

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias

Javier G. González ^{a,*}, Rodolfo E. Haber ^b, Fernando Matia ^b, Marcelino Novo ^c

^a Departamento de Control Automático. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Ave. Las Américas s/n. 90400. Cuba.

^b Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC). Ctra. De Campo Real km. 0.200. La Poveda. 28500. Madrid. España.

^c Fagor Automation S. Coop. San Andres Auzoa, 19, 20500 Arrasate-Mondragón, Guipúzcoa.

Resumen

Los nuevos procesos de microfabricación imponen nuevos requisitos de precisión y robustez en los sistemas de control de posición y trayectoria, lo que abre nuevas líneas de investigación en el campo del modelado y el control, y la necesidad de evaluar técnicas de control inteligente tales como el control borroso. En este trabajo, se presenta por una parte el modelado clásico de partes eléctricas y mecánicas consideradas como un sistema de múltiples masas acopladas mediante una transmisión elástica y amortiguamiento, en presencia de la fricción y la holgura, dos no linealidades duras. Además, se muestra el diseño de un controlador a partir de un modelo paramétrico dependiente de la frecuencia de resonancia y del amortiguamiento. Como paso inicial del estudio, se diseña un sistema de control en cascada dotado de componentes anticipativas que es el esquema más utilizado en la industria. Con vistas a evaluar el alcance de las no linealidades en la ley de control, se sintetiza un control borroso en cascada equivalente a partir del método propuesto por Matia et al. 1992. Para evaluar el comportamiento del sistema de control, se consideraron incertidumbres en parámetros tales como la frecuencia de resonancia, el amortiguamiento y el ancho de la zona muerta de la holgura y se realizaron simulaciones considerando trayectorias circulares. Algunas cifras de mérito tales como la integral del valor absoluto del error en el tiempo (ITAE), el error máximo absoluto (MAE) y la integral del valor absoluto de la señal de control (IAU) se utilizaron en el estudio comparativo de ambos controladores en cascada. El estudio permitió comprobar que no hay diferencias significativas en el comportamiento de ambos sistemas de control (cascada clásico y cascada borroso). *Copyright* © CEA.

Palabras Clave:

control en cascada, control borroso, cifras de mérito, optimización, Nelder-Mead, microfabricación, fricción, holgura.

1. Introducción

Las especificaciones y los requisitos de acabado superficial y dimensional en la microfabricación, han obligado no solo al rediseño de los sistemas electromecánicos, sino también a mejorar la precisión y a minimizar los errores máximos de seguimiento en los ejes de las máquinas. Por tanto, es muy importante diseñar sistemas de control de posición y trayectoria con transitorios rápidos y errores de seguimiento del orden de décimas de micra. El objetivo de la microfabricación es crear microsistemas o micro componentes (típicamente de tamaños inferiores a 1cm) con microcomponentes (1-100 μm) de modo que se cumplan las

especificaciones y los requisitos funcionales de dichos microsistemas (Haber et al., 2002).

Desde el punto de vista del modelado, algunos sistemas electromecánicos han sido analizados bajo la simplificación y suposición de considerarlos como sistemas de una masa, como en (Yeh et al., 2009), (Xi et al., 2009) y (Xi et al., 2010). Estos resultados han demostrado que aún en la actualidad las prestaciones de los sistemas de control son insuficientes en presencia de no linealidades tales como la fricción y la holgura. Los exigentes requisitos de precisión en el seguimiento de referencias y de comportamiento transitorio unido a la influencia de las dinámicas no modeladas ponen en evidencia las carencias de estos diseños. En el sistema de dos masas se tiene en consideración la torsión elástica de los ejes o barras de transmisión largos, lo que explica la tendencia a la oscilación de los sistemas mecánicos. En

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: javier@uo.edu.cu (Primer Autor),
rodolfo.haber@car.upm-csic.es (Segundo Autor)

(Sabatier et al., 2003) se muestra con claridad el modelado y la propuesta del control de un sistema de cuatro masas. Por su parte, en (Szabat and Orłowska-Kowalska, 2009) se analiza el origen de las vibraciones torsionales tales como los cambios en la velocidad de la referencia, cambios en el par de la carga, fluctuaciones del par electromagnético, incorrecta alineación entre el motor eléctrico y la carga y el efecto de no linealidades del sistema.

Una de las principales restricciones para el diseño, radica en características inherentes a los sistemas mecánicos tales como la holgura y la fricción debido a la transmisión mediante ruedas dentadas o trenes de engranajes. En el caso de la holgura es una no linealidad capaz de producir ciclos límite tal y como se reporta en (Márton and Lantos, 2009). En la actualidad, la literatura recoge numerosos trabajos relacionados con el control de sistemas mecánicos en los que se considera la holgura en el diseño de una manera directa o indirecta como en (Márton and Lantos, 2009), (Peter et al., 2003), (Serkies and Szabat, 2013), (Scholing and Orlik, 2000) y (Thomsen and Fuchs, 2009).

Asimismo, es inevitable en todo mecanismo la existencia de la fricción entre sus partes. El fenómeno no lineal de la fricción es muy complejo ya que depende muchos factores y variables tales como: la temperatura, la lubricación en el eje del convertidor electromecánico, del mecanismo y de la transmisión, entre otros factores tal y como se analiza en (De Marchi, 1998), (Olsson et al., 1998) y (Li, 1999). En (Olsson et al., 1998) se puede encontrar un análisis detallado del fenómeno de la fricción y una descripción de los diferentes modelos que existen en la actualidad. En (Li, 1999) se emplea el modelo de dos masas con transmisión flexible y los autores realizan una revisión del fenómeno no lineal de la fricción, de sus modelos, del procedimiento de identificación y de las técnicas de compensación de la fricción. Entre las técnicas de control que se exponen de forma resumida en (Li, 1999) se encuentran: control robusto H_∞ , compensación adaptativa, control adaptativo por modelo de referencia, control por modo deslizante y control por aprendizaje.

Este trabajo explora uno de los diseños más clásicos, básicos y ampliamente utilizados por la industria para el control, en este caso el control en cascada. Además aprovechando el acervo en el campo del control inteligente y los métodos de transformación para obtener un sistema de control borroso equivalente se presenta un control en cascada borroso. El estudio presentado evalúa a partir de simulaciones el comportamiento del sistema de control en cascada lineal y borroso con resultados positivos en ambos casos.

2. Modelado del sistema electromecánico

En esta sección se presenta un modelo para el eje X de un sistema electromecánico multieje. Se asume que el modelo es válido para los tres ejes X-Y-Z, suponiendo accionamientos y partes mecánicas similares. El modelo consta de varias partes que serán descritas brevemente.

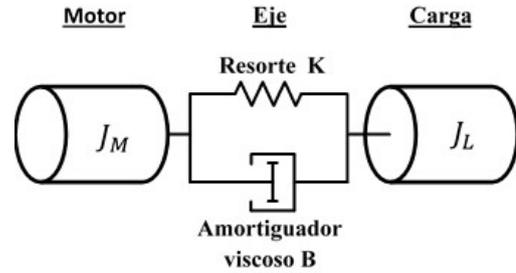


Figura 1. Esquema del modelo de dos masas con resorte y amortiguador viscoso.

El modelo mecánico consiste en un sistema de dos masas de tres elementos claramente diferenciados: el motor, el eje y la carga (ver figura 1). Los parámetros físicos de este modelo son: la rigidez del eje K , el amortiguamiento B , la inercia del motor J_M , la inercia de la carga J_L , el momento electromecánico aplicado por el motor M_M , el momento de la carga M_L , y el momento de torsión del eje M_S .

Se plantea el estudio del modelo mecánico mediante ecuaciones de estado. Se usarán como variables de estado las velocidades angulares de las masas del motor ω_M y carga ω_L y el momento de torsión del eje M_S (Del Toro et al., 2007).

Por una parte se tienen las ecuaciones de equilibrio, que si se combinan con las ecuaciones descriptivas de las mismas permiten obtener las ecuaciones (1-2)

$$J_M \frac{d}{dt} \omega_M = M_M - M_S \quad (1)$$

$$J_L \frac{d}{dt} \omega_L = M_S - M_L \quad (2)$$

La ecuación descriptiva para el eje teniendo en cuenta su rigidez y amortiguamiento se muestra en (3).

$$M_S = K(\theta_M - \theta_L) + B(\omega_M - \omega_L) \quad (3)$$

El modelo en variables de estado representado en forma matricial queda representado por (4)

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_M \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{M}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_M} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_L} \\ K & -K & -B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \omega_L \\ M_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_L} \\ \frac{B}{J_M} & \frac{B}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_M \\ M_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

A partir de aquí se simplifica el sistema a una entrada haciendo nulo M_L ya que la carga es un elemento pasivo que solo se opone al par que le comunica el eje. Esto no es completamente cierto ya que la carga también se opone al

movimiento por medio de la fricción, pero esta fricción no es independiente como entrada sino que depende de la velocidad de la carga y se modelará a parte como un par perturbador que debilita la entrada M_M .

Partiendo de la ecuación (4) y aplicando (5, 6), se obtiene la ecuación (7), mediante la cual se podrán determinar las funciones de transferencia que permiten obtener las variables de estado ω_M , ω_L y M_S a partir de la entrada M_M .

Para el sistema genérico

$$\frac{d}{dt}[\bar{z}(t)] = [A_1][\bar{z}(t)] + [A_2][\bar{w}] \quad (5)$$

Su solución, con estado inicial cero para las variables de estado, en el dominio de Laplace es:

$$[\bar{z}(s)] = (s[I] - [A_1])^{-1} \cdot ([A_2][\bar{w}]) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_M(s) \\ \omega_L(s) \\ M_S(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & \frac{1}{J_M} \\ 0 & s & -\frac{1}{J_L} \\ -K & K & s + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{M_M}{J_M} \\ \frac{M_M}{J_M} \\ 0 \\ \frac{B M_M}{J_M} \\ \frac{M_M}{J_M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Después de operar (7) queda:

$$\omega_M(s) = \frac{M_M}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + \frac{B}{J_L} s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (8)$$

$$\omega_L(s) = \frac{M_M}{J_M J_L s} \cdot \frac{Bs + K}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (9)$$

$$M_S(s) = \frac{M_M}{J_M} \cdot \frac{Bs + K}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (10)$$

En primer lugar la función de transferencia entre M_M y ω_M queda:

$$H_{\omega_M/M_M}(s) = \frac{\omega_M(s)}{M_M(s)} = \frac{1}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + \frac{B}{J_L} s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + \frac{B}{J_L}\left(1 + \frac{J_L}{J_M}\right) s + \frac{K}{J_L}\left(1 + \frac{J_L}{J_M}\right)} \quad (11)$$

Si se define la frecuencia de resonancia ω_{o1} y de antiresonancia ω_{o2} como:

$$\omega_{o1} = \sqrt{\frac{K}{J_L}} \quad \omega_{o2} = \omega_{o1} \sqrt{1 + \frac{J_L}{J_M}} \quad (12)$$

Y el coeficiente de amortiguamiento D_2 y D_1 como:

$$D_2 = \frac{B \omega_{o2}}{2K} \quad D_1 = \frac{B}{2 \omega_{o1} J_L} \quad (13)$$

Queda:

$$H_{\omega_M/M_M}(s) = \frac{1}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + 2D_1 \omega_{o1} s + \omega_{o1}^2}{s^2 + 2D_2 \omega_{o2} s + \omega_{o2}^2} \quad (14)$$

Se puede también definir otra función de transferencia entre ω_M y ω_L .

$$H_{\omega_L/\omega_M}(s) = \frac{\omega_L(s)}{\omega_M(s)} = \frac{\frac{B}{J_L} s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + \frac{B}{J_L} s + \frac{K}{J_L}} \quad (15)$$

Usando las mismas definiciones para ω_{o2} , ω_{o1} , D_2 y D_1 queda:

$$H_{\omega_L/\omega_M}(s) = \frac{2D_1 \omega_{o1} s + \omega_{o1}^2}{s^2 + 2D_1 \omega_{o1} s + \omega_{o1}^2} \quad (16)$$

Con estas expresiones se puede construir el modelo cuyas salidas sean las velocidades angulares del motor y de la planta.

Este es un modelo ampliamente conocido y que se usa por distintos autores como por ejemplo (De Marchi, 1998).

2.1. Modelo de fricción

Finalmente para obtener un modelo que sea lo más parecido a lo que se tiene en la realidad, se modelan la fricción, la holgura y el ruido. La fricción es un fenómeno inherente a todo sistema electromecánico y deteriora el desempeño de los mismos, esta ha sido estudiada ampliamente en la ingeniería mecánica clásica y últimamente ha tenido un fuerte resurgimiento; esto se debe entre otras cosas a grandes necesidades en la ingeniería en un amplio rango de aplicaciones que van desde los discos duros hasta los vehículos (Fontanet et al., 2016).

El modelo de fricción más básico es el modelo de Coulomb, donde la fuerza de fricción F es constante con un valor F_C y dependiente del sentido de la velocidad. Añadiendo una pequeña componente de fricción viscosa F_v que depende de la velocidad relativa entre las superficies v , el modelo clásico puede expresarse como se muestra en (17).

$$F = F_C \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (17)$$

Para evitar la discontinuidad en el paso por $v=0$ destaca el modelo de Karnoop que considera un umbral de velocidades entorno al cero, bajo el cual la fuerza de fricción se supone linealmente proporcional a la velocidad. Según (Deur and Peric, 2000) se ha demostrado experimentalmente que si el umbral de velocidad se encuentra en un intervalo entre 10^{-4} y $10^{-6} m/s$, representa un buen compromiso entre la precisión, eficacia y solidez computacional del modelo.

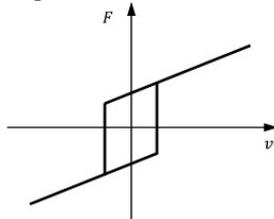


Figura 2. Representación del modelo de fricción usado en simulación.

2.2. Holguras

Como en el caso de la fricción, en esta investigación se utiliza un modelo que sea lo suficientemente realista a la par que eficiente. El conocimiento del comportamiento de las holguras es mucho importante que el de la fricción. Por un lado, se diferencia entre una parte de histéresis mecánica y, por otro lado, la parte asociada a la dinámica del impacto entre dos superficies duras que entran en contacto. El modelo clásico de holgura (figura 3) solo tiene en consideración la histéresis mecánica mediante una zona de banda muerta centrada en el punto de equilibrio desplazado.

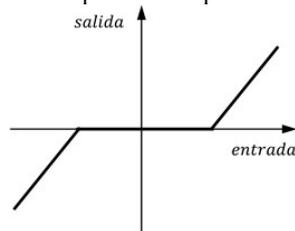


Figura 3. Representación del modelo clásico de holgura.

Este modelo ha sido usado ampliamente con resultados bastante buenos y realistas por lo que será el utilizado en el modelo en simulación.

2.3. Ruido

La influencia de las dinámicas no modeladas se representará mediante una perturbación en forma de ruido en la señal de la posición de la carga antes de ser utilizada en el sistema de control. En este trabajo se utiliza otro enfoque. Se hace un desarrollo en series Fourier de esta señal identificando los armónicos principales de las señales reales adquiridas en una máquina herramienta. Hay que tener en cuenta que este ruido se corresponde con una máquina herramienta con una frecuencia natural de 30 Hz.

Como resultado de este modelo del ruido, se disponen de 3 vectores que representan la amplitud, frecuencia y desfase de las componentes. Para equiparar la salida del modelo con los datos que se obtienen del sistema físico real, las variables de salida del modelo tienen que ser las posiciones del motor θ_M y de la carga θ_L . Estas se obtienen a partir de las velocidades ya calculadas, ver ecuaciones (18, 19):

$$\theta_M(t) = \theta_{M0} + \int_0^t \omega_M dt \quad (18)$$

$$\theta_L(t) = \theta_{L0} + \int_0^t \omega_L dt \quad (19)$$

Los parámetros del modelo aparecen resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo

Inercia del motor	$J_M = 11,0 e^{-4} kg m^2$
Inercia de la carga	$J_L = 9,8 e^{-4} kg m^2$
Frecuencia de resonancia	$f_1 = 30 Hz \rightarrow \omega_{o1} = 2 \pi f_1 rad / s$
Coefficiente de amortiguamiento	$D_I = 0.1$
Constante par motor	$K_t = 1.3 Nm / A$
Histéresis	$fH = 4.5 rpm$
Fricción Coulomb	$0.625 Nm$
Fricción viscosa	$0.007 Nm s$
Constante de tiempo para el filtro	$25.0 ms$
Holgura	$5 \mu m$
Constante del husillo	$K_H = 0.010 / (2\pi) m / rad$

3. Trayectoria y análisis

Se pretende realizar el diseño de un sistema de control de posición/trayectoria de dos ejes utilizado en el seguimiento de trayectorias. Un aspecto importante que no será tratado en este trabajo es la generación de trayectorias. En este trabajo se evaluará el comportamiento del error de seguimiento considerando una trayectoria circular de 200 milímetros de radio.

Las señales más importantes a considerar son el error de posición, el error de velocidad y la señal de control. En la primera se ve claramente si se ha conseguido un buen resultado en el seguimiento de la señal; en la segunda, se puede analizar el comportamiento del lazo de velocidad; y la tercera, proporciona información acerca de la exigencia que se le pide al motor. Se utilizarán cifras de mérito ampliamente utilizadas tales como el ITAE, el ITSE, el MAE y el IAE. De estas cifras de mérito podemos obtener información relevante de cómo está comportándose el sistema de control. También se pueden analizar estas cifras de mérito sobre las otras señales, por ejemplo, es de gran utilidad obtener la integral absoluta de la señal de control (IAU) y su máximo absoluto (MAU). La primera de ellas nos proporciona información relacionada con el esfuerzo de control. La segunda nos permite identificar los máximos que, obviamente, no deberían de sobrepasar ciertos límites.

4. Estrategias de control: control en cascada clásico y borroso.

En esta investigación se analiza una técnica de control muy conocida pero que tiene dos características importantes que hacen que siga siendo la más utilizada en la industria, tales como Siemens y Fagor Automation, a saber: permite desacoplar los lazos de control de posición y velocidad y tratar por separado la compensación de las no linealidades incorporando componentes anticipativas. Por otra parte, los procedimientos de ajuste son relativamente sencillos y de fácil aplicación por parte de la industria. La primera versión que se diseñará es un sistema de control en cascada P-PI clásico con ajuste óptimo basado en la técnica Nelder-Mead; y el segundo sistema es sistemas de control en cascada P-PI borroso en el que se utiliza también el método de Nelder-Mead de sintonía óptima.

4.1. Control en cascada P-PI

El control en cascada es una estructura de control muy consolidada a nivel industrial por sus muy buenos resultados y sencillez en el ajuste (Ogata and Yang, 1970).

Esta estructura responde de forma mucho más completa que los tradicionales controladores PID. Los controladores PID clásicos con un solo lazo también están muy extendidos en sistemas de control a nivel industrial pero en el caso del sector metal-mecánico predomina el uso de la estructura de control en cascada.

Este enfoque permite que los lazos interiores corrijan las perturbaciones interiores antes de que lleguen a afectar al lazo principal. Además, permite utilizar componentes anticipativas. Estas componentes anticipativas son un elemento clave en este sistema de control.

4.1.1. Ajuste óptimo

Para el ajuste del control propuesto se ha utilizado el método de Nelder-Mead, ya que, aunque las condiciones iniciales tienen una influencia, es bastante efectivo y rápido

para encontrar un óptimo local. Es un método libre de gradiente, lo cual resulta útil para optimizar funciones de coste que no están del todo definidas mediante una función explícita.

Para llevar a cabo la optimización se ha utilizado MatLab/Simulink. Los parámetros finales de los bloques de control P y PI son: ganancia proporcional para lazo externo $k_p = 13.9317 \text{ s}^{-1}$, ganancia proporcional para lazo interno $k_p = 6.4304 \text{ A/(rad}\cdot\text{s}^{-1})$ y el tiempo de integración para el lazo interno $T_i = 0.001 \text{ s}$.

4.1.2. Resultados obtenidos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante simulación; en estas se pueden analizar los efectos de la fricción, la holgura y el ruido, dicho esto, para mostrar una mayor semejanza a la realidad, se ha decidido simular con todas las no linealidades activas.

Los estudios realizados han considerado una variación en la frecuencia de resonancia, manteniendo constante el coeficiente de amortiguamiento, luego se mantendrá la frecuencia y se procede a realizar simulaciones con distintos valores del coeficiente de amortiguamiento, finalmente se varían ambos parámetros.

La Tabla 2 muestra las cifras de mérito obtenidas en las condiciones descritas previamente. Como puede observarse, a medida que disminuye la frecuencia de resonancia el comportamiento del sistema empeora.

Tabla 2: Comportamiento del sistema de control en cascada P-PI.

	12 Hz	13 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz
ITAEX	1,921E-02	1,645E-02	8,199E-03	3,620E-03	3,152E-03
ITSEX	3,543E-03	2,912E-03	1,102E-03	3,837E-04	2,135E-01
MAEX	5,423E+03	5,650E+00	5,462E+00	5,269E+00	5,468E+03
IAUX	4,860E+04	4,727E+01	4,044E+01	3,497E+01	3,173E+04
ITAEY	5,023E+02	3,541E-01	5,396E-02	1,942E-02	1,717E+01
ITSEY	2,654E+03	5,545E+00	2,212E-01	2,860E-02	2,997E+01
MAEY	2,928E+04	5,778E+00	5,632E+00	5,528E+00	5,673E+00
IAUY	1,143E+03	1,098E+03	8,681E+05	6,820E+02	5,729E+02

Lo mismo ocurre al analizar ante distintos valores en el amortiguamiento manteniendo $f_i = 30 \text{ Hz}$. Al hacerla más baja el sistema se comporta peor llegando a ser inestable. Para valores más altos de dicha relación se mejoran las cifras de mérito, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3: Cascada P-PI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distintos coeficientes de amortiguamiento

	D=0.04	D=0.05	D=0.1	D=0.2
ITAEX	5,040E-03	4,405E-03	3,620E-03	3,243E-03
ITSEX	1,156E-03	9,401E-04	3,837E-04	1,605E-04
MAEX	5,521E+00	5,374E+00	5,269E+00	5,208E+00
IAUX	5,475E+01	4,906E+01	3,497E+01	2,596E+01
ITAEY	7,270E-01	1,074E-01	1,942E-02	1,551E-02
ITSEY	1,793E+01	6,693E-02	2,860E-02	2,659E-02
MAEY	5,692E+01	5,508E+00	5,528E+00	5,506E+00
IAUY	1,351E+03	1,159E+03	6,820E+02	3,786E+02

A continuación se varía la frecuencia de resonancia $f_i = 21 \text{ Hz}$, y el coeficiente de amortiguamiento $D = 0.06$, estas son condiciones más duras. La figura 4 muestra el error de posición para la planta con la variación de los parámetros antes mencionados, puede verse, que la misma continúa siendo estable, y el error de la posición se mantiene en rangos aceptables.

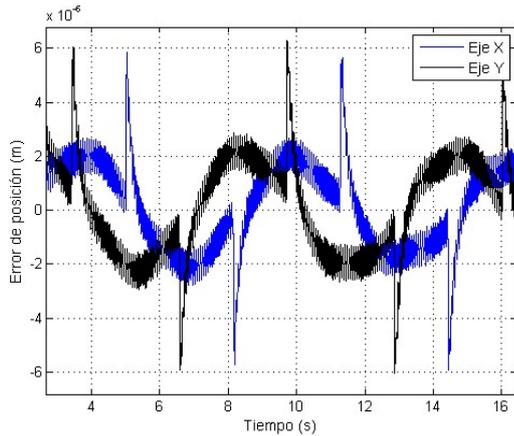


Figura 4. Cascada P-PI. Ajuste óptimo. Error de posición en los ejes X e Y, para $f_i=21$ Hz y $D=0.06$

4.2. Control en cascada borroso

El control borroso se ha convertido en una tecnología con un amplio impacto industrial que está presente en casi todas las facetas de la vida desde los electrodomésticos hasta los vehículos (Haber et al., 1996). Este trabajo pretende estudiar y analizar el alcance de los sistemas de control borroso en esquemas de control en cascada y en evaluar en qué medida la no linealidad en el control borroso mejora el comportamiento de sistema electromecánico en presencia de no linealidades duras como la holgura y la fricción.

Para realizar un control borroso equivalente de una acción P, I o D se toma como base el trabajo seminal (Matia et al., 1992). Uno de los enfoques a la hora de hacer un control borroso equivalente consiste en mantener la parte lineal conocida fuera del control borroso y utilizar el control borroso para introducir, posteriormente, no linealidades.

Controlador Borroso P a partir del control lineal P

El equivalente borroso P (FP) se obtiene escogiendo dos funciones de pertenencia en su forma más simple, en este trabajo se demuestra la forma de realizarlo escogiendo 3 funciones como las representadas por (20).

Se realizará la transformación de un bloque P con un rango con una K_p de 2.

$$\begin{aligned}
 N &\in [-2|e_{max}| \quad -|e_{max}| \quad 0] \\
 Z &\in [-|e_{max}| \quad 0 \quad |e_{max}|] \\
 P &\in [0 \quad |e_{max}| \quad 2|e_{max}|] \\
 \Rightarrow \begin{aligned}
 N &\in [-1000 \quad -500 \quad 0] \\
 Z &\in [-500 \quad 0 \quad 500] \\
 P &\in [0 \quad 500 \quad 1000]
 \end{aligned}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Definiendo las salidas u de tipo nítida por (21):

$$\begin{aligned}
 CN &= -|e_{max}| \cdot K_p & CN &= -1000 \\
 CZ &= 0 & CZ &= 0 \\
 CP &= |e_{max}| \cdot K_p & CP &= 1000
 \end{aligned} \tag{21}$$

Y las reglas (22):

$$\begin{aligned}
 IF \quad e = N \quad THEN \quad u = CN \\
 IF \quad e = Z \quad THEN \quad u = CZ \\
 IF \quad e = P \quad THEN \quad u = CP
 \end{aligned} \tag{22}$$

De forma general se define el controlador borroso normalizado con una entrada y una salida de la siguiente manera:

- Las funciones de pertenencia deben ser triangulares solapadas en $\mu=0.5$ y se construirán de acuerdo a la siguiente expresión (23) en función de la cantidad de funciones de pertenencias deseada.

$$\begin{aligned}
 e_1 &\in [-1-k \quad -1 \quad -1+k] \\
 e_2 &\in [-1 \quad -1+k \quad -1+2k] \\
 \vdots &\in [-1+k \quad \dots \quad -1+3k] \\
 &[\dots \quad \dots \quad \vdots] \\
 &[\dots \quad \dots \quad 1-k] \\
 &[\dots \quad 1-k \quad 1] \\
 e_n &\in [1-k \quad 1 \quad 1+k]
 \end{aligned} \tag{23}$$

donde:

e_i := la i ésima función de pertenencia de la entrada
 n := cantidad total de funciones de pertenencia (mínimo 2)

$$k := \frac{2}{(n-1)}$$

- Las salidas (24) serán conjuntos de tipo nítido (*singleton*) y se corresponderán con el valor donde se produce el pico en cada función de pertenencia triangular, esto es, de -1 a 1 divididas en intervalos de longitud “ k ”:

$$Salidas = \{-1, -1+k, \dots, 1-k, 1\} \tag{24}$$

- Se usarán “ n ” reglas (25); una para cada una de las funciones de pertenencia de la entrada.

$$\begin{aligned}
 IF \quad e = e_1 \quad THEN \quad salida = -1 \\
 IF \quad e = e_2 \quad THEN \quad salida = -1+k \\
 \vdots \\
 IF \quad e = e_{n-1} \quad THEN \quad salida = 1-k \\
 IF \quad e = e_n \quad THEN \quad salida = 1
 \end{aligned} \tag{25}$$

Controlador Fuzzy PI a partir del control PI

En este el equivalente al control PI consistirá en un control borroso con dos entradas y una sola salida. Se parte de la ecuación discretizada de la ley del regulador PI continuo.

En este caso las dos entradas del control borroso serán (26):

$$\begin{aligned}
 ep &= e \\
 ei &= T_s \frac{z}{z-1} e
 \end{aligned} \tag{26}$$

Funciones de pertenencia triangulares de la entrada (27):

$$\begin{aligned} N_p &\in [-2|ep_{max}| \quad -|ep_{max}| \quad 0] \\ Z_p &\in [-|ep_{max}| \quad 0 \quad |ep_{max}|] \\ P_p &\in [0 \quad |ep_{max}| \quad 2|ep_{max}|] \end{aligned} \quad (27)$$

Funciones de pertenencia triangulares de la entrada ei (28):

$$\begin{aligned} N_i &\in [-2|ei_{max}| \quad -|ei_{max}| \quad 0] \\ Z_i &\in [-|ei_{max}| \quad 0 \quad |ei_{max}|] \\ P_i &\in [0 \quad |ei_{max}| \quad 2|ei_{max}|] \end{aligned} \quad (28)$$

Salidas singleton (29):

$$\begin{aligned} CN_p &= -|ep_{max}| \cdot K_p & CN_i &= -|ei_{max}| \cdot K_p / T_i \\ CZ_p &= 0 & CZ_i &= 0 \\ CP_p &= |ep_{max}| \cdot K_p & CP_i &= |ei_{max}| \cdot K_p / T_i \end{aligned} \quad (29)$$

Donde es necesario definir no solo K_p y T_i sino también los rangos de cada entrada del bloque borroso, esto es, ep_{max} y ei_{max} .

Las reglas en este caso se representan en la Tabla 4 donde se recogen todas las combinaciones posibles entre las funciones de pertenencia de las dos entradas:

Tabla 4: Tabla de reglas para el F-PI con 3 funciones de pertenencia para cada entrada

	N_i	Z_i	P_i
N_p	CN_p+CN_i	CN_p+CZ_i	CN_p+CP_i
Z_p	CZ_p+CN_i	CZ_p+CZ_i	CZ_p+CP_i
P_p	CP_p+CN_i	CP_p+CZ_i	CP_p+CP_i

Generalizando lo antes expuesto, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos escogiendo cinco reglas para el control borroso de posición, y 5^2 reglas para el de velocidad. Estas 25 últimas reglas se corresponden con todas las combinaciones posibles entre las distintas funciones de pertenencia de las dos entradas sin que haya solapamientos entre la parte proporcional y la parte integral.

4.2.1. Ajuste óptimo

Para ajustar los parámetros del controlador se aplicará el mismo algoritmo de optimización que el usado en el control en cascada no borroso, esto es, el algoritmo de Nelder-Mead.

Las hipótesis iniciales serán las mismas: fricción y holguras activadas, compensación de fricción activada, ruido y compensación de holgura desactivados. De este modo, se pretende comprobar si mejora el pico de inversión del control en cascada borroso frente al no borroso con los parámetros a optimizar decididos y partiendo de las mismas condiciones iniciales, la misma función objetivo y usando el método de Nelder-Mead como algoritmo de optimización. Para realizar las pruebas de análisis dinámico, se aplican las mismas variaciones a la frecuencia de resonancia y el coeficiente de amortiguamiento descritos en (4.1.2).

Tabla 5: Cascada FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distinta frecuencia de resonancia

	12 Hz	13 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz
ITAEX	3,827E-02	3,197E-02	1,600E-02	6,644E-03	4,981E-03
ITSEX	1,005E-02	7,324E-03	3,113E-03	1,375E-03	8,109E-04
MAEX	6,466E+00	6,690E+00	5,925E+00	6,019E+00	6,297E+00
IAUX	1,531E+01	1,531E+01	1,531E+01	1,530E+01	1,530E+01
ITAEY	1,593E-01	1,518E-01	6,577E-02	3,336E-02	1,511E-02
ITSEY	2,058E+00	2,463E+00	5,433E-01	1,365E-01	1,913E-02
MAEY	6,875E+00	6,701E+00	6,290E+00	6,162E+00	6,244E+00
IAUY	1,742E+01	1,741E+01	1,758E+01	1,767E+01	1,773E+01

La Tabla 6 muestra las cifras de mérito ante las condiciones descritas previamente.

Tabla 6: Cascada FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distintos coeficientes de amortiguamiento

	D=0.04	D=0.05	D=0.1	D=0.2
ITAEX	8,116E-03	7,714E-03	6,644E-03	5,903E-03
ITSEX	3,355E+00	2,781E-03	1,375E-03	5,867E-04
MAEX	6,109E+00	6,061E+00	6,019E+00	5,960E+00
IAUX	1,529E+01	1,530E+01	1,530E+01	1,532E+01
ITAEY	4,392E-02	2,929E-02	3,336E-02	2,173E-02
ITSEY	6,764E-02	3,702E-02	1,365E-01	4,852E-02
MAEY	6,246E+00	6,215E+00	6,162E+00	6,095E+00
IAUY	1,755E+01	1,772E+01	1,767E+01	1,755E+01

5. Análisis de los resultados

Como puede observarse, comparando las cifras de mérito mostrada de manera resumida en tabla 7, las mejoras introducidas al introducir el control en cascada equivalente FP-FPI no son significativas, lo mismo se observa al realizar una comparación gráfica (figura 5) entre las estrategias de control. Se consigue mejorar ligeramente el error de seguimiento a pesar de no ser ese el objetivo de la optimización.

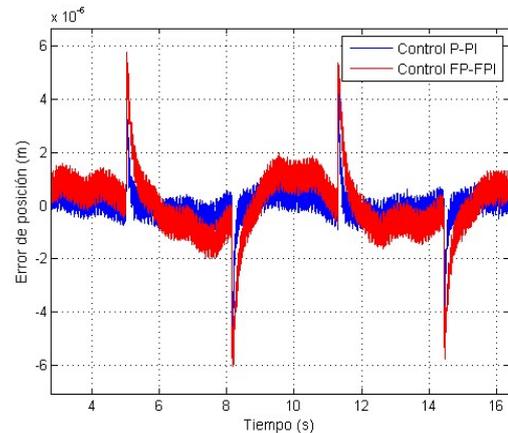


Figura 5. Cascada P-PI clásico frente a FP-FPI.

Tabla 7: Cascada P-PI Vs. FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito.

	P-PI	FP-FPI
ITAEX	3,620E-03	6,644E-03
ITSEX	3,837E-04	1,375E-03
MAEX	5,269E+00	6,019E+00
IAUX	3,497E+01	1,530E+01
ITAEY	1,942E-02	3,336E-02
ITSEY	2,860E-02	1,365E-01
MAEY	5,528E+00	6,162E+00
IAUY	6,820E+02	1,767E+01

6. Conclusiones

Tras realizar un modelado del sistema físico, se ha procedido a diseñar y evaluar el sistema de control en cascada P-PI y se ha diseñado a partir de éste un sistema de control en cascada borroso equivalente. Se ha aplicado un método de optimización (Nelder-Mead) para la sintonía óptima de los parámetros del controlador. El estudio comparativo de ambos controladores no muestra mejoras significativas en la aplicación del controlador borroso en cascada P'-PI. Estudios experimentales serán realizados en el futuro para evaluar el impacto real de ambas técnicas.

English Summary

Design of a classic and fuzzy cascade control system for trajectory control and tracking.

Abstract

New microfabrication processes impose new requirements for accuracy and robustness in position and trajectory control systems, opening up new lines of research in the field of modeling and control, and the need to evaluate intelligent control techniques such as Fuzzy control. In this paper, is presented the classical modeling of electrical and mechanical parts considered as a system of multiple masses coupled by an elastic transmission and damping, in the presence of friction and slack, two hard nonlinearities. Furthermore, the design of a controller is shown from a parametric model dependent resonance frequency and damping ratio. As the initial step of the study, a cascade control system is designed with anticipatory components that is the most used scheme in the industry. In order to evaluate the scope of nonlinearities in the control law, a cascade equivalent control is synthesized using the method proposed by Matia et al. 1992. To evaluate the behavior of the control system, uncertainties are considered in parameters such as the resonance frequency, the damping ratio and the width of the dead zone of the slack, and simulations were performed considering circular trajectories. Some merit numbers such as the integral of the absolute value of error in time (ITAE), the absolute maximum error (MAE) and the integral of the absolute value of the control signal (IAU) were used in the comparative study of both cascade controllers. The study allowed to verify that there are no significant differences in the behavior of both control systems (classic cascade and fuzzy cascade).

Keywords:

Microfabrication, friction, slack, cascade control, fuzzy control, merit numbers, optimization, Nelder-Mead.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos “Advanced Manufacturing 4th Generation (AM.4G)” financiado en el Programa CIEN y PCIN-2015-123 IoSENSE:

Línea Piloto Flexible de Sensores para el Internet de las Cosas”.

Referencias

- De Marchi, J.A., 1998. Modeling of dynamic friction, impact backlash and elastic compliance nonlinearities in machine tools, with applications to asymmetric viscous and kinetic friction identification, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Del Toro, R.M., Schmittiel, M., Haber, R., Haber-Haber, R., 2007. System identification of the high performance drilling process for network-based control. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007 1 PART B, 827-834.
- Deur, J., Peric, N., 2000. Pointing and tracking position control system of electrical drives with elastic transmission, 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control-EPE PEMC, Kosice, Slovak Republic, Citeseer.
- Fontanet, J.G.G., Cervantes, A.L., Ortiz, I.B., 2016. Alternativas de control para un Péndulo de Furuta. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 13, 410-420.
- Haber, R., Alique, J.R., Alique, A., Ros, S., C.R. P., 1996. Fuzzy Supervisory Control of End Milling Process. Information Sciences 89, 95-106.
- Haber, R.E., Haber, R., Alique, A., Ros, S., 2002. Application of knowledge-based systems for supervision and control of machining processes. Handbook of software engineering and knowledge engineering 2, 673-710.
- Li, Y.-F., 1999. Motion Control Subject to Nonlinearities and Flexibility:(an Overview Based on Friction and Flexibility Compensation). KTH.
- Márton, L., Lantos, B., 2009. Control of mechanical systems with Stribeck friction and backlash. Syst Control Lett 58, 141-147.
- Matia, F., Jimenez, A., Galan, R., Sanz, R., 1992. Fuzzy controllers: Lifting the linear-nonlinear frontier. Fuzzy Sets and Systems 52, 113-128.
- Ogata, K., Yang, Y., 1970. Modern control engineering.
- Olsson, H., Åström, K.J., Canudas De Wit, C., Gäfvert, M., Lischinsky, P., 1998. Friction Models and Friction Compensation. European Journal of Control 4, 176-195.
- Peter, K., Schöling, I., Orlik, B., 2003. Robust output-feedback H_∞ control with a nonlinear observer for a two-mass system. IEEE Trans Ind Appl 39, 637-644.
- Sabatier, J., Poullain, S., Latteux, P., Oustaloup, A., Thomas, J.L., 2003. Robust speed control of a low damped four mass system based on crone control, 2003 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, IL, pp. 625-631.
- Schöling, I., Orlik, B., 2000. Control of a nonlinear two-mass system with uncertain parameters and unknown states, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, IEEE, pp. 1096-1103.
- Serkies, P.J., Szabat, K., 2013. Application of the MPC to the position control of the two-mass drive system. IEEE Trans Ind Electron 60, 3679-3688.
- Szabat, K., Orłowska-Kowalska, T., 2009. Adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter. INTECH Open Access Publisher.
- Thomsen, S., Fuchs, F.W., 2009. Speed control of torsional drive systems with backlash, 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09, Barcelona.
- Xi, X.-C., Poo, A.-N., Hong, G.-S., 2009. Improving contouring accuracy by tuning gains for a bi-axial CNC machine. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49, 395-406.
- Xi, X.C., Poo, A.N., Hong, G.S., 2010. Tracking error-based static friction compensation for a bi-axial CNC machine. Precis Eng 34, 480-488.
- Yeh, S.S., Tsai, Z.H., Hsu, P.L., 2009. Applications of integrated motion controllers for precise CNC machines. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44, 906-920.