclavo con el entorno, sino que va contaminada con la fuerza de inercia del esclavo.

A continuación se comparan las trayectorias del maestro y del esclavo a lo largo del tiempo para unos movimientos de prueba realizados sobre el maestro. En la Figura 10 se muestra la posición del maestro en grados (en rojo) a lo largo de una trayectoria y su seguimiento por el esclavo (en azul). En la Figura 11 se muestra otro experimento de seguimiento incluyendo la colisión del esclavo con un elemento de su entorno que le impide continuar siguiendo al maestro. En este caso se han intercambiado los papeles del maestro y el esclavo: en color azul se muestra la posición angular del maestro, mostrándose en rojo la del esclavo. Estas gráficas se han obtenido midiendo los canales A y B de ambos encoders con una tarjeta dspace1103, lo que permite visualizar el conteo de los encoders y la posición real de maestro y esclavo en una gráfica en el computador.

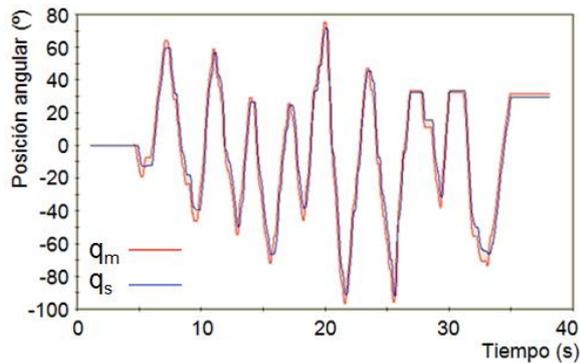


Figura 10: Ejemplo de seguimiento del maestro (rojo) por el esclavo (azul).

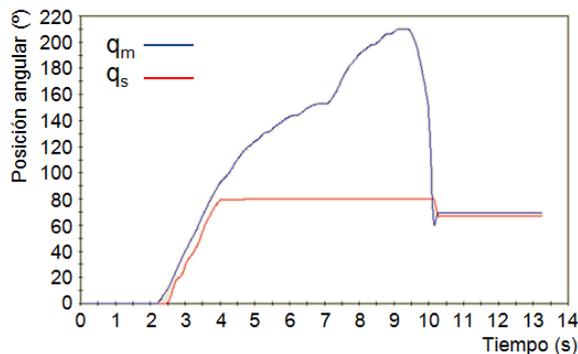


Figura 11: Choque del esclavo (rojo) con un obstáculo de su entorno.

## 7 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la implementación de una maqueta docente de control bilateral para la realización de experimentos con esquemas de control en Telerrobótica. Dicha maqueta consta de un único grado de libertad y se ha construido empleando equipos de bajo coste. En concreto, el clásico esquema de control bilateral posición-posición se ha implementado en una tarjeta Arduino MEGA 2560. Se ha indicado cómo implementar el mencionado algoritmo de control en código de Arduino, explicando cómo proceder a la lectura correcta, mediante interrupciones, de los pulsos generados por los encoders al mover los eslabones para evitar que el algoritmo se salte pulsos. También se ha descrito un procedimiento para transformar la acción de control PWM generada por Arduino en una tensión analógica útil con la que poder controlar los motores.

Esta maqueta puede ser empleada por estudiantes de Telerrobótica para estudiar diferentes controladores con los que mejorar tanto el seguimiento mutuo entre maestro y esclavo como la reflexión de esfuerzos del esclavo al maestro. Para ello los estudiantes pueden programar diferentes controladores en código de

Arduino, desde el controlador proporcional descrito en este artículo hasta controladores PID discretos.

Por otra parte, el esquema de control implementado en Arduino es un esquema discreto donde el tiempo que transcurre entre la aplicación de dos acciones de control sucesivas es igual al tiempo que tarda la tarjeta en ejecutar la función loop(), que se ve afectado por las interrupciones generadas por los pulsos de los encoders. Por tanto, esta maqueta también puede utilizarse por los alumnos para estudiar sistemas muestreados de control donde el periodo de muestreo no es constante, a diferencia de los sistemas con periodo constante normalmente estudiados en asignaturas de control discreto.

La utilización de Arduino en la realización de proyectos de control permite estudiar fenómenos como el anterior, que son obviados cuando se utilizan otras plataformas en las que la programación del algoritmo de control se realiza a más alto nivel (p.e. mediante diagramas de bloques); plataformas que facilitan la tarea del estudiante pero que también le ocultan algunos problemas prácticos de importancia.

## Referencias

- [1] <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140>
- [2] <http://www.arduino.cc/es/>
- [3] <http://www.intelitek.com>
- [4] Siciliano B, Khatib O (Editores). Springer Handbook of Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 1611p. ISBN: 978-3-540-23957-4.
- [5] Soriano, A., Marín, L., Juan, R., Casalilla, J., Valera, A., Vallés, M., & Albertos, P. Plataforma robótica de bajo coste y recursos limitados basada en Arduino y dispositivos móviles. XXXIV Jornadas de Automática. Terrassa, 4-6 de septiembre de 2013.
- [6] Valera, A.; Valles, M.; Fernandez, A.; Albertos, P., "Platform for the development of mechatronic practical works based on LEGO Mindstorms NXT robots," *Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE*, vol., no., pp.1224,1229, 8-10 July 2009
- [7] Vallvé Navarro, J., & Costa Castelló, R. Automatización de instrumentos musicales: un proyecto integral de ingeniería industrial. XXXIII Jornadas de Automática. Vigo, 5-7 de septiembre de 2012.