

# 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>	

# Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive

Andrés F. Hidalgo Romero

Centro de Automática y Robótica (CAR)-CSIC-UPM, af.hidalgo@csic.es

Eduardo Rocón

Centro de Automática y Robótica (CAR)-CSIC-UPM, e.rocon@csic.es

## Resumen

*Los sistemas de transmisión Harmonic Drive son muy utilizados en sistemas robóticos donde se requieren altas precisiones de trabajo. Este es el caso de los exoesqueletos utilizados para la rehabilitación y asistencia de personas con problemas de movilidad. En la bibliografía existen diversos modelos de sistemas de transmisión Harmonic Drive, pero generalmente estos modelos son considerados de forma aislada, sin tener en cuenta su interacción con el entorno en el que son utilizados. Debido a la interacción que existe entre los exoesqueletos y las personas, es importante considerar los elementos de la transmisión de movimiento como una parte integral del sistema. Con este objetivo, en este artículo se presenta la inclusión de los sistemas Harmonic Drive dentro de una formulación topológica para la simulación de sistemas multicuerpo. El uso de coordenadas relativas hace que esta formulación sea especialmente idónea para el diseño de algoritmos de control para exoesqueletos donde los actuadores transmiten el movimiento a través de sistemas de transmisión Harmonic Drive. La formulación se ha implementado en Simulink y se ha presentado un ejemplo de control de posición en un modelo de exoesqueleto de una pierna con actuación en la cadera y la rodilla.*

**Palabras Clave:** Sistemas Multicuerpo, Harmonic Drive, Exoesqueletos, Rehabilitación y asistencia, Simulación, Control.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un desarrollo creciente en la utilización de sistemas robóticos para ayudar a personas con problemas de movilidad. Este es el caso de los exoesqueletos utilizados para la rehabilitación y asistencia de personas que no pueden mover sus extremidades con normalidad. Los exoesqueletos generalmente se clasifican en dos grupos según sus sistemas de actuación sean pasivos o activos. En el primer caso se trata de dispositivos mecánicos

diseñados para almacenar energía durante una fase del movimiento de la persona y liberarla luego en otra fase ayudando a efectuar el movimiento. En el caso de los exoesqueletos activos, los movimientos se efectúan mediante actuadores cuyo movimiento debe controlarse continuamente durante todas las fases del movimiento del individuo.

Aunque los exoesqueletos pasivos presentan muchas ventajas potenciales, tienen aún bajas eficiencias en comparación con los dispositivos activos, por lo que estos últimos siguen siendo los más utilizados.

Uno de los aspectos más importantes de los exoesqueletos activos está relacionado con el control de movimiento, en donde el tipo de actuadores a utilizar tienen una gran influencia en los algoritmos. En este sentido, los actuadores rotativos eléctricos suelen preferirse frente a los lineales neumáticos debido a que son más sencillos de controlar. Por otro lado, los actuadores rotativos requieren de reductores de velocidad, siendo los sistemas Harmonic Drive (HD) uno de los más utilizados.

Los sistemas HD son muy utilizados para la transmisión de movimiento en robots con pares de Revolución (R) y que deben seguir trayectorias específicas con una determinada precisión. Esto se explica en gran medida por las altas relaciones de transmisión que pueden conseguirse con estos dispositivos. Esta característica es de especial importancia en unidades robóticas cuyos pares R deben seguir trayectorias angulares altamente no lineales de un modo preciso y seguro, como es el caso de los exoesqueletos mencionados previamente. Estos sistemas deben interactuar físicamente con las personas ayudándoles a mover las extremidades involucradas según trayectorias que cambian con el tiempo, adaptándose así al patrón de marcha y a los requerimientos del usuario. Las características intrínsecas de la marcha bípeda de personas con y sin patologías y la flexibilidad de adaptación requerida en los exoesqueletos demandan el diseño de algoritmos de control complejos. Estos controles utilizan como señales de entradas datos que provienen de la segmentación y detección de eventos de la marcha, que describen la cinemática de distintos

patrones de movimiento y que miden la fuerza de interacción entre el exoesqueleto y el usuario, entre otras variables.

Los exoesqueletos utilizados para tareas de rehabilitación generalmente siguen trayectorias y requieren estrategias de control menos variables que las de los exoesqueletos que son utilizados para tareas más generales de asistencia de movimiento. En este último caso la amplitud, frecuencia y el patrón de los movimientos pueden cambiar continuamente en el tiempo, como así también el tipo de control entre las distintas fases de la marcha.

En este sentido, la complejidad y no linealidad de los procesos involucrados en el control de exoesqueletos de asistencia dificultan el diseño de estrategias de control mediante métodos puramente deterministas. Estos algoritmos a su vez requieren de parámetros relacionados con la planta y los procesos, muy difíciles de obtener con métodos iterativos experimentales. En este sentido, el uso de modelos virtuales de simulación puede ser gran utilidad para estimar parámetros incluidos en los controles, como así también realizar pruebas con distintos algoritmos y estrategias de control. Para que estos controles aporten datos que sean de utilidad a la hora de ser implementados en el sistema real, es fundamental contar con modelos de plantas que reproduzcan de un modo fiel la dinámica y cinemática del sistema, como así también utilizar coordenadas adecuadas que faciliten el diseño del control.

Por ejemplo, el modelado de una articulación robótica con un par tipo R en la rodilla debería contemplar dos barras rígidas unidas cada una al muslo y pantorrilla respectivamente, un motor de corriente continua DC y la transmisión HD. Adicionalmente, como estas estructuras interactúan con personas, las inercias de las extremidades sumadas al efecto de las fuerzas de interacción entre el usuario y el exoesqueleto deben ser tenidas en cuenta.

El modelo mencionado anteriormente forma un sistema electromecánico en donde el motor y las barras más la transmisión HD pueden considerarse por separado. Existe una amplia variedad de modelos de motores en la bibliografía, por lo que su modelado no se menciona en este artículo. Por el contrario, si bien existen modelos de transmisiones HD en la bibliografía ([8], [3] y [5]), estos modelos frecuentemente aparecen como unidades aisladas o soportando cargas fijas y no como parte integral de un sistema mecánico en donde su interacción con el entorno puede inducir fluctuaciones en las fuerzas y torques externos.

Con el objetivo de obtener un entorno de simulación de estrategias de control, y dadas las ventajas que desde un punto de vista de investigación puede aportar tener un software de simulación propio frente a aplicaciones comerciales, en este artículo se presenta una metodología para incluir modelos de

transmisión HD dentro de una formulación topológica para la simulación dinámica y el control de sistemas multicuerpo.

Para ello se presenta inicialmente una formulación topológica semirrecursiva para la simulación dinámica de sistemas multicuerpo. La transmisión HD se introduce como caso especial de restricción dentro de la formulación. Toda la formulación se ha incluido en Simulink®, lo cual permitirá ejecutar distintos algoritmos de control, permitiendo a vez introducir elementos adicionales como por ejemplo modelos de motores que no se incluyen en este artículo.

Este artículo está dividido en dos secciones. En la primera sección se presenta la formulación topológica original en la cual se ha basado el trabajo de este artículo y se incluye también la adaptación realizada para poder incluir de un modo general restricciones de transmisiones HD dentro de la formulación de base. En la segunda sección se introduce un ejemplo de control de posición implementando la formulación topológica con el sistema HD aquí presentado. La formulación se ha introducido en Simulink y el modelo de sistema es un exoesqueleto con articulaciones en la cadera y en la rodilla.

## 2 FORMULACIÓN TOPOLÓGICA ADAPTADA

Se ha mencionado anteriormente la conveniencia de utilizar coordenadas relativas para desde un punto de vista del control

Los métodos topológicos, que se basan en el uso de coordenadas relativas, suelen denominarse como métodos recursivos o semirrecursivos. Dependiendo para ello de si debe o no resolverse un sistema de ecuaciones lineales para calcular las aceleraciones del sistema.

La formulación semirrecursiva presentada en este artículo está basada en la formulación semirrecursiva de Rodríguez y otros [6]. En términos generales, esta formulación inicialmente define el sistema mediante coordenadas Cartesianas, obteniéndose finalmente mediante una doble transformación de velocidades, una expresión de las ecuaciones del movimiento en función de las aceleraciones relativas independientes del sistema multicuerpo.

Cuando los sistemas son de cadena abierta, las aceleraciones relativas pueden obtenerse de forma completamente recursiva y solo se realiza una transformación de velocidades. Cuando los sistemas son de cadena cerrada, las cadenas se abren por determinados pares obteniéndose así un sistema de múltiples cadenas abiertas que se calculan de forma recursiva. Finalmente, las cadenas se cierran introduciendo las restricciones correspondientes a los pares por donde fueron abiertas. Al contrario de los

sistemas de cadena abierta, cuando los sistemas multicuerpo son de cadena cinemática cerrada, y las restricciones se imponen mediante el uso de coordenadas naturales [1] como se realiza en esta formulación, se requiere la resolución de un sistema de ecuaciones lineales para la obtención de las aceleraciones relativas del sistema, correspondiente a la segunda transformación de velocidades.

La formulación original utilizada en este artículo utiliza dos tipos restricciones cinemáticas, las de los pares (tipo R) y prismáticos (tipo P), ya que todas las demás restricciones pueden definirse como combinaciones de éstas.

Con la adaptación introducida en este artículo se introduce un tipo de restricción adicional, la correspondiente a la transmisión HD. Como se verá más adelante, este tipo de transmisión impone una restricción constante en el tiempo, lo cual evita la necesidad de resolver un sistema de ecuaciones lineales para realizar la segunda transformación de velocidades cuando el sistema multicuerpo está cerrado únicamente por transmisiones tipo HD.

### 2.1 ECUACIONES DE CADENA ABIERTA

Las ecuaciones de la dinámica de un sistema multicuerpo de cadena abierta como el que se muestra en la Figura 1 se plantean fácilmente mediante las ecuaciones de Newton-Euler de cada uno de los sólidos que componen el sistema. De esta manera aparecen también en las ecuaciones las fuerzas internas de restricción que existen entre los pares cinemáticos que vinculan los elementos entre sí. Estos sistemas de cadena abierta tienen un sólido de entrada a la cadena, que suele ser un elemento fijo con respecto al sistema inercial. Cada elemento además posee puntos de entrada y salida que lo vinculan con sus elementos contiguos en la cadena cinemática.

La geometría de cada sólido se define mediante un sistema de coordenadas móvil y situado en el punto de entrada al mismo. Los pares cinemáticos se definen mediante coordenadas naturales [1], que consisten en puntos y vectores unitarios que definen la posición y orientación de los pares.

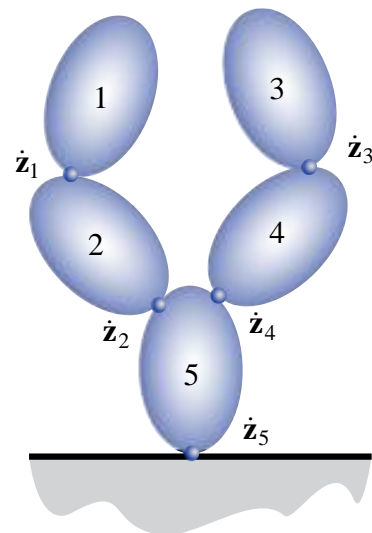


Figura 1. Sistema de cadena abierta

La posición y orientación de cada sólido se define inicialmente mediante las coordenadas Cartesianas del punto de entrada y su matriz de rotación. Aunque esta definición de la posición es redundante, luego se corrige mediante una transformación a coordenadas relativas.

Las velocidades y aceleraciones Cartesianas de un elemento se definen mediante los siguientes vectores

$$\mathbf{Z}_i \equiv \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_i \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{Bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{Z}}_i \equiv \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{s}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

donde  $\dot{\mathbf{s}}_i$  y  $\ddot{\mathbf{s}}_i$  representan la velocidad y aceleración del punto del sólido  $i$  que instantáneamente coincide con el origen del sistema de referencia inercial.

De esta forma, las velocidades y aceleraciones Cartesianas de los  $n$  elementos del sistema quedan definidas por los vectores

$$\mathbf{Z}^T = \{ \mathbf{Z}_1^T \quad \mathbf{Z}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{Z}_n^T \}, \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{Z}}^T = \{ \dot{\mathbf{Z}}_1^T \quad \dot{\mathbf{Z}}_2^T \quad \dots \quad \dot{\mathbf{Z}}_n^T \}$$

Utilizando puntos y vectores unitarios, el par de revolución (tipo R) entre los sólidos  $i-1$  e  $i$  como se muestra en la Figura 2 se define mediante el compartimiento de un punto y un vector unitario a la salida del sólido  $i-1$  y entrada del  $i$ .



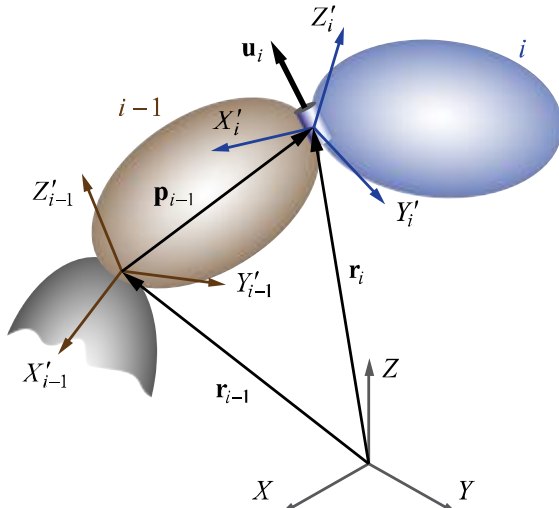


Figura 2. Par de revolución R

Como todos los elementos comparten el mismo punto de referencia (el origen de coordenadas), el cálculo de las velocidades y aceleraciones Cartesianas se hace en forma recursiva hacia adelante en función de las velocidades y aceleraciones relativas de una manera muy sencilla, ya que no se necesita ninguna matriz de transformación

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_i &= \mathbf{Z}_{i-1} + \mathbf{b}_i \dot{z}_i \\ \dot{\mathbf{Z}}_i &= \dot{\mathbf{Z}}_{i-1} + \mathbf{b}_i \ddot{z}_i + \mathbf{d}_i \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $\dot{z}_i$  y  $\ddot{z}_i$  son la velocidad y aceleración relativa del par  $i$  y las matrices  $\mathbf{b}_i$  y  $\mathbf{d}_i$  tienen expresiones que dependen del tipo de par (tipo R o tipo P) considerado. Por simplicidad, la expresión de estos vectores se omite en este artículo, pero pueden encontrarse en la referencia [2].

Las ecuaciones de movimiento se expresan más fácilmente en función de las velocidades  $\mathbf{Y}_i$  y aceleraciones Cartesianas  $\dot{\mathbf{Y}}_i$  basadas en el centro de masa del elemento y que están relacionadas con las  $\mathbf{Z}_i$  y  $\dot{\mathbf{Z}}_i$  mediante las siguientes expresiones

$$\mathbf{Y}_i = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{g}}_i \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -\tilde{\mathbf{g}}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_i \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{Bmatrix} \equiv \mathbf{D}_i \mathbf{Z}_i \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Y}}_i &= \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{g}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -\tilde{\mathbf{g}}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{s}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{g}_i \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \\ &\equiv \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{Z}}_i + \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $\dot{\mathbf{g}}_i$  y  $\ddot{\mathbf{g}}_i$  representan la velocidad y aceleración del centro de masas,  $\boldsymbol{\omega}_i$  y  $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$  la velocidad y aceleración angular del sólido  $i$ . Los vectores  $\dot{\mathbf{s}}_i$  y  $\ddot{\mathbf{s}}_i$  son la velocidad y aceleración del punto unido al sólido  $i$  que instantáneamente coincide con el origen del sistema inercial de coordenadas.

Considerando entonces las expresiones anteriores, el teorema de las potencias virtuales puede expresarse de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \mathbf{Y}_i^{*T} (\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{Y}}_i - \mathbf{Q}_i) &= \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_i^{*T} \mathbf{D}_i^T (\mathbf{M}_i \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{Z}}_i + \mathbf{M}_i \mathbf{e}_i - \mathbf{Q}_i) &= \quad (6) \\ = \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_i^{*T} (\bar{\mathbf{M}}_i \dot{\mathbf{Z}}_i - \bar{\mathbf{Q}}_i) &= 0 \end{aligned}$$

Donde el asterisco (\*) representa las velocidades virtuales de cada elemento del sistema. Las matrices de la ecuación (7) tienen las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_i &= \begin{bmatrix} m_i \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_i \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{M}}_i = \mathbf{D}_i^T \mathbf{M}_i \mathbf{D}_i &= \begin{bmatrix} m_i \mathbf{I}_3 & -m_i \tilde{\mathbf{g}}_i \\ m_i \tilde{\mathbf{g}}_i & \mathbf{J}_i - m_i \tilde{\mathbf{g}}_i \tilde{\mathbf{g}}_i \end{bmatrix} \quad (7) \\ \mathbf{J}_i &= \mathbf{A}_i \bar{\mathbf{J}}_i \mathbf{A}_i^T \\ \bar{\mathbf{Q}}_i &= \mathbf{D}_i^T (\mathbf{M}_i \mathbf{e}_i - \mathbf{Q}_i) \end{aligned}$$

donde las matrices  $\mathbf{A}_i$  y  $\bar{\mathbf{J}}_i$  son la matriz de rotación y el tensor de inercia del elemento  $i$  representados en su sistema de coordenadas locales.

Para obtener una expresión global del sistema completo, donde la matriz de inercia es  $\bar{\mathbf{M}}$ , el vector de fuerzas externas es  $\bar{\mathbf{Q}}$ , y el vector de aceleraciones es  $\dot{\mathbf{Z}}$  con las siguientes expresiones

$$\bar{\mathbf{M}} \equiv \text{diag}(\bar{\mathbf{M}}_1, \bar{\mathbf{M}}_2, \dots, \bar{\mathbf{M}}_n) \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}^T = [\bar{\mathbf{Q}}_1^T, \bar{\mathbf{Q}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{Q}}_n^T] \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{Z}}^T = [\dot{\mathbf{Z}}_1^T, \dot{\mathbf{Z}}_2^T, \dots, \dot{\mathbf{Z}}_n^T] \quad (10)$$

La ecuación de las potencias virtuales de todo el sistema queda definida por la expresión

$$\mathbf{Z}^{*T} (\bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{Z}} - \bar{\mathbf{Q}}) = 0 \quad (11)$$

Puede observarse que en la ecuación (11) no aparecen las fuerzas internas de los pares debido a que no producen potencias virtuales.

Para obtener las ecuaciones de movimiento del sistema de cadena abierta en función de las coordenadas relativas del sistema, se introduce la primera transformación de velocidades de esta formulación. Para ello debe tenerse en cuenta que las velocidades virtuales  $\mathbf{Z}^*$  no son independientes, pero que pueden expresarse en función de las velocidades relativas del sistema mediante la matriz de transformación  $\mathbf{R}$  como indica la siguiente expresión

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}_1 \dot{z}_1 + \dots + \mathbf{R}_n \dot{z}_n = \mathbf{R} \dot{\mathbf{z}} \quad (12)$$

La columna  $j$  de la matriz  $\mathbf{R}_j$ , se calcula en forma directa de una manera muy sencilla porque sus elementos son las velocidades Cartesianas de los sólidos de la cadena que se encuentran por encima del par  $j$ , siendo estas velocidades originadas por una velocidad relativa unitaria en el par  $j$  y velocidades nulas en el resto de pares.

Siguiendo la sugerencia de Negrut y otros [4], donde los sólidos se han enumerado desde las hojas hasta la raíz, de tal forma que cada sólido tiene un número menor que su padre en la cadena cinemática, la matriz de transformación  $\mathbf{R}$  para un sistema como el de la Figura 3 tiene la siguiente expresión

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & \mathbf{b}_3 & \mathbf{b}_4 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_4 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{b}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\equiv \mathbf{TR}_d$$

Donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad 6x6,  $\mathbf{T}$  es la matriz de accesibilidad, definida por la conectividad del sistema, y  $\mathbf{R}_d$  es una matriz diagonal cuyos elementos son los vectores  $\mathbf{b}_i$  dependientes del tipo para en el punto de entrada.

Utilizando la expresión de la matriz  $\mathbf{R}$  de la ecuación (13), se definen las velocidades y aceleraciones Cartesianas en función de las relativas con las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= \mathbf{R} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{TR}_d \dot{\mathbf{z}} \\ \dot{\mathbf{Z}} &= \mathbf{TR}_d \ddot{\mathbf{z}} + \dot{\mathbf{TR}}_d \dot{\mathbf{z}} \end{aligned} \quad (14)$$

Reemplazando las expresiones de la ecuación (14) en la ecuación de las potencias virtuales (11), se obtiene el sistema de ecuaciones de movimiento en función de las coordenadas relativas del sistema

$$\mathbf{R}_d^T (\mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{T}) \mathbf{R}_d \ddot{\mathbf{z}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T (\bar{\mathbf{Q}} - \bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{R}}_d \dot{\mathbf{z}}) \quad (15)$$

donde el vector  $\boldsymbol{\tau}$  representa las fuerzas exteriores generalizadas.

## 2.2 ECUACIONES DE CADENA CERRADA

Cuando los sistemas son de cadena cerrada, las aceleraciones relativas de la ecuación (15) ya no son independientes, por lo tanto, las ecuaciones de movimiento de sistemas de cadena cerrada se obtienen considerando las restricciones que relacionan estas coordenadas. Esto puede realizarse de una forma muy eficiente subdividiendo el conjunto de coordenadas relativas entre dependientes e independientes. De esta manera, las coordenadas relativas dependientes pueden expresarse en función de las independientes considerando el núcleo del espacio nulo de la matriz Jacobiana de las ecuaciones de restricción con respecto al vector de coordenadas relativas  $\Phi_z$ .

Por ejemplo, las ecuaciones de restricción del cierre de cadena de un par tipo R como el de la Figura 3 se expresan muy fácilmente como sigue

$$\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k = \mathbf{0} \quad (3 \text{ ec. independientes}) \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_k = \mathbf{0} \quad (2 \text{ ec. independientes}) \quad (17)$$

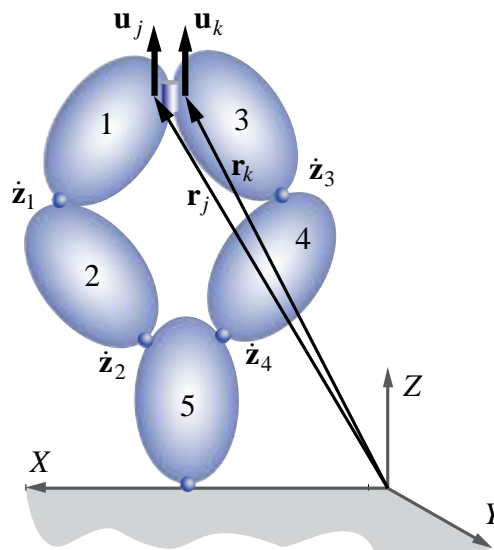


Figura 3. Cierre de cadena por un par R

Debido a que las ecuaciones de restricción están expresadas mediante coordenadas naturales, el cálculo de la matriz Jacobiana  $\Phi_z$  requiere el uso de la regla de la cadena como indica la siguiente expresión

$$\Phi_z = \Phi_{r_j} \frac{\partial \mathbf{r}_j}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{u_j} \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{r_k} \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{u_k} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial \mathbf{z}} \quad (18)$$

Utilizando el método de partición de coordenadas de [9] y [7], se obtienen los conjuntos de velocidades relativas dependientes e independientes como sigue

$$\Phi_z \dot{z} = \mathbf{0}, \quad \begin{bmatrix} \Phi_z^d & \Phi_z^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}^d \\ \dot{z}^i \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\dot{z}^d = -\Phi_z^d \setminus \Phi_z^i \dot{z}^i$$

Donde las coordenadas dependientes se eligen de tal forma que aseguren que  $\Phi_z^d$  es invertible.

De esta forma se obtiene la matriz  $\mathbf{R}_z$  correspondiente a la segunda transformación de velocidades relativas de dependientes a independientes

$$\dot{z} = \mathbf{R}_z \dot{z}^i, \quad \begin{Bmatrix} \dot{z}^d \\ \dot{z}^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\Phi_z^d)^{-1} \Phi_z^i \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \dot{z}^i \quad (20)$$

$$\mathbf{R}_z \equiv \begin{bmatrix} -(\Phi_z^d)^{-1} \Phi_z^i \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

Derivando las velocidades relativas de la ecuación (20) se obtienen las aceleraciones relativas

$$\ddot{z} = \mathbf{R}_z \ddot{z}^i + \dot{\mathbf{R}}_z \dot{z}^i \quad (21)$$

Finalmente, las ecuaciones de movimiento de cadena cerrada se obtienen reemplazando la ecuación (21) en la ecuación (15), quedando expresadas de la siguiente manera

$$\mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{M}^\Sigma \mathbf{R}_z \ddot{z}^i = \mathbf{R}_z^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{Q}^\Sigma - \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{R}_d \dot{z} - \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{R}_d \dot{\mathbf{R}}_z \dot{z}^i \quad (22)$$

### 2.3 RESTRICCIONES DEL SISTEMA HARMONIC DRIVE (HD)

Cuando se utilizan coordenadas globales (naturales en este caso) para definir las ecuaciones de restricción, la matriz  $\mathbf{R}_z$  se obtiene numéricamente. Como se verá a continuación, cuando el sistema multicuerpo está cerrado por uniones o pares correspondientes a sistemas de transmisión tipo HD, la matriz  $\mathbf{R}_z$  puede obtenerse de un modo más sencillo y eficiente, ya que permanece constante en el tiempo, evitando así la necesidad de resolver ningún sistema de ecuaciones.

Considerando un sistema multicuerpo como el exoesqueleto que se muestra en la Figura 5, la configuración del sistema HD consiste en el *circular spline* (CS), que se encuentra fijo a una de las extremidades de las barras. Por otro lado, el motor que transmite el movimiento al *wave generator* (WG) también está fijo al soporte del CS, con el WG

alojado dentro del elemento flexspline (FS), como se ve en la Figura 4

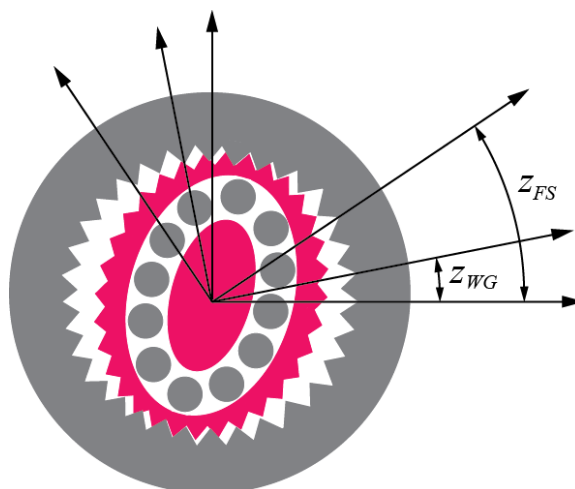


Figura 4. Detalle de transmisión HD

Las relaciones cinemáticas y dinámicas entre los desplazamientos angulares y torques de cada componente del sistema HD están definida por las siguientes expresiones

$$\theta_{WG} = (N+1)\theta_{CS} - N\theta_{FS} \quad (23)$$

$$T_{WG} = 1/(N+1)T_{CS} = -1/N T_{FS} \quad (24)$$

donde  $N$  es la relación de transmisión,  $\theta$  es el ángulo de rotación del elemento correspondiente de la transmisión HD y  $T$  es el torque.

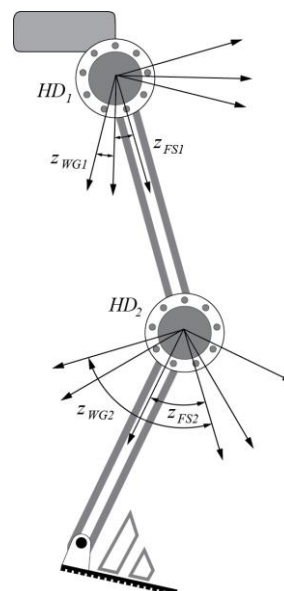


Figura 5. Esquema en 2D de exoesqueleto con transmisión HD en cadera y rodilla

El exoesqueleto de la Figura 5 con actuación en la cadera y rodilla representa un sistema de cadena cerrada debido a la interconexión entre los tres elementos que componen cada transmisión HD. Si

designamos al CS como el elemento padre del WG y del FS y consideramos el sistema local de coordenadas fijo al CS, la restricción cinemática de la ecuación (23) se puede expresar en coordenadas relativas  $z$  como sigue

$$\Phi(z) = z_{WG} + Nz_{FS} = 0 \quad (25)$$

Cuando las restricciones se expresan en función de coordenadas globales, como es el caso de las coordenadas naturales, la matriz  $R_z$  debe obtenerse generalmente en forma numérica en cada paso de integración. En el caso de la restricción del sistema HD como indica la ecuación (25), la relación entre las coordenadas relativas se mantiene constante, dependiendo solamente de la relación de transmisión  $N$ . De esta forma, el cierre de la cadena cinemática del sistema HD puede hacerse muy fácilmente y de una forma eficiente. Considerando entonces las coordenadas relativas del elemento WG  $z_{WG1}$  y  $z_{WG2}$  como independientes, las velocidades relativas del sistema de la Figura 5 pueden expresarse como una función de las independientes según la siguiente expresión

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_{FS1} \\ \dot{z}_{WG1} \\ \dot{z}_{FS2} \\ \dot{z}_{WG2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/N & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1/N \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_{WG1} \\ \dot{z}_{WG2} \end{Bmatrix}; \quad (26)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} -1/N & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1/N \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Derivando con respecto al tiempo la ecuación (26) se obtienen las aceleraciones relativas. Como puede observarse la matriz  $R_z$  es constante, por lo que  $\dot{R}_z$  es cero. De esta forma la ecuación (22), que representa la ecuación del movimiento del sistema de cadena cerrada pierde el último término del lado derecho, quedando expresada como

$$R_z^T R_d^T M^{\Sigma} R_d R_z \ddot{z}^i = R_z^T \tau + R_z^T R_d^T Q^{\Sigma} - R_z^T R_d^T T^T \bar{M} T R_d \dot{z} \quad (27)$$

donde los toques de la ecuación (24) pueden incluirse fácilmente dentro del término que representa los torques externos  $\tau$ . Aunque se ha introducido un modelo ideal de transmisión HD, también pueden incluirse efectos adicionales como la rigidez, viscosidad torsional y la histéresis relacionada con estos sistemas.

### 3 IMPLEMENTACIÓN

Debido al incremento de par generado por la transmisión HD, el sistema no es backdriveable. Es importante remarcar que esta característica no podría simularse con un par R ordinario, y este efecto sería más difícil de incluir para describir más fielmente el funcionamiento del sistema. Esta característica además se hace especialmente importante para simular controles de impedancia y/o admitancia, con la finalidad de hacer más transparente el exoesqueleto para el usuario.

La formulación topológica con la inclusión de la transmisión HD descrita en el apartado anterior se ha implementado en Simulink®. Esto tiene la ventaja de que las simulaciones se realizan en un entorno preparado para sistemas multidominio y especialmente desarrollado para el diseño de algoritmos de control.

Con el objetivo de mostrar el funcionamiento de la formulación topológica adaptada con la inclusión de restricciones dinámicas y cinemáticas de los sistemas de transmisión HD, se ha implementado un ejemplo de control de posición a un modelo de exoesqueleto como el de la Figura 5. El diagrama de bloques de este sistema puede verse en la Figura 6

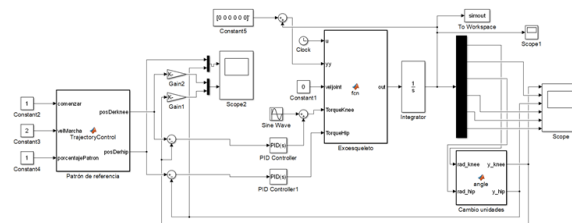


Figura 6. Diagrama de bloques del modelo de exoesqueleto.

El control de posición se aplica al movimiento de la cadera y de la rodilla, utilizando para ello trayectorias preestablecidas basadas en modelos de marcha normal. En la Figura 7 puede verse la trayectoria de referencia de cada una de las articulaciones del exoesqueleto y la trayectoria seguida al aplicar un control PID a cada articulación.

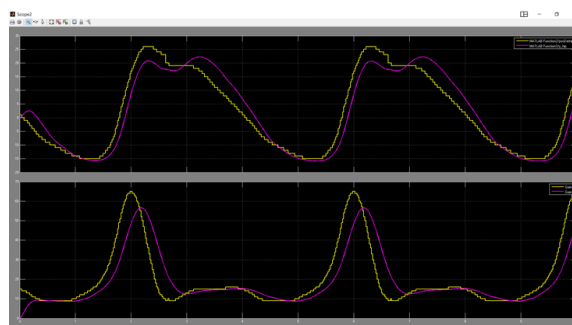


Figura 7. Trayectorias de la cadera y rodilla durante el control de posición.

Adicionalmente, en la Figura 8 puede verse una gráfica con los valores del vector de estado completo, formado por los cuatro desplazamientos angulares del sistema y sus dos velocidades angulares independientes.

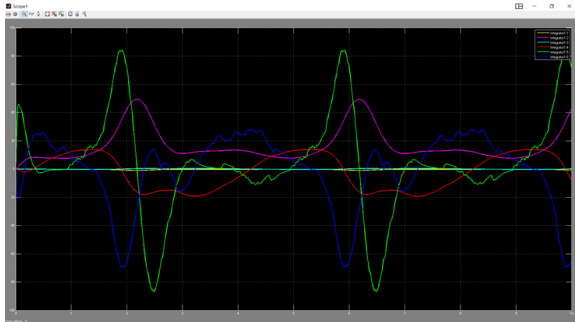


Figura 8. Valores del vector de estado del sistema.

## Referencias

- [1] J. García de Jalón and E. Bayo, *Kinematic and dynamic simulation of multibody systems: the real-time challenge*. Springer-Verlag, 1994.
- [2] A. F. Hidalgo and J. García de Jalón, “Implementación eficiente de una formulación semirrecursiva para la dinámica de sistemas multicuerpo de gran tamaño,” *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 29, no. 4, pp. 225–233, Oct. 2013.
- [3] L. Lemmer and B. Kiss, “Modeling, Identification, and Control of Harmonic Drives for Mobile Vehicles,” in *2006 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2006, pp. 369–374.
- [4] D. Negrut, R. Serban, and F. A. Potra, “A Topology-Based Approach to Exploiting Sparsity in Multibody Dynamics: Joint Formulation\*,” *Mech. Struct. Mach.*, vol. 25, no. 2, pp. 221–241, Jan. 1997.
- [5] C. Preissner, “A high-fidelity harmonic drive model: Experiment, simulation, and application,” University of Illinois at Chicago, 2009.
- [6] J. I. Rodríguez, J. M. Jiménez, F. J. Funes, and J. García de Jalón, “Recursive and Residual Algorithms for the Efficient Numerical Integration of Multi-Body Systems,” *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 11, no. 4, pp. 295–320, May 2004.
- [7] Serna, R. Avilés, and J. García de Jalón, “Dynamic analysis of plane mechanisms with lower pairs in basic coordinates.,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 17, 1982.
- [8] H. D. Taghirad and P. R. Bélanger, “Modeling and Parameter Identification of Harmonic Drive Systems,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 120, no. 4, p. 439, 1998.
- [9] R. A. Wehage and E. J. Haug, “Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic Systems,” *J. Mech. Des.*, vol. 104, no. 1, p. 247, Jan. 1982.