

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

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



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



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

## Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

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

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

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

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

# T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS

T. Prado, B. Quintana, S. A. Prieto, A. Adán

3D Visual Computing and Robotics Lab, Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, España.

Tomas.Prado@alu.uclm.es, {Blanca.Quintana, Samuel.Prieto, Antonio.Adan}@uclm.es

## Resumen

*Este artículo presenta el sistema T-Scan (Thermal Scan) dedicado a realizar una captación de nubes de puntos densas con información de color y temperatura. El sistema forma parte del proyecto T-BIM (Thermal Building Information Models) en el que se pretende generar de forma automática modelos semánticos térmicos de edificios, con el objetivo de integrarlos en los actuales modelos normalizados BIM. El artículo presenta el sistema sensorial, la calibración, metodología y los resultados experimentales en entornos reales.*

**Palabras Clave:** Tecnologías láser escáner, Imagen térmica, Procesamiento de datos 3D, modelado 3D, BIM.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de generación de modelos 3D a partir de datos de nubes de puntos para ser usados con fines de modelado de energía consiste básicamente en tres etapas: colección de datos, modelado y análisis. En la práctica, la toma de datos se lleva a cabo de forma manual por auditores de energía, tomando muestras locales de la escena. La ejecución manual de estas tareas puede ser lenta, costosa e incompleta.

El desarrollo de métodos automáticos de toma de datos para generar modelos 3D térmicos densos de interiores de edificios es una línea puntera que entrará en breve a formar parte del proceso global de creación de modelos BIM. Este artículo está dedicado a exponer el componente sensorial y la creación de una nube de puntos térmica que es utilizada en las etapas posteriores de modelado semántico y análisis de la información 3D térmica.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La adquisición y modelado de datos 3D es un campo de investigación tratado desde hace varios años por multitud de autores. Sin embargo, la inclusión de información térmica en datos 3D es un aspecto

novedoso y que comienza a ser de gran interés en la comunidad científica [2].

La idea principal consiste en incorporar una cámara térmica a un sistema de adquisición de datos 3D para aportar información térmica a una nube de puntos. Se pueden encontrar distintos sistemas, desde sistemas con fotogrametría [4] y cámaras de profundidad [9] hasta sistemas más precisos basados en escáneres 3D y tecnología LiDAR [1,3,6-8,10].

La operación clave del proceso consiste en calibrar ambos sistemas de adquisición entre sí, de manera que los datos térmicos puedan proyectarse sobre la nube de puntos 3D. Ham et al. [4] presentan un sistema únicamente compuesto por una cámara térmica FLIR E60, capaz de adquirir tanto imágenes térmicas como digitales. Un modelo 3D, tanto térmico como espacial, es generado mediante una calibración extrínseca e intrínseca (realizada con un panel compuesto por 42 bombillas LED). Posteriormente los modelos son alineados tomando puntos característicos elegidos por un usuario. Rangel et al. [9] usan un sistema compuesto por una cámara de profundidad Microsoft Kinect y una cámara térmica Jenoptik IR-TCM 640. Se sirve de un panel de calibración para obtener la relación geométrica entre ambas cámaras. Realizan un estudio exhaustivo sobre el material utilizado en dicho panel y la distribución geométrica del mismo, ya que los puntos de referencia deben ser visibles tanto en la imagen de profundidad como en la térmica, siendo finalmente utilizado un panel de cartón pluma con orificios circulares equi-espaciados. Borrmann et al. [1] presentan un sistema compuesto por un láser escáner 3D Riegl VZ-400 y una cámara térmica Optris PI160. Un panel de calibración es de nuevo usado para obtener la relación entre ambos sistemas de referencia, estando en este caso compuesto por 30 bombillas incandescentes. El sistema de adquisición de Mader et al. [8] difiere de los anteriores en el sentido de que no es un sistema integrado en un solo dispositivo, sino que se compone de tres drones cada uno equipado con un sensor diferente. Uno de los drones, equipado con un láser de rango Hokuyo UTM-30LX se encarga de obtener una nube de puntos 3D del escenario. Mientras que los otros dos drones, equipados con una cámara RGB y una cámara térmica FLIR A65

respectivamente, obtienen los datos de color e información térmica. La calibración entre los datos geométricos y las imágenes se realiza mediante un patrón compuesto por marcadores identificables por todos los sensores distribuido en el suelo. De manera similar a los métodos expuestos anteriormente, Chao Wang et al. [10] utilizan un patrón con forma de tablero de ajedrez para registrar los datos obtenidos mediante un LiDAR y una cámara térmica. Dicho patrón contiene huecos en las casillas blancas por los que, al ser colocado frente a un cuerpo caliente, se puede visualizar tanto en la imagen térmica como en la nube de puntos características comunes para realizar el registro.

Todos estos artículos presentan sistemas integrados de adquisición de información 3D con datos de temperatura. Sin embargo, otros autores proponen metodologías que permiten combinar información 3D con información térmica adquirida con sistemas independientes. Lagüela et al. [6] proponen una metodología que permite obtener la relación entre los datos geométricos y térmicos mediante un software comercial, eligiendo de manera manual puntos en común entre ambos escenarios y registrando así los datos. Para la adquisición de datos utilizan un láser escáner 3D Riegl LMS-Z390i y una cámara térmica NEC TH9260. En este caso el panel de calibración (compuesto por 64 bombillas) es utilizado para la calibración intrínseca de la cámara térmica y posterior corrección de la distorsión. Por el contrario, González-Aguilera et al. [3] presentan una metodología para el registro automático de la información de ambos sensores, identificando puntos singulares tanto en la nube de puntos 3D (obtenida mediante un Faro Photon 80) como en las imágenes térmicas (obtenidas mediante una FLIR ThermoCAM SC640), obteniendo así la transformación necesaria para proyectar la información térmica sobre la nube de puntos. Por último, López-Fernández [7] et al. también presentan un método que permite registrar la información de dos sistemas independientes. Por un lado, adquieren imágenes térmicas de cada pared con una cámara térmica NEC TH9260, y por otro adquieren nubes de puntos con un sistema de mapeado de interiores formado por un láser escáner 2D Hokuyo UTM-30LX, una IMU y dos encoders de canal dual. El proceso de registro entre ambos sistemas se realiza seleccionando características homólogas en ambas imágenes de manera manual.

### 3. CONTRIBUCIONES DEL MÉTODO

La diferencia fundamental del sistema que presenta este artículo radica en tres aspectos. En primer lugar, el sistema de calibrado es novedoso ya que se utilizan dianas (balizas) que incorporan a la vez discriminantes térmico y de reflectancia, lo que hace aumentar la precisión y eficiencia del sistema (Sección 5.2).

En segundo lugar, la posición de las dianas no está restringida a pequeñas regiones como en [1,9,10] (contenidas en pequeños tableros) - frecuentemente balizas activas (bombillas) [1,8], identificadas en tableros [9,10] o en características de la imagen [3,4,6,7]. Por el contrario, nuestras balizas pueden abarcar un espacio amplio de la escena, en posiciones lejanas del escáner, y donde no existen restricciones en su posicionamiento. Como consecuencia, la calibración es más fiable y precisa.

En tercer lugar, muchos de los sistemas referenciados no tratan el problema de completitud del espacio observable, por lo que solamente obtienen un mapa térmico parcial de la escena. El sistema T-Scan está preparado para realizar un mapa térmico 3D completo del espacio debido a que realiza una integración de tomas desde una o distintas posiciones, consiguiendo un mapa acumulado muestreado que cubre todo el escenario (Sección 6).

### 4. 3D T-SCAN

El sistema escáner 3D térmico desarrollado se muestra en la Figura 1. Este sistema capta nubes de puntos con información de color (RGB) y temperatura. Consta del escáner 3D RIEGL VZ-400, la cámara RGB Nikon D90 y la cámara térmica FLIR Series AX5 A65.



Figura 1: Imagen del sistema 3D T-Scan. Se ilustra el sistema de coordenadas universal utilizado.

El escáner 3D RIEGL VZ-400 es un escáner 3D láser terrestre capaz de captar coordenadas 3D de su entorno utilizando un haz láser de clase uno. Presenta una distancia máxima de escaneo de 600 m, con un ángulo de visión horizontal de 360° y vertical de 30° a 130°. Posee un engranaje que le permite ser inclinado hasta 90°, permitiendo así escanear suelos y techos. Los rangos de paso de barrido horizontal y vertical son [0.0024°, 0.5°] y [0.0024°, 0.28°], permitiendo amoldarse a las necesidades del usuario.

La cámara RGB Nikon D90 tiene una óptica con apertura 170° y resolución de 4288x2848 píxeles. Por su parte la cámara térmica FLIR A65 posee una resolución de 640x512 píxeles y un campo de visión de 45x37° captados a una frecuencia de 30Hz. Se trata de una cámara muy versátil ya que permite ajustar la precisión y el rango de temperaturas captado gracias a la posibilidad de configurarla de dos modos, “HighMode”, lo que nos dará un rango de temperaturas de 233-823°K con una precisión de 0.4° y “LowMode”, que permite un rango de temperaturas de 248-408°K con una precisión de 0.04°.

El sistema se ha diseñado para funcionar en dos fases (ver Figura 2). La fase 1 consiste en la calibración de los elementos del sistema y es necesaria ejecutarla una única vez. Los resultados de calibración son usados como base para la toma de datos 3D-térmicos en la fase 2.

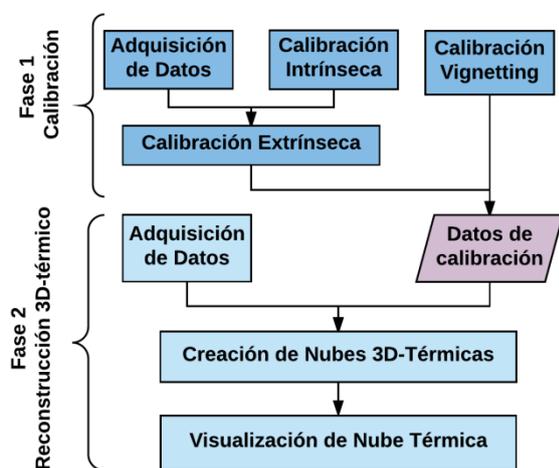


Figura 2: Esquema funcionamiento del escáner 3D térmico

### 5. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

En primer lugar, es necesario llevar a cabo un conjunto de calibraciones, no sólo de cada elemento del sistema por separado, sino también de la integración entre los mismos.

#### 5.1 CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS

Con objeto de obtener imágenes de máxima calidad se realiza un proceso de calibración intrínseco en donde se obtienen los parámetros que regulan la distorsión presente en la imagen, tanto para la cámara RGB como para la cámara térmica. El procedimiento usado para obtener los parámetros intrínsecos ha sido el seguido por Heikkilä et al. [5]. Con los parámetros intrínsecos de distorsión radial ( $k_1, k_2, k_3$ ) y tangencial ( $p_1, p_2$ ), se calcula la nueva posición de los píxeles ( $X_n, Y_n$ ) de la imagen sin distorsión como:

$$\begin{aligned} X_n &= X(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2Yp_1 + p_2(r^2 + 2X^2) \\ Y_n &= Y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2Xp_2 + p_1(r^2 + 2Y^2) \end{aligned} \quad (1)$$

Con  $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$

La cámara térmica además presenta una distorsión conocida como *vignetting*, la cual produce un ennegrecimiento de los bordes de la imagen, falseando de esta manera la información térmica obtenida (ver Figura 3). Para lograr corregir esta distorsión es necesario conocer el porcentaje de pérdida de temperatura en función de su distancia con el centro de la imagen.

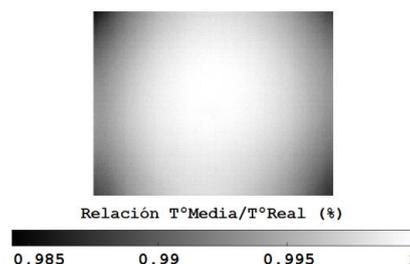


Figura 3: Efecto *vignetting* observado en una imagen térmica

La calibración del efecto *vignetting* ha sido modelada utilizando un panel de madera de temperatura conocida y constante. La calibración proporciona una función de pérdida radial de temperatura. Para obtener los valores corregidos en la imagen térmica sólo es necesario dividir cada píxel de la imagen entre su porcentaje de pérdida. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

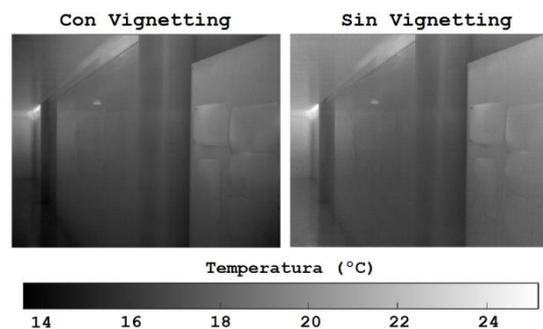


Figura 4: Imagen térmica corregida de *vignetting*

#### 5.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ESCÁNER-CÁMARA TÉRMICA

La asociación entre píxeles de la imagen térmica  $I_T$  con puntos de la nube 3D captada por el escáner requiere calcular la matriz de transformación proyectiva correspondiente. Esta es una transformación que relaciona las coordenadas de la nube de puntos con las coordenadas, en píxeles, de los

correspondientes puntos proyectados en la imagen térmica. La transformación se modela en la ecuación siguiente:

$$\begin{pmatrix} \lambda X_f \\ \lambda Y_f \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

la ecuación (2) puede ser expresada como:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_p & Y_p & Z_p & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_f X_p & -X_f Y_p & -X_f Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_p & Y_p & Z_p & 1 & -Y_f X_p & -Y_f Y_p & -Y_f Z_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}$$

Para  $n$  pares de coordenadas correspondientes, se forma un sistema sobredeterminado:

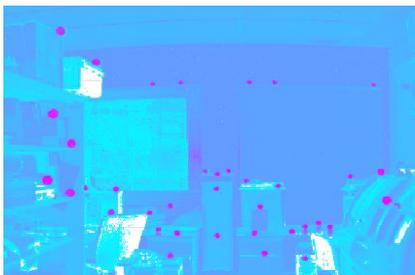
$$\begin{pmatrix} X_{f1} \\ Y_{f1} \\ \vdots \\ X_{fn} \\ Y_{fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{f1} X_{p1} & -X_{f1} Y_{p1} & -X_{f1} Z_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & -Y_{f1} X_{p1} & -Y_{f1} Y_{p1} & -Y_{f1} Z_{p1} \\ \vdots & \vdots \\ X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{fn} X_{pn} & -X_{fn} Y_{pn} & -X_{fn} Z_{pn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 & -Y_{fn} X_{pn} & -Y_{fn} Y_{pn} & -Y_{fn} Z_{pn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

que puede ser expresado como  $C = WP$ .

Conocidas las coordenadas de los píxeles  $(X_f, Y_f)$ , las correspondientes coordenadas 3D de los puntos asociados  $(X_p, Y_p, Z_p)$ , e imponiendo  $r_{34} = 1$ , la ecuación (3) queda resuelta por:

$$P = (W^T W)^{-1} W^T C \quad (4)$$

En la práctica, en el procedimiento de calibración se utilizan dianas reflectantes pegadas en pequeños cubos de plástico de hielo. Como se puede apreciar en la Figura 5, esto facilita la localización de los mismos tanto en la imagen de reflectancia asociada a la nube de puntos 3D como en la imagen térmica. El emparejamiento de puntos correspondientes se realiza mediante un algoritmo de búsqueda por posicionamiento de dianas en la imagen y posterior refinamiento verificando la coherencia entre los conjuntos correspondientes.



a)



b)

Figura 5: Localización de dianas. a) Imagen de reflectancia. b) Imagen térmica

La matriz de transformación es recalculada minimizando el error entre las coordenadas obtenidas mediante la ecuación (2),  $(X'_f, Y'_f)$ , y las detectadas en la imagen,  $(X_f, Y_f)$ . Para ello se toma un conjunto de puntos vecinos del centroide de la diana, se aplica de nuevo la ecuación (4) y se toma la matriz de transformación que proporciona el mínimo error (ver diagrama de flujo de la Figura 6).

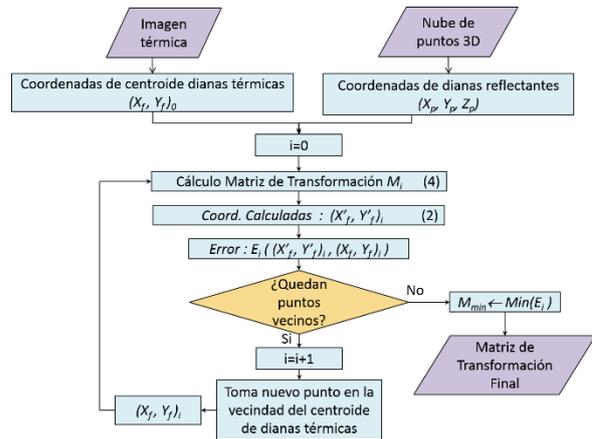


Figura 6: Refinamiento de la matriz de transformación proyectiva

## 6. OBTENCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS TÉRMICA DEL ESPACIO OBSERVABLE

### 6.1 INTEGRACIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS EN LA NUBE DE PUNTOS

El procedimiento seguido para la inclusión de un conjunto de imágenes térmicas en la nube de puntos está explicado en el diagrama de flujo de la Figura 7.

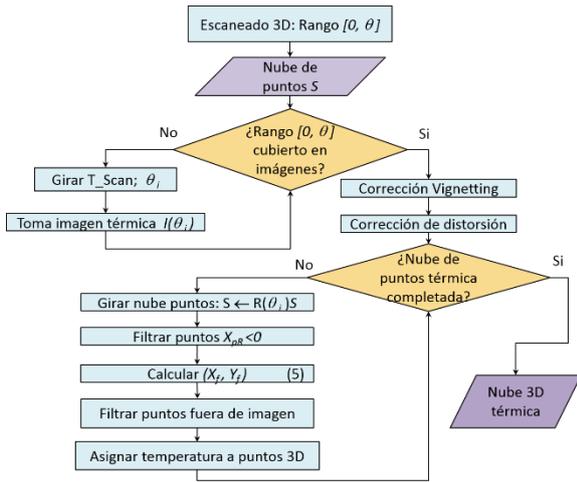


Figura 7: Proceso creación Nubes 3D térmicas

El sistema 3D T-Scan realiza la toma de datos en tres fases secuenciales. En la primera fase el escáner 3D capta las coordenadas 3D de puntos alcanzados por el láser en un espacio definido por el rango de ángulos vertical  $\lambda$  y horizontal  $\theta$  fijados por el usuario. Normalmente el rango de  $\lambda$  se mantiene en  $[30^\circ, 130^\circ]$ , mientras que el rango de  $\theta$  es fijado a voluntad.

En la segunda fase, las cámaras RGB y térmica realizan, partiendo de  $\theta = 0$ , el número de tomas necesarias para cubrir totalmente el rango de  $\theta$  elegido en la sesión. De acuerdo con el campo de visión de las cámaras, cada toma de imágenes se realiza después de girar el 3D T-Scan en  $\theta$  lo necesario para que exista un mínimo solape entre imágenes térmicas consecutivas.

En la tercera fase se trata de preprocesar las imágenes y de asignar la temperatura a la nube de puntos tomada en la fase primera. El preprocesamiento consta esencialmente de la eliminación del *vignetting* y de la corrección de distorsión.

Realizadas  $m$  tomas en los ángulos  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ , las coordenadas de los puntos proyectados en cada imagen térmica  $I(\theta_1), I(\theta_2), \dots, I(\theta_m)$  son calculados después de haber incluido las correspondientes matrices de rotación  $R(\theta_1), R(\theta_2), \dots, R(\theta_m)$  en la ecuación (2). Formalmente la expresión es:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Hay que hacer notar que, después de la rotación de las coordenadas 3D iniciales con cada matriz  $R$ , los puntos con coordenadas  $X_{pR} < 0$  son filtrados, ya que corresponderían a proyecciones de puntos por detrás de la cámara.

Por último, los valores de coordenadas  $(X'_f, Y'_f)$  que se salen de rango de la dimensión de la imagen son también filtrados en el proceso. En nuestro sistema  $0 < X'_f \leq 640$  y  $0 < Y'_f \leq 512$ . Finalmente, un punto 3D válido tendrá uno o varios valores de temperatura asignados. Esto es debido a que existe un pequeño solapamiento entre imágenes consecutivas por lo que el mismo punto 3D puede estar proyectado en dos imágenes térmicas. En ese caso, el valor final asignado es el valor medio de ambas temperaturas asignadas. Finalmente, se consigue la nube de puntos térmica (NPT).

La Figura 8 muestra la asignación de temperatura para una sola imagen térmica, mientras que la Figura 9 ilustra el resultado de integrar tres imágenes térmicas consecutivas sobre una parte de la nube de puntos.

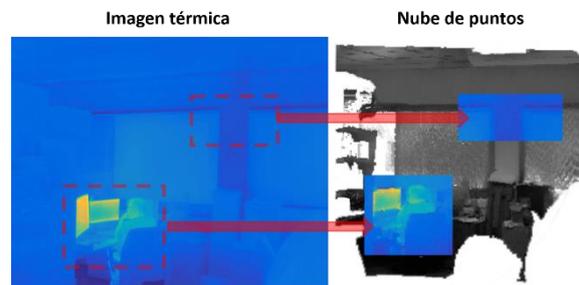


Figura 8: Ilustración de una imagen térmica y asignación de color en la nube de puntos. La figura muestra la asignación de dos partes sobre la nube de puntos.

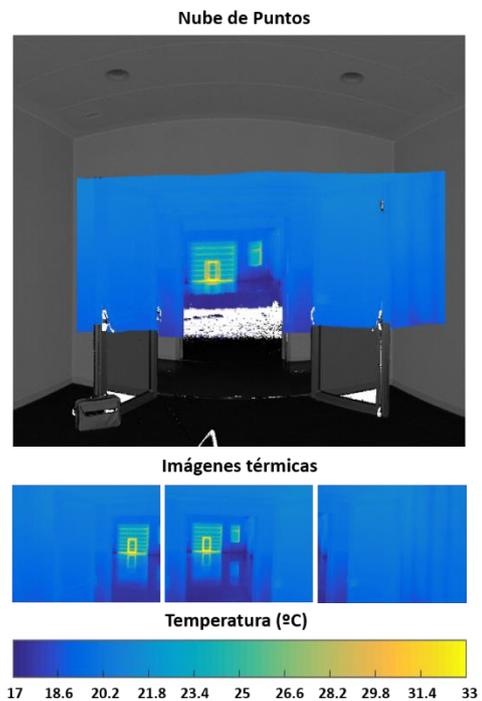


Figura 9. Integración de varias imágenes térmicas en una nube de puntos.

## 6.2 INTEGRACIÓN DE VARIAS NUBES DE PUNTOS TÉRMICAS.

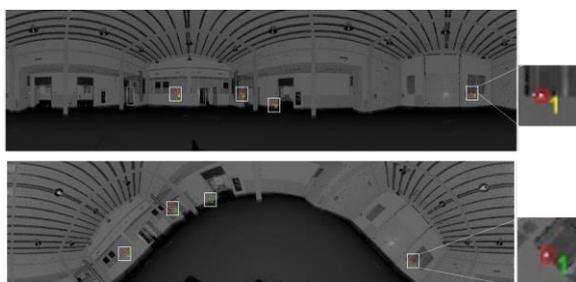
Como se expuso en la Sección 2, el sistema 3D T-Scan no es capaz de muestrear todo el espacio visible debido a que el rango de  $\lambda$  está limitado. Esto causa la existencia de dos conos (inferior y superior) en el que no se registran datos. Por otra parte, debido a oclusiones causadas principalmente por el mobiliario existente, una toma de escáner es insuficiente para generar un modelo 3D térmico completo de la estructura arquitectónica de la escena. Por estas razones, para generar un mapa térmico completo de una escena, se necesitan varias tomas desde varias posiciones.

La integración de varias NPTs tomadas en diferentes posiciones del escáner sigue un procedimiento usual de un registro de nubes de puntos. Se utilizan marcas reflectantes distribuidas en la escena, con el requerimiento de ser visibles desde distintas posiciones.

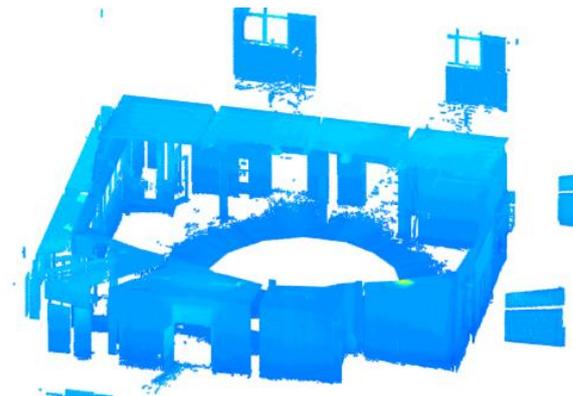
Para realizar el registro de dos NPTs, se genera una imagen polar de reflectancia y se asocian las marcas correspondientes (Figura 10 a)). Con cuatro o más parejas de marcas, se calcula la matriz de transformación de las NPTs y se pasa a un sistema de referencia común, que normalmente ha sido fijado en la posición de la primera sesión de escaneo.

Este proceso es secuencial desde la primera a la última NPT. En cada iteración se genera una nube acumulada (Figura 10 b)) en la que se llevan a cabo dos procesos.

1. Registro y muestreo con la nube anterior. El muestreo se realiza a través de un filtrado de rejilla de vóxeles (*box grid filter*), reduciendo el tamaño de la nube acumulada.
2. Obtención de color y temperatura de la nube reducida. Se realiza igualmente recurriendo al promedio de color y temperatura por vóxel.



a)



b)

Figura 10. a) Imágenes polares de dos nubes de puntos y dianas reflectantes correspondientes. b) Nube de puntos térmica acumulada reducida.

## 7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema T-Scan ha sido puesto a punto en el 3D Visual Computing & Robotics Lab de la Universidad de Castilla La Mancha y probado en entornos reales. En este apartado se presentan los resultados obtenidos en un caso de estudio.

Se ha realizado el modelo de nube de puntos térmica de una parte del Instituto de Ciencias de la Edificación en el campus de Cuenca de la Universidad de Castilla La Mancha. Este trabajo se ha realizado en varias sesiones de trabajo durante tres días. En total se realizaron 87 tomas de escáner desde 27 posiciones, con el siguiente volumen aproximado de datos: 435 millones de puntos espaciales de escáner, de los cuáles un 76% tiene color asignado y un 40% contiene información térmica. En el proceso de toma de datos se utilizaron 40 dianas reflectantes. La planta y las posiciones del escáner pueden verse en la Figura 11.

El rango en  $\theta$  fue de  $[0, 360^\circ]$ , con un paso de barrido del escáner de  $0.08^\circ$ . Se tomaron 15 fotografías para un giro completo del escáner.

Los tiempos invertidos en la toma de datos es el siguiente: toma de datos de escáner (en rango de  $360^\circ$ ) 47 seg, toma de imágenes color y térmicas 60 seg.

La Figura 12 muestra el resultado del modelo térmico de una sala del edificio con un pseudocolor insertado. Se aprecian claramente salidas de calefacción en un tono amarillo, así como pequeñas variaciones de color en las paredes. Esta pequeña variación se hace más evidente en la parte baja de la pared donde hay supuestas humedades.

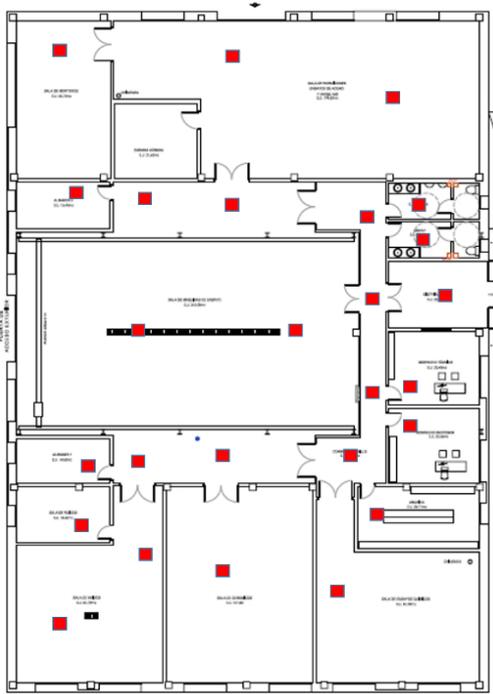


Figura 11. Posiciones del sistema T-Scan en el escenario del trabajo.



a)



b)

Figura 12. a) Imagen la nube de puntos térmica en una de las salas del edificio. Se aprecia variación de temperatura en distintos componentes del edificio y salidas calientes de aire. b) Detalle de variación de temperatura en la parte inferior de las paredes.

## 8. CONCLUSIONES

El objetivo general del artículo es presentar un sistema sensorial junto con su metodología asociada para obtener modelos de nubes de puntos térmicos de interiores de edificaciones. Este sistema se integra como una primera etapa para generar soluciones de ingeniería inversa sobre la creación automática de modelos 3D BIM térmicos y su monitorización en el tiempo.

El sistema T-Scan se ha diseñado para cubrir el espacio observable mediante integración de varias tomas desde varias posiciones. La nube térmica integrada es muestreada a cada iteración con objeto de no saturar la memoria, obteniendo finalmente un modelo completo asumible para ser posteriormente procesado en la etapa de obtención del modelo semántico térmico del edificio. El sistema ha sido probado en una planta de 40.70 m × 28.45 m con 18 salas obteniendo resultados muy satisfactorios.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos AEI/FEDER, UE. DPI2013-43344-R (Ministerio Español de Economía y Competitividad), PEII-2014-017-P (Gobierno de Castilla la Mancha) y la beca predoctoral UCLM con el número de referencia PREDUCLM16/23.

## Referencias

- [1] D. Borrmann, A. Nüchter, M. Đakulović, I. Maurovic, I. Petrović, D. Osmankovic, J. Velagić, A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping, *Adv. Eng. Informatics*. (2014).
- [2] Y.K. Cho, Y. Ham, M. Golpavar-Fard, 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art, *Adv. Eng. Informatics*. 29 (2015) 184–195.
- [3] D. González-Aguilera, P. Rodríguez-Gonzálvez, J. Armesto, S. Lagüela, Novel approach to 3D thermography and energy efficiency evaluation, *Energy Build.* 54 (2012) 436–443.
- [4] Y. Ham, M. Golparvar-Fard, An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery, *Adv. Eng. Informatics*. 27 (2013) 395–409.
- [5] J. Heikkilä, O. Silven, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* (n.d.) 1106–1112.
- [6] S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto, P. Arias, Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies, *Energy*

Build. 43 (2011) 1216–1221.

- [7] L. Lopez-Fernandez, S. Laguela, D. Gonzalez-Aguilera, H. Lorenzo, Thermographic and mobile indoor mapping for the computation of energy losses in buildings, *Indoor Built Environ.* 0 (2016) 1–14.
- [8] D. Mader, R. Blaskow, P. Westfeld, C. Weller, Potential of UAV-Based laser scanner and multispectral camera data in building inspection, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 2016–Janua (2016) 1135–1142.
- [9] J. Rangel, S. Soldan, A. Kroll, 3D Thermal Imaging: Fusion of Thermography and Depth Cameras, in: *2014 Quant. InfraRed Thermogr.*, 2014.
- [10] C. Wang, Y.K. Cho, M. Gai, As-Is 3D Thermal Modeling for Existing Building Envelopes Using a Hybrid LIDAR System, *J. Comput. Civ. Eng.* 27 (2013) 645–656.