

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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

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

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

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG)	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG	328
<i>Marisol Rodríguez-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>	

Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas

Ester Sales-Setién, David Tena, Ignacio Peñarrocha
 Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño
 Universitat Jaume I, Castellón, España
 {esales,david.tenatena,ipenarro}@uji.es

Resumen

Este trabajo aborda el problema de estimación de fugas en una red industrial real de tuberías y tanques. Para lograr este objetivo, se propone el uso de un modelo basado en el principio de conservación de la masa en el que se incluyen las fugas como señales aditivas. A continuación, se plantean observadores tipo PI para la estimación de estas fugas. El trabajo incluye un análisis de las prestaciones del observador en relación a la estimación de las fugas y al diagnóstico de las mismas. También se estudia el efecto del comportamiento no Gaussiano del ruido que afecta a las mediciones reales.

Palabras clave: Fugas, aplicación industrial, estimación, diagnóstico de fallos, observadores PI.

1. Introducción

Las redes de tuberías y tanques representan importantes activos en la industria de procesos. Con independencia del esfuerzo dedicado al diseño y construcción de estas redes, las tuberías son propensas a sufrir fugas debido a la corrosión, la erosión o defectos de materiales entre otros. En muchos casos, el daño causado por las fugas se extiende más allá de los costes monetarios ya que las pérdidas de producto pueden ser peligrosas para los seres humanos y el medio ambiente. Así, la comunidad científica ha dedicado mucho esfuerzo al estudio de este problema. Los trabajos pioneros en el campo versaban sobre la rehabilitación y el replazamiento de tuberías, ver [1]. En las últimas décadas, sin embargo, las técnicas de detección de fugas han acaparado más atención, ver [2].

La clasificación incluida en [3] divide las técnicas de detección de fugas en dos grandes grupos. En primer lugar, existen las técnicas directas o externas, las cuales requieren el uso de hardware especializado como sensores ópticos o de inspección del suelo. En segundo lugar, se tienen las técnicas indirectas o internas que no requieren el uso de sensores especializados y se basan en la información proporcionada por las mediciones del proceso. Entre ellas, [4] distingue entre las estrategias que

se basan en el principio de conservación de la masa y los métodos que usan modelos analíticos de la dinámica del fluido en el interior de la tubería. Muchas contribuciones como [5] trabajan con estos métodos para la identificación de fugas; sin embargo, estas estrategias están basadas en complejos modelos que, la mayoría de las veces, son muy difíciles de calibrar y requieren de personal especializado para su gestión, [6]. Además, muchas redes industriales no están provistas de transductores de presión y la aplicación de estas estrategias resulta imposible. Por su parte, los métodos basados en el principio de conservación de la masa, como los presentados en [7], son fáciles de usar y pueden ser implementados fácilmente ya que utilizan mediciones proporcionadas por instrumentación presente en toda red industrial, [8].

En la bibliografía encontramos múltiples trabajos que usan técnicas de identificación basadas en observadores para la detección de fugas, por ejemplo [9]. A excepción de contadas contribuciones, i.e. [10], la mayoría de estos trabajos no usan datos reales y, en muchos casos, se asumen condiciones ideales de ruido. Los autores de [11] señalan la necesidad de estudios más detallados y comprensibles que permitan mejorar la efectividad y factibilidad del diagnóstico de fugas en redes de ambientes industriales. El principal objetivo de este trabajo es la aplicación de estimadores de fugas a una red industrial real de tanques y tuberías. Se utilizarán técnicas aditivas basadas en modelo que trabajan con el principio de conservación de la masa.

La organización de este trabajo es la siguiente. Primero, se establece el problema en la Sección 2, donde se incluye el modelo de la red de tanques y tuberías con sus sensores. En la Sección 3, se añaden las fugas al modelo anterior y se presentan observadores tipo PI (Proporcional-Integral) para la estimación de las mismas. En la Sección 4, se estudia la aplicación de técnicas de diagnóstico de fallos basadas en las señales de fuga estimadas. Finalmente, en la Sección 5, aplicamos la metodología propuesta a una red industrial real y, en la Sección 6, resumimos las principales conclusiones

2. Descripción del problema

Considérese un conjunto de $i = \{1, \dots, n_v\}$ tanques de almacenamiento de fluidos interconectados a través de una red de $j = \{1, \dots, n_q\}$ tuberías. Para modelar esta red, se propone la aplicación del balance de masas a cada uno de los tanques i de la red, i.e.,

$$\dot{M}_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} m_j, \quad (1)$$

donde m_j es el caudal másico transportado por la tubería j , \dot{M}_i es la derivada de la masa de fluido contenido en el tanque i y $c_{i,j}$ es una constante que describe la relación entre el caudal de la tubería j y la variación experimentada por el tanque i . Así, $c_{i,j} = 0$ si la tubería no está conectada al tanque y $c_{i,j} = \{-1, 1\}$ dependiendo de si la tubería extrae o inyecta fluido en él.

Debido al elevado coste de los caudalímetros másicos como los medidores de Coriolis, los caudales másicos no se miden, en general, con estos instrumentos en la industria. Por el contrario, es mucho más común encontrar caudalímetros volumétricos magnéticos o de diferencial de presión. Éstos se calibran con una densidad predefinida del producto, ρ_j^0 , dando el siguiente caudal másico:

$$m_j^0 = \rho_j^0 m_j. \quad (2)$$

Las condiciones ambientales, entre otros, pueden afectar a la densidad del producto por lo que la densidad real del producto, ρ_j , no cumple más la relación $\rho_j = \rho_j^0$. Así, modelamos, los caudales másicos proporcionados por los sensores volumétricos, denotados con u_j , como

$$u_j = m_j + \eta_j, \quad (3)$$

donde η_j no solo tiene en cuenta los ruidos de medida sino que también considera el sesgo que se producen por la diferencia entre la densidad de referencia del producto, ρ_j^0 , y la densidad real, ρ_j , i.e. $m_j - m_j^0$.

Lo mismo se aplica a la masa del fluido contenido en los tanques. En la industria, la masa se calcula a partir de las medidas proporcionadas por sensores de nivel, las dimensiones del tanque y la densidad de referencia del producto, ρ_i^0 , i.e.

$$M_i^0 = \rho_i^0 S_i h_i, \quad (4)$$

con S_i la sección equivalente del tanque i y h_i la altura equivalente medida por los sensores. De nuevo, modelamos las medidas másicas, a las que llamamos s_i , como

$$s_i = M_i + \nu_i, \quad (5)$$

donde ν_i recoge los ruidos de medida, los sesgos de densidad y la incertidumbre en las dimensiones del tanque.

La red anterior puede quedar afectada por fugas en sus tuberías, las cuales corromperían el sistema. Si tiene lugar una fuga, la ecuación (1) no se cumple más. En la siguiente sección mostramos como modificar la relación (1) para que ésta tenga en cuenta las posibles fugas en las tuberías.

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar un algoritmo de estimación de fugas que utilice la información proporcionada por las mediciones u_j y s_i . También se tratará de caracterizar las prestaciones de este estimador para construir un diagnosticador de fallos que diferencie entre la presencia y ausencia de fugas en el sistema. En la literatura de diagnóstico de fallos, es común considerar que los ruidos que afectan a las mediciones son Gaussianos. Las mediciones reales, sin embargo, suelen estar afectadas por desviaciones no Gaussianas como sesgos, i.e. (3) y (5). Otras discrepancias con respecto a esta suposición derivan de otras causas como el uso de filtros en sensores inteligentes o temas de cuantización, que dependen de la resolución digital. Con todo, en el trabajo se tratará de discutir cuán críticos son estos comportamientos para el diagnóstico de fallos.

Se desea que los algoritmos de este trabajo se puedan implementar en hardware industrial como PLCs o Sistemas de Control Distribuido. Por ello, a lo largo del artículo, se trabajará en el espacio discreto con un periodo de muestro T_s . También se estudiará el efecto de este periodo de muestro en la no Gaussianidad de los ruidos que afectan a las mediciones.

3. Estimación de Fugas

3.1. Modelado Aditivo de las Fugas

Para tener en cuenta las posibles fugas en la red de tanques y tuberías, la ecuación (1) puede ser reescrita como

$$\dot{M}_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} (m_j + l_{i,j}), \quad (6)$$

donde $l_{i,j}$ representa el caudal másico fugado en la tubería j conectada al tanque i . De acuerdo con lo expuesto en [12], para que las señales de fallo sean identificables, éstas deben ser también detectables e aislables. Un fallo es detectable si sus variaciones afectan a las salidas medibles del sistema. Así, un fallo de fuga $l_{i,j}$ es detectable con M_i si $c_{i,j} \neq 0$. Por otra parte, un fallo aditivo como $l_{i,j}$ solo es aislable si el número total de fallos que puede afectar al sistema no es superior al número de salidas medibles. Dado que una única medida de salida

M_i está disponible por tanque, solo se puede llegar a estimar el caudal másico total fugado en el conjunto de las tuberías conectadas a cada tanque i , i.e

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} m_j + f_i, \quad (7)$$

con $f_i = \sum_{l=1}^{n_q} c_{i,j} l_{i,j}$. Finalmente, definimos la función de transferencia entre un fallo f_i y la salida del sistema como $G_{f_i}(s)$. Para que un fallo f_i sea identificable se necesita que la inversa de $G_{f_i}(s)$ sea estable y causal. Como la salida del sistema es M_i , tenemos que $G_{f_i}^{-1}(s) = s$, lo que significa que f_i no es identificable a partir de M_i . Para solucionar este problema, proponemos utilizar la derivada de M_i , que denotamos como \dot{M}_i , como salida del sistema; así, $G_{f_i}^{-1}(s) = 1$, i.e. f_i es identificable a partir de \dot{M}_i . La discretización del modelo del sistema que permite la estimación de las fugas es

$$y_i[k] = E_i u[k] + E_i \eta[k] + \mu_i[k] + f_i[k], \quad (8)$$

con

$$\begin{aligned} E_i &= [c_{i,1} \quad \dots \quad c_{i,n_q}], \\ u[k] &= [u_1[k] \quad \dots \quad u_{n_q}[k]]^T, \\ \eta[k] &= [-\eta_1[k] \quad \dots \quad -\eta_{n_q}[k]]^T, \end{aligned}$$

y donde $\mu_i[k]$ es el ruido de la nueva medición de salida $y_i[k]$, i.e.

$$y_i[k] = \frac{1}{T_s} (s_i[k] - s_i[k-1]), \quad (9)$$

$$\mu_i[k] = \frac{1}{T_s} (\nu_i[k] - \nu_i[k-1]). \quad (10)$$

3.2. Algoritmo de Estimación

Para favorecer la precisión del estimador en estado estacionario, proponemos el uso de observadores tipo PI. Así, modelamos la dinámica de los fallos f_i de (8) como

$$f_i[k+1] = f_i[k] + \Delta f_i[k], \quad (11)$$

donde $\Delta f_i[k]$ representa la variación de las señales de fallo f_i entre dos instantes consecutivos. La ecuación (11) permite modelar, por ejemplo, señales tipo escalón ($\Delta f_i[k]$ sólo tiene un valor no nulo en el momento de aparición del fallo) o señales tipo rampa ($\Delta f_i[k]$ toma un valor constante). Este tipo de modelo de fallos ha sido extensamente utilizado en la bibliografía para analizar el comportamiento de detectores de fallos, ver [13, 14].

El observador PI propuesto para la estimación del fallo f_i , que denotamos como \hat{f}_i , es

$$\hat{f}_i[k+1] = \hat{f}_i[k] + l_i(y_i[k] - \hat{f}_i[k] - E_i u[k]), \quad (12)$$

donde l_i es la ganancia que actualiza las predicciones obtenidas del modelo con las mediciones.

3.3. Diseño Basado en Prestaciones

Primero, definamos el error de estimación del fallo como

$$\tilde{f}_i[k] = f_i[k] - \hat{f}_i[k]. \quad (13)$$

Su dinámica viene dada por

$$\begin{aligned} \tilde{f}_i[k+1] &= (1 - l_i) \tilde{f}_i[k] + \Delta f_i[k] - \\ & l_i (E_i \nu_i[k] + \mu_i[k]). \end{aligned} \quad (14)$$

De (14) se deduce que l_i fija los polos de la dinámica de \tilde{f}_i . Para un sistema de primer orden, una medida estandarizada para la caracterización de la velocidad de respuesta es la constante de tiempo τ_i definida como

$$\tau_i = -T_s / \ln(1 - l_i). \quad (15)$$

Esta constante fija, entre otros, el tiempo de establecimiento al 98 % frente a fallos escalón como $t_{s,98\%} = 4\tau$. También podemos utilizar otros índices como el Error Cuadrático Acumulado (ISE, del inglés *Integral Squared Error*) del error que, cuando ocurre un fallo tipo escalón, viene dado por

$$\text{ISE}_i = T_s (1 - (1 - l_i)^2). \quad (16)$$

Segundo, denominamos a la varianza del error $\tilde{f}_i[k]$ como σ_i^2 . Para calcular σ_i^2 debemos tener en cuenta la correlación entre $\nu_i[k]$ y $\nu_i[k-1]$ dentro de $\mu_i[k]$, ver (10). Así, en estado estacionario y cuando ningún fallo está presente en el sistema, σ_i^2 satisface la siguiente ecuación de Lyapunov:

$$\mathcal{F}_i = A_i \mathcal{F}_i A_i^T + B_i \mathcal{V}_i B_i^T, \quad (17a)$$

$$\sigma_i^2 = R \mathcal{F}_i R^T, \quad (17b)$$

con $R = [1 \quad 0]$,

$$A_i = \begin{bmatrix} l_i/T_s & 1 - l_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} -l_i E_i & -l_i/T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y \mathcal{V}_i la covarianza del vector $v_i[k] = [\eta[k] \quad \nu_i[k]]$, i.e. $\mathcal{V}_i = \mathbf{E}\{v_i[k] v_i^T[k]\}$. La matriz \mathcal{F}_i da la varianza del vector $[f_i[k]^T \quad \nu_i[k]^T]^T$.

Las ecuaciones (15)-(16) y (17) muestran que hay un compromiso entre la habilidad de seguimiento del estimador y la precisión de las estimaciones. Para diseñar el estimador de fallos, se puede fijar el comportamiento temporal de las estimaciones con (15) o (16) y obtener la precisión de las estimaciones con (17) o seguir el procedimiento inverso, i.e., fijar la precisión con (17) y caracterizar la habilidad de seguimiento con (15)-(16).

4. Diagnóstico de Fallos

Dadas las características del estimador presentado anteriormente en (12), proponemos usarlo para el diagnóstico de fugas. Así, se introduce la siguiente decisión

$$\begin{cases} \text{if } |\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} & \text{Fuga } f_i \\ \text{otherwise} & \text{No fuga } f_i \end{cases} \quad (18)$$

donde $f_{m,i}$ denota el mínimo fallo diagnosticable f_i , es decir, $f_{m,i}$ es el valor constante de fallo que hace saltar la alarma de fallo f_i si se tiene en cuenta que no hay otros fallos ni ruidos en el sistema.

$$f_{m,i} = \left\{ |f_i[k]| : \begin{array}{l} f_i[k] = f_i[k-1], \forall k \\ \lim_{k \rightarrow \infty} |\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} \end{array} \right\}. \quad (19)$$

Se define ahora el ratio de falsas alarmas (FAR, del inglés *False Alarm Rate*), que denotamos con ϕ_i , como la probabilidad de hacer saltar una falsa alarma, es decir,

$$\phi_i = \Pr\{|\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} : f_i[k] = 0\}. \quad (20)$$

Si asumimos que los ruidos que afectan al sistema son Gaussianos, tenemos que el error de estimación asociado a cada estimación del fallo, $\tilde{f}_i[k]$, tiene una distribución normal de media cero. Entonces, $f_{m,i}$ debería satisfacer la siguiente relación para garantizar cierto FAR:

$$f_{m,i} = \Phi^{-1}(1 - \phi_i/2) \sigma_i, \quad (21)$$

donde Φ^{-1} es la inversa de la función de densidad de una variable aleatoria normal. Esto significa que el mínimo fallo diagnosticable puede verse también como el cuantil utilizado para construir el intervalo de confianza de nivel $1 - \phi(i)/2$.

Nota 1 Si los ruidos tienen sesgo, debemos incrementar el umbral $f_{m,i}$ en una cantidad igual a $\sum_j |F_{i,j}| \bar{v}_{i,j}$ donde $F_{i,j}$ es la ganancia estática del ruido del sensor $v_{i,j}$ al fallo estimado \hat{f}_i , y $\bar{v}_{i,j}$ es el sesgo en el sensor $v_{i,j}$.

5. Aplicación

Considérese la red mostrada en la Figura 1. Hay un tanque de almacenamiento de materia prima conectado a un tanque de alimentación. Se denota la masa en esos tanques como M_1 y M_2 . La máxima capacidad de los tanques es, respectivamente, 10000 y 800 toneladas métricas. Estos tanques se conectan a través de una tubería que proporciona un caudal másico m_1 de hasta 25 t/h ($c_{1,1} = -1$ y $c_{2,1} = 1$). El tanque de alimentación tiene dos consumidores, cuyos caudales másicos se denotan como m_2 y m_3 ($c_{2,2} = c_{2,3} = -1$). Estos caudales

másico son de hasta 15 y 10 t/h respectivamente. Todas las tuberías pueden sufrir una fuga (i.e., las fugas $l_{1,1}$ y $l_{2,1/2/3}$). En este análisis, nos enfocamos en la detección de la fuga $l_{2,1}$ ya que, en realidad, esta tubería es la más larga y la menos accesible para los operarios. Aplicamos la técnica de estimación de fallo en dos situaciones, una con datos simulados y otra con datos reales de industria en los que hemos añadido una fuga simulada. Para $T_s = 1$, las señales reales necesarias para la

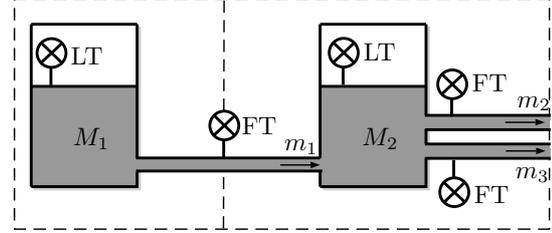


Figura 1: Arquitectura de la red de tanques, tuberías y transductores.

estimación son las que se muestran en la Figura 2. La Figura 3 muestra que la cuantización en las mediciones $s[k]$ afecta a $y_2[k]$ cuando se calcula con $T_s=1$ s; su ruido está correlado. Si se utiliza $T_s=20$ s, la correlación desaparece con el coste de un retardo mínimo en la detección de 20 segundos. Este retardo es despreciable para el caso de estudio; por lo tanto, elegimos $T_s = 20$ s para la implementación. En este caso, la desviación estándar del ruido de medición de $y_2[k]$ es 79,2 t/h. En el peor de los casos, la desviación estándar de cada uno de los sensores $u_1[k]$, $u_2[k]$ y $u_3[k]$ es 0,053 t/h, 0,0026 t/h y 0,022 t/h, respectivamente. Vemos que el reto principal del problema reside en la diferencia del orden de magnitud del ruido entre las mediciones del tanque y las que vienen de las tuberías.

Se han diseñado diferentes observadores para el estimador (12) con diferentes constantes de tiempo τ_2 desde 20 min a 180 min y con diferentes FARs ($\phi(1) = 10^{-3}$, $\phi(2) = 10^{-6}$ y $\phi(3) = 10^{-9}$). La parte superior de la Figura 4 muestra el mínimo fallo detectable que corresponde a cada diseño. Se ve que para un FAR dado, el mínimo fallo detectable $f_{m,2}$ disminuye cuando se incrementa la constante de tiempo del estimador. Conseguir gran sensibilidad a los fallos (es decir, un $f_{m,2}$ pequeño) requiere una mayor constante de tiempo del estimador si uno quiere asegurar a su vez ratios de falsas alarmas pequeños.

Bajo la presencia de un fallo f_2 tipo escalón, la estimación $\hat{f}_2[k]$ se comporta como un sistema de primer orden con constante de tiempo τ_2 y ganancia unitaria. Esto nos permite obtener el instante de tiempo en el que la estimación del fallo cruza

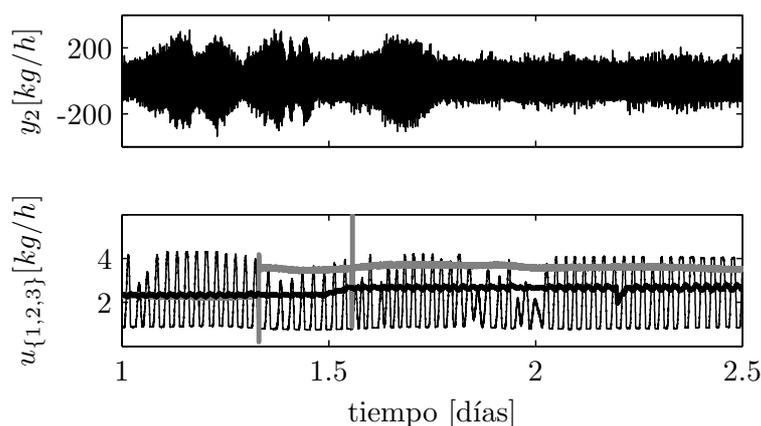


Figura 2: Entradas y salidas reales del tanque 2, $T_s = 1$.

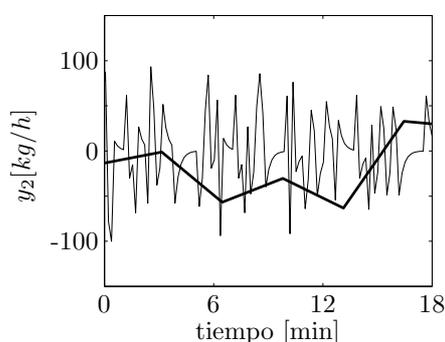


Figura 3: Detalle de la medición real y_2 para periodos de muestreo diferentes. (Claro: $T_s = 1$, Oscuro: $T_s = 20$)

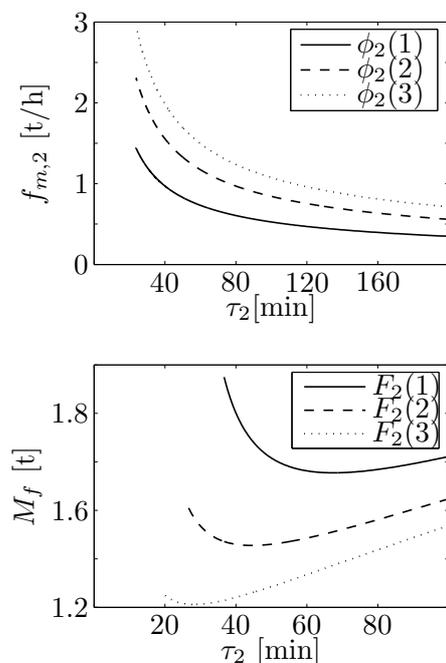


Figura 4: Compromiso de prestaciones para diferentes diseños.

el umbral y, por lo tanto, la cantidad de masa que se ha perdido hasta la detección:

$$M_f = -F \tau \log\left(1 - \frac{f_m}{F}\right).$$

La parte inferior de la Figura 4 se representa esta masa para diferentes estimadores (con las constantes de tiempo indicadas en el eje horizontal, y con $\text{FAR}=10^{-3}$) bajo tres fallos escalón de tamaños $F_2(1) = 2$ t/h, $F_2(2) = 3$ t/h, y $F_2(3) = 5$ t/h. Dado un detector definido por τ_2 y $f_{m,2}$, es remarkable que una fuga mayor F_2 hace que el tiempo de detección ocurra más rápido de forma que se pierde menos masa durante la fuga. La masa fugada es infinita si el fallo F_2 es menor que el umbral $f_{m,2}$, y alcanza un mínimo para cierto τ_2 . Como el fallo no se conoce a priori, esta característica no puede utilizarse para encontrar un detector óptimo (en el sentido de encontrar el detector que asegura una masa fugada mínima hasta la detección).

Para probar la bondad del enfoque, hemos alimentado el algoritmo (12) con datos reales para detectar fallos en el tanque 2. Hemos añadido una señal en forma de escalón de 3 t/h desde el instante 5h en las mediciones de m_1 , lo que representa una pérdida de esa cantidad en la tubería que va desde el caudalímetro hasta el tanque 2. Hemos probado el enfoque para diferentes diseños con tres valores diferentes de $f_{m,2}$ y para un valor fijo de FAR de 10^{-3} . El comportamiento del estimador y se puede ver en la Figura 5 (en oscuro). Se observa que en los periodos libres de fallo iniciales, la estimación tiene un pequeño sesgo debido a la densidad considerada en los caudalímetros, tal y como se explica en la ecuación (3). También se ha considerado datos simulados a partir de la generación de señales de caudal y obteniendo el volumen por integración, añadiendo también ruidos Gaussianos con la mayor varianza observada en los datos reales. En este caso, se tiene una estimación sin sesgo en los

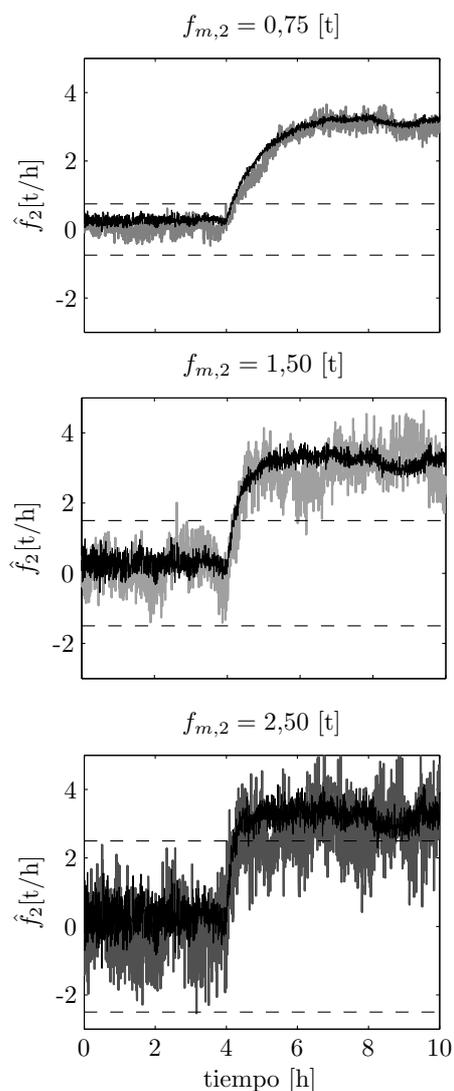


Figura 5: Comparación de las estimaciones y diagnóstico de diferentes diseños. (Oscuro: Datos industriales, Claro: Datos simulados.)

periodos libres de fallo que satisface con precisión el FAR diseñado.

6. Conclusión

En este trabajo se ha analizado el problema de la detección de fugas en redes de tuberías y tanques industriales, cuya masa y caudales se miden con sensores ruidosos. Se ha descrito y modelado el problema y se ha propuesto una estrategia de estimación. La estrategia modela las fugas como fallos aditivos y se propone el uso de un observador PI para su estimación. Este enfoque no requiere ninguna excitación específica para las señales y se pueden caracterizar las prestaciones obtenidas a pesar del nivel elevado de ruido de las señales disponibles. Estas prestaciones se han caracterizado por medio de los fallos mínimos diagnosticables,

el ratio de falsas alarmas, y el ratio de convergencia ante fallos tipo escalón. Se ha mostrado la relación entre estos tres índices de desempeño para el ruido disponible en datos industriales reales. Finalmente, se ha simulado la presencia de fugas perturbando las mediciones en los caudalímetros y se ha estudiado su comportamiento. Se ha demostrado la validez del enfoque para fugas en tuberías que rodean cierto tanque.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I de Castelló a través del proyecto con referencia P11B2015-42 2 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto con referencia TEC2015-69155-R. También se ha financiado a través de la ayuda predocctoral FPU14/01592 del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Los autores quieren mostrar su agradecimiento a UBE Corporation Europe, S.A.U. por su colaboración al compartir los datos industriales utilizados en el caso de estudio.

Referencias

- [1] Boulos, Paul y Tom Altman: *A graph-theoretic approach to explicit nonlinear pipe network optimization*. Applied Mathematical Modelling, 15(9):459–466, 1991.
- [2] Poulakis, Z, Dimitris Valougeorgis y Costas Papadimitriou: *Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework*. Probabilistic Engineering Mechanics, 18(4):315–327, 2003.
- [3] Geiger, Gerhard, Thomas Werner y Drago Matko: *Leak detection and locating - a survey*. En *PSIG Annual Meeting*. Pipeline Simulation Interest Group, 2003.
- [4] Murvay, Pal Stefan y Ioan Silea: *A survey on gas leak detection and localization techniques*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(6):966–973, 2012.
- [5] Verde, Cristina: *Accommodation of multi-leak location in a pipeline*. Control Engineering Practice, 13(8):1071–1078, 2005.
- [6] Sun, Liang: *Mathematical modeling of the flow in a pipeline with a leak*. Mathematics and Computers in Simulation, 82(11):2253–2267, 2012.
- [7] Andersen, Johannes H y Roger S Powell: *Implicit state-estimation technique for water network monitoring*. Urban Water, 2(2):123–130, 2000.

- [8] Doorhy, James: *Real-time pipeline leak detection and location using volume balancing*. Pipeline & Gas Journal, 238(2):65–66, 2011.
- [9] Torres, Lizeth, Cristina Verde, Gildas Besançon y Omar González: *High-gain observers for leak location in subterranean pipelines of liquefied petroleum gas*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 24(6):1127–1141, 2014.
- [10] Reddy, H Prashanth, Shankar Narasimhan, S Murty Bhallamudi y S Bairagi: *Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part II. Experimental and field evaluation*. Computers & Chemical Engineering, 35(4):662–670, 2011.
- [11] Yin, Shen, Steven X Ding, Xiaochen Xie y Hao Luo: *A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(11):6418–6428, 2014.
- [12] Ding, Steven X: *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [13] Khedher, Atef, Kamel Benothman, Didier Maquin y Mohamed Benrejeb: *State and sensor faults estimation via a proportional integral observer*. En *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2009.*, páginas 1–6. IEEE, 2009.
- [14] Koenig, Damien: *Unknown input proportional multiple-integral observer design for linear descriptor systems: application to state and fault estimation*. IEEE Transactions on Automatic Control, 50(2):212–217, 2005.