

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

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



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



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

## Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

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

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

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

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

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/>	
<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>	
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>	
<b>HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO .....</b>	<b>793</b>
<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>	
<b>SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS .....</b>	<b>806</b>
<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>	
<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....</b>	<b>821</b>
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
<b>INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>829</b>
<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>	
<b>DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO .....</b>	<b>844</b>
<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>	
<b>CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....</b>	<b>852</b>
<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>	

# COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES

Natalia García del Prado<sup>1</sup>, Víctor González-Castro<sup>1,2</sup>, Enrique Alegre<sup>1,2</sup>, Eduardo Fidalgo Fernández<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática, Universidad de León, España

<sup>2</sup> Investigador en INCIBE (Instituto Nacional de Ciberseguridad)  
ngarcd00@estudiantes.unileon.es, {vgonc, ealeg, efidf}@unileon.es

## Resumen

*En este trabajo se realiza la evaluación de tres métodos de detección de rostros con cuatro conjuntos de imágenes utilizados en la literatura relacionada con este problema. Los métodos evaluados son el método de detección de objetos de Viola & Jones, un método basado en una modificación de HOG implementado en la librería DLib, y un método basado en Redes Neuronales Convolucionales llamado Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN). Los resultados obtenidos con los conjuntos de datos evaluados indican que el método que mejores resultados globales ha obtenido ha sido MTCNN, tanto en términos de FScore como en recall, i.e. tasa de verdaderos positivos.*

**Palabras clave:** Detección de rostros, Viola & Jones, DLib, MTCNN.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha producido un gran auge en aplicaciones de detección de rostros utilizando procesamiento de imágenes digitales y reconocimiento de patrones. Una de las razones que ha llevado a este crecimiento son las necesidades cada vez mayores de esta tecnología en aplicaciones de seguridad y vigilancia utilizadas en diferentes ámbitos. Pero también en el campo de las aplicaciones de dispositivos móviles está siendo de vital importancia ya que muchas de estas apps utilizan la detección de rostros en una fotografía o en un video (p. ej., Snapchat).

Existe un gran número de áreas en las que se desarrollan programas para la detección automática de rostros, bien con el único objetivo de la detección o como paso previo al reconocimiento de los mismos, y requieren la mayor precisión posible. En el campo de la seguridad, por ejemplo, la detección automática de rostros puede ser de gran ayuda para los investigadores ya que permite el filtrado automático de imágenes o videos en función de la presencia o no de rostros.

El principal objetivo de este artículo es el estudio

de varios métodos del estado del arte en detección de rostros y la evaluación de los resultados obtenidos al ejecutarlos contra varios conjuntos de imágenes para verificar cuál de ellos es el que mejor funciona y el que detecta mayor número de rostros. Estos resultados pueden aportar mucha información previa al desarrollo de programas que impliquen una detección precisa del rostro, pues permitirá implementar el método más adecuado.

Existen muchos campos en los que se aplica la detección facial, tales como la extracción de contenido de imagen, codificación de video, videoconferencia, etc., aplicaciones de videovigilancia e interfaces computadora-humano. Otro campo a destacar donde se utiliza la detección de rostros son los sistemas de autenticación biométrica, como los sistemas de autenticación mediante reconocimiento facial, que se investigan activamente para las aplicaciones de control de acceso y seguridad. Además, la detección de rostros también se emplea en el área del entretenimiento (p. ej., videojuegos, realidad virtual, álbumes de fotos, maquillaje virtual, aplicaciones de Smartphone, etc.).

En este trabajo se han evaluado diferentes métodos de detección de rostros: (a) el algoritmo de Viola-Jones [1], (b) el método de detección de rostros propuesto por Kazemi y Sullivan [2] implementado en la librería Dlib y (c) el método Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN) [3]. En esta evaluación se han utilizado varios conjuntos de datos públicos: FDDB [4], WIDER FACE [5], MALF [6] y AFW [7].

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: En la Sección 2 se realiza un breve repaso a los antecedentes y el estado del arte de métodos de detección de rostros. A continuación, en la Sección 3 se explican brevemente los métodos que se han evaluado y los conjuntos de datos usados en dicha evaluación. Los experimentos y sus resultados son explicados y discutidos en la Sección 4 y, finalmente, las conclusiones se exponen en la Sección 5.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La detección de rostros se lleva desarrollando desde hace varias décadas. En la de 1950 se realizaron los primeros experimentos sobre detección de rostros desde el punto de vista de la psicología [8]. Tras estos se realizaron otras investigaciones como las interpretaciones de las diversas expresiones de la cara, la interpretación de las emociones o la percepción de gestos.

Durante las décadas de los 70 y 80 del siglo pasado se utilizaban plantillas y mediciones de características geométricas de partes del rostro para detectar y reconocer caras [9]. El estudio sobre la detección de rostros continuó desde entonces: por ejemplo, en 1994 Yang y Huang [10] propusieron un método jerárquico basado en conocimiento que va refinando la detección del rostro en cada etapa. Li y colaboradores presentaron un método para detectar y seguir rostros en vídeos en color utilizando detección de la piel a través del color junto con un modelo facial para detectar rostros dentro de regiones de la piel [11]. Viola y Jones presentaron un método de detección de objetos [1] que también serviría para detección de rostros que, aún hoy, es muy utilizado. Por ejemplo, para aplicaciones como videovigilancia e interfaces computadora-humano, Kim y colaboradores propusieron en el año 2002 un método para detectar y rastrear caras [12]. Este método se aplicó en la región candidata extraída por el movimiento, el color y la información de aspecto global. A continuación, las características extraídas de estas regiones candidatas mediante análisis de componentes independientes (ICA en sus siglas en inglés) se clasificaron mediante máquinas de vectores de soporte (SVM en sus siglas en inglés). Los experimentos se realizaron tanto en imágenes en escala de gris como en secuencias de vídeo en color, obteniendo tasas de detección del 91 %, con muy pocas falsas alarmas, i.e. falsos positivos.

Con la aparición del Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*) se han comenzado a utilizar Redes Neuronales Convolucionales a la detección de rostros, con muy buenos resultados [3, 13, 14].

## 3. MÉTODOS

En esta sección se describirán brevemente los métodos evaluados en el presente trabajo.

### 3.1. ALGORITMO VIOLA & JONES

El algoritmo clásico de Viola & Jones [1] es uno de los algoritmos más utilizados en la detección de rostros debido a su robustez y velocidad. Trabaja con funciones que, mediante el uso de regiones rectan-

gulares de diversos tamaños, buscan el rectángulo más pequeño que es el que contendrá la cara que se busca.

Se basa en extraer características de la imagen basadas en la sustracción de los valores de intensidad de los pixels de la imagen en una región rectangular. Específicamente se resta la suma de los niveles de gris de los pixels que se encuentran bajo la parte blanca del rectángulo menos los que se encuentran bajo la parte negra (ver ejemplos en la Figura 1). Estas características se llaman características Haar pues los rectángulos empleados son una reminiscencia de las funciones base de Haar [1].

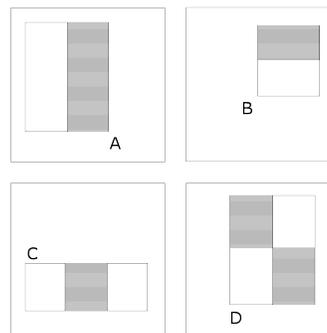


Figura 1: Ejemplos de regiones rectangulares empleadas en la extracción de las características Haar.

El cálculo de estas características se puede realizar rápidamente gracias a la utilización de la *imagen integral* [1]. Dada una imagen  $i$ , su integral  $I$  en el punto  $(x, y)$  se calcula sumando todos los pixels a la izquierda y por encima de  $(x, y)$  (ver Ecuación (1)).

$$I(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y') \quad (1)$$

El número de características así calculadas incluso para una región pequeña es muy alta, y solo un pequeño conjunto de las mismas es útil para la detección. Por ello, se emplea Adaboost para reducir el número de características.

Por último, se utiliza una cascada de clasificadores para evaluar las diferentes ventanas, de modo que si alguno de los clasificadores de la cascada falla, se descarta la existencia de un rostro en la subventana evaluada, de manera que la velocidad del método se incrementa.

### 3.2. ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ROSTROS IMPLEMENTADO EN LIBRERÍA DLIB

Este detector está basado en un clasificador que utiliza características basadas en una variante [15]

de histogramas de gradientes orientados (HOG) [16] extraídas de ventanas deslizantes de tamaño fijo operando sobre pirámides de imágenes.

Una vez detectado el rostro se puede utilizar el método de Kazemi y Sullivan [2] para detectar la pose de la cara mediante la detección de puntos característicos de la misma, o *landmarks* (ver Figura 2). Sin embargo, en este trabajo solo se ha utilizado para detectar caras en posición frontal para compararlo con el método de Viola & Jones.

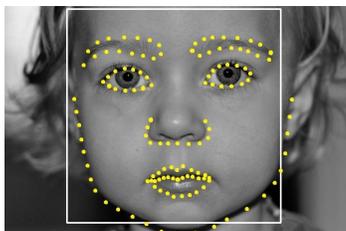


Figura 2: Ejemplos de puntos característicos detectados en un rostro.

### 3.3. MULTI-TASK CASCADED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS (MTCNN)

Zhang y colaboradores propusieron la utilización de una cascada de Redes Neuronales Convolucionales para detectar rostros y *landmarks* en los mismos [3], que consta de tres etapas. Antes de comenzar, se redimensiona la imagen a diferentes escalas para construir una pirámide de imágenes. En la primera etapa se utiliza una red convolucional que detecta ventanas de caras candidatas. A continuación, se utiliza otra red neuronal convolucional que descarta un gran número de candidatos en los que no existen rostros. Finalmente una última red convolucional trata de identificar en cuáles de los candidatos existe realmente un rostro, identificando las posiciones de cinco puntos de referencia faciales: uno en cada ojo, otro en la punta de la nariz y los dos restantes en las comisuras de los labios.

## 4. EXPERIMENTOS

### 4.1. DATASETS UTILIZADOS

#### 4.1.1. Fddb: Face Detection Data Set Benchmark

Fddb es un conjunto de imágenes de regiones faciales diseñada para estudio de los problemas de la detección de rostros sin restricciones [4]. Este conjunto de datos contiene las anotaciones para 5171 caras en un subconjunto del dataset “Faces in the Wild” que consta de 2845 imágenes.

#### 4.1.2. WIDER FACE

El conjunto de datos WIDER FACE [5] consta de 32.203 imágenes con 393.703 caras anotadas con un alto grado de variabilidad en escala, pose y oclusión extraídas del conjunto de datos público WIDER. El conjunto de imágenes WIDER FACE se organiza en 61 clases de eventos muy diversos, como imágenes de desfiles de bandas, manifestaciones, conferencias de prensa, reuniones familiares o incluso funerales. En este trabajo se ha utilizado un subconjunto de imágenes que contienen unas 40200 caras anotadas.

#### 4.1.3. MALF: Multi-Attribute Labelled Faces

MALF es un conjunto abreviado de imágenes cuyas etiquetas contienen múltiples atributos faciales recopilados y proporcionados por el Centro de Biometría y de Investigación de Seguridad [6]. MALF es el primer conjunto de datos de detección de rostros que soporta una evaluación fina ya que contiene 5.250 imágenes tomadas en entornos reales con un total de 11.931 caras. Sin embargo, en este trabajo se ha utilizado un subconjunto de 250 imágenes para las que se tenía la anotación del *ground truth* que contienen unos 600 rostros.

#### 4.1.4. AFW: Annotated Facial in the Wild

AFW [7] contiene 205 imágenes con 473 caras etiquetadas. Para cada cara, las anotaciones incluyen un rectángulo circunscrito (*bounding box*), 6 puntos de referencia y los ángulos de la postura. Este dataset, por lo tanto, permite evaluar métodos tanto de detección de rostros como de estimación de posición y de hitos en imágenes desordenadas del mundo real.

## 4.2. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se han probado los tres métodos indicados en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 con cada uno de los cuatro conjuntos de imágenes comentados en la sección 4.1. Cuando el método evaluado detecta un rostro, el *bounding box* que devuelve se compara con la de la *ground truth* del conjunto de imágenes. La comparación se realiza evaluando la proporción de la superficie de intersección de ambos *bounding boxes* sobre el área total del *ground truth*, de modo que si esta es mayor que un determinado umbral, se considera el rostro como bien detectado. En caso contrario se considera que el rostro no se detecta. El umbral que se ha establecido en este trabajo ha sido 0.7.

Sean TP, FP y FN el número de verdaderos po-

sitivos (i.e., el número de rostros detectados correctamente), falsos positivos (i.e., el número de veces que se detecta un rostro donde en realidad no existe) y falsos negativos (i.e., el número de rostros que no se detectan), respectivamente. Las métricas de error utilizadas en este trabajo han sido:

- *Precision*: Indica la tasa de rostros que detecta correctamente entre todos los elementos que detecta como un rostro.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

- *Recall*: Indica la tasa de rostros detectados correctamente detectados sobre el total de rostros que se encuentran realmente en las imágenes.

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

- *FScore*: Sean  $P$  y  $R$  la *precision* y *recall*, respectivamente. El FScore es la media armónica de  $P$  y  $R$ .

$$FScore = 2 \frac{P \cdot R}{P + R} \quad (4)$$

A continuación se discuten los resultados obtenidos con cada uno de los datasets evaluados.

#### 4.2.1. Resultados con el dataset FDDB

Se han evaluado los tres métodos con todas las imágenes del conjunto FDDB (i.e., 2845 imágenes que contienen 5171 rostros). En la Tabla 1 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 1: Resultados de los métodos evaluados con el dataset FDDB.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.63	0.92	0.75
DLib	0.56	<b>0.99</b>	0.71
MTCNN	<b>0.77</b>	0.93	<b>0.84</b>

Globalmente, el método MTCNN es el mejor de los tres evaluados con este dataset ya que el FScore que consigue mejora al del obtenido por los otros dos métodos. La tasa de verdaderos positivos (i.e. *recall*) es notablemente superior respecto a los otros métodos, lo que indica que es el que más rostros detecta correctamente. Además, el hecho de que obtenga menor *precision* que el método incluido en la librería DLib indica que detecta más elementos de la imagen como rostros que no son rostros (i.e., más falsos positivos) que este.

En la Figura 3 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

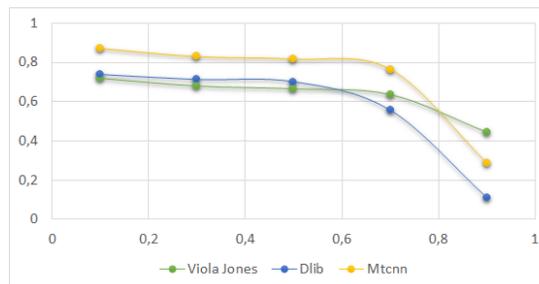


Figura 3: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset FDDB con umbrales de detección diferentes.

En la Figura 3 se puede comprobar que MTCNN tiene mayor *recall* (i.e., tasa de verdaderos positivos) en todos los escenarios excepto en el más restrictivo (i.e. aquél en el que se exige que el 90% de la superficie del rectángulo de la cara detectada esté superpuesto al del *ground truth* del *dataset*).

#### 4.2.2. Resultados con el dataset WIDER FACE

También se han evaluado los tres métodos con el conjunto de imágenes WIDER FACE. Como se indicó en la sección 4.1.2 se ha utilizado un subconjunto de imágenes que consta de unas 40200 rostros anotados. En la Tabla 2 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 2: Resultados de los métodos evaluados con el subconjunto del dataset WIDER FACE.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.14	0.86	0.23
DLib	0.11	<b>0.99</b>	0.20
MTCNN	<b>0.36</b>	0.96	<b>0.53</b>

Una vez más, el método MTCNN ha obtenido mejores resultados globalmente que los otros dos métodos (*FScore* de 0.53 y *recall* de 0.36), si bien los resultados con este dataset no han resultado tan buenos como con FDDB.

En la Figura 4 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

En el caso de WIDER, MTCNN obtiene un *recall* superior a los otros dos métodos con todos los umbrales de detección evaluados.

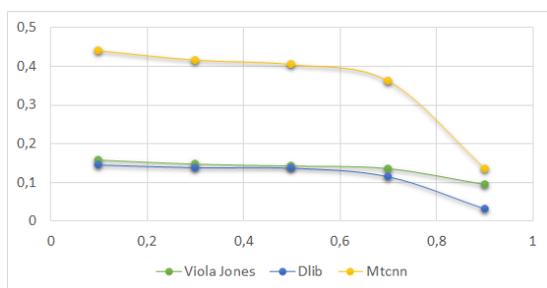


Figura 4: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset WIDER con umbrales de detección diferentes.

#### 4.2.3. Resultados con el dataset MALF

Se han evaluado los tres métodos con un subconjunto de 250 imágenes extraídas del conjunto de imágenes MALF. En la Tabla 3 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 3: Resultados de los métodos evaluados con el dataset MALF.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.47	0.86	0.61
DLib	0.48	<b>0.99</b>	0.64
MTCNN	<b>0.57</b>	0.90	<b>0.70</b>

Siguiendo la misma tendencia, el método MTCNN ha obtenido mejores resultados que los otros dos métodos (*FScore* de 0.70 y *recall* de 0.57). En la Figura 5 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

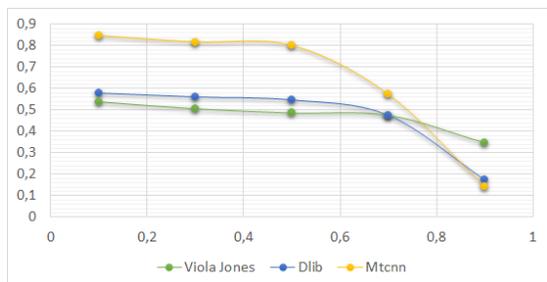


Figura 5: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset MALF con umbrales de detección diferentes.

Una vez más, MTCNN obtiene una tasa de rostros detectados correctamente superior a los otros dos métodos en todos los escenarios excepto en el más restrictivo.

#### 4.2.4. Resultados con el dataset AFW

Finalmente, se han evaluado los tres métodos con con todas las imágenes del conjunto AFW (i.e., 205 imágenes con 473 rostros etiquetados). En la Tabla 4 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 4: Resultados de los métodos evaluados con el dataset AFW.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.67	0.57	0.62
DLib	0.66	<b>0.98</b>	0.79
MTCNN	<b>0.94</b>	0.69	<b>0.80</b>

El comportamiento de los diferentes métodos evaluados es el mismo que en el caso de los otros datasets: MTCNN obtiene mejores resultados globales que los otros, aunque en este caso el *FScore* de MTCNN y del método implementado en la librería DLib es similar. En la Figura 6 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).



Figura 6: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset AFW con umbrales de detección diferentes.

Siguiendo la misma tendencia, MTCNN obtiene *recalls* superiores a los otros dos métodos para todos los umbrales de detección.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se han evaluado tres métodos de detección de rostros: el algoritmo de detección de objetos propuesto por Viola & Jones, un método basado en una variante de HOG implementado en la librería DLib y, por último, el método Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN). El rendimiento de estos tres métodos en la tarea de detección de rostros se ha comparado utilizando cuatro conjuntos de imágenes disponibles públicamente diferentes ampliamente utilizadas en la literatura: FDDB, WIDER FACE, MALF y AFW.

En todos los casos el método que mejor rendimiento global ha obtenido ha sido MTCNN. Tanto el FScore como el *recall* (i.e. la tasa de verdaderos positivos) han sido superiores usando MTCNN en todos los conjuntos de datos. Por otro lado, llama la atención que el método implementado en la librería DLib obtiene mejor *precision* en todos los casos. Esto se debe a que el número de falsos positivos (i.e. detecciones de caras donde no existen rostros) que detecta este método es menor que el de MTCNN. Por otro lado, el método de Viola & Jones y el implementado en la librería DLib presentan resultados similares en cuanto a *recall* aunque el FScore de este último es algo superior. Una de las mayores limitaciones del método de Viola & Jones es que en este trabajo se ha utilizado solo la cascada de clasificadores Haar para detectar rostros frontales. Es posible que, combinando esta con la cascada para detectar rostros de perfil se lograsen mejorar los resultados de este método.

En futuros trabajos se tratará de aplicar la detección de rostros a diferentes aplicaciones (p. ej., conteo de personas en eventos o transporte público), o aplicar reconocimiento de los rostros detectados o incluso evaluar de manera automática las emociones de una persona determinada mediante el análisis de sus gestos.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el acuerdo marco entre la Universidad de León e INCI- BE (Instituto Nacional de Ciberseguridad) bajo la adenda 22.

### Referencias

- [1] Paul Viola and Michael Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–I. IEEE, 2001.
- [2] Vahid Kazemi and Josephine Sullivan. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1867–1874, 2014.
- [3] Kaipeng Zhang, Zhanpeng Zhang, Zhifeng Li, and Yu Qiao. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(10):1499–1503, 2016.
- [4] Vidit Jain and Erik G Learned-Miller. Fddb: A benchmark for face detection in unconstrained settings. *UMass Amherst Technical Report*, 2010.
- [5] Shuo Yang, Ping Luo, Chen-Change Loy, and Xiaoou Tang. Wider face: A face detection benchmark. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 5525–5533, 2016.
- [6] Bin Yang, Junjie Yan, Zhen Lei, and Stan Z Li. Fine-grained evaluation on face detection in the wild. In *Automatic Face and Gesture Recognition (FG), 2015 11th IEEE International Conference and Workshops on*, volume 1, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [7] Xiangxin Zhu and Deva Ramanan. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*, pages 2879–2886. IEEE, 2012.
- [8] Jerome S Bruner and Renato Tagiuri. The perception of people. Technical report, DTIC Document, 1954.
- [9] Mark Nixon. Eye spacing measurement for facial recognition. In *29th Annual Technical Symposium*, pages 279–285. International Society for Optics and Photonics, 1985.
- [10] Guangzheng Yang and Thomas S Huang. Human face detection in a complex background. *Pattern Recognition*, 27(1):53 – 63, 1994. ISSN 0031-3203.
- [11] Y. Li, A. Goshtasby, and O. Garcia. Detecting and tracking human faces in videos. In *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, volume 1, pages 807–810 vol.1, 2000.
- [12] Tae-Kyun Kim, Sung-Uk Lee, Jong-Ha Lee, Seok-Cheol Kee, and Sang-Ryong Kim. Integrated approach of multiple face detection for video surveillance. In *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*, volume 2, pages 394–397. IEEE, 2002.
- [13] Qin-Qin Tao, Shu Zhan, Xiao-Hong Li, and Toru Kurihara. Robust face detection using local cnn and svm based on kernel combination. *Neurocomputing*, 211:98 – 105, 2016. ISSN 0925-2312. SI: Recent Advances in SVM.
- [14] Shaohui Lin, Ling Cai, Xianming Lin, and Rongrong Ji. Masked face detection via a modified lenet. *Neurocomputing*, 218:197 – 202, 2016. ISSN 0925-2312.
- [15] Pedro F Felzenszwalb, Ross B Girshick, David McAllester, and Deva Ramanan. Object detection with discriminatively trained part-based models. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(9): 1627–1645, 2010.

- [16] Navneet Dalal and Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages 886–893. IEEE, 2005.