

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

José Emilio Traver¹, Juan Francisco Ortega Morán², Inés Tejado¹, J. Blas Pagador²,
Fei Sun², Raquel Pérez-Aloe¹, Blas M. Vinagre¹, F. Miguel Sánchez Margallo²

¹ Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006 Badajoz,
e-mail: {jetraver,itejbal,raquel,bvinagre}@unex.es

² Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón, Ctra. N-521 km 41, 10004 Cáceres,
e-mail: {jfortega,jbpagador,feisun}@ccmijesususon.com

Resumen

Este artículo presenta un modelo de simulación del sistema cardiovascular en el entorno de Matlab/Simulink, más concretamente de la zona de mayor riesgo cardiovascular, la arteria carótida. Está basado en un modelo eléctrico del sistema que describe la dinámica de contracción del corazón, así como su carácter cíclico y autónomo. Como primer paso, este modelo se generaliza para contemplar también la dinámica de la arteria carótida izquierda. A partir de él, y haciendo una serie de equivalencias entre dominios, se obtiene un modelo hidráulico que emula el comportamiento del sistema cardiovascular en esa zona y que, a diferencia del anterior, no presenta carácter autónomo. Para el diseño del control, se hace uso de la estrategia de linealización por realimentación. Se incluyen simulaciones, tanto del modelo eléctrico completo como del hidráulico propuesto, para demostrar el correcto funcionamiento del simulador desarrollado. El objetivo final de este trabajo es la construcción de una plataforma de ensayo para robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano de pequeñas dimensiones a partir del modelo hidráulico desarrollado que permita emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano.

Palabras clave: Sistema cardiovascular, modelo eléctrico, modelo hidráulico, linealización por realimentación, Simulink, plataforma de ensayo, robots de pequeñas dimensiones.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares se consideran como la primera causa de defunción a nivel global, y la tendencia del número de incidencias de este tipo es creciente [11]. Esta circunstancia pone de manifiesto la gravedad de la situación, la necesidad de su estudio y el desarrollo de medios que permitan evaluar y mejorar su tratamiento. Como consecuencia de esta situación, son numerosos y conocidos los esfuerzos combinados de la comunidad médica e ingenieril [1] para el desa-

rollo de modelos y simuladores, conocidos como lazos de circulación Mock (MCLs, del término en inglés). Estos modelos permiten un ahorro en coste y tiempo, además de servir de herramientas para el diseño, evaluación y mejora del funcionamiento de dispositivos de asistencia ventricular [13, 6], prótesis de válvulas cardíacas [3] o emuladores del sistema circulatorio para aprendizaje y evaluación de herramientas de cateterismo.

El sistema cardiovascular (SCV) es un sistema relativamente complejo y son numerosos los modelos desarrollados para su investigación, así como las perspectivas desde las que han sido abordados. Sin embargo, a pesar de la abundante información que es posible encontrar en la literatura respecto al modelado del SCV [13, 6, 4, 18], ésta es escasa en lo que se refiere a tratar los problemas originados por la enfermedad de arteriosclerosis, concretamente en el oclusión (estenosis) de las arterias debido su engrosamiento [10]. Esto se encuentra motivado principalmente por tres razones: 1) las herramientas actuales se encuentran enfocadas principalmente a reducir los síntomas o eliminar las dolencias derivadas de la enfermedad, de forma concreta y localizada, sin la eliminación de los factores que la originan, como es el caso del uso de dispositivos de estabilización (stent) o cirugía de bypass; 2) recientes estudios avalan una mayor eficacia de los tratamientos farmacéuticos frente a las técnicas de tratamientos invasivos, además de ofrecer un tratamiento sistémico [10]; y 3) la ausencia de dispositivos capaces de tratar la enfermedad de forma sistémica. Sin embargo, a partir de la última década los avances tecnológicos han permitido el estudio de dispositivos dentro del campo de la robótica de pequeña escala, como aplicación de la nano y microrrobótica al ámbito médico [9].

En este contexto, el presente trabajo pretende recopilar los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de un simulador hidráulico que permita emular la dinámica del SCV. Para ello, se partirá de un modelo eléctrico que describe la dinámica de contracción del corazón de acuerdo con la ley de Frank-Starling, así como su carácter cíclico y autónomo. Como primer paso, este modelo se generalizará para incluir también la dinámica de la

arteria carótida izquierda, que constituye la región con mayor recurrencia en problemas cardiovasculares, y más concretamente, en la formación de placas de ateroma. Basado en éste, se desarrollará un modelo hidráulico que, a diferencia del anterior, no presentará carácter autónomo y necesitará ser controlado para emular la dinámica cardiovascular. Se utilizará el método de linealización por realimentación para el diseño del control. Con ello se logrará independizar la dinámica del sistema de la caracterización de la ley de Frank-Starling, pudiendo así emular el comportamiento descrito por el modelo eléctrico. Ambos modelos, tanto el eléctrico completo como el hidráulico, se implementarán en el entorno Matlab/Simulink usando la herramienta Simscape para validarlos.

El objetivo final de este trabajo es la construcción de una plataforma experimental a partir del modelo hidráulico desarrollado para el ensayo de robots de pequeñas dimensiones, concretamente robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano. Se pretende, pues, emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano. Cabe resaltar que en la literatura es posible encontrar modelos del SCV, principalmente eléctricos, de mayor complejidad que el aquí considerado. Sin embargo, no contemplan las arterias centrales, al contrario que los aquí considerados, y están enfocados a otros estudios.

El resto del documento está estructurado como sigue. La sección 2 resume el funcionamiento del SCV. La sección 3 describe y analiza un modelo eléctrico equivalente del SCV, lo extiende para incluir la dinámica de la arteria carótida izquierda, y comprueba su validez con simulaciones en Matlab. Basado en este modelo, la sección 4 presenta un modelo hidráulico que emula la dinámica del SCV. Finalmente, la sección 5 resume las principales conclusiones del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

Con el objeto de poder realizar una correcta descripción y modelado del SCV, a continuación se resume el funcionamiento del órgano principal, así como la importancia de la red de distribución y su hemodinámica. Conviene tener presente en todo momento que se está describiendo un organismo vivo, y por lo tanto, es importante no olvidar la variabilidad de sus parámetros.

En términos sencillos, es posible describir el SCV como una red de distribución (vasos sanguíneos) que abastece de fluido (sangre) a una población por medio de una bomba (corazón). El corazón ge-

nera la presión necesaria para bombear la sangre a través del conjunto de vasos sanguíneos que recorren las células del cuerpo. En el flujo de sangre se distinguen dos etapas: 1) circulación sistémica o general, que es la encargada del transporte de sustancias y oxígeno, y 2) circulación pulmonar, responsable de la oxigenación de la sangre [8].

El corazón actúa como una bomba para cada circulación. Se encuentra constituido por una doble cámara aurícula-ventrículo, donde las aurículas actúan como cámara de precarga y los ventrículos hacen la función de bomba. Así mismo, presenta válvulas unidireccionales que impiden el reflujo entre cámaras (válvulas auriculoventriculares) y a la salida de los ventrículos (válvulas semilunares). La capacidad del corazón para generar el gradiente de presión necesario reside en su capacidad de contracción y la sucesión de fenómenos eléctricos y mecánicos ocurridos durante un latido, conocidos como ciclo cardíaco [8].

El ciclo cardíaco se divide en dos etapas claramente diferenciadas que ocurren de forma alternada: diástole (periodo de relajación) y sístole (periodo de contracción). Las manifestaciones físicas correspondientes a cada una de ellas se ilustran en la Figura 1, donde puede observarse la presión y los cambios de volumen registrados en la aurícula y ventrículo izquierdo (VI) para un conjunto de ocho etapas [8].

Esta dinámica no se preserva durante todo el sistema circulatorio, debido a su diversidad en morfologías, diámetros y composiciones. Por lo tanto, la oposición al flujo de sangre también es variable. La resistencia vascular, entendida como la fricción que experimenta la sangre con las paredes, depende principalmente de dos factores: la longitud y

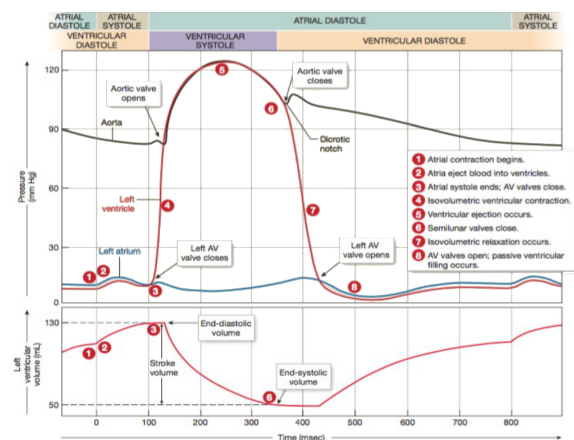


Figura 1: Relación de presiones en el VI durante el ciclo cardíaco para una frecuencia cardíaca de 75 latidos por minuto (lpm). Imagen extraída de [8].

el diámetro del vaso. Dicha resistencia es menor en las zonas vasculares (capilares) debido a que su sección total es superior a las zonas adyacentes al corazón (arterias y venas).

Respecto a la presión carótida, presenta ligeras diferencias en comparación con la ilustrada en la Figura 1: 1) existe un desfase de tiempo respecto a la presión sistólica, 2) la presión experimenta un ligero aumento a raíz de las ondas de presión reflejadas, y 3) la onda diacrótica se intensifica [10]. En cuanto al flujo, según las condiciones fisiológicas pueden darse diferentes comportamientos. Sin embargo, su comportamiento principal está caracterizado por un flujo positivo en un menor periodo de tiempo, seguido de un flujo negativo originado por el cierre de la válvula aórtica, pudiendo llegar incluso a producirse un segundo impulso de sangre durante la diástole ventricular motivado por el retroceso de la sangre en la aorta descendente.

Las repercusiones que presenta la aterosclerosis sobre el comportamiento cardiovascular son principalmente dos: la pérdida de elasticidad de las arterias y el estrechamiento de la luz del vaso (estenosis). La pérdida de elasticidad produce un aumento de las presiones máximas alcanzadas [10], así como la modificación del patrón de onda debido a que la reflexión de las ondas se producen con mayor rapidez. Por otro lado, la estenosis reduce el flujo de sangre.

3. MODELO ELÉCTRICO DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

Para desarrollar un modelo del SCV se ha optado por describir primero su comportamiento mediante estructuras eléctricas con un funcionamiento conceptual análogo.

A partir del modelo de Windkessel [16] y las modificaciones sugeridas en [18], el SCV puede ser analizado a través de un circuito eléctrico, como se muestra en la Figura 2 (sombreado naranja) [13]. En este modelo, la circulación sistémica y pulmonar quedan simplificadas a una resistencia periférica total (R_s) que considera la oposición de todas las arterias y venas, y un condensador que emula la elasticidad de los vasos sanguíneos, y con ello la capacidad de albergar sangre (C_s). La morfología destacada del cayado aórtico también se encuentra reflejada en el modelo a través de la resistencia R_c , así como las fuerzas inerciales que experimenta el flujo debido a su carácter pulsátil (L). Por otro lado, la dinámica del corazón es reducida a la parte izquierda y las correspondientes válvulas. La capacidad de contracción del VI, recogido por la ley de Frank–Starling, es considerada como un condensador variable ($C(t)$) [13, 15], mientras

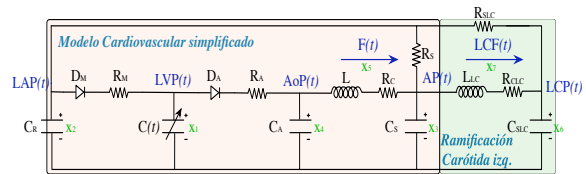


Figura 2: Modelo eléctrico del SCV (sombreado naranja) extendido a la arteria carótida común izquierda (sombreado verde).

que la aurícula izquierda es interpretada como un elemento pasivo de acumulación (C_s). En cuanto a las válvulas, son modeladas como un diodo no ideal, componente que permite identificar el control del flujo de sangre en función de la presión entre sus extremos [13, 4]. Además, la elasticidad de la válvula aórtica es caracterizada con un condensador (C_A) que recoge la dinámica de la onda diacrótica. Respecto al carácter cíclico del SCV, es logrado a través un circuito realimentado.

En segundo lugar, al sistema anterior se le incluye el modelo de las arterias centrales, concretamente de la arteria carótida común izquierda, de acuerdo con [18, 13] (ver el sombreado verde en la Figura 2). Como se ha comentado anteriormente, se elige este lecho vascular por su elevada recurrencia en presentar placas de ateroma [10]. El modelo completo se ha establecido en base a la distribución anatómica del sistema circulatorio y los criterios empleados para desarrollar el modelo de Windkessel de 4 elementos [16], donde la resistencia R_{CLC} modela de la oposición al flujo y la bifurcación de dicha arteria, mientras que R_{SLC} modela la resistencia de retorno al corazón. El elemento L_{LC} simboliza la inercia experimentada en gran medida por el flujo de la arteria aorta, provocando grandes variaciones del flujo. La capacidad C_{SLC} representa la elasticidad.

Una vez completado el esquema eléctrico que representa el funcionamiento cardiovascular, se extraen las relaciones matemáticas entre las diferentes variables hemodinámicas, atendiendo a la definición física de los componentes que constituyen el modelo eléctrico equivalente, salvo en el caso de los diodos y el componente que emula el VI que se explican a continuación. Los diodos son descritos según la siguiente función:

$$r(\xi) = \begin{cases} \xi, & \text{si } \xi \geq 0 \\ 0, & \text{si } \xi < 0 \end{cases} \quad (1)$$

mientras que su comportamiento resistivo viene determinado por la resistencia en serie asociada. Por otra parte, el condensador de capacidad variable $C(t)$ refleja la elasticidad durante la contracción del VI y es definida como la inversa de la

Tabla 1: Variables del modelo del SCV.

Variable	Abreviatura	Significado clínico (unidad)
$x_1(t)$	LVP(t)	Presión del ventrículo izquierdo (mmHg)
$x_2(t)$	LAP(t)	Presión de la aurícula izquierda (mmHg)
$x_3(t)$	AP(t)	Presión arterial (mmHg)
$x_4(t)$	AoP(t)	Presión aórtica (mmHg)
$x_5(t)$	F(t)	Flujo de sangre (ml/s)
$x_6(t)$	LCP(t)	Presión arteria carótida común izquierda (mmHg)
$x_7(t)$	LCF(t)	Flujo de sangre en la arteria carótida (ml/s)

elastancia $E(t) = \frac{1}{C(t)}$. La elastancia es el estado de contracción, que relaciona la presión ($LVP(t)$) y volumen ($LVV(t)$) del VI de acuerdo con la siguiente expresión [13]:

$$E(t) = \frac{LVP(t)}{LVV(t) - V_0}, \quad (2)$$

donde V_0 es el volumen de referencia, que se corresponde con el volumen ventricular teórico a una presión cero. La descripción empleada en este documento se basa en los estudios realizados en [15], donde describen la elastancia de una persona en un buen estado cardiovascular como

$$E_H = (E_{max} - E_{min})E_n(t_n) + E_{min}, \quad (3)$$

siendo E_{max} y E_{min} constantes relacionadas con el volumen máximo y mínimo diástole. El parámetro $E_n(t_n)$ es la elastancia normalizada, con $t_n = t/(0,2 + 0,15 \cdot 60/HR)$, donde HR es la frecuencia cardíaca. La elastancia normalizada, conocida como función de doble colina, viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_n(t_n) = 1,55 \left(\frac{\left(\frac{t_n}{0,7}\right)^{1,9}}{1 + \left(\frac{t_n}{0,7}\right)^{1,9}} \right) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{t_n}{1,17}\right)^{21,9}} \right) \quad (4)$$

Es necesario matizar que en (3) se realiza el escalado de la elastancia normalizada entre los valores E_{max} y E_{min} , ya que el valor normalizado presenta la misma morfología para un corazón sano o enfermo [17]. Las afecciones cardíacas son modeladas mediante la ponderación de (3) con el factor δ , con $0 < \delta \leq 1$ (el valor unitario corresponde a una persona sana).

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema se obtienen seleccionando las variables recogidas en la Tabla 1 y empleando la definición de los propios componentes, así como las leyes de tensiones y corrientes de Kirchoff.

Así, el estado x_1 es establecido a partir de la relación indicada en (2) y la relación entre el voltaje (V) y la corriente (I) en un condensador, es decir, $\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}I$, que resulta en:

$$x_1 = E(t)(LVV(t) - V_0), \quad (5)$$

donde $LVV(t) = \int (I_{D_M} - I_{D_A})dt$, siendo I_{D_M} e I_{D_A} las corrientes correspondientes a los diodos

Tabla 2: Parámetros del modelo del SCV.

Parámetro	Valor	Significado clínico
Resistencias		
R_S	1 (mmHg s / ml)	Resistencia periférica total.
R_{SLC}	10 (mmHg s / ml)	Resistencia periférica carótida común izquierda.
R_M	0,005 (mmHg s / ml)	Resistencia válvula mitral.
R_A	0,001 (mmHg s / ml)	Resistencia válvula aórtica.
R_C	0,0398 (mmHg s / ml)	Resistencia arteria aorta.
R_{CLS}	0,2 (mmHg s / ml)	Resistencia carótida común izquierda.
Capacidad		
C_R	8,8 (ml / mmHg)	Elasticidad aurícula izquierda.
C_S	1,33 (ml / mmHg)	Elasticidad sistémica.
C_A	0,08 (ml / mmHg)	Elasticidad válvula aórtica.
C_{LC}	0,09 (ml / mmHg)	Elasticidad carótida común izquierda.
Inductancia		
L_S	0,0005 (mmHg s ² / ml)	Inercia asociada a la arteria aorta.
L_{SLC}	0,03 (mmHg s ² / ml)	Inercia asociada a la carótida común izquierda.
Ventrículo izquierdo		
E_{max}	2 (mmHg/ml)	Contractilidad máxima.
E_{min}	0,006 (mmHg/ml)	Contractilidad mínima.
V_0	10 (ml)	Volumen del ventrículo izquierdo a presión cero.
HR	75 (lpm)	Frecuencia cardíaca.

D_M y D_A , respectivamente. Por tanto, la derivada del estado x_1 es

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C(t)}(-\dot{C}(t)x_1 + \frac{1}{R_M}r(x_2 - x_1) - \frac{1}{R_A}r(x_1 - x_4)). \quad (6)$$

Las derivadas de los demás estados, como se muestra a continuación, son deducidas directamente a partir de las leyes mencionadas:

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_R} \left(- \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{SLC}} \right) x_2 + \right. \quad (7)$$

$$\left. \frac{1}{R_S} x_3 + \frac{1}{R_{SLC}} x_6 - \frac{1}{R_M} r(x_2 - x_1) \right)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_S} \left(\frac{1}{R_S} x_2 - \frac{1}{R_S} x_3 + x_5 - x_7 \right) \quad (8)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_A} \left(-x_5 + \frac{1}{R_A} r(x_1 - x_4) \right) \quad (9)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L} (-x_3 + x_4 - R_C x_5) \quad (10)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_{SLC}} \left(\frac{1}{R_{SLC}} x_2 - \frac{1}{R_{SLC}} x_6 + x_7 \right) \quad (11)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{L_{LC}} (x_3 - x_6 - R_{LC} x_7) \quad (12)$$

Se define así un sistema de marcado carácter no lineal a causa de la función descrita en (1) y autónomo debido al carácter cíclico de los términos $\dot{C}(t)$ y $1/C(t)$. De esta forma se describe la dinámica cardiovascular de manera continua.

Los valores utilizados para definir las variables del modelo son recogidos en la Tabla 2, los cuales se han extraído de [13, 18]. La magnitud de los parámetros se expresa en unidades de referencias híbridas, que permiten obtener la información en el sistema de unidades más utilizado a nivel clínico.

Con el propósito de su validación, el modelo eléctrico se ha implementado con la herramienta Simscape Electronics de Matlab/Simulink, y mediante la programación de las ecuaciones anteriores en Matlab. La dinámica cardiovascular simu-

lada se representa en la Figura 3, donde se observan las formas de ondas hemodinámicas para un adulto con una frecuencia cardíaca de 75 latidos por minuto (lpm). Para este caso particular, las presiones arteriales sistólica y diastólica son 112 y 77 mmHg, la presión media arterial (calculada como $MAP = (SAP + 2DAP)/3$) es 92 mmHg, y el gasto cardíaco es de 5,90 l/min para una fracción de eyección de 78,71 ml/latido. Las presiones sistólicas y diastólicas del VI son 117 y 7 mmHg, los volúmenes telesistólicos y telediastólico son 67 y 137 ml, y la presión de la aurícula varía entre 7–12 mmHg durante el ciclo cardíaco. Estos resultados, además de los obtenidos por otros medios de verificación (omitidos por cuestiones de espacio), son consistentes con los parámetros hemodinámicos reales [8, 7, 5, ?, 12], demostrando así que el modelo ofrece unos resultados acordes a la realidad.

Por último, la Figura 4 muestra las formas de onda de la presión y el flujo en la carótida común izquierda, donde se identifican las principales características que la definen [10]: 1) desfase de tiempo respecto a la presión arterial, 2) ligero aumento de la presión, 3) mayor acentuación de la onda diacrótica, y 4) flujo negativo y segundo impulso de sangre en diástole ventricular.

4. MODELO HIDRÁULICO PARA ROBOTS NADADORES

Con el objeto de trasladar el modelo eléctrico descrito a un modelo hidráulico que permita el ensayo de robots nadadores, se establecerán las equivalencias entre componentes eléctricos e hidráulicos, así como las consideraciones pertinentes que permitan adaptar la dinámica descrita a una implementación física. Como se ha visto, los componentes eléctricos utilizados han sido resistencias, condensadores e inductancias, cuyo comportamiento hidráulico puede ser modelado por cambios de sección, depósitos o tuberías de gran longitud [2],

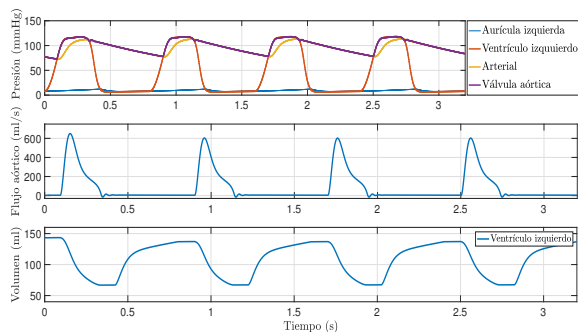


Figura 3: Resultados del modelo eléctrico.

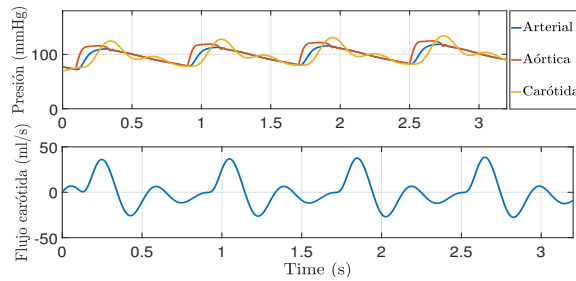


Figura 4: Resultados relativos a la arteria carótida común izquierda (a partir del modelo eléctrico).

respectivamente, como se detalla a continuación. Respecto a los diodos, son sustituidos por válvulas unidireccionales.

La resistencia hidráulica es directamente equivalente a una resistencia eléctrica y se denotarán más adelante como R_{H_i} , donde i se refiere al subíndice usado en el modelo eléctrico; esta misma nomenclatura se utilizará para el resto de elementos. Un condensador en términos hidráulicos es un depósito, cuya constante de capacidad equivalente es identificada como $C_H = \frac{A}{\rho g}$, donde A es la sección del depósito, ρ es la densidad del fluido y g , la gravedad. Respecto a la inductancia eléctrica, es similar a la hidráulica, pudiendo expresarse de la siguiente forma $L_H = \frac{l\rho}{A}$, donde l es la longitud de la tubería [2].

Respecto la contracción muscular del VI, el modelo eléctrico consideraba un condensador de capacidad variable para satisfacer la ley de Frank–Starling y así describir la actividad muscular del VI como (5). Para el modelo hidráulico es emplear una bomba, concretamente en este trabajo se utilizará una bomba de pistón [4], que junto con una adecuada estrategia de control, permitirá emular el funcionamiento del corazón de acuerdo con la ley indicada. Este tipo de actuador se puede interpretar como un depósito de volumen variable en función de la posición del pistón.

Analizando la dinámica de la bomba como un depósito de volumen variable, se obtiene que la variación de presión es función de los caudales de entrada, salida y la variación de volumen causada por el desplazamiento del pistón. Por lo tanto, la derivada de x_1 para el modelo hidráulico se define como:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_p}(Q_i - Q_o - A_p\nu), \quad (13)$$

donde C_p define la capacidad del pistón, Q_i y Q_o son los caudales de entrada y salida, respectivamente, A_p es la sección del pistón (véase la Figura 5), y $\nu = \dot{x}_p$ se corresponde con la velocidad de desplazamiento del pistón de acuerdo al criterio de signos indicado en la figura.

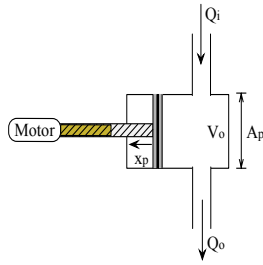


Figura 5: Esquema del VI emulado mediante una bomba de pistón.

Teniendo en cuenta las equivalencias descritas, el esquema eléctrico presentado en la Figura 2 se corresponde con el mostrado en la Figura 6. Por su parte, el modelo matemático anteriormente descrito viene dado en este caso como sigue:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_p} \left(\frac{1}{R_{HM}} r(x_2 - x_1) \right) \quad (14)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_{HR}} \left(- \left(\frac{1}{R_{HS}} + \frac{1}{R_{HSLC}} \right) x_2 + \frac{1}{R_{HS}} x_3 + \frac{1}{R_{HSLC}} x_6 - \frac{1}{R_{HA}} r(x_1 - x_4) \right) \quad (15)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_{HS}} \left(\frac{1}{R_{HS}} x_2 - \frac{1}{R_{HS}} x_3 + x_5 - x_7 \right) \quad (16)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_{HA}} \left(-x_5 + \frac{1}{R_{HA}} r(x_1 - x_4) \right) \quad (17)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L_H} (-x_3 + x_4 - R_{HC} x_5) \quad (18)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_{HSLC}} \left(\frac{1}{R_{HSLC}} x_2 - \frac{1}{R_{HSLC}} x_6 + x_7 \right) \quad (19)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{L_{HLC}} (x_3 - x_6 - R_{HLC} x_7) \quad (20)$$

donde la dinámica de \dot{x}_1 es la impuesta por la bomba de pistón, y la derivada de los demás estados se corresponde con las del modelo eléctrico a través de las equivalencias descritas. El modelo obtenido es un sistema no lineal y no autónomo

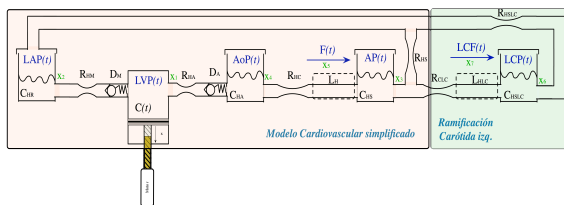


Figura 6: Modelo hidráulico del SCV.

cuya entrada ν modifica la presión en la cámara del pistón (x_1).

A diferencia del modelo eléctrico, éste no presenta un carácter autónomo como consecuencia del tipo de mecanismo escogido para implementar la contracción del VI, motivo por el cual se hace necesario aplicar una estrategia de control que regule la velocidad de desplazamiento del pistón para así emular las variaciones de presión del VI.

4.1. Diseño del controlador

La estrategia de control utilizada para el sistema anterior se basa en una linealización por realimentación, método que permite realizar una transformación algebraica entre la entrada y salida deseada e interpretar el sistema como lineal, y por lo tanto, aplicar cualquier técnica de control lineal, reduciendo así la complejidad del control [14].

Para linealizar la relación (14) se puede tomar la variable de entrada ν del sistema como:

$$\nu = - \frac{C_p}{A_p} \left(u - \frac{1}{C_p} \left(\frac{r(x_2 - x_1)}{R_{HM}} - \frac{r(x_1 - x_4)}{R_{HA}} \right) \right), \quad (21)$$

que permite considerar una relación lineal entre la salida del sistema ($y = x_1$) y la variable u , siendo u la entrada equivalente de la dinámica linealizada, que es interpretada de orden relativo uno al obtener una relación de integración entre la salida y entrada equivalente ($\dot{y} = u$). Considerando esta nueva relación lineal, se establece como criterio de diseño la siguiente ley de control:

$$u = \dot{y}_d + \lambda e, \quad (22)$$

donde y_d es la salida deseada, e es el error definido de la forma $e = y_d - y_1$ y $1/\lambda$ es la constante de tiempo del error.

Finalmente, sustituyendo (22) en (21), se obtiene

$$\nu = - \frac{C_p}{A_p} \left(\dot{y}_d - \frac{1}{C_p} \left(\frac{r(x_2 - x_1)}{R_{HM}} - \frac{r(x_1 - x_4)}{R_{HA}} \right) + \lambda e \right), \quad (23)$$

que permite alcanzar la referencia de acuerdo con la ley de control establecida. Es necesario destacar el valor positivo del parámetro λ para asegurar la estabilidad del sistema, siendo mayor la velocidad del sistema cuanto mayor sea su valor.

Conviene mencionar que, en la simulación, las variables \dot{y}_d y y_d son proporcionadas por el modelo eléctrico, mientras que las demás son obtenidas por medición del emulador hidráulico. Es necesario destacar que mediante el modelo y estrategia de control propuesta se logra independizar la dinámica emulada de la caracterización de la contracción ventricular (ley de Frank-Starling), pudiendo utilizar datos reales como referencia. La

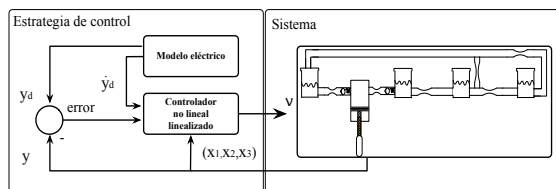


Figura 7: Diagrama de bloques de la estrategia de control para el modelo hidráulico del SCV.

Figura 7 muestra un diagrama de bloques de la estrategia de control empleada.

Para verificar la estrategia de control propuesta, así como el propio modelo desarrollado, el modelo hidráulico es implementado con la herramienta Simscape Fluids de Matlab/Simulink. Las tuberías que conectan los diferentes depósitos y válvulas se establecen con un diámetro de 2 pulgadas (diámetro suficiente para asegurar un libre movimiento de los robots nadadores), sin que éste se encuentre limitado por las restricciones de contorno. Respecto a las dimensiones de los depósitos, su sección y el valor inicial del fluido, son obtenidos a partir de las equivalencias indicadas anteriormente y los valores de la Tabla 2. Además, con el objeto de lograr escalar a nivel macroscópico los fenómenos microscópicos producidos a causa de la interacción de los microrrobots con la hemodinámica cardiovascular, el fluido a utilizar será aceite 30W, cuya viscosidad es 109,408 cSt y densidad 852,5 kg/m³ a 35°, características que, para robots de pequeñas dimensiones, permiten emular las condiciones en las que se encontrarían sujetos estos robots en el sistema circulatorio humano.

La Figura 8 muestra los resultados de simulación correspondientes al modelo hidráulico con el control. Como se puede observar, éstos son similares a los obtenidos con el modelo eléctrico, por lo que este modelo se puede considerar válido para emular la dinámica del SCV. El error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de los resultados obtenidos en la variable de control con este modelo con res-

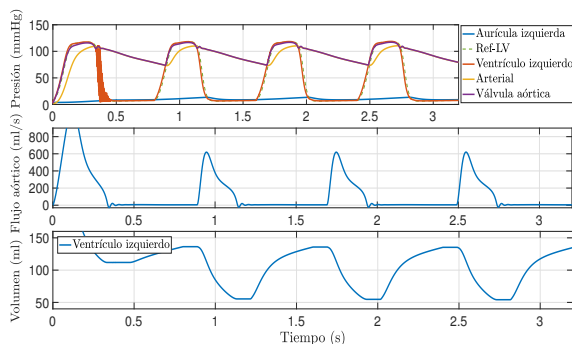


Figura 8: Resultados del modelo hidráulico.

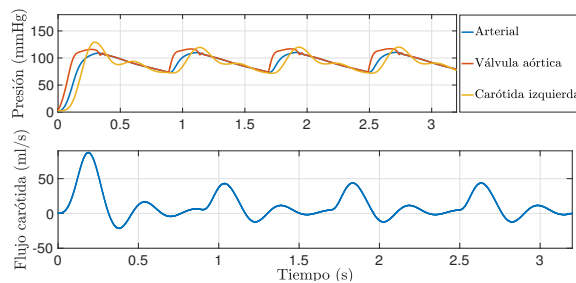


Figura 9: Resultados relativos a la arteria carótida común izquierda (modelo hidráulico).

pecto al eléctrico es de 1,90 %, que evidentemente se puede considerar despreciable y al mismo tiempo admisible considerando la variabilidad de los parámetros hemodinámicos, mientras que el desfase es de 10,50 ms.

Respecto a la presión en la carótida izquierda común y el flujo, representados en la Figura 9, también muestran el comportamiento esperado.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado un modelo de simulación del sistema cardiovascular (SCV) en el entorno de Matlab/Simulink, más concretamente de la zona de mayor riesgo cardiovascular, la arteria carótida. Está basado en un modelo eléctrico que contempla la dinámica de contracción del corazón de acuerdo con la ley de Frank-Starling y su carácter cíclico y autónomo. Así mismo, se ha extendido el modelo a la dinámica de las arterias centrales, concretamente a la arteria carótida izquierda, con motivo del elevado índice de mortalidad que produce la enfermedad de arteriosclerosis en este vaso sanguíneo.

A partir de él, y haciendo una serie de equivalencias entre dominios, se ha desarrollado un modelo hidráulico del SCV que emula el comportamiento del sistema en esa zona y que, a diferencia del anterior, no presentaba carácter autónomo. Es por ello que se ha utilizado la estrategia de linealización por realimentación para diseñar el control para este modelo. Con el propósito de validarlos, se han implementado ambos modelos en el entorno Matlab/Simulink mediante la herramienta Simscape. Los resultados de simulación obtenidos, tanto con el modelo eléctrico extendido como con el hidráulico propuesto, han demostrado el correcto funcionamiento al compararlos con los recogidos en la bibliografía de ambos.

Como trabajo futuro, se plantea realizar una verificación cuantitativa del comportamiento hemodinámico de la arteria carótida común izquierda,

el estudio de diferentes estrategias de control independientes del modelo eléctrico y la construcción física del modelo hidráulico desarrollado como plataforma de ensayo para robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano de pequeñas dimensiones que permita emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondos FEDER (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020), a través de la Ayuda a Grupos de la Junta de Extremadura con número de expediente GR15178, y el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto con referencia DPI2016-80547-R.

Referencias

- [1] H.R. Arabnia and Q.N. Tran. Emerging trends in applications and infrastructures for computational biology, bioinformatics, and systems biology: Systems and applications. *Emerging Trends in Computer Science and Applied Computing*. Elsevier Science, 2016.
- [2] D. K. Chaturvedi. *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC Press, 2009.
- [3] L. P Dasi, H. A. Simon, P. Sucusky, and A. P. Yoganathan. Fluid mechanics of artificial heart valves. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 36(2):225–237, 2009.
- [4] K. Gwak, H. D. Kim, and C. Kim. Feedback linearization control of a cardiovascular circulatory simulator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(5):1970–1977, 2015.
- [5] Edwards Lifesciences. Normal hemodynamic parameters and laboratory values, 2017.
- [6] Y. Liu, P. Allaire, Y. Wu, H. Wood, and D. Olsen. Construction of an artificial heart pump performance test system. *Cardiovascular Engineering*, 6(4):151–158, 2006.
- [7] LiDCO Ltd. Normal hemodynamic parameters, 2017.
- [8] F. Martini, J.L. Nath, and E.F. Bartholomew. *Fundamentals of Anatomy & Physiology*. Benjamin-Cummings Publishing Company, 2015.
- [9] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual review of biomedical engineering*, 12:55–85, 2010.
- [10] W. Nichols, M. O'Rourke, and C. Vlachopoulos. *McDonald's Blood Flow in Arteries, Sixth Edition: Theoretical, Experimental and Clinical Principles*. CRC Press, 2011.
- [11] World Health Organization. Cardiovascular diseases, 2016.
- [12] H. Priebe and K. Skarvan. *Cardiovascular physiology*. BMJ Publishing Group, 1995.
- [13] M. A. Simaan. *Rotary Heart Assist Devices*, pages 1409–1422. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [14] J.J.E. Slotine and W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall International Editions. Prentice-Hall, 1991.
- [15] N. Stergiopoulos, J. Meister, and N. Westerhof. Determinants of stroke volume and systolic and diastolic aortic pressure. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 270(6):H2050–H2059, 1996.
- [16] N. Westerhof, J. Lankhaar, and B. E. Westerhof. The arterial windkessel. *Medical & biological engineering & computing*, 47(2):131–141, 2009.
- [17] N. Westerhof, N. Stergiopoulos, and M. Noble. *Snapshots of hemodynamics: an aid for clinical research and graduate education*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [18] Y. Yu, J. R. Boston, M. A Simaan, and J. Antaki. Estimation of systemic vascular bed parameters for artificial heart control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(6):765–778, 1998.