

# 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. Zamarreño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> <b>Automar</b> <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

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

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

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

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

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

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

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

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

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

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

---

### Visión por Computador

---

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

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

# DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO

Marta Ayats

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona < marta.ayats@alumnes.upc.edu >

Raúl Suárez

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona <raul.suarez@upc.edu >

## Resumen

*En este artículo se presenta el diseño de una prótesis de mano que se adapta al crecimiento del usuario, desde los 4 años hasta la edad adulta. Se ha considerado en el diseño el estudio de las necesidades de los pacientes y el estudio de las medidas antropométricas de los usuarios en la edad de crecimiento. El diseño incluye únicamente la estructura externa y los mecanismos de movimiento, así pues no se ha incluido en este trabajo el diseño del control ni de la electrónica.*

**Palabras Clave:** Mano protésica, prótesis adaptable, prótesis pediátrica.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Asociación Nacional de Amputados calcula que en 2002 había en España un total de 46.886 personas con amputaciones. Un 14% de estas tienen una deficiencia de miembro superior desde el nacimiento, significando esto que en 2002 había 8.845 personas con necesidad de utilizar prótesis desde el nacimiento. Debe hacerse notar que no existen datos oficiales más actuales al respecto.

Estudios realizados en el hospital Sant Joan de Déu [2] afirman que si un niño que nace sin mano alcanza los tres meses de vida sin este miembro, fijará en su cerebro una idea de bimanualidad (concepto de igual longitud de los brazos) distorsionada. Para evitarlo, a los bebés que carecen de una mano desde el nacimiento se les enseña desde pequeños a hacer uso de una mano protésica puramente estética y sin funcionalidad, que les ayuda a incorporar en su cerebro el concepto de igualdad de longitud entre los dos brazos. Antes de cumplir los 2 años, la mano cosmética es substituida por una prótesis que les permite agarrar objetos con tres dedos: anular, índice y pulgar. A medida que el usuario aprende a utilizar las prótesis, el nivel de complejidad de esta se va aumentando, hasta que a

los 13-14 años el paciente ya empieza a utilizar prótesis de adultos.

El precio de las prótesis mioeléctricas más avanzadas del mercado oscila entre 36.000 y 40.000 euros y la seguridad social española aporta unos 10.000 euros en el caso de los niños y unos 18.000 euros en el caso de los adultos, afirma personal de la Unidad Integral de Atención al Niño Amputado del Hospital Sant Joan de Déu de Barcelona [1].

Uno de los problemas que existe en el mercado de prótesis para niños es que cuando estos crecen sus cuerpos cambian y las prótesis les quedan pequeñas pero, aunque los más pequeños experimentan muchos cambios físicos en periodos cortos de tiempo, es una equivocación reemplazar la prótesis cada pocos meses, ya que el niño necesita un tiempo para adaptarse a la nueva prótesis y esto además implicaría un impacto económico enorme para sus familias.

Es a raíz de esto que se planteó una pregunta: ¿Qué pasaría si existiera una prótesis que se adaptara al crecimiento del niño? Esto implicaría una mejora significativa en la vida del usuario de la prótesis, ya que podría utilizar desde edades tempranas prótesis con mejores funcionalidades, que aunque tienen precios más elevados el aumento de precio queda compensado por el hecho de que se puede utilizar la misma prótesis durante toda la etapa de crecimiento. Esto no solo tiene un impacto económico sino también a nivel de practicidad para el usuario, éste no ha de adaptarse de forma casi anual a una nueva prótesis sino que es la prótesis la que se adapta al usuario.

## 2 ESTUDIO DE LA MANO HUMANA

Para definir las necesidades de la prótesis se ha hecho un estudio de la mano humana especialmente de los límites de movimiento de los dedos, de los movimientos coordinados básicos y de las características antropométricas.

## 2.1 MOVIMIENTOS ARTICULARES

La mano humana tiene 3 grupos de articulaciones, la articulación trapezometacarpiana del pulgar, las articulaciones metacarpofalángicas y las articulaciones interfalángicas, teniendo cada grupo unos límites de movimiento distintos.

La articulación trapezometacarpiana del pulgar es la articulación entre la palma de la mano y el dedo pulgar, cuyos límites de movimiento son  $90^\circ$  para el movimiento de extensión y  $70^\circ$  para el movimiento de abducción (Figura 1) [6].

Las articulaciones metacarpofalángicas son las articulaciones entre los dedos y la palma. En el caso de los dedos índice al meñique, los límites de movimiento son  $90^\circ$  para la flexión, entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$  para la extensión y  $20^\circ$  para los movimientos de abducción y aducción (Figura 2). En cuanto a la articulación metacarpofalángica del pulgar, los límites de movimiento son  $50^\circ$  para la flexión y  $0^\circ$  para la extensión (Figura 3).

Finalmente, en el caso de las articulaciones interfalángicas, los límites de movimiento son para la flexión de entre  $90^\circ$  y  $100^\circ$  en función de la falange y para la extensión entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$  (Figura 4).

## 2.2 MOVIMIENTOS COORDINADOS BÁSICOS

Una vez estudiados los límites de movimiento de las articulaciones se ha hecho un estudio de los movimientos coordinados básicos [5]: agarre cilíndrico, agarre de punta, agarre de gancho, agarre de palma, agarre esférico y agarre de lado. Estos movimientos coordinados básicos permiten definir las acciones independientes que ha de realizar la prótesis, que son: abducción y aducción del pulgar, flexión y extensión del pulgar y flexión y extensión de los dedos índice hasta el meñique.

## 2.3 ANTROPOMETRÍA

Finalmente, para poder realizar un diseño que se adapte al crecimiento de los niños desde los 4 años hasta su edad adulta se ha hecho un estudio antropométrico con la finalidad de definir el rango de medidas a las que se tendrá que adaptar la prótesis.

Con respecto a la palma, se ha estudiado su ancho y su largo. La medida del ancho (V) es la distancia que hay entre la parte interior y exterior a la altura de los nudillos y el largo de la palma (Y) es la distancia en dirección perpendicular entre el nudillo del dedo anular y la muñeca (Figura 5)

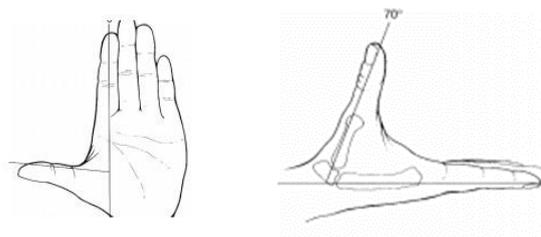


Figura 1: A la izquierda movimiento de extensión, a la derecha movimiento de abducción de la articulación trapezometacarpiana.

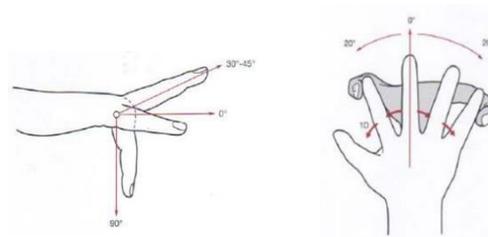


Figura 2: Límites de movimiento para la articulación metacarpofalángica de los dedos índice al meñique.

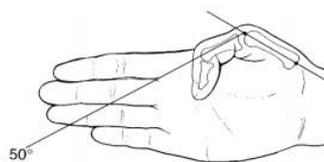


Figura 3: Límite de movimiento articulación metacarpofalángica del pulgar.

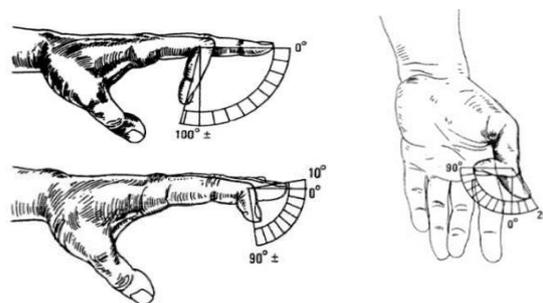


Figura 4: Límite de movimiento articulaciones interfalángicas.

El rango de valores obtenidos según [4] es  $X \in [55,93]$  e  $Y \in [65,120]$ , ambos en milímetros. También se ha estudiado el grosor de la palma (Z), resultando  $Z \in [20, 30]$  (Figura 5)

En cuanto a los dedos, los largos mínimos y máximos se muestran en la Tabla 1. Con respecto al grosor (W), el máximo encontrado es de 25 mm y el mínimo de 8 (Figura 5).

### 3 ESTADO DEL ARTE

Las prótesis de mano se dividen en dos grandes grupos: prótesis estéticas y prótesis funcionales. Las primeras son aquellas que como su nombre indica cumplen únicamente una función estética, es decir no pueden ejercer ningún tipo de movimiento. Las segundas, por lo contrario, pueden hacer movimientos varios. Las prótesis funcionales se dividen en 5 grandes grupos: mecánicas, mioeléctricas, eléctricas, neumáticas e híbridas, según la forma de transmitir el movimiento, siendo las mecánicas y las mioeléctricas las más utilizadas en el mercado actual.

A continuación se hace una descripción de los mecanismos de accionamiento utilizados para las prótesis de mano y del estado del mercado actual.

#### 3.1 MECANISMOS DE ACCIONAMIENTO

Actualmente se están utilizando principalmente cuatro mecanismos de accionamiento: el basado en tendones, el que usa un motor en cada articulación, el de transmisión por poleas y el de barras. En este caso nos hemos centrado en el mecanismo basado en tendones, que, es un mecanismo de accionamiento que funciona como los tendones de los dedos de la mano humana. En el caso de la extensión con mecanismos de accionamiento basados en tendones, esta puede ser controlada o no controlada. En el primer caso, la extensión se realiza normalmente con muelles en las articulaciones, o bien con el recubrimiento de la articulación con un material elastomérico.

#### 3.2 ESTUDIO DEL MERCADO ACTUAL

El mundo de las prótesis, tanto de miembro inferior como de miembro superior, ha evolucionado de forma acelerada en los últimos años, ya sea en investigación con nuevos materiales, en los actuadores, los movimientos, la estética, entre otros aspectos.

Esta evolución implica un aumento de precio de las prótesis. Es también importante destacar que en general la investigación se ha centrado en prótesis de

Tabla 1: Medidas del largo de los dedos.

Dedo	Mínimo [mm]	Máximo [mm]
Pulgar	39	54
Índice	60	82
Corazón	67	93
Anular	63	87
Meñique	49	68

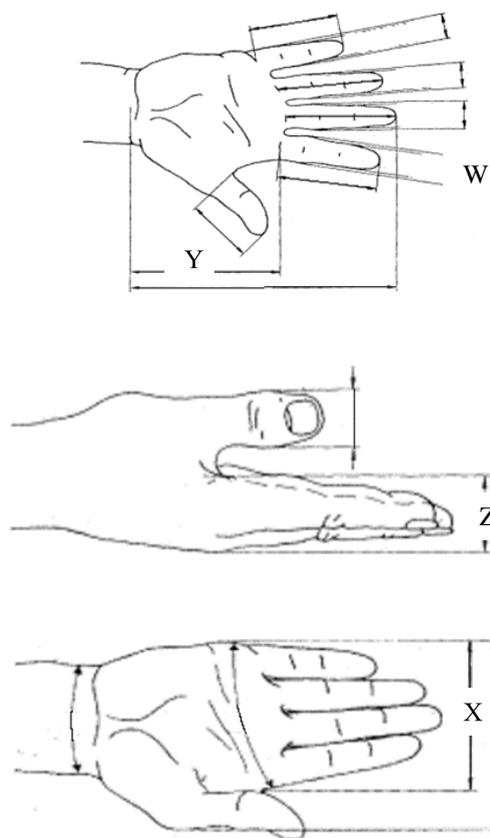


Figura 5: Medidas estudiadas en el estudio antropométrico.

mano para adultos, ya que, como se ha comentado anteriormente, en el caso de niños y adolescentes en etapa de crecimiento, el uso de la prótesis se reduce de hasta 10 años a solamente 1-2 años. Es por esto que el mercado de prótesis para adultos está muy desarrollado mientras que en el caso de prótesis para niños las opciones son más limitadas.



Figura 6: ejemplos de prótesis de mano pediátricas. a) UCLA CAPP de Hosmer; b) Child Dorrance 200 de Hosmer; c) 2000 de Ottobock; d) 99P de Hosmer; e) CHILD CAPP de Hosmer.

En la Figura 6 se muestran 5 prótesis de mano diseñadas para uso pediátrico, cuyos problemas principales son: la poca apertura del movimiento de pinza, el peso, la falta de opciones al escoger la medida que más se adapta al paciente y el precio que oscila entre los 9.000 y los 15.000 €.

La intención principal de este trabajo es diseñar una prótesis de mano que pueda tener las funcionalidades propias de una prótesis de mano para adultos, cuyo precio elevado quede compensado por la posibilidad de alargar la prótesis anualmente. Para hacerlo se propone un diseño que permite adaptar la medida de la prótesis mediante la adición de piezas. Este diseño podría usarse para las prótesis de mano para adultos ya existentes pudiendo ser utilizadas también para niños en su etapa de crecimiento.

#### 4 DISEÑO PROPUESTO

Para hacer el diseño de la prótesis primero se han definido las características que ésta ha de cumplir.

Primero se ha decidido que la prótesis ha de ser lo más parecida posible a una mano real, es decir, tendrá 5 dedos con 3 articulaciones cada uno y una palma. También con el mismo propósito, esta ha de poder cubrirse con un guante de látex que la dará un color, grosor y textura similares a la mano del usuario.

En este diseño no se ha incluido la articulación de la muñeca, y se ha limitado el peso de la estructura exterior a 200 g, así, posicionando los motores y las baterías fuera de la mano (en el antebrazo o brazo) se reduce el peso de la prótesis.

En cuanto a los mecanismos de movimiento se ha decidido hacer un diseño basado en tendones con el mecanismo "Dogleg Link". Finalmente, para el crecimiento de la prótesis se ha decidido diseñar una estructura modular, cuyas piezas sean independientes y puedan juntarse de la forma más adecuada para cada usuario.

##### 4.1 DISEÑO DE LA PALMA

Como ya se ha comentado, se desea diseñar una prótesis modular, es decir que tenga unas piezas que puedan unirse de forma diferente para cada usuario.

Para la palma se han diseñado 6 piezas, 4 de estas son fijas y unidas forman la palma con las medidas mínimas encontradas en el estudio antropométrico. Esta palma inicial tiene medidas de 55 mm de ancho y 65 mm de largo (Figura 7).

Para hacer crecer la palma a lo ancho, se han diseñado piezas con 3 medidas distintas, de 3 mm, 5 mm y 10 mm de ancho. Estas piezas se posicionan como se muestra en la Figura 8 en el centro de la palma.

Para el crecimiento del largo de la palma se han diseñado 2 piezas. Una de ellas va posicionada en los extremos de la palma, variando el largo, mientras que la segunda va posicionada en la parte central (Figura 9). Esta segunda pieza ha de tener distintas medidas de ancho y de largo, para adaptar la palma al crecimiento en estas dos direcciones. Es por esto que la pieza central tiene 9 posibles medidas, según las combinaciones entre los largos 3, 5 y 10 mm y los anchos 3, 5 y 10 mm. En cuanto a la pieza lateral, esta tiene un largo que equivale a la mitad del ancho de la palma inicial y tres medidas de alto de 3, 5 y 10 mm.

##### 4.2 DISEÑO DE LOS DEDOS

Primero se han diseñado unas piezas para el posicionamiento de los dedos en la palma. Estas piezas pueden verse en la Figura 10 y se han diseñado para poder posicionar los dedos en el lugar de la palma que más se adapte a las necesidades del usuario.

Una vez diseñada la pieza para el posicionamiento de los dedos, se ha pasado al diseño de estos. Después del estudio antropométrico se decidió diseñar todos los dedos con la medida mínima de ancho encontrada en el estudio, así, las personas con los dedos más finos podrán utilizar la prótesis y aquellas personas



Figura 7: Montaje de las piezas fijas de la palma.



Figura 8: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo ancho.

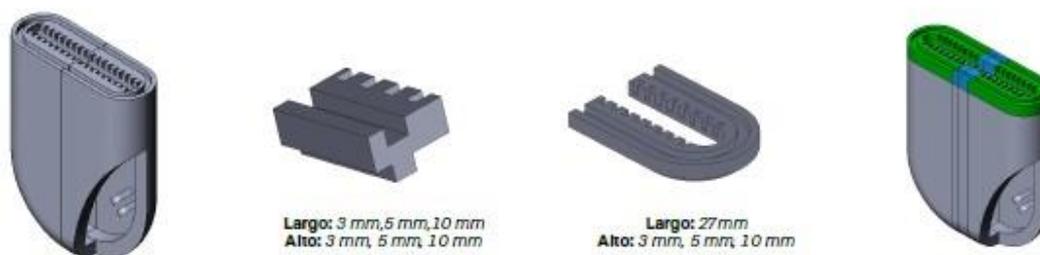


Figura 9: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo largo.

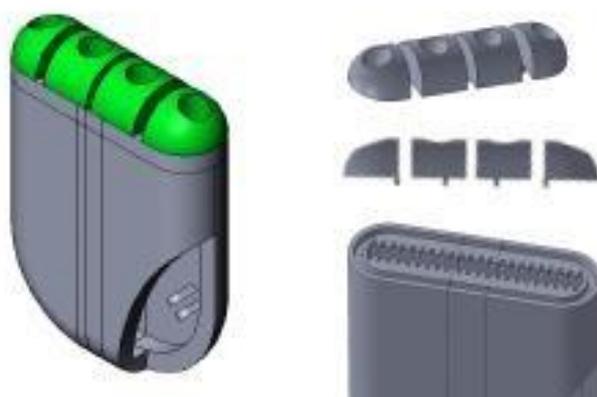


Figura 10: Piezas para el posicionamiento de los dedos índice al meñique.

con los dedos más gruesos simplemente tendrán que añadir más grosor al guante de silicona con el que se podrá cubrir la prótesis.

Cada falange está formada por la combinación de tres piezas, dos de ellas son piezas fijas que juntas tienen la longitud mínima de falange encontrada en el estudio antropométrico realizado, la tercera pieza es la que da la longitud que el usuario necesita. Esta pieza se ha fabricado con 3 medidas distintas (1 mm, 3 mm, 5 mm) y su posicionamiento en la falange puede verse en la Figura 11.

### 4.3 DISEÑO DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO

El mecanismo de movimiento seleccionado es el basado en tendones, con la configuración *Dogleg link* (Figura 12). Para la flexión de los dedos índice al meñique se utiliza un solo motor que, mediante poleas, permitirá que todos los dedos ejerzan una misma presión sobre el objeto que se quiera agarrar.

Para la extensión se ha puesto un tendón elástico que, cuando el motor deje de ejercer par, mueva los dedos a su posición inicial.

### 4.4 CÁLCULO DE FUERZAS

Para tener una idea de cómo han de ser los actuadores que se han de utilizar para el movimiento de la mano se han realizado los cálculos de tensiones para todos los dedos.

Según [3] el promedio de fuerza que puede ejercer una persona adolescente es de 6 kg repartida entre los dedos índice al meñique, resultando una fuerza normal de 14,72 N a ejercer por cada uno de los dedos.

Una vez que se ha definido la fuerza de contacto máxima que podrán ejercer los dedos sobre el objeto que se desea agarrar, se ha calculado la fuerza de tensión que tendrá que realizar el actuador. En la Figura 13 se muestra el diagrama de distribución de fuerzas a partir del cual se ha calculado la fuerza T de tensión.

Esta fuerza T se ha calculado mediante el sumatorio de momentos respecto al punto B,

$$\sum M_B = 16N - 6T_y - 4T_x = 0 \quad (1)$$

De la ecuación 1 se ha obtenido el valor de T en función del ángulo  $\alpha$  de flexión del dedo,

$$T = \frac{16N}{6\cos\alpha + 4\sin\alpha} \quad (2)$$

Con la ecuación 2 se ha calculado el valor de la tensión en las dos situaciones límite, la situación de flexión máxima del dedo ( $\beta=90$ ) y la situación de extensión máxima del dedo ( $\beta=180$ ), considerando que la tensión máxima a efectuar por el motor era de 58,88 N en la situación de extensión máxima.

Una vez que se ha calculado la fuerza de tensión que ha de recibir cada uno de los dedos, se ha calculado el par que ha de hacer el actuador mediante el diagrama de fuerzas que se muestra en la Figura 12 y que representa el mecanismo "Dogleg Link". Suponiendo el peor de los casos, en que todas las tensiones transmitidas a los dedos por el motor están orientadas verticalmente, se obtiene que la fuerza máxima a ejercer por el motor es 4 veces la tensión, siendo esto equivalente a una  $F_{\max}$  de 235,5 N.

Para calcular el par que tendrá que ejercer el motor para que los tendones reciban la tensión máxima, se ha utilizado una polea de 1 cm de radio, dando un par motor de 2,35 Nm.

Los cálculos anteriores se refieren a los dedos índice al pulgar, y se ha seguido el mismo procedimiento para el cálculo de tensiones del dedo pulgar. En la Figura 14 se puede ver el diagrama de distribución de fuerzas, la tensión que se ha de ejercer sobre el dedo pulgar es función del ángulo de flexión,

$$T = \frac{22N}{13\cos\alpha + 4\sin\alpha} \quad (3)$$

Con la ecuación 3 se puede calcular la tensión máxima que ha de ejercer el motor para que el pulgar pueda realizar una fuerza de 14,72 N sobre el objeto que el usuario quiera agarrar, siendo esta tensión de 80,96 N.

Finalmente, mediante el mismo procedimiento que en el caso de los dedos índice al meñique, se ha calculado a partir de la tensión, el par motor a realizar por el actuador, siendo este de 0,81 Nm.

Así pues, la prótesis de mano tendrá que estar dotada de 2 motores, un motor para el movimiento de los dedos índice al meñique, con un par limitante de 2,5 Nm y un motor para el movimiento del pulgar con un par limitante de 0,81 Nm.



Figura 11: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo largo de las falanges.

#### 4.5 ELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la elección del material se han considerado 7 opciones: aluminio, fibra de carbono, titanio, nylamid, polímero de ABS, material compuesto de fibra de carbono y kevlar, y ortocarbono. Los criterios considerados para la selección del material ha sido principalmente la limitación del peso de la estructura a 200 g, la resistencia, el precio y la facilidad de obtención del material.

Así pues, la primera selección de materiales se hizo con la limitación de peso de 200 g y todos aquellos materiales que daban un peso mayor a la prótesis se han descartado.

Con esta primera selección, los materiales restantes son la fibra de carbono, el polímero de ABS, el ortocarbono y el material compuesto de fibra de carbono y kevlar. De entre estos 4 materiales, se descartó primero el ABS por ser el menos resistente y el ortocarbono por ser el más difícil de obtener, ya que se trata de un material en investigación. Finalmente, entre la fibra de carbono y el material compuesto de fibra de carbono y kevlar, se ha decidido utilizar el segundo, por tener unas muy buenas propiedades mecánicas y un precio muy parecido al de la fibra de carbono.

#### 4.6 RESUMEN DEL DISEÑO

Se ha diseñado una prótesis de mano que se adapta al crecimiento de los niños, desde los 4 años hasta el final de su edad de crecimiento (Figura 15). El peso de la estructura de la prótesis es de 150 g y estaría fabricada con material compuesto de fibra de carbono y kevlar. El estudio de fuerzas y tensiones se ha hecho para que la mano pueda ejercer una presión de 6 kg repartidos entre los dedos del índice al meñique. La mano tiene tres movimientos independientes, movimiento de flexión y extensión de los dedos índice al meñique, movimiento de flexión y extensión del pulgar y movimiento de abducción y aducción del pulgar, pudiendo realizar tres tipos de agarre, el agarre en pinza, el agarre cilíndrico y el agarre de gancho (Figura 16).

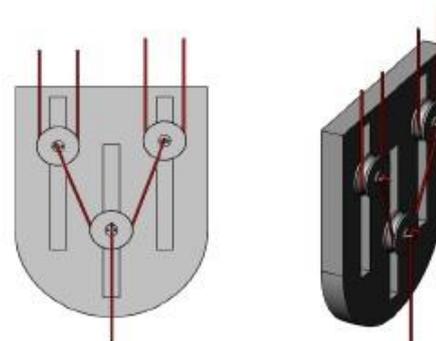


Figura 12: Mecanismo de transmisión *Dogleg Link*.

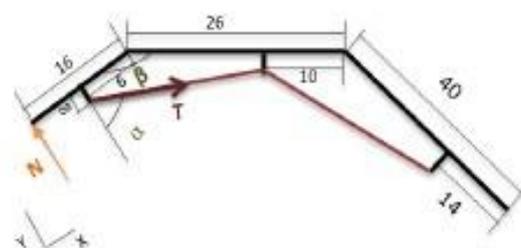


Figura 13: Esquema de fuerzas para el cálculo de las tensiones del dedo índice al meñique.

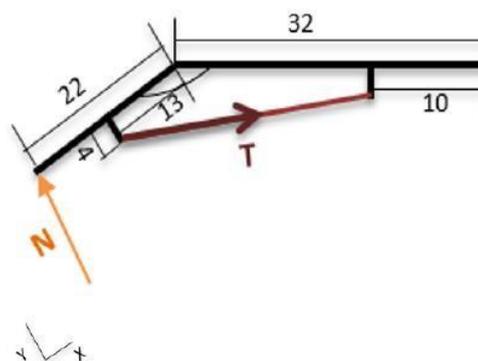


Figura 14: Esquema de fuerzas para el cálculo de las tensiones del pulgar.



Figura 15: Diseño de prótesis de mano propuesto.

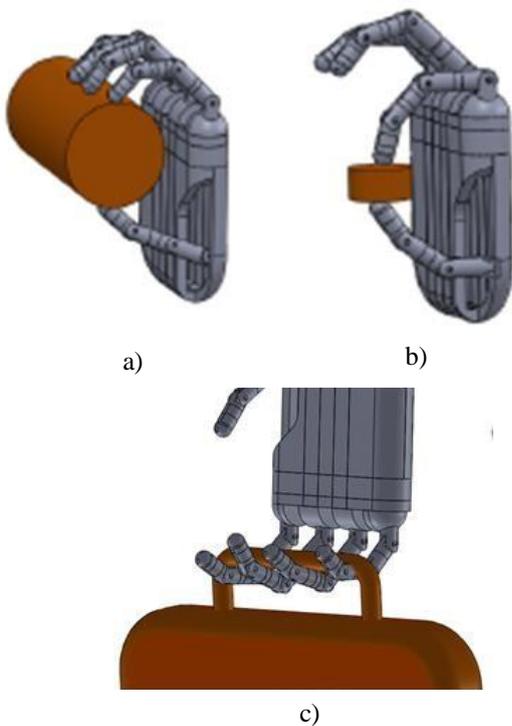


Figura 16: a) Agarre cilíndrico; b) agarre de pinza; c) agarre de gancho.

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Durante el estudio del estado del arte para el diseño de la prótesis se ha visto que existe una necesidad real de investigación en el mundo de la protésica pediátrica, tanto en nuevos materiales como en funcionalidades.

En el ámbito de la protésica pediátrica el crecimiento de los niños hace que sus prótesis no puedan tener tantas funcionalidades como las de los adultos porque esto implicaría un precio muy elevado, por ello se opta por hacer prótesis más básicas y que en muchos casos no cumplen las necesidades reales del usuario. Con el diseño propuesto podría hacerse una prótesis infantil con más funcionalidades y aunque el precio sea superior, este se compensa con una mayor vida útil del producto.

En cuanto al trabajo futuro, queda por hacer el diseño de la electrónica y el control, y construir posteriormente un prototipo, para que los posibles usuarios puedan probar si el mecanismo de crecimiento es adecuado, tanto para ellos como para sus familias.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España a través de los proyectos DPI2013-40882-P y DPI2016-80077-R.

### Referencias

- [1] David Lloberas (2008), <http://www.europapress.es/catalunya/noticia-hospital-sant-joan-deu-implanta-primera-mano-bionica-adolescente-europa-20080122141447.html>
- [2] Marisa Cabrera, (2012) <http://www.elperiodico.com/es/noticias/sociedad/manos-magicas-2239033>
- [3] Pamela Escalona PA, Jannette Naranjo O, Veronica Lagos S y Fresia Solís F, (2009), Prámetros de prensión de mano en sujetos de ambos sexos de 7 a 17 años de edad.
- [4] Richard G.Snyder, Lawrence W. Sheider, Clyde L. Owings, (1978), *Infant, Child and Teenager Anthropometry For Product Safety Design.*
- [5] Taylor G.L., Schwartz R.J., (1955), *The Anatomy and Mechanics of the Human Hand*
- [6] Vladimir Zatsiorsky, (1998), *Kinematics of human motion*