



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

<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>	

# CONTROL DE UN ASCENSOR COMO CASO PRÁCTICO PARA LA DOCENCIA DE CONTROL AVANZADO

Adrián Peidro, Arturo Gil, José María Marín, Luís Payá, 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 un problema práctico de control de un ascensor no lineal con cargas variables, incluyendo su modelado, identificación, discretización y control tanto en simulación como con una maqueta real del ascensor. Dicho problema permite introducir esquemas adaptativos de control de sistemas no lineales a alumnos de asignaturas de ingeniería de control mediante un caso práctico completo. El esquema de control adaptativo estudiado es robusto en el sentido de que no requiere un conocimiento perfecto de los parámetros del sistema, admitiendo cierto error. Los experimentos con la maqueta revelan aspectos prácticos de implementación normalmente obviados en simulación y que son importantes en la formación de ingenieros.*

**Palabras clave:** Linealización por Realimentación, control, ascensor, identificación, RLS

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el problema de control de un ascensor no lineal donde la carga transportada varía de forma desconocida, requiriéndose un mecanismo de adaptación para controlarlo con precisión. El ejemplo práctico que se propone puede utilizarse para iniciar a los alumnos de asignaturas de control avanzado en técnicas adaptativas de control no lineal mediante un sistema más sencillo que otros sistemas no lineales tradicionalmente utilizados en la enseñanza, como el clásico péndulo invertido. Además se trata de un proyecto integral que abarca numerosos conceptos fundamentales para todo investigador o profesional del ámbito de la ingeniería de control: aplicación práctica del control, modelado matemático de sistemas dinámicos, discretización e identificación, simulación del control e implementación con equipamiento real.

El esquema de control no lineal y adaptativo estudiado es una combinación de la técnica de Linealización por Realimentación (*Feedback Linearization*) con identificación en línea por mínimos cuadrados. Esta combinación de técnicas ha sido estudiada por otros autores para controlar moto-

res síncronos y asíncronos ([1], [9], [5]), sistemas caóticos discretos [8], robots móviles ([3], [6]), el pH de un proceso [7] o la fuerza en un sistema robótico de inyección de células [11], pero no se ha aplicado para controlar un ascensor.

El problema estudiado en este artículo es el resultado de un trabajo realizado por uno de los autores durante el curso académico 2013-2014 como alumno de la asignatura de Ingeniería de Control del Máster en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación de la Universidad Miguel Hernández. Dicha asignatura presenta técnicas avanzadas de control que generalmente no se estudian, o se estudian superficialmente, en asignaturas de ingeniería industrial, como control inteligente, no lineal, multifrecuencia o adaptativo. La asignatura se evalúa mediante la realización de un trabajo sobre cualquier técnica avanzada de control, teniendo los alumnos total libertad para plantear su proyecto, fomentándose así su motivación y creatividad.

El resto del artículo está organizado como sigue. La Sección 2 revisa la técnica de Linealización por Realimentación. En la Sección 3 se modela la dinámica del ascensor a controlar. A continuación, dicho control se simula en la Sección 4 suponiendo que la carga del ascensor es constante. Las limitaciones del controlador diseñado cuando la carga varía se analizan en la Sección 5, sugiriéndose la mejora del controlador mediante técnicas de adaptación. En la Sección 6 se discretiza el modelo del ascensor para su identificación, presentándose en la Sección 7 el identificador a utilizar. El funcionamiento del esquema resultante se analiza en simulación en la Sección 8, probándose sobre una maqueta real del ascensor en la Sección 9. Finalmente, la Sección 10 concluye este artículo.

## 2. LINEALIZACIÓN POR REALIMENTACIÓN

En esta sección se revisa la técnica de Linealización por Realimentación (LR) para controlar sistemas dinámicos de la forma siguiente:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}) + g(y, \dot{y}) u \quad (1)$$

donde  $y \in \mathbb{R}$  es la salida y  $u \in \mathbb{R}$  es la entrada.  $f$  y  $g$  son funciones no lineales que dependen de  $y$  y  $\dot{y}$  (en adelante se omitirá esta dependencia explícita en la notación) con  $g(y, \dot{y}) \neq 0$ . El objetivo de control es que la salida  $y(t)$  siga una trayectoria deseada  $y_d(t)$ . El control LR pretende cancelar las no linealidades de (1) para que el sistema controlado se comporte de forma lineal, aplicando la siguiente ley de control:

$$u = \frac{\ddot{y}_d - k_1\dot{e} - k_2e - f}{g} \quad (2)$$

donde el error de seguimiento  $e = y - y_d$  es la diferencia entre la salida real y la deseada. Al sustituir  $u$  de (2) en (1)

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= f + g \frac{\ddot{y}_d - k_1\dot{e} - k_2e - f}{g} \\ &= f + \ddot{y}_d - k_1\dot{e} - k_2e - f \\ &= \ddot{y}_d - k_1\dot{e} - k_2e \end{aligned} \quad (3)$$

$$\ddot{y} - \ddot{y}_d + k_2\dot{e} + k_1e = \ddot{e} + k_2\dot{e} + k_1e = 0 \quad (4)$$

se tiene que el error de seguimiento evoluciona según una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden. Si  $k_1$  y  $k_2$  se escogen de forma que las raíces del polinomio característico asociado a la anterior ecuación diferencial

$$s^2 + k_2s + k_1 = 0 \quad (5)$$

tienen todas parte real negativa, entonces el error convergerá a cero y la salida  $y$  del sistema seguirá a la trayectoria deseada  $y_d$ . La técnica de LR funciona siempre que el modelo utilizado para calcular la acción de control  $u$  en (2) describa la dinámica del sistema con suficiente precisión, en otro caso el control podría no conseguirse. Efectivamente, supóngase que la dinámica del sistema a controlar obedece la siguiente ecuación diferencial donde las funciones  $\tilde{f}$  y  $\tilde{g}$  no coinciden exactamente con las funciones  $f$  y  $g$  utilizadas para modelar dicho sistema:

$$\ddot{y} = \tilde{f} + \tilde{g}u \quad (6)$$

Cuando la acción de control  $u$  empleada para controlar este sistema se calcula según (2) usando las funciones  $f$  y  $g$ , la ecuación del sistema en bucle cerrado será

$$\ddot{y} = \tilde{f} + \tilde{g} \frac{\ddot{y}_d - k_1\dot{e} - k_2e - f}{g} \quad (7)$$

Dado que  $f \neq \tilde{f}$  y  $g \neq \tilde{g}$ , los términos no pueden cancelarse como en la ecuación (3) luego el sistema en bucle cerrado no obedecerá (4) y el error no evolucionará a cero necesariamente, por lo que la trayectoria deseada podría no seguirse. En la siguiente sección se modelará la dinámica de un ascensor, para posteriormente controlarlo utilizando la técnica LR presentada en este apartado.

### 3. DINÁMICA DEL ASCENSOR

La Figura 1 muestra el ascensor a controlar. El ascensor es impulsado por un motor DC y dispone de un eje, una polea y una cabina que transporta cargas. La entrada  $u$  a este sistema es el voltaje aplicado al motor, y su salida  $y$  es la posición vertical de la cabina, medida positiva hacia abajo. Asumiendo un motor DC de imán permanente con inductancia despreciable, la ecuación (8) es el equivalente eléctrico del motor (Figura 2a):

$$u = RI + k_v\dot{\phi} \quad (8)$$

donde  $u$  es el voltaje aplicado,  $R$  es la resistencia entre terminales,  $I$  es la corriente,  $k_v$  es la constante de velocidad-fuerza contraelectromotriz y  $\phi$  es la posición angular del rotor del motor. Como muestra la Figura 2b, el par electromagnético generado por la corriente eléctrica debe mover el rotor, la reductora, el eje, la polea y la cabina del ascensor, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\tau = k_i I = (J_r + J_g)\ddot{\phi} + \frac{1}{n} \left( J_{ep} \frac{\ddot{\phi}}{n} - Tr \right) \quad (9)$$

en la que  $k_i$  es la constante de par,  $J_r$  es la inercia del rotor,  $J_g$  es la inercia de la reductora reducida al eje del motor,  $n > 1$  es el factor de reducción,  $J_{ep}$  es la inercia del conjunto eje-polea,  $T$  es la tensión del cable y  $r$  es el radio de la polea. Finalmente, la segunda ley de Newton establece el movimiento de la cabina (véase la Figura 2c):

$$m_c\ddot{y} = m_cg - T \quad (10)$$

donde  $m_c$  es la masa de la cabina (incluida la carga transportada),  $y$  es la posición vertical de la cabina y  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  es la aceleración de la gravedad. Además, se asumirá que el cable no desliza sobre la polea, obteniéndose dos ecuaciones adicionales:

$$\dot{y} = r\dot{\phi}n^{-1}, \quad \ddot{y} = r\ddot{\phi}n^{-1} \quad (11)$$

Combinando las ecuaciones (8) a (11) se obtiene una única ecuación diferencial relacionando  $y$  y  $u$ :

$$\ddot{y} = c_1\dot{y} + c_2u + c_3 \quad (12)$$

donde los coeficientes  $c_i$  son:

$$c_1 = -\frac{k_i k_v n^2}{J_T R}, \quad c_2 = \frac{r k_i n}{J_T R}, \quad c_3 = \frac{m_c r^2 g}{J_T} \quad (13)$$

y  $J_T = n^2 (J_g + J_r) + J_{ep} + m_c r^2$ . Para simular este sistema se utilizarán los siguientes valores numéricos para los parámetros, que pertenecen a equipos reales:  $R = 21,5 \text{ } \Omega$ ,  $k_v = 0,0212 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$ ,  $k_i = 0,0212 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ ,  $J_r = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $J_g = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $n = 62$ ,  $J_{ep} = 287,584 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $r = 0,0425 \text{ m}$ ,  $m_c = 0,18 \text{ kg}$ .

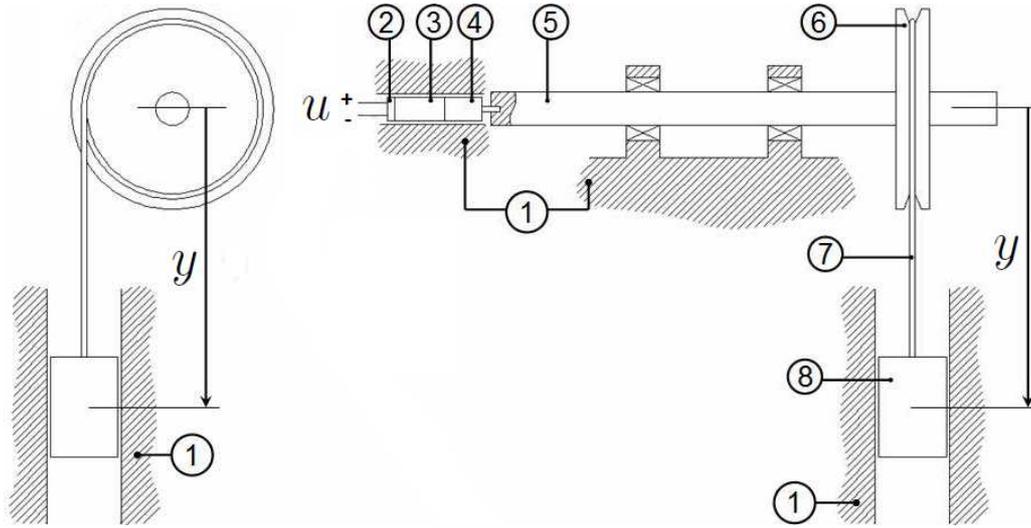


Figura 1: Partes del ascensor a controlar. 1) Bastidor. 2) Encoder para medir la posición. 3) Motor DC. 4) Reductora para incrementar el par del motor. 5) Eje. 6) Polea. 7) Cable. 8) Cabina.

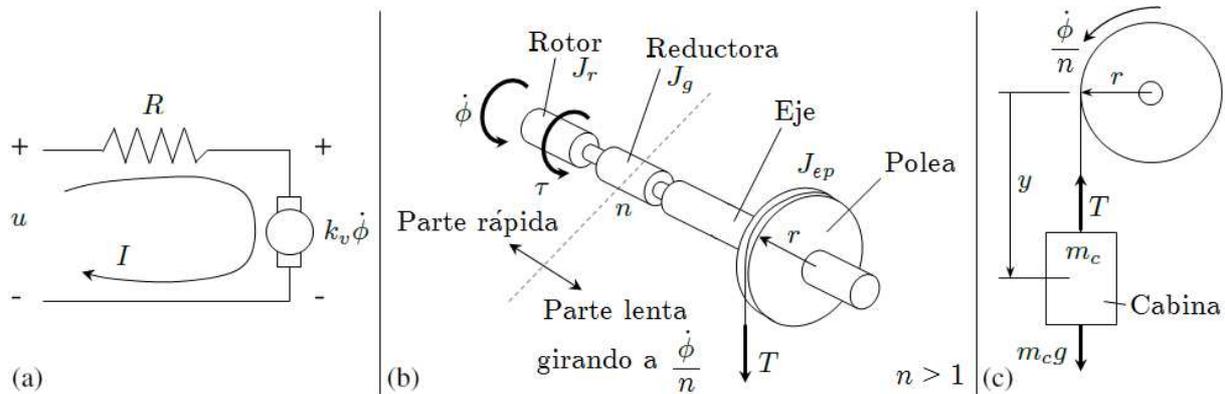


Figura 2: Partes del modelo dinámico del ascensor. (a) Circuito equivalente del motor DC. (b) Dinámica de las partes rotativas del sistema. (c) Fuerzas que actúan sobre la cabina del ascensor.

#### 4. CONTROL DEL ASCENSOR

En esta sección se estudia el control del ascensor para que éste siga la trayectoria periódica de la Figura 3, que es una onda casi trapezoidal obtenida al saturar entre 0,45 m y 0,05 m un seno de amplitud y valor medio de 0,25 m y una frecuencia de  $0,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ . Esta trayectoria simula el transporte de cargas entre dos pisos (Figura 4); cuando el ascensor llega a uno de los pisos se detiene durante unos segundos para cargar o descargar.

El movimiento del ascensor está gobernado por la ecuación diferencial (12), que relaciona la posición del ascensor con la tensión aplicada al motor. Esta ecuación es no lineal en términos de entrada-salida debido a la existencia del término independiente  $c_3$ , que no multiplica a  $y$ ,  $u$  ni a ninguna de sus derivadas. Para controlar este sistema se utilizará la técnica LR presentada en la sección 2. La ecuación (12) puede escribirse como (1) identificando

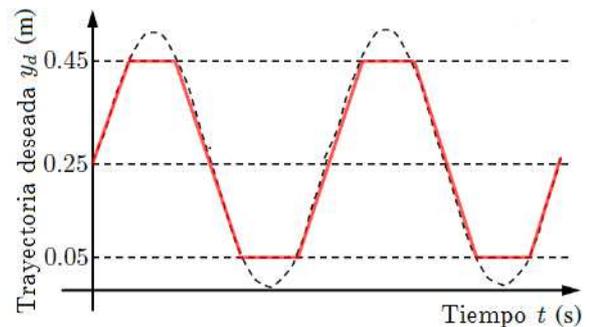


Figura 3: La trayectoria deseada es una onda casi trapezoidal obtenida saturando un seno.

las funciones  $f$  y  $g$ :  $f = c_1 \dot{y} + c_3$  y  $g = c_2$ . Si (12) reproduce con suficiente precisión la dinámica del ascensor, entonces la siguiente acción de control cancelará las no linealidades del sistema

$$u = \frac{\ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - c_1 \dot{y} - c_3}{c_2} \quad (14)$$

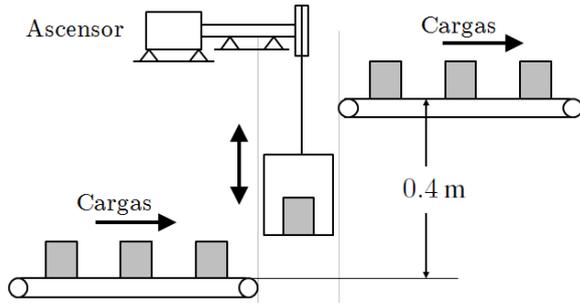


Figura 4: Aplicación práctica del problema.

y el error de seguimiento evolucionará según (4), que fuerza al error a converger hacia cero para cualquier condición inicial si  $k_1$  y  $k_2$  son ambas positivas. Dicha evolución depende de  $k_1$  y  $k_2$ , que determinan las raíces de la ecuación característica (5) asociada a (4). Cuando dichas raíces tienen parte imaginaria no nula, se producen oscilaciones en el seguimiento debido a los términos senoidales de la solución de la ecuación diferencial. Para evitar estas oscilaciones,  $k_1$  y  $k_2$  se elegirán para obtener raíces reales negativas. Además se impondrá que dichas raíces sean iguales para simplificar el análisis, luego  $k_1 = (k_2/2)^2$ . El diseño del regulador se realizará simulando en Simulink el sistema controlado para diversos valores de  $k_2 > 0$ . Las simulaciones se realizarán con los valores numéricos indicados al final de la sección anterior, que proporcionan los siguientes coeficientes:  $c_1 = -33,75 \text{ s}^{-1}$ ,  $c_2 = 1,09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$  y  $c_3 = 1,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Las simulaciones demuestran que si  $k_2$  es pequeño el seguimiento es pobre y lento, y que cuanto mayor es  $k_2$  más fiel es el seguimiento de la trayectoria, de modo que si  $k_2$  es lo suficientemente elevado (p.e.  $k_2 = 40$ ) se logra un seguimiento perfecto en todo momento. No obstante, al aumentar  $k_2$  para lograr un seguimiento rápido también crece la acción de control  $u$ , que es la tensión aplicada al motor. En la práctica los amplificadores que alimentan a los motores se saturan en un límite de tensión, que aquí se supondrá de 24 V. De modo que se incluirá la condición de diseño:  $|u(t)| \leq 24 \text{ V} \forall t$ . Tras varias simulaciones se escoge el valor  $k_2 = 11$ , que permite un buen seguimiento (Figura 5) y produce unas tensiones máximas de 24 V durante el transitorio inicial de dicho seguimiento (Figura 6). Mayores valores de  $k_2$  producen tensiones por encima de 24 V.

## 5. LIMITACIONES DEL CONTROLADOR DISEÑADO

El controlador diseñado en la sección anterior ( $k_1 = 30,25$ ,  $k_2 = 11$ ) hace uso del modelo del

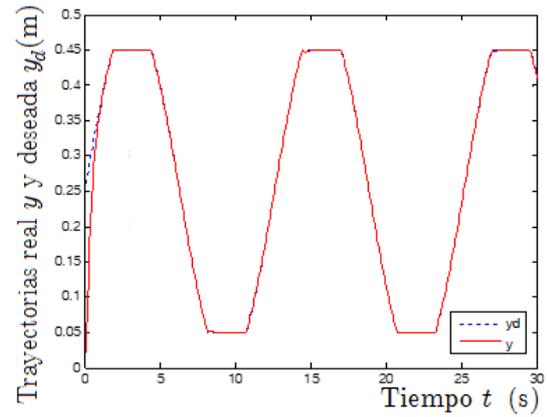


Figura 5: Seguimiento para  $k_2 = 11$ . Comparación de la trayectoria deseada (línea punteada) y real (línea continua).

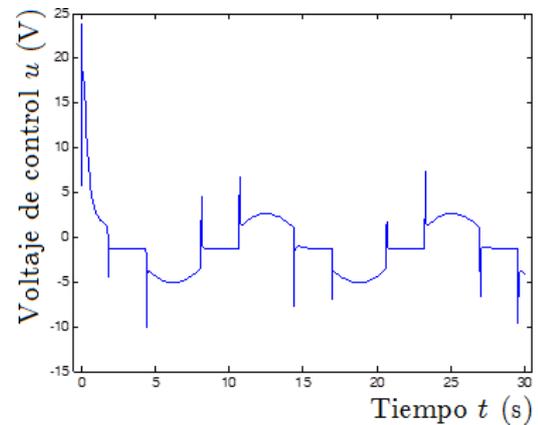


Figura 6: Tensión de control a lo largo de la trayectoria para  $k_2 = 11$ .

ascensor sin carga en su cabina, consiguiéndose un buen control. Si se incluye una carga, la masa  $m_c$  cambia y los parámetros  $c_i$  del modelo del ascensor también varían. Si el modelo que emplea el controlador no se actualiza en consecuencia, las no linealidades del ascensor podrían no compensarse y el controlador podría no funcionar.

Para verificar la validez del controlador diseñado cuando varía la carga transportada, se simulará que en el instante  $t = 22 \text{ s}$  se añade una carga de 1 kg a la cabina, tomando nuevos valores los coeficientes del sistema:  $c_1 = -19,19 \text{ s}^{-1}$ ,  $c_2 = 0,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$  y  $c_3 = 4,99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . En la Figura 7 se observa que tras el incremento de carga el controlador no consigue forzar el seguimiento de la trayectoria porque los parámetros  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  empleados por el controlador (que ha sido diseñado para el ascensor en vacío) ya no coinciden con los nuevos coeficientes de la ecuación diferencial del ascensor, luego no puede cancelarse el modelo y el error no obedece (4).

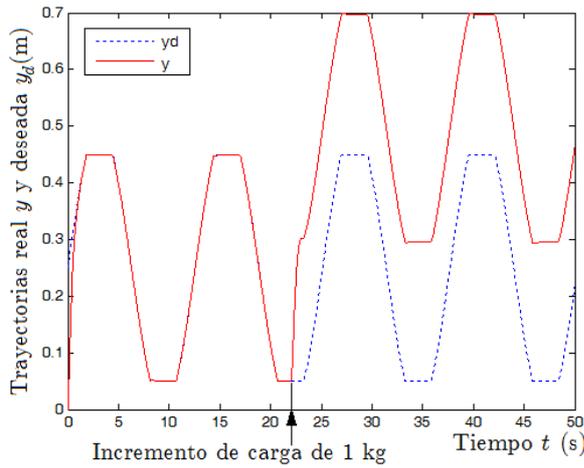


Figura 7: En  $t = 22$  s la carga transportada aumenta en 1 kg y la dinámica del ascensor ya no obedece al modelo usado por el controlador.

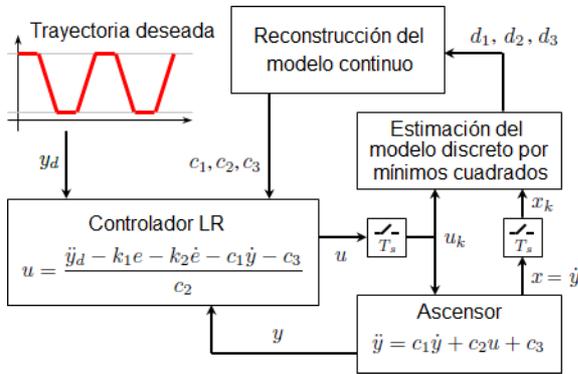


Figura 8: Esquema adaptativo para identificar y controlar el ascensor de forma simultánea cuando se producen cambios de carga.

Esta es la limitación de la técnica de Linealización por Realimentación: precisa un modelo fiel al proceso. La situación se agrava cuando se desconoce cómo varían los parámetros del proceso, p.e. si se supone que las cargas transportadas por el ascensor pueden tomar cualquier valor aleatorio. Para que el controlador LR siga funcionando con cargas aleatorias, se deben ajustar sus parámetros de acuerdo a la variación de carga en el ascensor. Para lograr esto se va a incorporar un identificador en línea que estime en todo momento los coeficientes  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  de la dinámica del ascensor para actualizar el controlador. Para ello se va a utilizar un algoritmo discreto de identificación, a continuación se van a reconstruir los parámetros continuos a partir del modelo discreto identificado y se va a actualizar el controlador LR con los parámetros continuos, según el esquema de la Figura 8.

## 6. DISCRETIZACIÓN DEL MODELO DEL ASCENSOR

El esquema adaptativo propuesto requiere discretizar el modelo del ascensor. La Ecuación (12) puede describirse de la siguiente manera:

$$\dot{x} = [c_1]x + [c_2 \ c_3] \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde  $x = \dot{y}$  es la velocidad de la cabina. Si la acción de control  $u$  es constante entre instantes de muestreo, se puede demostrar [4] que el siguiente modelo es una discretización exacta de (15):

$$x_{k+1} = d_1 x_k + d_2 u_k + d_3 \quad (16)$$

donde  $x_k = x(kT_s)$ ,  $T_s$  es el periodo de muestreo y

$$d_1 = e^{c_1 T_s}, \quad d_i = \frac{e^{c_1 T_s} - 1}{c_1} c_i, \quad i = 2, 3 \quad (17)$$

son los parámetros del modelo discreto. Mediante un identificador en línea pueden estimarse los parámetros  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  e invertir las anteriores relaciones para despejar los parámetros continuos  $c_i$  con los que actualizar el controlador. No obstante, esto no siempre es posible:  $c_1$  es proporcional al logaritmo de  $d_1$  y el valor estimado de  $d_1$  podría tornarse temporalmente negativo durante el proceso de identificación (especialmente cuando se detecta un cambio de carga). El logaritmo no está definido para argumentos negativos, luego el control quedaría temporalmente indefinido y el sistema podría desestabilizarse.

Esto puede evitarse si se utiliza una discretización aproximada. Si  $T_s$  es lo suficientemente pequeño, las exponenciales en (17) se pueden aproximar por  $e^{c_1 T_s} \approx 1 + c_1 T_s$  y las relaciones se tornan lineales

$$d_1 = 1 + c_1 T_s, \quad d_2 = c_2 T_s, \quad d_3 = c_3 T_s \quad (18)$$

pudiéndose invertir sin problemas. En este artículo se utilizará la discretización aproximada con  $T_s = 0,01$  s, que es suficiente para hacer válida la aproximación según se desprende de las simulaciones realizadas en bucle abierto.

## 7. IDENTIFICACIÓN EN LÍNEA DEL MODELO DISCRETO

El algoritmo recursivo de identificación por mínimos cuadrados (RLS en inglés) permite estimar en línea los parámetros de sistemas que son lineales en dichos parámetros, es decir, sistemas de la forma

$$x_{k+1} = \varphi_{k+1}^T \theta \quad (19)$$

donde  $\varphi_{k+1} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$  es el vector de regresión, que depende de manera no lineal de entradas y salidas

pasadas y  $\theta \in \mathbb{R}^{p \times 1}$  es el vector con los parámetros a estimar. El modelo discreto (16) del ascensor puede escribirse como (19) con  $\varphi_{k+1}^T = [x_k \ u_k \ 1]$  y  $\theta = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T$  ( $p = 3$ ), luego puede identificarse mediante este algoritmo. De forma general, el identificador RLS estima los parámetros mediante las siguientes ecuaciones recursivas:

$$\mathbf{L}_{k+1} = \frac{\mathbf{P}_k \varphi_{k+1}}{\lambda_{1,k} + \varphi_{k+1}^T \mathbf{P}_k \varphi_{k+1}} \quad (20)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \mathbf{L}_{k+1} (x_{k+1} - \varphi_{k+1}^T \theta_k) \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I}_p - \mathbf{L}_{k+1} \varphi_{k+1}^T) \frac{\mathbf{P}_k}{\lambda_{1,k}} \quad (22)$$

donde  $\theta_k$  es actualizado según (21) utilizando las entradas y salidas medidas.  $\mathbf{L}_k \in \mathbb{R}^{p \times 1}$  y  $\mathbf{P}_k \in \mathbb{R}^{p \times p}$  son respectivamente las matrices de ganancia y covarianza, mientras que  $\lambda_{1,k}$  y  $\lambda_{2,k}$  son los factores de olvido.  $\mathbf{I}_p$  es la matriz identidad de tamaño  $p$ . Los factores de olvido se introducen para que el algoritmo pueda detectar cambios en los parámetros (cambios de carga en el ascensor), ya que la forma estándar del algoritmo RLS (dada por  $\lambda_{1,k} = \lambda_{2,k} = 1$ ) supone que los parámetros son constantes y pierde la capacidad de detectar cambios en los mismos transcurrido cierto tiempo.

Una elección común para evitar esto es tomar  $\lambda_{2,k} = 1$  y  $\lambda_{1,k} = \lambda_1 \in (0, 1)$  ([1], [9]), de forma que las medidas más recientes tienen más peso en la estimación. Esta elección, no obstante, puede provocar inestabilidad en la estimación si el sistema no se excita lo suficiente durante la identificación [2], luego no se adoptará esta solución para identificar el ascensor pues también podría desestabilizar el control.

La pérdida de la capacidad de detectar cambios en los parámetros o la inestabilidad en la estimación se producen respectivamente porque la matriz de covarianza  $\mathbf{P}$  se hace muy pequeña o crece desmesuradamente. Una opción más sofisticada para los factores de olvido es la siguiente:

$$\lambda_{1,k} = 1 - \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_k \varphi_{k+1} \varphi_{k+1}^T \mathbf{P}_k)}{\text{tr}(\mathbf{P}_k) (a + \varphi_{k+1}^T \mathbf{P}_k \varphi_{k+1})} \quad (23)$$

$$\lambda_{2,k} = a^{-1} \lambda_{1,k} \quad (24)$$

Esta elección evita los dos problemas mencionados porque fuerza a que la traza de la matriz  $\mathbf{P}$  sea constante. Para identificar el modelo discreto del ascensor se emplearán las ecuaciones (23) y (24) con  $a = 1$ . Además, como condiciones iniciales para las ecuaciones recursivas (20)-(22) se tomará  $\mathbf{P}_0 = 5\mathbf{I}_3$ , mientras que los parámetros  $\theta_0$  se inicializarán como números aleatorios uniformes en  $(0, 1)$ .

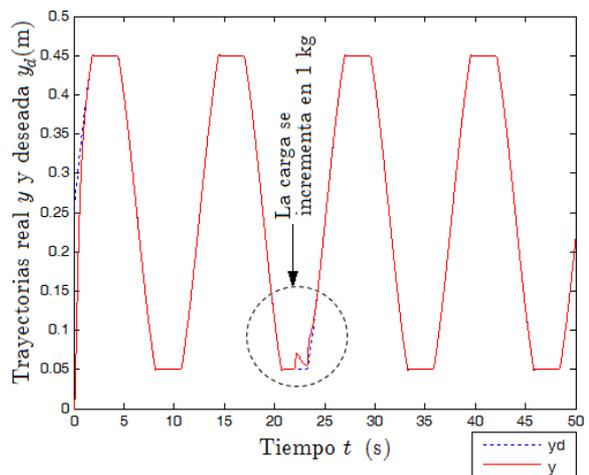


Figura 9: Respuesta de control con identificación en línea. La trayectoria es temporalmente perturbada tras el cambio de masa (zona rodeada), pero se corrige rápidamente cuando los nuevos parámetros son estimados.

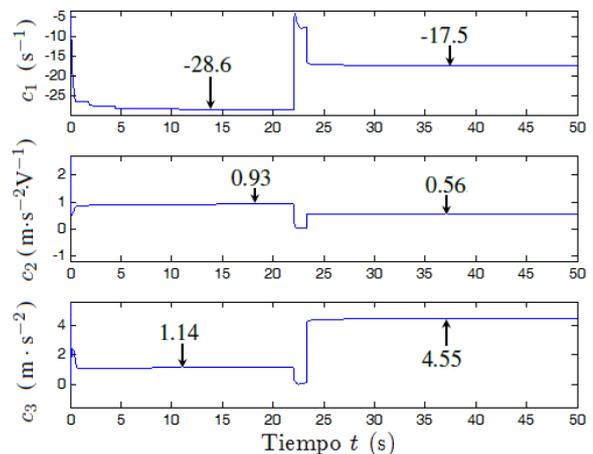


Figura 10: Gráficas con los parámetros  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  estimados por el algoritmo RLS durante la simulación.

## 8. CONTROL ADAPTATIVO DEL ASCENSOR

En esta sección se simula el esquema de control completo de la Figura 8, incluyendo el identificador discreto y el reconstructor del modelo continuo. En la Figura 9 se muestra el seguimiento de la trayectoria cuando la carga aumenta en 1 kg en  $t = 22$  s. Cuando la carga aumenta, la trayectoria real experimenta una pequeña perturbación mientras el identificador estima los nuevos parámetros del ascensor. El controlador logra corregir la trayectoria rápidamente ante cambios de carga.

La Figura 10 muestra la estimación de los parámetros  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  durante la simulación. La estimación del algoritmo RLS converge hacia parámetros

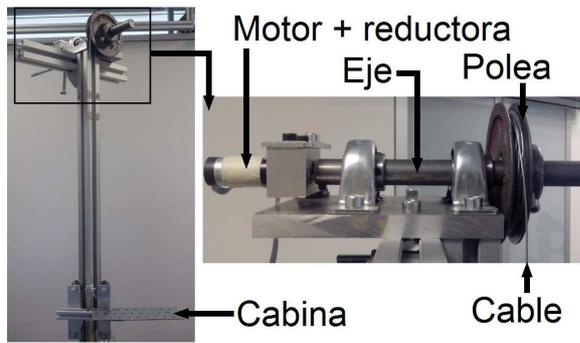


Figura 11: Maqueta construida del ascensor.

constantes antes y después del cambio de carga. No obstante, si se comparan los valores estimados de la Figura 10 con los valores numéricos reales empleados en simulación indicados en las secciones 4 y 5, se observa un error relativo del 15% y 10% en los parámetros estimados antes y después del cambio de carga, respectivamente. Este error se debe a la discretización aproximada empleada, pudiéndose disminuir tomando  $T_s$  más pequeños. Pese a este error, el control logra el seguimiento de la trayectoria con carga variable.

## 9. IMPLEMENTACIÓN EN UN ASCENSOR REAL

Se ha construido una maqueta del ascensor para validar en una planta real el esquema de control propuesto. La maqueta se muestra en la Figura 11 y contiene los mismos elementos que el sistema analizado en simulación. Las propiedades físicas indicadas en la sección 3 pertenecen a los equipos de la maqueta.

El esquema de control simulado en la sección anterior se ha probado en la maqueta, implementándolo en una tarjeta dspace1103 con un muestreo de  $T_s = 0,01$  s. La Figura 12 muestra la respuesta de control sobre el ascensor real. El control consigue el seguimiento de la trayectoria en los tramos de subida y bajada, pero se comporta peor en los puntos extremos de la trayectoria, a los que el ascensor no logra llegar. En  $t = 23,5$  s la carga del ascensor se incrementa en 0,7 kg, aunque esto apenas perturba la trayectoria.

La Figura 13 muestra la estimación de los parámetros durante el control. Al contrario que en simulación, las estimaciones no convergen a valores constantes. Esta diferencia se debe a diversos factores. En primer lugar, la velocidad  $x = \dot{y}$  empleada por el algoritmo RLS es accesible directamente en simulación, mientras que en el sistema real se obtiene derivando la señal de posición de un encoder. Si en simulación se introduce al identificador la velo-

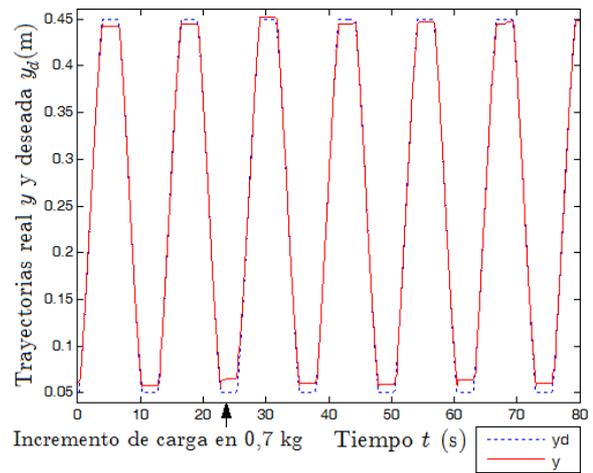


Figura 12: El controlador conduce el ascensor real por la trayectoria deseada, pero no logra un seguimiento perfecto.

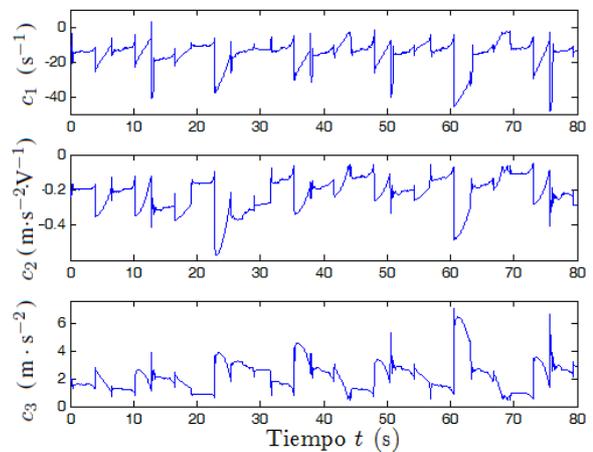


Figura 13: Estimación de los parámetros de la maqueta. Las estimaciones no convergen a constantes.

cidad obtenida mediante diferenciación numérica, también se observan variaciones en la estimación.

En segundo lugar, la posición  $y$  en la maqueta se obtiene de un encoder, que proporciona valores discretos de la posición, introduciendo un ruido de cuantización. Aun utilizando encoders de mucha resolución, al derivar dicha señal se obtiene una velocidad muy contaminada y difícil de filtrar [10], afectando a la calidad de las estimaciones.

La Figura 14 muestra los parámetros estimados en simulación cuando la velocidad empleada por el identificador se obtiene al derivar la señal de posición proporcionada por un encoder con una resolución de  $2,8125^\circ$ . Como puede comprobarse, aunque los factores mencionados no explican totalmente las variaciones observadas en la maqueta, los parámetros estimados en simulación ya no convergen a valores constantes.

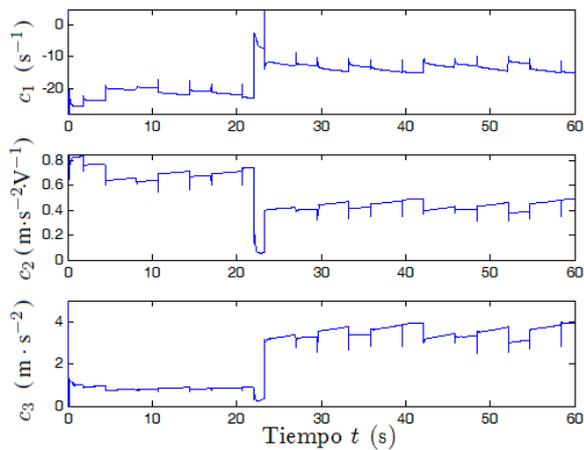


Figura 14: Estimación de los parámetros en simulación empleando la velocidad obtenida al derivar una señal de posición cuantizada.

## 10. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un problema planteado en una asignatura de máster para controlar un ascensor no lineal con carga variable mediante la técnica de Linealización por Realimentación con identificación por mínimos cuadrados. Este problema se propone como ejemplo didáctico para asignaturas de control en grado y máster pues permite poner en práctica mediante un ejemplo real todas las etapas de un problema de ingeniería de control: modelado, identificación, discretización, simulación e implementación en una planta real.

El problema presentado permite estudiar un esquema híbrido en el que el control no lineal emplea un modelo continuo que se estima mediante un algoritmo discreto. Se ha presentado una discretización aproximada que evita acciones de control indefinidas a costa de precisión en los parámetros estimados, que presentan errores del 15%. Aun así, se logra un buen control, lo cual prueba la robustez del esquema estudiado.

La implementación en un ascensor real del controlador propuesto permite estudiar importantes aspectos prácticos de implementación usualmente obviados en simulación, como la aparición de ruido al derivar una señal de posición cuantizada para obtener la velocidad y su efecto en la identificación del modelo y en el control, o la saturación de la acción de control.

Para el futuro, se pretende implementar el problema planteado en forma de laboratorio virtual y remoto utilizando Easy Java Simulations para que cualquier estudiante pueda experimentar con este problema de forma remota, sumándose a la gran variedad de laboratorios virtuales y remotos

de control automático disponibles en Internet.

## Referencias

- [1] A. Abianeh. Direct torque and flux control of ipm synchronous motor drive using input-output feedback linearization approach. In *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1813–1818, Nov 2011.
- [2] K. J. Åström and B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Courier Dover Publications, 2008.
- [3] H. Cho, M. Fadali, K. Lee, and N. Kim. Adaptive position and trajectory control of autonomous mobile robot systems with random friction. *Control Theory Applications, IET*, 4(12):2733–2742, December 2010.
- [4] S. Dominguez, J. Sebastián, and P. Campoy. *Control en el espacio de estado*. Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [5] M. Hajian, J. Soltani, G. A. Markadeh, and S. Hosseinnia. Input-output feedback linearization of sensorless im drives with stator and rotor resistances estimation. *Journal of Power Electronics*, 9(4):654–666, 2009.
- [6] W. F. Lages and E. M. Hemerly. Adaptive linearizing control of mobile robots. 1998.
- [7] A. Nejati, M. Shahrokhi, and A. Mehrabani. Adaptive input-output linearization control of ph processes. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2008.
- [8] H. Salarieh and M. Shahrokhi. Indirect adaptive control of discrete chaotic systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 34(4):1188 – 1201, 2007.
- [9] J. Soltani, H. Zarchi, G. Markadeh, and H. W. Ping. Adaptive speed tracking control of three-phase synchronous reluctance motor taking the iron loss resistance into account. In *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, pages 625–630, Oct 2007.
- [10] A. Tilli and M. Montanari. A low-noise estimator of angular speed and acceleration from shaft encoder measurement. *AUTOMATIKA-ZAGREB-*, 42(3/4):169–176, 2001.
- [11] Y. Xie, D. Sun, C. Liu, H. Tse, and S. H. Cheng. A force control approach to a robot-assisted cell microinjection system. *The International Journal of Robotics Research*, 29(9):1222–1232, 2010.