

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 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
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 Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/>	
Control Inteligente	
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>	

EXPLORACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN 3D DE FONDOS MARINOS MEDIANTE AUVs Y SENSORES ACÚSTICOS

Oscar L. Manrique, Mario Garzón y Antonio Barrientos
 Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC), Universidad Politécnica de Madrid
 c/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006 Madrid
 ol.manrique@alumnos.upm.es, ma.garzon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Este trabajo presenta un sistema para la reconstrucción 3D de fondos acuáticos poco profundos utilizando medidas de un array de sensores de distancia tipo sonar acoplado a un robot submarino tipo torpedo. Se utiliza el simulador UWSim, específicamente desarrollado para misiones subacuáticas así como la arquitectura de control y navegación COLA2 adaptada al modelo de robot utilizado. Se ha desarrollado también una aplicación que controla la trayectoria del robot, de modo que se garantice la cobertura completa del área teniendo en cuenta los solapamientos necesarios para crear el mapa. A medida que el robot se desplaza por el escenario, las medidas del multibeam se integran para crear nubes de puntos parciales, que luego se agrupan para obtener el mapa 3D del fondo completo. Esta tarea de agrupación requiere de un proceso de corrección errores de localización relativa, para lo que se utiliza el algoritmo Iterative Closest Point. Este algoritmo requiere un complejo ajuste de filtros y configuraciones que para afinar el resultado final y conseguir una reconstrucción de buena calidad. Finalmente, el sistema se probó sobre varios escenarios y trayectorias diferentes, diseñados con el fin de evaluar la robustez del sistema y la calidad del mapa generado.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, PointCloud, Sensor Multibeam, Reconstrucción de fondos marinos, UWSim, COLA2.

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento del fondo marino siempre ha supuesto un reto para la navegación subacuática, ya que las condiciones en este entorno son muy variables y normalmente desconocidas, además no es posible el uso de tecnologías de localización o de comunicaciones, en las cuales se basan hoy en día la mayoría de los sistemas de navegación terrestre. Por tanto, el estudio de los fondos marinos y su conocimiento a la hora de llevar a cabo las misiones, supone una gran ventaja cuando hablamos de navegación, y más aún si se trata de sistemas autónomos.

Este trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema completo para la generación de mapas 3D utilizando robots submarinos. Se pretende por tanto generar una misión que incluye generación de trayectorias, navegación autónoma, recolección de datos y procesamiento on-line y off-line de los datos para finalmente obtener una reconstrucción correcta del fondo. Las posibles aplicaciones de este trabajo son muy variadas, empezando por la navegación autónoma de AUVs, así como tareas de búsqueda y rescate además de otras aplicaciones de la robótica de alto nivel, pudiéndose integrar además en flotas heterogéneas de múltiples robots.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo ha sido necesaria una combinación de desarrollos propios así como de integración y configuración de diferentes tecnologías o desarrollos previos, empezando por la simulación de entornos acuáticos, para la cual se utiliza en software *UWSim* [1]. Esta es una herramienta, de código abierto, específica para la simulación de misiones marinas. Es fácilmente configurable mediante un documento de *XML*, donde es posible incluir tantos objetos como se desee, así como parametrizar el entorno, añadiendo oleaje, presión, corrientes, claridad del agua entre otros, de manera que el escenario se asemeje a condiciones reales de operación. Este simulador ofrece también una gran variedad de sensores que se pueden adaptar fácilmente tanto al escenario como al vehículo que se introduzca en la escena.

El siguiente componente a integrar es el control y navegación del robot, para el que se utiliza la arquitectura *COLA2* [2], la cual se encuentra integrada en *UWSim* y ROS. Esta arquitectura, brinda las herramientas necesarias controlar los movimientos del robot y realizar una navegación hacia un punto de paso. Fue por tanto necesario desarrollar una aplicación, objetivo es ejercer como capitán del vehículo, es decir que se encargue de definir la trayectoria del vehículo y enviar a *COLA2* las sucesivas posiciones objetivo que se desea que el robot alcance para que recorra la trayectoria predefinida.

A medida que el robot se desplaza por el escenario, el sensor multibeam va publicando sus mediciones.

Es necesario por tanto, recoger estos datos y a partir de ellos crear nubes de puntos, que representan las medidas suministradas por el multibeam durante un periodo de tiempo. Una vez tenemos las nubes de puntos almacenadas, es posible generar un mapa 3D completo. Esta tarea podría realizarse de manera muy sencilla simplemente concatenando las diferentes nubes de puntos parciales. Pero debido a errores en las mediciones y en la localización del robot, cuyo error va incrementando continuamente, dos nubes de puntos pueden no coincidir perfectamente. Para solventar estos errores, se aplica el algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)* [3], implementado en la librería *libpointmatcher* [4], este algoritmo se encarga de encontrar el movimiento relativo de una nube de puntos respecto otra, siempre que las dos compartan un área en común, es decir, teniendo dos nubes de puntos de áreas que se solapan entre sí, el algoritmo intentará rotar y/o trasladar una de las nubes de puntos de tal manera que ambas coincidan lo máximo posible. Esto solventa, en cierta medida, los errores de localización del robot que se han ido arrastrando desde el inicio de la misión.

Para finalizar, se han diseñado distintos escenarios, con objetos de diferentes tipos (conos, esferas, prismas). Así mismo, se han generado trayectorias diferentes para la cobertura del área, que requerirán tiempos de ejecución distintos y producirán nubes de puntos que se solapan más o menos. Estas trayectorias y escenarios se combinan y evalúan con el objetivo de realizar una valoración global del sistema desarrollado.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Para el desarrollo del trabajo, ha sido necesario pasar por varias fases, cumpliendo objetivos parciales en cada una de ellas. Los más relevantes se detallan a continuación.

2.1. Integración del sensor con UWSim y ROS

UWSim está pensado de tal forma que su comunicación con el Sistema Operativo para Robots (ROS) sea especialmente sencilla. Incluso en su configuración por defecto se encuentran varios servicios y tópicos listos para ser utilizados, adicionalmente, en el archivo de configuración del escenario a simular, se incluye un bloque para definir la interfaz de comunicación con ROS, en la que se ofrecen 22 interfaces distintas. Así, por ejemplo, en este trabajo se utilizará un sensor *multibeam*, por lo que basta con añadir la interfaz *multibeam.SensorToLaserScan* para disponer de un canal donde

se publiquen las medidas realizadas por el sensor correspondiente.

El sensor *multibeam* simula un conjunto de sensores de distancia cuya orientación se configura previamente, es decir se trata de una colección de sensores de alcance colocados en un mismo punto apuntando a distintos ángulos y contenidos en un mismo plano. Tanto la resolución, o incremento angular, como los ángulos máximo y mínimo de apertura se pueden configurar fácilmente. Este sensor se ubicó en la parte ventral del robot, de manera que realice un barrido transversal a la dirección de navegación del robot. Esta localización se debe reflejar también en ROS mediante la publicación de una transformación entre la base del robot y la posición del sensor, en la Figura 1 se muestra una imagen de los datos generados por este sensor.

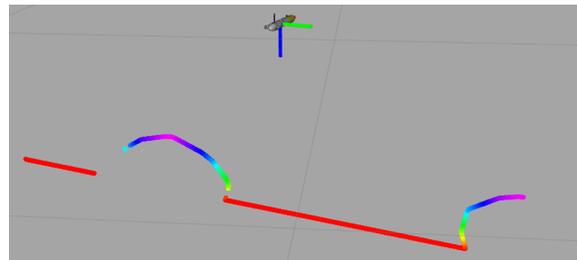


Figura 1: **Sensor multibeam.** Visualización de las lecturas recogidas por el sensor multibeam.

2.2. Guiado, Navegación y Control del AUV

La siguiente tarea a desarrollar es la navegación autónoma del robot, tarea necesaria para conseguir que el robot recorra un camino predefinido. Para esto se ha utilizado la librería *Component Oriented Layer-based Architecture for Autonomy (COLA2)*[2]. Esta arquitectura implementa un control basado en tres capas, reactiva, ejecución y misión y permite realizar misiones de manera autónoma, Además incluye los modelos cinemáticos y dinámicos de 2 robots extensamente utilizados en la investigación de robótica submarina (*Sparus.II* y *Girona.500*). Se ha utilizado una configuración propia de *COLA2* para que se adapte a los escenarios y a la misión.

Para la generación de la trayectoria de cobertura de área, se ha desarrollado un programa que envía al robot diferentes posiciones que debe alcanzar, de manera que al final el robot haya recorrido la trayectoria deseada y por tanto realizado un barrido completo de la superficie de interés, el algoritmo no enviará una nueva posición objetivo mientras que el vehículo no haya alcanzado la meta parcial. Para enviar la posición deseada del

robot, se utiliza un servicio que ofrece *COLA2*, con nombre `/enable_goto`. Este servicio define de manera automática los canales y señales de control que se deben utilizar, y requiere una serie de parámetros, en los que se define, entre otras cosas, la posición y velocidad deseada, el ángulo de rotación y la profundidad del punto final. La configuración que le pasemos afectará a la calidad de los resultados. Por poner un ejemplo, cuanto más rápido se ejecute el barrido, menos lecturas del fondo se realizará por metro recorrido.

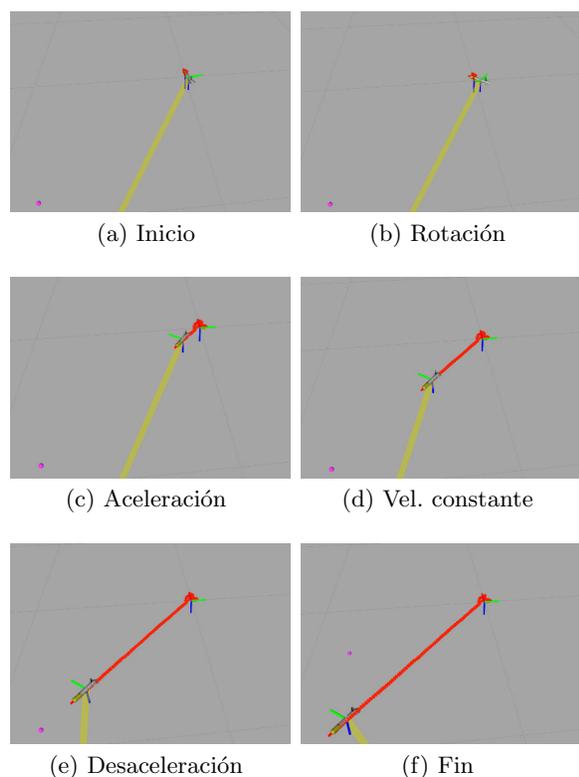


Figura 2: Secuencia de movimiento hacia una posición objetivo.

Como se aprecia en la Figura 2, el algoritmo que utiliza *COLA2* para alcanzar la posición objetivo inicia con una rotación pura hasta orientarse correctamente con la posición objetivo para después avanzar hacia ella. La secuencia avance inicia con una aceleración, continua con un movimiento a velocidad constante y termina con una desaceleración hasta alcanzar la posición objetivo. En la figura 2f el vehículo ya ha alcanzado la posición objetivo, es ese momento se le envía la siguiente posición objetivo, hasta completar la trayectoria deseada.

2.3. Creación de nubes de puntos parciales

Los datos generados por el sensor multibeam se publican en forma de mensajes de tipo *LaserScan*, que es utilizado para representar los datos de un escáner láser 2D. Gracias a ello, podemos trabajar de manera cómoda con los datos obtenidos. Para convertir estos datos en una nube de puntos y visualizarlas en 3D, es necesario agrupar una serie de estos mensajes y transformarlos a un mensaje tipo nube de puntos (*Pointcloud2*). Esta conversión se realiza utilizando el software *laser_assembler*¹ que recoge todas las medidas publicadas por el multibeam y las transforma en una nube de puntos que contiene todos los datos.

El proceso de creación de una nube de puntos se puede observar en la Figura 3, en la cual se inicia con una sola medida del multibeam y se van agrupando progresivamente hasta completar una imagen más significativa.

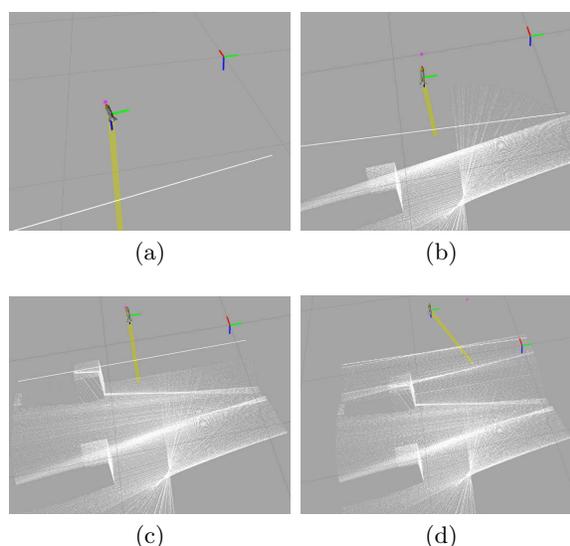


Figura 3: Secuencia temporal de lectura de medidas del multibeam.

El software de ensamblado de datos permite definir el intervalo de recolección de datos, definiendo dos instantes temporales correspondientes al inicio y final de la recolección. Para controlar este proceso se ha creado una aplicación que se encarga de enviar las solicitudes marcando los correspondientes en intervalos de tiempo. Esta aplicación debe crear las nubes de puntos garantizando que se solapen ciertas medidas entre una nube de puntos y la siguiente, ya que de no ser así no podría realizarse una correcta alineación en el siguiente paso del proceso, al intentar generar un mapa con nubes de puntos que no se solapan, el algoritmo

¹http://wiki.ros.org/laser_assembler

las agrupará de forma que varias secciones del mapa se superpongan en una sola, esto se visualiza claramente en la Figura 4.

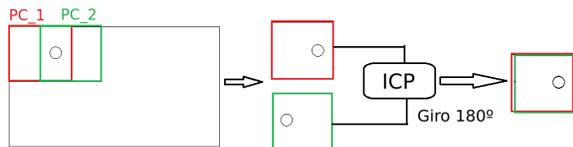


Figura 4: **Solapado erróneo.** El algoritmo ICP superpone las dos nubes de puntos para reducir al mínimo la distancia entre ambas.

3. Reconstrucción 3D del mapa

El siguiente paso del proceso, es la reconstrucción del mapa 3D juntando las diferentes nubes de puntos en una sola, de forma que se represente el escenario completo. Como se ha mencionado anteriormente, esta unión se realiza utilizando el programa *libpointmatcher* [4] y el algoritmo *ICP*. De modo que se alineen dos o más nubes de puntos que se superponen, de modo que se puedan corregir posibles errores y generar un mapa que se ajuste mejor a la realidad. Para poder hacer uso del *libpointmatcher*, es necesario convertir los Pointclouds a un formato válido para el programa, por se ha desarrollado una aplicación que transforma las nubes de puntos de mensajes *PointCloud2* de ros a ficheros en formato *Visualization ToolKit (.vtk)*.

El algoritmo *ICP* realiza una medición inicial de las distancias entre cada punto de una primera imagen o nube de puntos, con el punto más cercano en la segunda imagen. Una vez realizadas las medidas, se estima una matriz de transformación que aporte un movimiento de traslación y otro de rotación, aplica esta matriz a todos los puntos y vuelve a medir distancias con sus nuevos vecinos más cercanos. Este proceso se repite iterativamente hasta que se ha alcanzado una distancia mínima aceptable entre ambas imágenes.

Libpointmatcher aporta además otras funcionalidades, como la capacidad de aplicar varios filtros a las imágenes, antes y después del procesamiento. Esto permite eliminar posibles ruidos, o reducir la densidad de puntos cuando es excesivamente alta.

Otra funcionalidad que ofrece *libpointmatcher* y, como veremos más adelante, ha sido clave para el sistema, es la verificación de transformaciones (*TransformationChecker*). Cuando *ICP* estima una transformación, este componente se encarga de comprobar si los resultados del algoritmo cumple límites preestablecidos. Es posible utilizar tres tipos de configuraciones, que conjuntamente

afectan tanto el tiempo de ejecución como la calidad del mapa obtenido, estas configuraciones se listan a continuación.

- Número de iteraciones: Acota superiormente el número de iteraciones que el algoritmo puede realizar.
- Límite de error: Establece un valor mínimo de diferencia entre las transformaciones estimadas por debajo del cual consideramos que el resultado del algoritmo es aceptable.
- Acotación superior de rotación y traslación: Limita los movimientos estimados de traslación y de rotación. Si el algoritmo estima unas transformaciones superiores, entonces el proceso finaliza.

Es posible encontrarse en una situación en que las nubes de puntos generadas no tengan un solapamiento suficiente, o cuando la superficie es muy homogénea. Para explicar esta situación, supongamos un entorno en el que solo existen unos pocos objetos y ejecutamos la misión para obtener los Pointclouds.

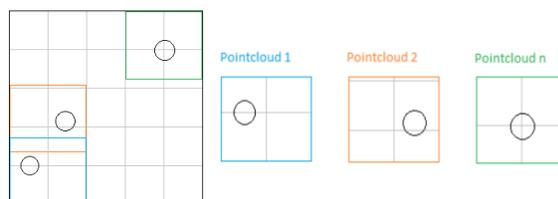


Figura 5: **Ejemplo de escenario y nubes de puntos.** Se presenta un esquema de un escenario sencillo con 3 objetos y se señalizan tres nubes de puntos tomadas durante la ejecución de la misión.

Como se puede ver en la Figura 5, el resultado serían tres nubes de puntos distintas a las que aplicaremos el *ICP*. Este algoritmo busca la transformación que consiga un menor error entre los puntos. En este caso, el resultado óptimo es juntar las nubes de puntos, dando lugar a una representación de la superficie irreal, como se muestra en la Figura 6.

Para solucionar esta situación ha sido necesario realizar dos adaptaciones al sistema completo, la primera de ellas consiste en buscar una mayor superposición de las nubes de puntos, para lo cual se modificó el método de obtención de las nubes de puntos, aislándolo completamente de la misión y generando una aplicación externa que genere las nubes de puntos con referencias de tiempo superpuestas, es decir, cada nueva captura inicia antes de terminar la anterior.

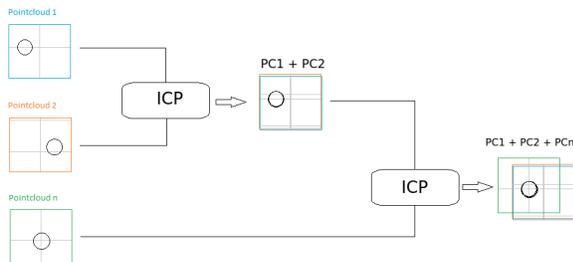


Figura 6: **ICP sin límites establecidos.** Se puede observar que el algoritmo ICP agrupa las nubes de puntos de manera errónea

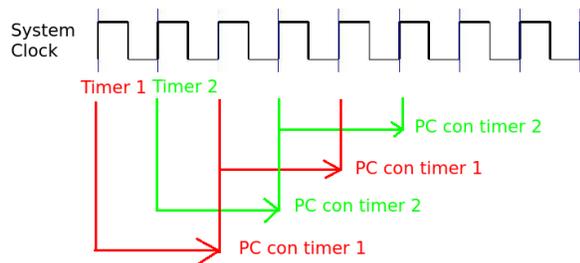


Figura 7: **Esquema de la toma de referencias temporales.**

Como se aprecia en la Figura 7, se utiliza un temporizador que genera las referencias de tiempo que se alternan entre sí, por tanto resulta en nubes de puntos que comparten aproximadamente el 50% de su área total.

La segunda adaptación para solventar el problema del solapamiento fue el empleo de límites para el algoritmo *ICP*, como se ha explicado anteriormente, *libpointmatcher* permite establecer ciertos límites en el proceso de unión de imágenes. Se decide por ello imponer límites superiores en la matriz de transformación estimada por el *ICP*, tanto para la rotación como para la traslación. En los casos en que estos límites sean superados, se concatenarán las dos nubes de puntos sin corrección, es decir tomando solamente la posición del robot como referencia.

De esta manera, retomando el ejemplo presentado en la Figura 5, es posible conseguir que el *ICP* no ejecute la corrección de las nubes de puntos y que simplemente las concatene, una generando una única imagen que represente el escenario de manera más fehaciente, tal como se observa en la Figura 8.

4. Experimentos y resultados

Esta sección presenta una serie de experimentos que buscan realizar una valoración del sistema al completo y de los aspectos que pueden afectar a la calidad de los mapas obtenidos. Se eva-

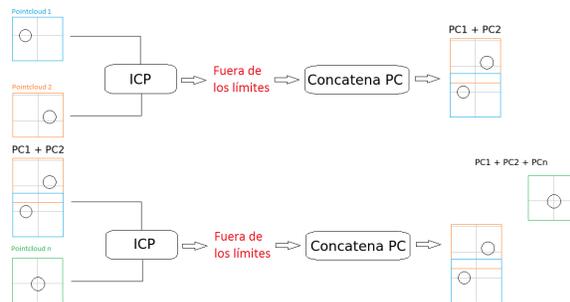


Figura 8: **ICP con límites de rotación y traslación.**

luará en efecto del tipo de trayectoria implementado así como de los diferentes objetos que se puedan encontrar en el fondo.

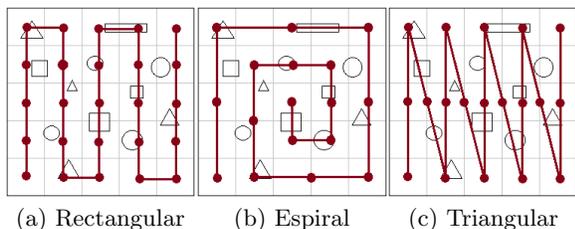
Es importante destacar la relevancia de la trayectoria elegida, pues como se ha explicado, la superposición de las nubes de puntos es un factor muy importante a la hora de crear el mapa global. Al generar las nubes de puntos a una frecuencia fija, el número de las mismas, el nivel de solapamiento y las áreas visitadas en repetidas ocasiones dependen de la trayectoria. Además, como es evidente, el tiempo que tardará la misión en realizarse depende directamente de la trayectoria realizada.

4.1. Tipos de trayectorias y escenarios

Para los experimentos se han generado tres tipos de trayectorias diferentes, descritas a continuación.

- **Rectangular** (Figura 9a): Trayectoria de 25 waypoints y 8 puntos de giro de 90 grados. El área de interés es recorrido de forma homogénea por lo que obtendremos un mapa con una densidad de puntos bastante similar.
- **Espiral** (Figura 9b): Trayectoria de 17 waypoints con 8 puntos de giro de 90 grados. Esta trayectoria inicia con un bajo grado de superposición que va aumentando a medida que se realiza el recorrido.
- **Triangular** (Figura 9c): Trayectoria de 19 waypoints con 8 puntos de giro de más de 90 grados. El objetivo de realizar esta trayectoria es la de estudiar casos en los que el robot tenga que realizar rotaciones más largas, de casi 180 grados. Se consigue además un alto grado de superposición entre todas las nubes de puntos.

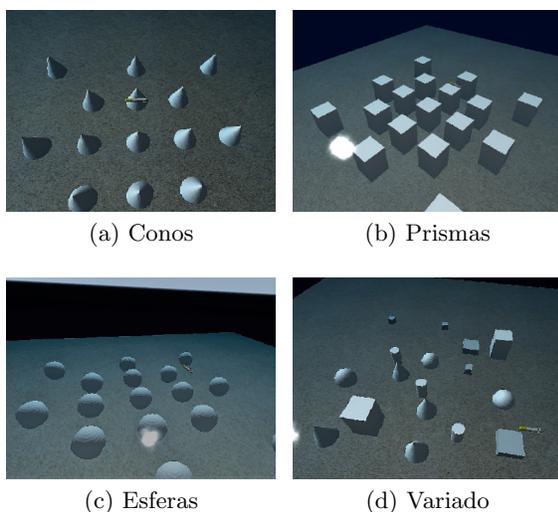
De igual manera, se han creado escenarios con distintos tipos de superficies: conos, cilindros, prismas, esferas y uno con varios elementos diferentes.



(a) Rectangular (b) Espiral (c) Triangular

Figura 9: Tipos de trayectoria utilizados

El objetivo es evaluar si el tipo de objetos que se encuentran en el fondo influyen en la calidad del mapa generado, estos escenarios se muestran en la Figura 10.



(a) Conos (b) Prismas (c) Esferas (d) Variado

Figura 10: Escenarios utilizados

Una vez definido el escenario y el tipo de trayectoria se realiza el proceso de captura de datos. Este proceso inicia con el robot en la posición inicial de la ruta, a continuación el robot se mueve, siguiendo la trayectoria que se le ha definido, y a medida que avanza va capturando datos con el sensor multibeam. Estos datos se van agrupando en nubes de puntos parciales, que pueden visualizarse inicialmente una tras otra, es decir sin el proceso de corrección basado en *ICP*, los datos se almacenan en disco durante el experimento, y posteriormente se realiza la alineación utilizando *ICP*. La Figura 11 muestra una secuencia de captura de datos, así como las nubes de puntos parciales que se crean en línea.

4.2. Resultados

En esta sección presentamos algunos de los resultados obtenidos. Se debe tener en cuenta que para que esta valoración sea consistente, todas las misiones se han ejecutado con la misma configuración,

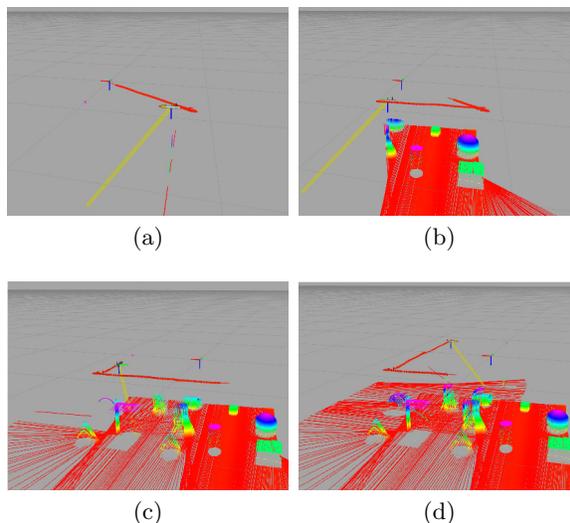


Figura 11: **Proceso de captura de datos** La línea roja en la parte superior muestra la ruta del robot. Los datos recogidos por el sensor multibeam se muestran en colores que varían según la altura relativa al fondo

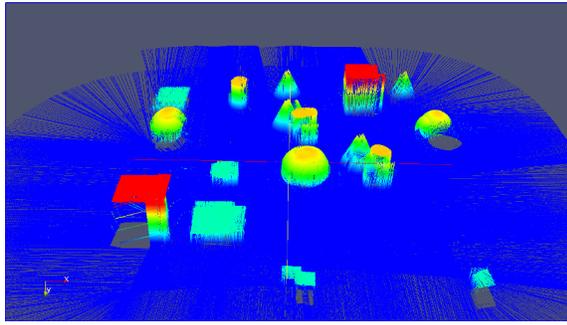
tanto del entorno acuático como de los parámetros del vehículo. La Figura 12 muestra el resultado del proceso en un escenario con elementos variados, en los cuales se puede apreciar la mejora en el detalle de los mismos, por ejemplo en los vértices de los conos o en la forma de los prismas.

La Figura 13 muestra el resultado antes y después de la alineación de las nubes de puntos para el escenario de esferas y la ruta rectangular, se puede observar que en este caso la mejora no es tan notoria, posiblemente debido tanto a la ruta del robot como a la configuración del algoritmo *ICP*.

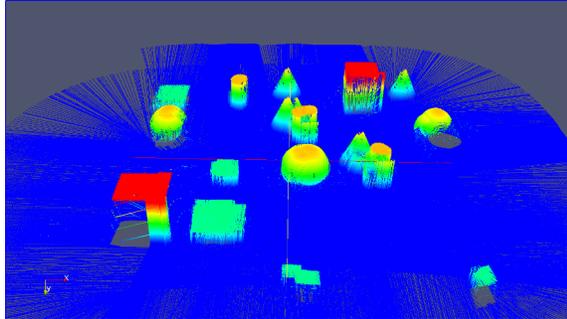
4.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados, es posible realizar algunas observaciones del comportamiento del sistema desarrollado:

- **Giros durante la misión:** Las nubes de puntos adquiridas mientras el robot realiza una rotación contienen bastantes errores, por tanto, para obtener un mapa de mayor calidad se podría realizar una selección previa con el fin de eliminarlas.
- **Filtrado de datos:** *libpointmatcher* ofrece una gran variedad de filtros para las nubes de puntos, que permiten obtener procesos de ejecución más o menos rápidos y unos resultados de mayor o menor calidad. Estos filtros deben ser calibrados detalladamente para conseguir mapas de la mejor calidad posible.



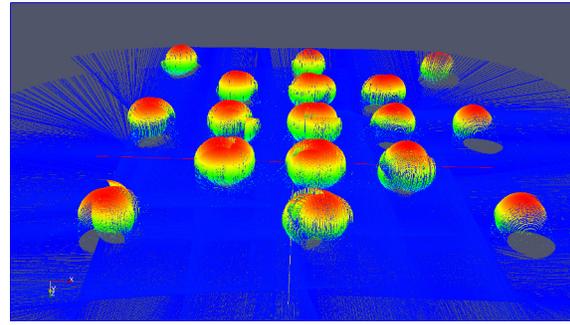
(a) Antes



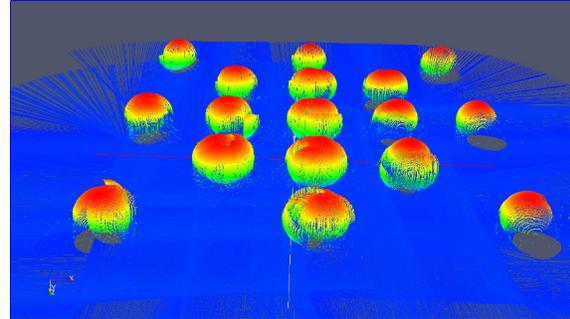
(b) Después

Figura 12: **Escenario variado** Se observan las nubes de puntos del escenario variado, antes y después del proceso de ajuste del mapa 3D utilizando ICP.

- **Influencia de los objetos:** No se ha observado que el tipo de superficie de los objetos influya directamente en la calidad de los mapas obtenidos. En todos los tipos de figuras se observan errores aparentemente similares. Sin embargo, si se ha detectado que en los objetos de menor tamaño se pueden apreciar más distorsiones o fallos en la reconstrucción. Otro aspecto a destacar, es que los errores destacan de manera más notoria en elementos que contengan vértices más cerrados, por ejemplo, en los conos.
- **Influencia de las trayectorias:** En este caso sí se aprecian claras diferencias entre unas trayectorias y otras, la mejor trayectoria para generar los mapas es la circular ya que se aprecia una mejor definición de los objetos así como una distribución de errores no homogéneos. Esto se debe a que se realizan más barridos por la zona central que por el exterior. En cuanto a los otros tipos de trayectorias, la rectangular y la triangular, no se han observado resultados concluyentes, sin embargo, los giros más amplios en la trayectoria triangular parecen afectar un poco más el resultado. El tipo de trayectoria realizada es el factor que más afecta la duración de la misión, ya que varía considerablemente la



(a) Antes



(b) Después

Figura 13: **Escenario esferas** Se observan las nubes de puntos del escenario con esferas, antes y después del proceso de ajuste del mapa 3D utilizando ICP.

longitud del recorrido. También tiene una influencia directa sobre el número de nubes de puntos obtenidas, pues la generación de estos se realiza a una frecuencia fija, por lo que en el caso de las trayectorias triangulares se obtienen muchas más nubes de puntos y tarda también un mayor tiempo en completar la misión.

- **Velocidad del movimiento:** Las misiones deben plantearse de tal manera que la velocidad sea la adecuada con respecto a la frecuencia del multibeam. De esta manera podremos conseguir una mejor definición del fondo con un solo barrido del vehículo.

5. Conclusiones

El trabajo presentado brinda una solución para la generación de mapas de fondos acuáticos, se han desarrollado e integrado diferentes herramientas que permiten generar los mapas abarcando el proceso completo, es decir, desde la planificación de una misión y los componentes necesarios para obtener los datos, hasta un tratamiento de los mismos y la generación del mapa final.

La integración de distintas herramientas para conseguir crear un mapa 3D paso a paso se ha basado

en el uso del framework ROS como punto de conexión entre los diferentes algoritmos y herramientas de software o librerías utilizadas (*UWSim*, *COLA2*, *libpointmatcher*).

La integración del algoritmo *ICP* como etapa final del proceso, ha permitido afinar el resultado, sin embargo, se ha comprobado que su uso correcto requiere de un ajuste muy fino de los parámetros y del pre-procesado de los datos.

El sistema desarrollado se ha probado en diferentes escenarios y utilizando rutas diversas. Se ha observado que la calidad del mapa resultante no varía considerablemente según los objetos presentes en el escenario. Sin embargo, se ha verificado que la trayectoria realizada sí afecta el resultado. Las pruebas han mostrado que una trayectoria circular permite una mejor reconstrucción, debido a que esta trayectoria realiza más barridos de la zona central y además permite visitar en varias ocasiones zonas cercanas, de modo que se facilita el trabajo del algoritmo *ICP*.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea y PRIC (Protección robotizada de infraestructuras críticas, DPI2014-56985-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Los autores quisieran además agradecer al grupo IRSLab en la Universidad Jaume-I de Castellón por su desarrollo del simulador *UWSim* así como al grupo ViCOROB de la Universidad de Girona por su desarrollo y colaboración con la arquitectura *COLA2*.

Referencias

- [1] M. Prats, J. Pérez, J. J. Fernández, and P. J. Sanz. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2577–2582, Oct 2012.
- [2] Andres El-Fakdi y Marc Carreras Narcis Palomeras. Cola2: A control architecture for auvs. pages 695 – 716, Aug 2012.
- [3] P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, Feb 1992.

- [4] François Pomerleau, Francis Colas, Roland Siegwart, and Stéphane Magnenat. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets. *Autonomous Robots*, 34(3):133–148, February 2013.