

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
University of Oviedo



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

## Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

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

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
MiguelÁngel 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/> <b>Automar</b> <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

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

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG) .....	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial .....	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL .....	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA .....	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG .....	328
<i>Marisol 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/>	
<b>Control Inteligente</b>	
<hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico .....	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias .....	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

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

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



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

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

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

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

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

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

---

### Visión por Computador

---

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

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

# Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499

Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez, Esteban Querol-Dolz  
 Departamento de Ingeniería de Sistema Industriales y Diseño  
 Universidad Jaume I  
 omiguel@uji.es, romeroj@uji.es, estebanqueroldolz@gmail.com

## Resumen

*En este artículo se presenta un estudio sobre el desempeño de controladores PID basados en eventos implementados según el estándar de programación IEC-61499. En el trabajo se abordan los detalles de la implementación y se presentan resultados experimentales que demuestran las ventajas de este tipo de algoritmos respecto a los controladores basados en tiempo, fundamentalmente en cuanto a la reducción del coste computacional sin afectar de forma significativa al comportamiento del lazo de control.*

**Palabras clave:** PID, control basado en eventos, tiempo real, IEC-61499

## 1. INTRODUCCIÓN

En la última década se han realizado numerosas investigaciones sobre el control basados en eventos (CBE) de sistemas continuos. A diferencia de los controladores basados en tiempo usados tradicionalmente, en los que la ejecución del algoritmo de control se realiza a un periodo constante, en los controladores basados en eventos el algoritmo de control se ejecuta sólo tras la ocurrencia de eventos asíncronos que indican cambios significativos en el estado del sistema; un ejemplo típico es el cruce de niveles por parte de la señal de error (diferencia entre la referencia o set-point y la salida controlada), [3].

A la par de los avances teóricos en el CBE, durante los últimos años se ha estado desarrollando un nuevo estándar para la programación de sistemas de automatización y control distribuidos, conocido como IEC-61499 [9]. Dicho estándar introduce conceptos novedosos respecto a su predecesor, el IEC-61131 [6], el cual es ampliamente usado en la actualidad en la programación de Automatas Programables; como por ejemplo la forma de ejecución, mientras que el antiguo está basado en ciclos de SCAN y el nuevo basado en el uso y manejo de eventos, y que además contiene características que favorecen su uso en el diseño de aplicaciones distribuidas y reconfigurables.

En este trabajo se realiza un estudio sobre la implementación y el desempeño de algoritmos de CBE usando el estándar IEC-61499. Esto permitirá introducir en el IEC-61499 estrategias de control de sistemas continuos más acorde con las características del propio estándar (control de ejecución por eventos), en sustitución de los controladores basados en tiempo (con ejecución periódica) que se han venido usando hasta ahora. En el estudio sobre el desempeño de los controladores se tendrán en cuenta tanto los aspectos de coste computacional como del comportamiento del sistema de control.

Dado que los controladores PID son los más utilizados en aplicaciones industriales, y que actualmente existen varios trabajos en los que se proponen distintas versiones de PID basados en eventos, hemos considerado conveniente realizar el estudio sobre la implementación y el comportamiento de este tipo de controladores bajo el IEC-61499.

## 2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA NORMA IEC-61499

En el centro de la norma se encuentra el modelo de bloques de funciones (Function Block Model - FBM), donde un bloque de funciones (Function Block - FB) es una unidad funcional de software, con su propia estructura de datos que puede ser manipulada por uno o más algoritmos que dotan al FB de su funcionalidad. Un FB define un *tipo* a partir del cual se pueden crear una o varias instancias del FB.

En los FBs confluyen dos tipos de parámetros, los datos y los eventos, los cuales regulan la ejecución del bloque. Un FB puede tanto recibir como enviar estos tipos de parámetros y asociarlos de manera que la recepción o envío de un evento se corresponda con el refresco de los datos de entrada o salida asociados. Los FBs encapsulan una funcionalidad concreta, lo que puede dar lugar a que estos FBs contengan variables internas, cuyo tipo y tratamiento vienen regulados por las características del FB. Como en la norma IEC-61499 no se permite el uso de variables globales para la aplicación, los algoritmos que definen la funcionalidad del FB, sólo tendrán acceso a las entradas,

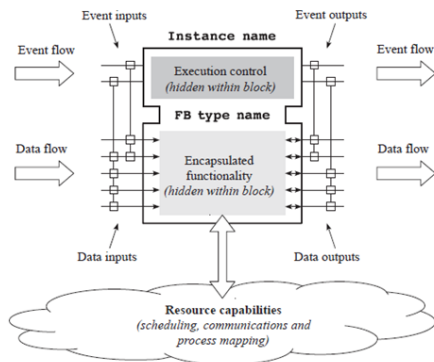


Figura 1: Estructura de un FB. [9]

las salidas y a las variables internas, siendo todos ellos datos retenidos entre llamadas al FB.

En la figura 1 se muestran los elementos anteriormente descritos de un FB. En la parte superior se representa el *control de ejecución* (Execution control) que gestiona la entrada y salida de eventos. En la parte inferior se representa la *funcionalidad* del FB, formada por los algoritmos encargados de procesar los datos de entrada. Cuando ocurre un evento de entrada, se actualizan los datos de entrada asociados al evento y se ejecutan los algoritmos vinculados al mismo. La asociación de eventos y datos se representa mediante las líneas verticales que aparecen en la entrada y salida del FB y que unen eventos y datos mediante pequeños cuadrados. Como resultados de la ejecución de los algoritmos se generan los eventos y datos de salida.

Los BFB se caracterizan por tener una estructura y comportamiento que están definidas como respuesta a la recepción de eventos entrantes. Internamente, esto se materializa en un gráfico de control de ejecución (Execution Control Chart - ECC), cuyas transiciones pueden estar reguladas por la recepción de dichos eventos o por las variables que se tratan durante su ejecución.

Los FBs se agrupan en un modelo que configura una aplicación de la norma IEC-61499 (Application Model - AM). Una aplicación está definida por las diferentes instancias de FB que la componen (pudiendo haber múltiples instancias de un mismo tipo de bloques) y por la interconexión de los mismos. Como la funcionalidad total del programa queda definida completamente en función de los FBs, no se necesita de variables globales o locales fuera de los mismos.

### 3. CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS

Una de las primeras contribuciones al desarrollo de los controladores PID basados en eventos fue

introducida por Árzén en [1] como una forma de reducir el uso de la CPU de los sistemas de control basados en computador sin afectar de forma significativa el comportamiento del bucle de control. En su artículo, Árzén puso de relieve algunas de las consideraciones más importantes que se debía tener en cuenta en los controladores PID basados en eventos. Entre éstas se pueden destacar los errores que se producen en los cálculos de los términos integral y derivativo cuando el tiempo entre muestras se incrementa. Varios trabajos posteriores estuvieron dirigidos a resolver los problemas revelados por Árzén, fundamentalmente el relacionado con el error en el cálculo de error del término integral. Deben ser destacados en este sentido los trabajos publicados por Durand [4, 5] y Vasyutynskyy [7, 8].

En concreto, el algoritmo de Árzén plantea una llamada periódica al controlador no siéndolo así la ejecución del cálculo. Árzén propone una lógica de detección de eventos basada, por una parte, en que la diferencia de errores entre la última ejecución y la llamada actual supere un umbral y por otra parte impone una condición basada en el tiempo máximo que el controlador puede estar sin ejecutarse.

Además, y a diferencia del controlador PID basado en ciclos de SCAN, el cual pre-calcula algunos coeficientes, en el algoritmo de Árzén se deben recalcular cada vez ya que dependen del tiempo entre ejecuciones. Por todo ello el código resultante queda de la forma siguiente:

```

e = ysp - y;
% calcula acción de control
hact = hact + hnom;
if abs(e - e_old) > elim || hact > hmax
%coeficientes del pid discreto
ad=Td/(N*hact+Td);
bd=K*Td*N/(Td+N*hact);
bi=K*hact/Ti;
%algoritmo de control PID discreto
up= K*(b*ysp - y);
ud=ad*ud + bd*(c*(ysp-ysp_old)-(y-y_old));
ui=ui+bi*(ysp - y);
u=up + ui + ud;
if (u<u_sat_min)
u=u_sat_min;
if (ysp-y<0)
ui=ui-bi*(ysp - y);
end
end
if (u>u_sat_max)
u=u_sat_max;
if (ysp-y>0)
ui=ui-bi*(ysp - y);
end
end
y_old=y;
ysp_old=ysp;
hact = 0;
event=1;

```

```
end
u_out = u;
```

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DE CBE EN LA NORMA IEC-61499

El desarrollo de controladores con la norma IEC-61499 se lleva a cabo mediante la implementación de nuevos bloques de funciones, ya que estos constituyen la unidad básica de programación. En este estudio, vamos a implementar y comparar un controlador basado en un tiempo clásico, con período constante, con el controlador basado en eventos de Årzen, desarrollado en [1].

Para la implementación y evaluación de comportamiento de los controladores hemos utilizado el software 4DIAC, un entorno de desarrollo *open-source*, basado en el entorno de desarrollo Eclipse. Una alternativa de software más enfocada al ámbito industrial sería la utilización del software NxtOne, el cual también es capaz de desarrollar aplicaciones en la norma IEC-61499 y además soporta hardware de diferentes fabricantes industriales como BECKHOFF, WAGO o SIEMENS.

4DIAC permite la creación de bloques, sistemas, aplicaciones y el resto de modelos. Las aplicaciones desarrolladas en 4DIAC son interpretadas por el runtime FORTE que debe estar ejecutándose en el dispositivo de control. Este runtime puede descargarse de la página del proyecto 4DIAC.

La Figura 2 muestra la estructura externa de dos controladores. A la izquierda tenemos el controlador periódico y a la derecha el controlador de Årzen. Al tratarse en este caso de BFB (Basic Function Block), su estructura interna, y su comportamiento está caracterizada por un ECC (Execution Control Chart). El ECC para el controlador periódico se muestra en la figura 3, y es compuesto por tres estados (INIT, RST y REQ) donde se ejecutan dos algoritmos (RESET y REQ) y cuyas transiciones se pasan si se reciben los eventos REQ, RST o INIT y se sale siempre de los estados. En algunos estados (INIT y en REQ), se pueden enviar eventos de salida, como lo son CNF en el caso de REQ y INITO en el caso de INIT. El algoritmo RESET es una puesta a cero de valores (término derivativo, integral y anterior medida), mientras que el algoritmo REQ realiza el cálculo del controlador PID.

El ECC del controlador de Årzen es más complejo, Figura 4. En este caso, se mantienen tanto las partes de inicialización y de reset del controlador pero en cuanto a la ejecución, una vez se recibe el evento REQ, se pasa al estado *Check\_point* donde se procede a evaluar el tiempo que ha pasado entre

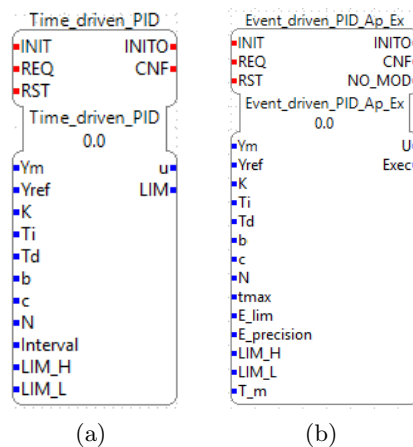


Figura 2: Bloques de funciones de los PID periódico (a) y basado en eventos (b).

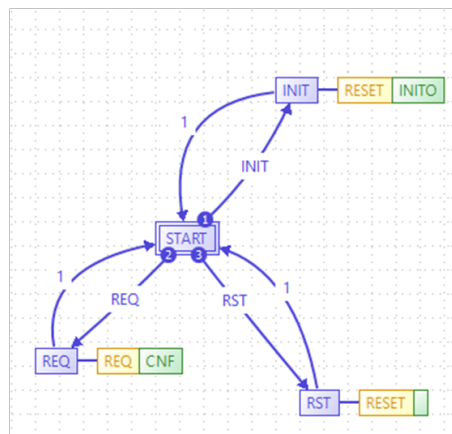


Figura 3: ECC del controlador PID basado en tiempo de muestreo.

la última ejecución y el momento actual mediante el algoritmo *Check.time*. Una vez efectuado este cálculo se comprueban las transiciones, que son las condiciones que impone Årzen para la ejecución de su controlador (la función *abs* devuelve un entero, por eso es necesario añadir algunas cifras significativas con la parámetro en entrada *E\_precision*). En el caso de no tener que ejecutarse simplemente se entra en el estado SENDNOMOD y se envía el evento NO\_MOD. En caso contrario, se ejecuta el algoritmo *Req*, donde se realiza el cálculo de la nueva acción de control.

Finalmente, se modela una aplicación donde se incluyen diferentes bloques para la correcta ejecución del algoritmo de control. Se incluyen los bloques XENO\_RT\_E\_CYCLE para llamar regularmente a la cadena de FBs, el bloque BB-Bio\_AIn que proporciona la entrada medida, F\_RT\_CLOCK\_NS que proporciona el tiempo del procesador para efectuar cálculos dentro del controlador y un bloque adicional para actualizar la



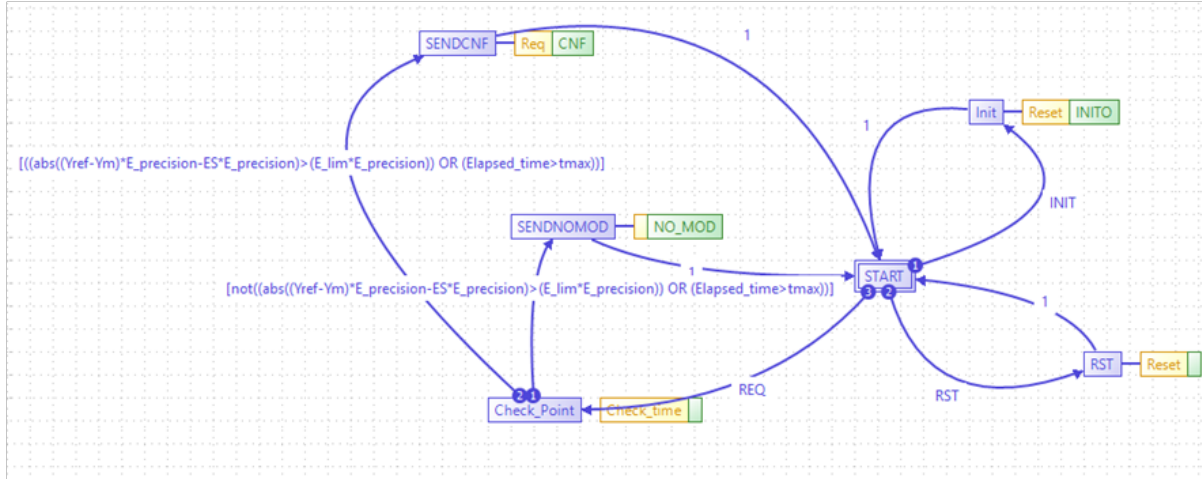


Figura 4: ECC del controlador PID basado en eventos propuesto por Árzen [1].

salida PWM BBBio\_PWM, como se muestra en la Figura 5.

La ejecución de la aplicación se desarrolla en dos fases. En una primera fase de inicialización se envía un evento a la entrada INIT del bloque Cycle desde el recurso que contiene esta aplicación. Una vez inicializado este FB se inicia toda la cadena hasta llegar a la salida PWM, siendo este último bloque el que da comienzo a la fase de ejecución con el evento entrante en el START del FB Cycle, iniciando así el envío periódico de eventos y el control del sistema ejecutando o no el controlador.

## 5. MODELADO DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es la evaluación de los controladores basados en eventos desarrollados según el estándar IEC-61499. En dicha evaluación abordaremos tanto el comportamiento del sistema de control en lo relativo a su respuesta, y al coste computacional de este tipo de controladores. La comparación se realizará con un controlador periódico.

En primer lugar, podemos caracterizar el tiempo de realizar  $Q$  ejecuciones del controlador periódico como la suma del tiempo que consume cada uno de los FBs que forman su cadena de ejecución por medio de la ecuación (1):

$$t_{PIDtb} = Q(t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}) \quad (1)$$

donde  $t_{AIN}$  es el tiempo de ejecución del bloque de lectura de entrada analógica (BBBio\_AIN),  $t_{PID}$  es el tiempo de ejecución del bloque PID y  $t_{PWM}$  es tiempo de ejecución del bloque de escritura en la salida analógica (BBBio\_PWM).

En el caso del PID basado en eventos, dicha ecuación

debe tener en cuenta el porcentaje de generación de eventos, que llamaremos  $\eta$ , o sea, cuando la condición para el cálculo de una nueva acción de control es verdadera y por tanto el algoritmo de control se ejecuta completamente. El tiempo de ejecución es descrito por la ecuación (2) obtenida de la modelización presentada en la figura 5. En este caso  $t_{PID_e}$  es el tiempo que consume el bloque PID cuando se tiene que calcular una nueva acción de control,  $t_{PID_{ne}}$  es el tiempo consumido por el bloque PID cuando no se tiene que calcular un nuevo valor de acción de control y  $t_{CLK}$  es el tiempo que consume el bloque F\_RT\_CLOCK\_NS encargado de la obtención del tiempo del procesador.

$$t_{PID_{eb}} = Q(\eta(t_{AIN} + t_{PID_e} + t_{PWM} + t_{CLK}) + (1 - \eta)(t_{AIN} + t_{PID_{ne}} + t_{CLK})) \quad (2)$$

Usando las ecuaciones (1) y (2) podemos calcular el porcentaje de tiempo necesario por el controlador basado en eventos respecto del controlador periódico, en función del porcentaje de generación de eventos ( $\eta$ ). Dicha relación vendrá dada por el siguiente cociente:

$$\frac{t_{PID_{eb}}}{t_{PID_{tb}}} = \frac{Q(\eta(t_{AIN} + t_{PID_e} + t_{PWM} + t_{CLK})) + (1 - \eta)(t_{AIN} + t_{PID_{ne}} + t_{CLK})}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (3)$$

Si definimos  $\gamma = \frac{t_{PID_{eb}}}{t_{PID_{tb}}}$  y operamos sobre la ecuación anterior, obtenemos que la relación entre  $\gamma$  y  $\eta$  viene dada por la ecuación (4), que se corresponde a la ecuación de una recta cuyos parámetros dependen de los tiempos de ejecución de cada uno de los bloques implicados en el modelo de la apli-

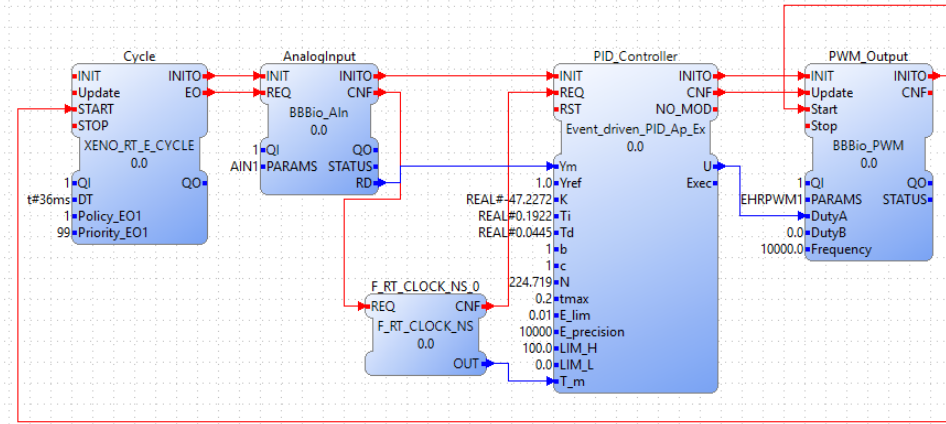


Figura 5: Estructura de la aplicación de control PID basado en eventos según IEC-61499, desarrollada en 4DIAC.

cación.

$$\gamma = \eta \frac{t_{PID_e} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} + \frac{t_{PID_{ne}} + t_{AIN} + t_{CLK}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (4)$$

A partir de la ecuación anterior podemos llegar a interesantes conclusiones sobre el tiempo consumido por un controlador basado en eventos respecto del controlador periódico en función del porcentaje de ejecución del primero. Por ejemplo, evaluando la ecuación 4 para  $\gamma = 1$ , obtenemos el porcentaje de generación de eventos  $\eta$  para el cual el controlador basado en eventos tiene el mismo tiempo de ejecución medio que el controlador periódico. Dicho valor vendría dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{t_{PID} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM} - t_{CLK}}{t_{PID_e} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM}} \quad (5)$$

Si evaluamos la ecuación 4 para  $\eta = 0$ , obtenemos el tiempo medio consumido por el CBE respecto del controlador periódico para un porcentaje de generación de eventos igual a cero. Dicha condición se corresponde con el funcionamiento del controlador en estado estable, si no se genera evento alguno. La ecuación sería la siguiente:

$$\gamma = \frac{t_{PID_{ne}} + t_{AIN} + t_{CLK}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (6)$$

Finalmente, si evaluamos la ecuación (4) para  $\eta = 1$ , se obtiene el tiempo medio consumido por el controlador basado en eventos respecto del controlador periódico para un 100% de generación de eventos. Dicho comportamiento se corresponde con el comportamiento del controlador en estado transitorio, cuando se produce un cambio en la referencia o aparece una perturbación de valor significativo.

Los resultados obtenidos con estas ecuaciones para la plataforma de experimentación usada en este estudio serán presentadas en la siguiente sección.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 6.1. Plataforma de experimentación

La plataforma experimental para la evaluación del comportamiento de los controladores basados en eventos está formada por una tarjeta BeagleBone Black (BBB). Dicha tarjeta cuenta con varias entradas analógicas y salidas PWM que la hacen idónea para realizar nuestros experimentos, a diferencia de otras alternativas que también fueron valoradas como la tarjeta Raspberry Pi.

Con el objetivo de tener una plataforma experimental lo más simple y versátil posible, se optó por definir los sistemas a controlar mediante circuitos electrónicos cuya dinámica viene determinada por los componentes pasivos que lo forman. En concreto se trata de un filtro paso-bajo de segundo orden con una estructura de Rauch, cuyo esquema se muestra en la Figura 6, con función de transferencia definida por sus componentes de acuerdo con la ecuación (7).

$$H(s) = -\frac{1}{s^2 + \frac{3}{RC_2}s + \frac{1}{R^2C_1C_2}} \quad (7)$$

Cuatro de estos circuitos fueron incluidos en una tarjeta electrónica que se puede acoplar directamente sobre la BBB en forma de capa, como se muestra en la Figura 7. Los componentes que definen la dinámica de los circuitos se pueden cambiar fácilmente, por lo que resulta muy sencillo tener sistemas con diferentes dinámicas.

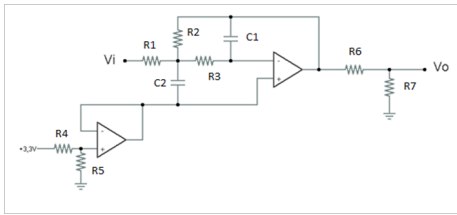


Figura 6: Circuito electrónico que emula un sistema a controlar.

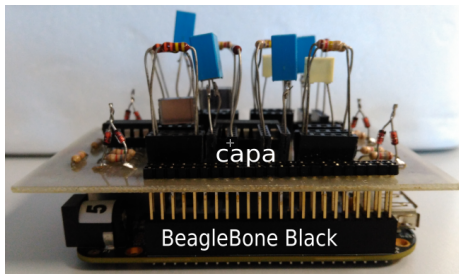


Figura 7: Conjunto BeagleBone Black y capa con circuitos a controlar.

Para programar la tarjeta BBB y hacer los experimentos, la conectamos a un ordenador y mediante una conexión SSH accedemos al directorio donde se encuentra el runtime FORTE (con los bloques que queremos probar compilados) y lo ejecutamos. Acto seguido, descargamos la aplicación desde el ordenador a la BBB con el programa 4DIAC y comienza su ejecución automáticamente.

### 6.1.1. Sistema de tiempo real: Xenomai

Las tarjetas BBB traen instalado por defecto un sistema operativo Linux que no permite ejecutar aplicaciones en tiempo real. Esto supone un problema ya que la ejecución de cada nuevo FB se realiza cada 5 ms independientemente de los tiempos de ejecución de cada uno. Para mejorar las prestaciones de la BBB se ha instalado en ella Xenomai. Esto nos proporciona una gestión de la aplicación en tiempo real y permite reducir de forma significativa los tiempos de respuesta de la tarjeta.

## 6.2. Resultados y discusión

### 6.2.1. Tiempos de ejecución

Para poder aplicar la ecuación (4) a nuestras aplicaciones de control periódico y basado en eventos al ejecutarse en la BBB se han realizado mediciones de los tiempos de ejecución medio de cada uno de los FB que intervienen en ellas. Para ello hemos medido con un osciloscopio el tiempo entre la activación de una salida digital de la BBB que tiene lugar al inicio de la ejecución del FB y la desactivación de la misma salida digital que tiene lugar al final de la ejecución del FB en estudio. Con el

objetivo de corregir la medición realizada de esta forma con el tiempo requerido de activación y desactivación de una salida digital, se hizo un test preliminar en que hemos activado una salida digital para acto seguido desactivarla. El tiempo obtenido ha sido de entorno a los  $4 \mu s$ . Este valor se restó a los tiempos medidos para cada uno de los FB. Los resultados arrojados por el estudio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados experimentales de tiempos de ejecución medios.

Tiempos	Valor ( $\mu s$ )
$t_{AIN}$	8
$t_{PWM}$	12.7
$t_{PID}$	8.5
$t_{PID_e}$	10.5
$t_{PID_{ne}}$	5.5
$t_{CLK}$	2

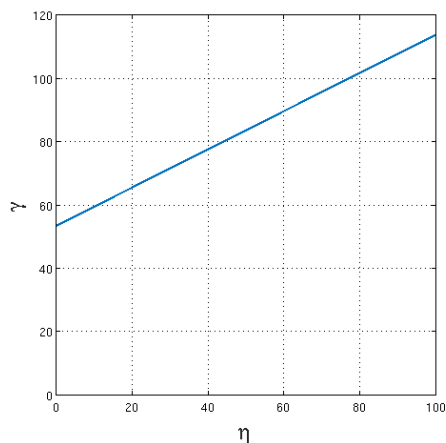
Usando los datos de la tabla 1 en la ecuación 4, obtenemos la recta mostrada en la figura 8, de la cual podemos extraer como resultados importantes los siguientes:

- El tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos es igual al requerido por el controlador periódico si el porcentaje de generación de eventos del primero es del 77.12 %.
- Si la tasa de generación de eventos es del 100 % entonces el tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos sobrepasa al tiempo de ejecución del controlador periódico en un 13.8 % de su valor.
- Por último, si no se generan eventos, entonces el tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos es el 53.45 % del tiempo de ejecución del controlador periódico.

Respecto a este último punto, debemos tener en cuenta que para el controlador propuesto por Árzén no existe una tasa de generación de eventos igual a cero ya que el algoritmo fija un tiempo máximo ( $h_{max}$ ) que si es sobrepasado se genera un evento. Si se considera que el tiempo de ejecución del algoritmo es  $h_{nom}$ , entonces la tasa de generación de eventos para una secuencia de eventos por superación de tiempo máximo será  $h_{nom}/h_{max}$ . Esta sería la tasa de generación mínima que puede alcanzar del algoritmo de Árzén.

### 6.2.2. Comportamiento del sistema

Para el estudio del comportamiento del sistema de control se consideró un circuito como el mos-

Figura 8: Relación entre  $\eta$  y  $\gamma$ .

trado en la figura 6 con función de transferencia dada por la ecuación 8, la cual se obtiene con los siguientes valores de los componentes:  $C1=270nF$ ,  $C2=1\mu F$ ,  $R1=R2=R3=330k\Omega$ ,  $R4=R5=1k\Omega$ ,  $R6=1.5k\Omega$  y  $R7=1.8k\Omega$ .

$$G(s) = \frac{0,612}{s^2 + 9s + 34} \quad (8)$$

El ajuste de los parámetros del controlador PID se realizó mediante el método AMIGO presentado en [2]. Para el diseño se ha usado un valor máximo de la función de sensibilidad  $M_s=1.4$  y un coeficiente de filtro de la derivada  $N=10$ . Los parámetros obtenidos son los siguientes:  $K_c=47.2$ ,  $T_i=0.19$ ,  $T_d=0.044$ . Estos parámetros fueron usados tanto para el controlador periódico como para el basado en eventos. El periodo de muestreo en ambos casos se fijó en  $h_{nom}=36ms$  y los valores de ponderación de la referencia y de la derivada de la referencia se consideraron  $b=1$  y  $c=1$ . Además los valores de saturación mínimo y máximo de la acción de control:  $LIM_H=5$  y  $LIM_L=0$ . Para el controlador basado en eventos se consideró umbral de cruce  $E_{lim}=0.01$  y un tiempo máximo de ejecución sin eventos  $h_{max}=5h_{nom}$ .

La Figura 9 muestra las respuestas obtenidas con el controlador periódico y el CBE propuesto por Árzén ante tres cambios en la referencia en  $t = 15$ , 20 y 25 segundos. Se puede observar que la respuesta del PID periódico es similar en los tres cambios de referencias, mientras que el CBE tiene diferencias significativas en el tercer cambio respecto a los dos primeros. Esto es consecuencia de que en el CBE la respuesta está muy influenciada por la casuística de generación de los eventos. Se puede notar, además, que la acción de control del CBE tiene cambios más bruscos que la del controlador periódico. Esto se debe al efecto de la acción integral, según se indicó por Durand y sus

Tabla 2: Índices IAE y TV de la respuesta del sistema real con ambos controladores.

Índice	Experimento	Periódico	Árzén
IAE	15sec	0.103	0.0948
	20sec	0.1035	0.0969
	25sec	0.1031	0.0792
TV	15sec	0.6378	0.6431
	20sec	0.6106	0.6747
	25sec	0.6264	0.5323

colaboradores en [5]. Con el objetivo de cuantificar las diferencias entre ambas respuestas se ha calculado el índice IAE de la salida y el TV de la acción de control para cada controlador. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2, donde se puede apreciar que no existen diferencias significativas entre ambos controladores. Los resultados confirman la variabilidad en las respuestas del CBE respecto del controlador periódico: para el tercer cambio de referencia los valores obtenidos para el CBE son diferentes respecto a los resultados para  $t = 15$  y  $t = 20$  segundos.

En la zona de estado estable se puede apreciar como el controlador basado en eventos se ejecuta por tiempo máximo cada  $5h_{nom}$ , lo cual quiere decir una tasa de generación de eventos  $\eta=h_{nom}/h_{max}=1/5=20\%$ . Para este valor de  $\eta$  se obtiene de la gráfica de la Figura 8 que tiempo medio de ejecución medio del controlador de Árzén es el 66% del tiempo medio de ejecución del controlador periódico. Por el contrario, cuando se produce un cambio en la referencia el controlador basado en eventos se ejecuta todos los instantes de muestreo, o sea que la tasa de generación de eventos es  $\eta = 100\%$  y en ese caso el controlador de Árzén requiere para su ejecución el tiempo del controlador periódico incrementado en un 13.8% de su valor, como indica el valor de  $\gamma$  en la Figura 4. Durante la respuesta transitoria la tasa de generación de evento  $\eta$  varía, y en consecuencia lo hace  $\gamma$ .

## 7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la implementación de controladores basados en eventos según el estándar IEC-61499 para la programación de sistema de control distribuidos. Además se ha realizado un estudio donde se ha tenido en cuenta tanto los aspectos relativos al coste computacional de los algoritmos como la respuesta del sistema de control.

En cuanto al coste computacional se ha obtenido un modelo que permite comparar de una forma sistemática los controladores basados en eventos con los periódicos. Dicho modelo relaciona la tasa de generación de eventos de un controlador basado en

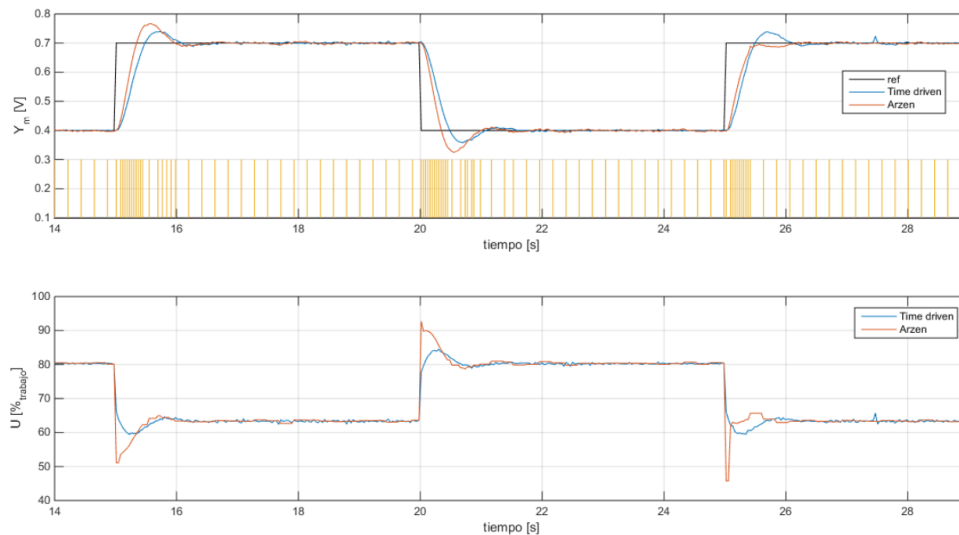


Figura 9: Respuesta del sistema (superior) y acción de control (inferior) a cambios en referencia controlado con un PID periódico y el PID basado en eventos propuesto por Årzen. Las líneas verticales amarillas en la gráfica superior representan los eventos generados por el controlador de Årzen.

eventos con el porcentaje de tiempo de ejecución de un controlador periódico usado por el algoritmo basado en tiempo. El modelo permite conocer el ahorro en tiempo de ejecución que se obtiene para una tasa de generación de eventos baja, o el sobre coste en tiempo de ejecución para tasa de generación de eventos altas, tomando como referencia el tiempo de ejecución del controlador periódico.

Se ha demostrado de forma experimental la viabilidad del estándar IEC-6499 para la implementación de algoritmos de control basados en eventos. Para ello se ha desarrollado una plataforma que permite realizar experimentos considerando sistemas con diferentes características de respuesta dinámica.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante fondos de los proyectos TEC2015-69155-R del MICINN y P1-1B2015-42 de la Univesitat Jaume I.

### Referencias

- [1] Karl-Erik Arzen. A simple event-based pid controller. In *Proc. 14th IFAC World Congress*, volume 18, pages 423–428, 1999.
- [2] K.J. Åström and T. Hägglund. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 14(6):635–650, sep 2004.
- [3] Sebastián Dormido, J Sánchez, and Ernesto Kofman. Muestreo, control y comunicación basados en eventos. *Revista Iberoamericana*

*de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(1):5–26, 2008.

- [4] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. An event-based pid controller with low computational cost. In *8th International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA'09)*, pages Special-session, 2009.
- [5] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. Further results on event-based pid controller. In *Control Conference (ECC), 2009 European*, pages 1979–1984. IEEE, 2009.
- [6] Karl-Heinz John and Michael Tiegelkamp. *IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [7] Volodymyr Vasyutynskyy and Klaus Kabitzsch. Time constraints in pid controls with send-on-delta. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(3):48–55, 2009.
- [8] Volodymyr Vasyutynskyy and Klaus Kabitzsch. A comparative study of pid control algorithms adapted to send-on-delta sampling. In *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 3373–3379. IEEE, 2010.
- [9] Alois Zoitl and Robert Lewis. *Modelling control systems using IEC 61499*, volume 95. IET, 2014.