

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 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/> 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	
<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/> 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>	

REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Eliás Plaza
eliasplaza@gmail.com

Matilde Santos
Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

En este trabajo se presenta una solución alternativa, basada en técnicas de la Inteligencia Artificial, al problema de la gestión de la distribución de combustible dentro de una aeronave comercial. En concreto se ha abordado el repostaje de la aeronave antes de un vuelo. El repostaje en tierra consiste en decidir la cantidad de combustible que se dispondrá en cada depósito atendiendo a criterios de seguridad, estabilidad del avión y eficiencia energética. Para ello se define un problema de optimización cuya función de coste nace del conocimiento específico de los factores que influyen en una aeronave que tiene relación con el posicionamiento del combustible. Después su resolución se realiza mediante Algoritmos Genéticos. Los resultados obtenidos en simulación mejoran la solución manual estándar que se viene aplicando.

Palabras Clave: Algoritmos Genéticos, optimización, repostaje de combustible, arquitectura de los depósitos, aeronave comercial.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se plantea el sistema de control para gestionar la distribución de combustible entre los tanques de un avión comercial real tipo Long Range (por ejemplo un Airbus A330 [1]).

Este tipo de aviones consta de varios depósitos de combustible situados en sus alas (del orden de seis tanques), más un depósito situado en la cola que sirve para balancear el peso del avión y así tener más control sobre el centrado del mismo. Esto tiene gran influencia en la estabilidad del avión así como en su controlabilidad. Por tanto, es necesario disponer de un sistema de control de la distribución de combustible entre los tanques para mantener el centro de gravedad dentro de unos márgenes de seguridad adecuados. Además dicho sistema debe gestionar el combustible de tal forma que los motores siempre queden suministrados correctamente.

Debido a su complejidad, la estrategia de redistribución abarca dos fases. En primer lugar el repostaje de la aeronave antes de un vuelo, y en segundo lugar, la redistribución del combustible entre los tanques durante el vuelo de la aeronave.

El primero de los problemas, el de repostaje en tierra, consiste en decidir la cantidad de combustible que se dispondrá en cada depósito. Para ello se define un problema de optimización cuya función de coste nace del conocimiento específico de los factores que influyen en una aeronave que tiene relación con el posicionamiento del combustible. En este trabajo se presenta una propuesta basada en la técnica heurística evolutiva de los Algoritmos Genéticos para su resolución [7], y se compara con la aproximación manual estándar.

Aunque la literatura sobre este tema es escasa, en el artículo de Turgut [8] se utilizan algoritmos genéticos para analizar la relación entre el consumo de fuel de una aeronave y la altitud de la misma durante la fase de descenso. También hace referencia a un problema similar en el sector aeronáutico el trabajo de Mongeau [5] sobre la optimización de la distribución de la carga de pago en un avión. Sin embargo hay que apuntar que en este caso el problema es discreto ya que el tamaño de contenedor es fijo; además el algoritmo busca maximizar la carga para cada vuelo de entre toda la mercancía a transportar. En nuestro caso la masa de fuel es fija para un vuelo dado, y el problema es continuo ya que la cantidad de combustible en cada tanque estará comprendida entre cero y el máximo que puede acoger el tanque.

La organización de esta contribución es como sigue. En la sección 2 se presentan las especificaciones de la aeronave. En la sección 3 se describe la configuración del algoritmo genético utilizado y la función de coste que define el problema a optimizar. La sección 4 muestra la aplicación al problema concreto y los resultados son presentados y comentados en la sección 5. El trabajo termina con las conclusiones y trabajos futuros.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Como es sabido, justo antes de despegar la aeronave debe repostar. La cantidad de combustible que se debe cargar se determina a partir del plan de vuelo concreto aprobado por la autoridad. Para un determinado plan le corresponderá una carga mínima obligatoria. Básicamente esta carga, además de tener en cuenta la cantidad de combustible que previsiblemente consumirán los motores (más un margen de seguridad), también contiene, o bien la cantidad de combustible necesaria para mantenerse a la espera en hipódromo durante un determinado tiempo antes de tener permiso para aterrizar en el destino, o bien la cantidad necesaria para aterrizar en el aeropuerto alternativo si no es posible hacerlo en el de destino [3].

Tomando como base la arquitectura típica del sistema de combustible de un avión comercial de largo alcance (como el A330-200), se tienen dos depósitos en cada ala, un depósito central en la panza y un depósito en la cola de la aeronave, todos ellos intercomunicados por tuberías (un total de 6 tanques). La distribución de combustible se controla por válvulas y bombas.

Los depósitos 2 y 4 (ver [6]) se denominan *Inner*, ya que se encuentran en la parte más interior de cada semi-ala. Los depósitos 1 y 5 son llamados *Outer*, situándose estos en una zona más alejada del encastre de cada ala. Los depósitos 1 y 2 son simétricos respecto a 4 y 5, a cada lado del plano vertical de simetría del avión. Además, debido a la forma del ala y por conveniencia de la distribución inercial, los depósitos *Inner* son mucho más grandes en capacidad que los *Outer*. El depósito 3 es el denominado *Central*, por estar situado en la panza de la aeronave entre los encastres de las alas. Su capacidad es del mismo orden de magnitud que los *Inner*. Por su parte el depósito 6 es conocido como *Trim Tank* ya que está dispuesto en el interior del estabilizador horizontal de trimado. Su capacidad es bastante menor al *Central* aunque algo mayor que los *Outer*.

Esta tarea de decisión sobre el repostaje se encuentra muy reglada para cada aeronave particular. La cantidad de combustible total a repostar va a ser un dato de entrada para nuestro problema.

Otro dato de entrada es el peso total de la aeronave. A partir de él se calcula el centro de gravedad (CG) objetivo que conviene tener en el eje longitudinal del avión para su maniobrabilidad y el margen de estabilidad, definido por la posición longitudinal máxima y mínima que puede alcanzar el centro de gravedad. Estos tres valores (CG objetivo, CG máximo, CG mínimo) se pueden obtener de funciones que provee el fabricante del avión. Las

usadas en este caso se presentan en las Figuras 1 y 2, generadas con magnitudes de aviones reales [4].

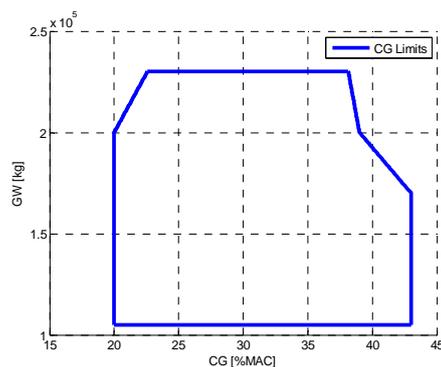


Figura 1: Límites del centro de gravedad en función de la masa total.

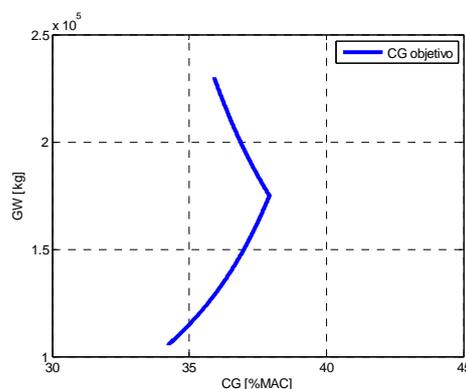


Figura 2: Centro de gravedad objetivo en función de la masa total.

El peso total de la aeronave GW (Gross Weight) viene dado por tres componentes independientes. El primero es fijo: el peso del avión en vacío EW (Empty Weight), dado por todo el conjunto estructural de la aeronave así como la carga de sistemas. Los otros dos son variables. Uno de ellos es la carga de pago del avión MP (Mass Payload), formada por tripulación, pasaje, equipaje y mercancía. La suma de la carga de EW más MP da lugar al peso sin fuel de la aeronave, ZFW (Zero Fuel Weight). El tercer conjunto es la cantidad de combustible, MF (Mass Fuel).

$$\begin{aligned} GW(kg) &= ZFW(kg) + MF(kg) \\ ZFW(kg) &= EW(kg) + MP(kg) \end{aligned} \quad (1)$$

Además diferenciamos la masa prevista para consumo, porque no toda la masa cargada se consumirá; siempre se llevan reservas que permitan llegar a un aeropuerto alternativo en caso de emergencia o mantenerse en hipódromo. Esta masa será de interés por su influencia en la seguridad operacional así que será otro dato de entrada más a nuestro problema.

La operación de repostaje consiste en distribuir la cantidad total de fuel entre los tanques. Cada compañía elige una forma de llevar a cabo esta operación durante la fase de pre-vuelo. Este orden está estudiado para mantener un llenado lógico y que mantenga el CG dentro de la envolvente si la carga de pago también se ha colocado correctamente. Sin embargo no optimiza la distribución. La distribución manual que habitualmente se utiliza, además de poder incurrir en errores humanos, resulta más lenta que si la automatizamos con alguna técnica como los algoritmos evolutivos. Además el problema de colocación de la carga de pago pasa a ser menos exigente, ya que cierto error en la colocación de la carga puede suplirse con la distribución del fuel.

3 RESTRICCIONES Y FUNCIÓN DE COSTE

El objetivo de la optimización es distribuir la carga de fuel de un avión entre los tanques haciendo que el centro de gravedad quede dentro de los límites de estabilidad y lo más cerca posible del CG objetivo. Para ello se va a definir una función de coste a minimizar. Los componentes o costes de esta función vienen dados por los siguientes criterios:

- *Coste 1*: la distancia entre el centro de gravedad resultante y el objetivo debe ser mínima (2).

$$C1 = |X_{cg_obj} - X_{cg}| + |Y_{cg_obj} - Y_{cg}| + |Z_{cg_obj} - Z_{cg}| \quad (2)$$

Donde el CG objetivo viene determinado por la masa total (ZFW+MF), y el CG de la aeronave se calcula aplicando la ley de masas (3).

$$\overline{CG} = \frac{ZFW \cdot \overline{CG}_{zfw} + \sum_{i=1}^6 (\overline{CG}_{dep_i} \cdot M_i)}{ZFW + \sum_{i=1}^6 (M_i)} \quad (3)$$

con CG_{dep_i} la posición del centro de gravedad y M_i la masa de cada depósito de combustible.

- *Coste 2*: la diferencia entre la cantidad de combustible cargada en los tanques que abastecen los motores y el combustible que previsiblemente consumirán durante el vuelo. Esto tiene como objetivo la seguridad operacional y minimizar la cantidad de fuel que habrá que redistribuir en vuelo, lo que reduce el gasto energético de las bombas (4).

$$C2 = (M_{eng1} / 2 - M_2 + M_{eng2} / 2 - M_4) / MF \quad (4)$$

Donde M_{eng} es la masa prevista para el consumo de los motores (kg), M_2 es la masa de combustible en el tanque "2" (kg) y M_4 la del "4" (kg), la de los *Inner*.

- *Coste 3*: la inversa de la diferencia entre la cantidad de fuel cargada en cada depósito frente a la crítica. Se trata de minimizar el desplazamiento del CG durante el despegue debido a la inercia que tiene el líquido a ir hacia atrás por la aceleración. Para cada depósito existe una cantidad de combustible para la cual el desplazamiento de CG es máximo dada una aceleración, cantidad que llamaremos masa crítica.

Para construir este coste se ha recurrido a una función definida a tramos para cada tanque. Dicha función vale "1" para el rango de masas en que el desplazamiento es máximo durante la operación de despegue. Fuera de ese rango se interpola hasta el valor de la función "0" en los puntos en que el desplazamiento es mínimo.

Dependiendo del avión las curvas del desplazamiento del centro de gravedad respecto a la carga de fuel en cada tanque es distinto. En la Figura 3 se presentan los correspondientes a órdenes de magnitud de aviones como el considerado en este trabajo.

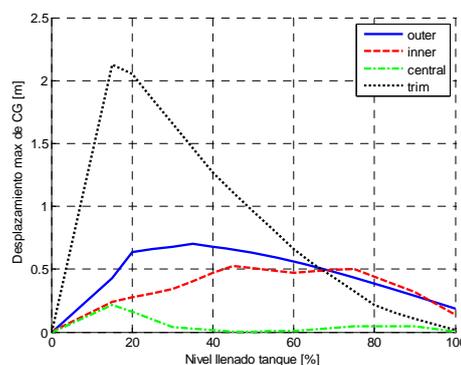


Figura 3: Desplazamiento máximo del CG para un porcentaje de llenado durante un despegue típico.

En base a esta gráfica se obtienen las funciones que dan lugar a este coste, con $\mu = M_i / M_{max_i} \cdot 100$, porcentaje de llenado de cada tanque. A modo de ejemplo se muestra en (5) la del tanque central.

$$f_{central} = \begin{cases} 1, & si \{ \mu > 10 \parallel \mu < 20 \} \\ 1 - \frac{10 - \mu}{10}, & si \{ \mu \leq 10 \} \\ 1 + \frac{20 - \mu}{80}, & si \{ \mu \geq 20 \} \end{cases} \quad (5)$$

$$C3 = f_{central} + 2 \cdot f_{inner} + f_{outer} + f_{trim}$$

- *Coste 4*: la cantidad de fuel cargada en los depósitos que no tienen tomas de repostaje (tanques internos). Se trata de minimizar el tiempo de repostaje, y por tanto el tiempo que el avión debe permanecer en tierra. Se debe tener en cuenta la cantidad que ya está cargada en el avión inicialmente (6).

$$C4 = (100M_1 + M_2 + 50M_3 + M_4 + 100M_5 + 1000M_6) / MF \quad (6)$$

- *Coste 5*: la diferencia entre las cantidades de combustibles cargadas en cada depósito para realizar la distribución lo más homogénea posible y así repartir el peso a lo largo del ala. Aunque no es crítico, a la larga disminuiría la fatiga del ala.

$$C5 = (|M_1 - M_2| + |M_4 - M_5|) / MF \quad (7)$$

La función de coste vendrá definida por la suma de esos costes, que dependen de las masas de los depósitos y datos de entrada al problema, multiplicados cada uno por un peso según su prioridad. La sintonía de esos costes se basa en la experiencia acerca del problema.

$$C(ZFW, M_{eng}, M_i) = P_1 \cdot C1(ZFW, M_i) + P_2 \cdot C2(M_{eng}, M_i) + P_3 \cdot C3(M_i) + P_4 \cdot C4(M_i) + P_5 \cdot C5(M_i)$$

Es importante observar que algunos de los costes siguen criterios contrarios entre ellos. Por ejemplo, el coste C2 obtiene su mínimo cuando la masa de fuel en los depósitos *Inner* iguala a la prevista para el consumo en el vuelo. Sin embargo, el coste C5 es mínimo cuando las masas *Inner* y *Outer* son iguales (hay que recordar que la masa máxima posible en los *Outer* es muy baja). Como las soluciones pueden ser múltiples, se buscan estos pesos para llegar a la mejor solución de compromiso basada en la experiencia. De esta manera se ha decidido dar más peso a C1 y C2 frente a los demás, y el peso más pequeño a C5.

La minimización de la función de coste está supeditada a las siguientes restricciones:

- *Restricción 1*: no superar el volumen máximo de cada depósito.

$$R1: M_i \leq M_{\max_i} \quad (9)$$

- *Restricción 2*: no permitir masas negativas.

$$R2: M_i \geq 0.0 \quad (10)$$

- *Restricción 3*: no salir del rango válido del centro de gravedad impuesto (11).

$$R3: X_{CG\min}(ZFW + MF) \leq X_{CG} \leq X_{CG\max}(ZFW + MF)$$

- *Restricción 4*: mínima cantidad de combustible obligatoria.

$$R4: \sum_{i=1}^6 M_i \geq MF \quad (12)$$

- *Restricción 5*: dejar espacio libre suficiente en el *Trim Tank* para retrasar el CG durante el vuelo, siendo η un porcentaje de la masa máxima de este tanque prefijado en base a la experiencia sobre el retraso del CG necesario durante un vuelo.

$$R5: M_6 \leq \eta M_{\max_6} \quad (13)$$

4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

El repostaje en tierra tiene una doble vertiente: la resolución del problema de optimización y la sintonización de la función objetivo (los pesos).

El vector de decisión es la cantidad de fuel que hay que introducir en cada depósito. Lo más directo es elegir la masa como magnitud de esta cantidad. Tenemos seis depósitos, así que tendremos un vector de decisión de seis componentes ordenadas según el número que identifica cada depósito.

$$V_{decision} = [M1 \ M2 \ M3 \ M4 \ M5 \ M6]$$

Dado que la suma de las cantidades de cada depósito debe ser la masa total de fuel que se ha determinado para la operación de la aeronave, la sexta componente es la diferencia entre la masa total (dato) y la suma del resto de componentes. Hemos decidido que esta componente sea el tanque central (M3) por ser el que tiene mayor tamaño y está más centrado en el avión.

$$V_{individuo} = [M1 \ M2 \ M4 \ M5 \ M6]$$

Las entradas son: masa total de fuel, masa total de la aeronave (para obtener los límites de CG y el CG objetivo), y la masa de fuel prevista para el consumo.

Respecto al algoritmo genético, aunque la configuración la puede determinar el usuario, hemos considerado una población inicial de $N=30$ individuos, de los cuales tomamos $N_p=8$ parejas de padres en cada iteración. Para generar la población inicial hemos considerado varias opciones, por ejemplo, generar de manera aleatoria cada componente del vector individuo, pero puede generar soluciones no factibles. Otra opción es el llenado secuencial de los depósitos, repartiendo la masa total en cascada, y después perturbar cada individuo sumándole una cantidad aleatoria entre 0 y el 10% de la masa máxima del tanque en cuestión. La mayor parte de los individuos son factibles, cumpliendo todas las restricciones, pero la perturbación asimétrica desplaza el CG hacia la izquierda o derecha, algo no deseable. Por lo tanto, se optó por aplicar esta última opción pero con una perturbación simétrica (sumamos lo mismo a los tanques que se encuentran a un lado y al otro del ala).

4.1 OPERADORES GENÉTICOS

Los padres son seleccionados de entre todos los individuos siguiendo el método de la ruleta.

Aunque se han considerado tres versiones del cruce (asimétrico, binario simulado y cruce binario con restricciones), pero se ha optado por la primera por

ser la más sencilla ya que no se obtenía una mejora significativa con las otras tras varios experimentos.

Para la mutación de hijos obtenidos en el cruce hemos considerado mutación uniforme, mutación semi-aleatoria sobre un número aleatorio de componentes (se suma a las componentes a mutar un valor comprendido entre 0 y el 20% de la masa máxima del tanque), y si de forma aleatoria una componente del vector es seleccionada para ser mutada, también se muta el tanque simétrico, que ha resultado la elegida por dar mejores resultados.

En la población de partida se sustituyen los padres elegidos por los hijos resultantes del cruce y mutación de los primeros.

Como criterio de parada se ha establecido un máximo de 5000 iteraciones que son asumibles en tiempo de computación y la convergencia es buena. También se tiene en cuenta para parar la ejecución si la aptitud del mejor individuo de la población no mejora durante 100 iteraciones consecutivas.

5 VALIDACIÓN Y RESULTADOS

El algoritmo diseñado es codificable directamente dentro de la computadora FCMS (Sistema de Control y Monitorización de Fuel) del avión. Los datos necesarios son de dos tipos: fijos, correspondientes a la geometría del avión, y los variables, correspondientes a los parámetros de entrada (ZFW, CG, M_{eng}), que provienen de la conexión digital ARINC-429 de otra computadora (el FMGC, encargada de la gestión del plan de vuelo). La solución del problema son las masas de combustible en cada tanque. Una vez se tienen estos valores, el FCMS se encarga de abrir las válvulas de paso de cada tanque y bombear el combustible a cada tanque hasta alcanzar dichas masas.

El tiempo de resolución no puede ser mayor de 5 minutos ya que la fase de pre-vuelo se puede ver afectada por retrasos.

5.1 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN

Partimos de una solución lejana a los óptimos y además no factible, por ejemplo:

$$v_{individuo} |_{inic} [2865, 0, 0, 2865, 40000]$$

Hemos considerado en este escenario que la aeronave repostará 75000 kg de combustible, con una carga de pago de 10000 kg, situándose el CG con ZFW a 0.4 m por detrás del punto de referencia, borde de ataque del MAC (cuerda media aerodinámica). Con esto, el vector de decisión inicial sería:

$$v_{decision} |_{inic} = \begin{bmatrix} 2865 \\ 0 \\ 75000 - 2865 - 2865 - 40000 \\ 0 \\ 2865 \\ 40000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2865 \\ 0 \\ 29270 \\ 0 \\ 2865 \\ 40000 \end{bmatrix}$$

Es decir, no cargamos los tanques *Inner*, cargamos los tanques *Outer* al máximo, el *Central* casi al completo también, y el *Trim Tank* muy por encima de su capacidad. Evidentemente esta solución no es factible (R1). Además la posición del CG también está fuera del margen de estabilidad, situándose muy por detrás del límite situado para la configuración de este escenario (7 m del origen).

Aplicando el algoritmo, la evolución de los costes para el mejor individuo de la población en cada iteración se muestra en la Figura 4. Observamos que el algoritmo enseguida tiende a generar soluciones factibles y a empezar a disminuir los costes, sobre todo de aquellos que más peso tienen en la función criterio como es la posición del CG. Por otra parte, se observa también como una vez encontrada una solución bastante aceptable (a partir de la iteración 200 aproximadamente), ya es muy difícil mejorar al individuo encontrado.

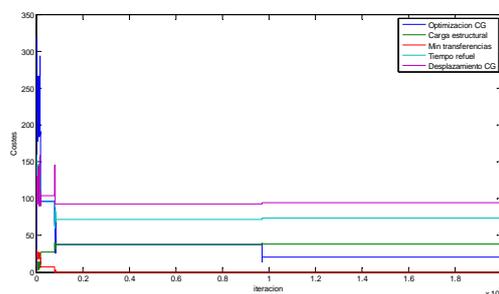


Figura 4: Evolución de los costes para cada variable.

La Figura 5 muestra la evolución de la aptitud máxima de la población en cada iteración. En las primeras iteraciones es nula, debido a que dichos individuos no son solución factible. En el momento que se encuentra un individuo factible se produce un salto en la aptitud. A partir de aquí el algoritmo trata de encontrar una mejor mediante cruce y mutación.

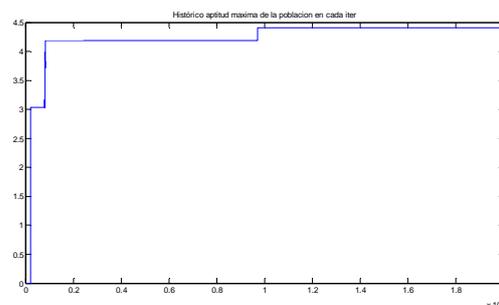


Figura 5: Aptitud del mejor individuo.

Es evidente que en nuestro diseño prima la optimización de la posición longitudinal del CG, lo que se hace evidente si presentamos la evolución del CG del mejor individuo en cada iteración (Figura 6).

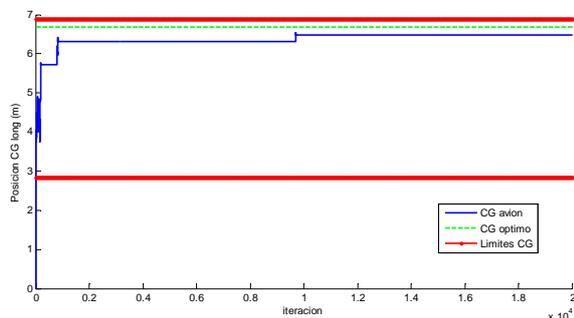


Figura 6: Evolución del CG del fuel.

El CG tiende al óptimo pero sin llegar a alcanzarlo ya que los demás costes lo impiden. Nótese que el CG inicial es nulo, debido a que en la primera iteración ya se ha perturbado la solución inicial.

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS PESOS

Se trata de un problema con varios objetivos que deben cumplirse, cada uno de ellos con un coste asociado que se debe determinar, ya que la función de coste es la suma ponderada de todos ellos. Por ejemplo, si damos pesos muy grandes al posicionamiento del CG, la solución convergerá a una distribución del fuel cercana al CG óptimo, sin tener en cuenta los otros costes que pueden no alcanzar buenas soluciones (Figura 7).

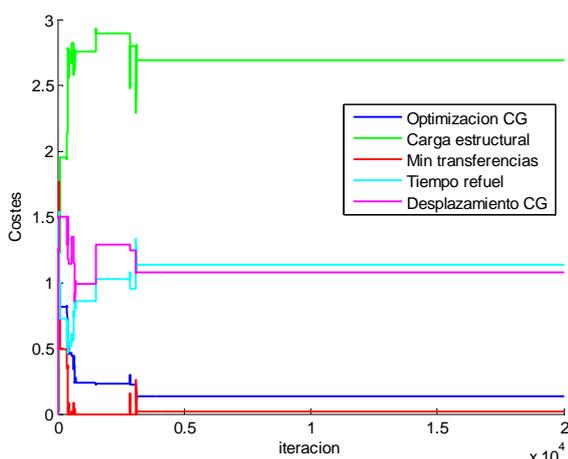


Figura 7: Evolución de los costes asociados al mejor individuo para los pesos $P = [100 \ 1 \ 1 \ 1]$.

En la Figura 8 se muestra la evolución del CG del mejor individuo. Efectivamente el CG está muy cerca del CG óptimo, a unos 30 cm de él.

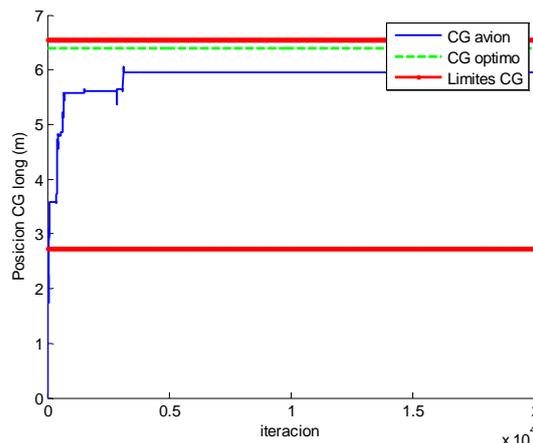


Figura 8: Evolución del CG del fuel completo para una distribución de pesos $P = [100 \ 1 \ 1 \ 1]$.

Si en vez de dar tanto peso al posicionamiento del CG se lo damos a otras variables como, por ejemplo, a la minimización del tiempo de transferencia durante el repostaje y a las transferencias durante el vuelo, podemos observar cómo el comportamiento varía bastante respecto al anterior (Figura 9).

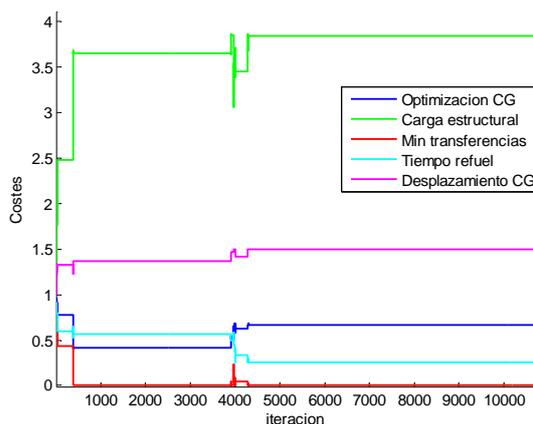


Figura 9: Evolución de los costes asociados al mejor individuo para los pesos $P=[1 \ 1 \ 100 \ 100 \ 1]$.

El algoritmos disminuye esos dos factores, y la evolución del CG no tiende a converger al óptimo.

Por otra parte, si igualamos todos los costes, el algoritmo tenderá a minimizar unos costes frente a otros de manera indistinta, con lo que las soluciones del algoritmo serán dispares y no tendrá mucho sentido. Por ello conviene jerarquizar los costes para que haya una tendencia hacia lo que mejora de manera global la solución basándonos en el conocimiento cualitativo del experto.

En nuestro caso se ha premiado ante todo el posicionamiento del CG porque es el principal objetivo de diseño del control. El segundo criterio prioritario ha sido intentar disminuir las transferencias durante el vuelo; esto es, introducir en

los tanques *Inner* la masa de fuel más cercana posible a la que previsiblemente consumirán los motores en el vuelo concreto. Esto es importante ya que, ante un fallo total del sistema de transferencia de combustible, los motores no tendrían problema en seguir siendo alimentados. Por ello finalmente se ha optado por el siguiente reparto:

$$P = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 70 \\ 90 \\ 60 \\ 80 \end{bmatrix}$$

5.3 COMPARACIÓN CON LA SOLUCIÓN CLÁSICA

Una cuestión importante es si se mejora la solución que se toma habitualmente en el sector aeronáutico, es decir, el llenado jerárquico de unos tanques concretos hasta cierta cantidad, después otros, y así sucesivamente hasta llegar a introducir toda la masa prevista.

Ejecutamos el algoritmo tomando como solución inicial la clásica, considerando el escenario de 65000 kg de combustible, carga de pago de 10000 kg y situándose el CG del avión para ZFW 0.4 m por detrás del punto de referencia. Se considera que el 80% del combustible será consumido por los motores durante el vuelo normal. La evolución de los costes se muestra en la Figura 10.

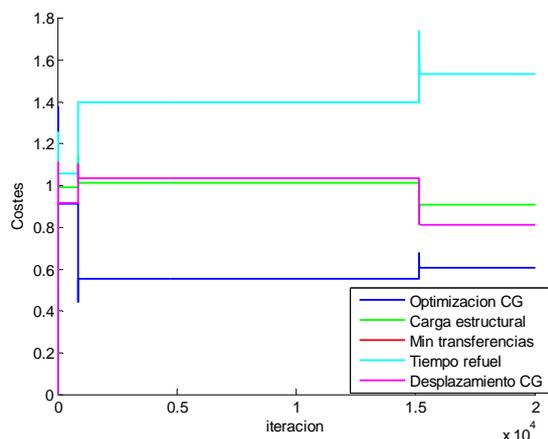


Figura 10: Evolución de los costes asociados al mejor individuo en cada iteración para los pesos.

Observamos como el coste asociado al CG es de los más premiados en el sentido que el algoritmo tiende a disminuirlo rápidamente. Si presentamos la gráfica de su evolución podemos ver que efectivamente la solución es bastante aceptable, con el CG situado en los márgenes y cerca del óptimo (Figura 11).

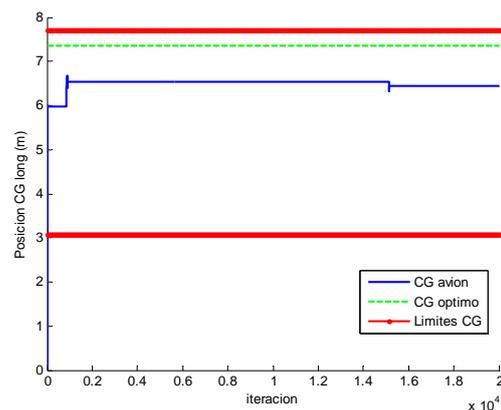


Figura 11: Evolución del CG del fuel para el individuo mejor de cada iteración.

La minimización de transferencias no se observa en la gráfica de los costes pues está con coste “0” todo el rato. Eso es debido a que desde un principio más del 80% de la masa del fuel se encuentra en los tanques *Inner*, por lo que el coste de las transferencias es menor. El algoritmo ha premiado las soluciones en las que al menos esa cantidad de fuel permanece en los *Inner*.

También tiene una clara influencia la minimización del desplazamiento del CG durante el despegue en cada tanque. En las primeras iteraciones el algoritmo encuentra una solución en la que se tiene un CG mejor posicionado a costa de aumentar el desplazamiento de éste durante el despegue. Sin embargo, al evolucionar, se llega a encontrar una solución aún mejor en la que con un leve aumento del coste de la posición del CG se disminuye sustancialmente el coste de su desplazamiento.

El resultado final del algoritmo es el siguiente. Partiendo de una solución inicial de diseño clásica, siguiendo la jerarquía de llenado para 65000 kg de combustible, que es:

$$v_{decision}|_{inic} = [2865, 28435, 0, 28435, 2865, 2400]$$

Donde los dos tanques *Outer* están completos, los *Inner* casi completos (56870 kg, es decir, 2 x 28425 kg.), el *Central* vacío y el *Trim* con lo restante, el CG del combustible queda a 5.7735 m por detrás del origen de referencia. El vector de costes sería:

$$C|_{inic} = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 158.91 \\ 38.55 \\ 0 \\ 46.61 \\ 109.09 \end{bmatrix}$$

La solución final seleccionada por el mecanismo evolutivo es la siguiente:

$$v_{decision}|_{final} = [2852,25681,3519,25681,2852,4414]$$

Es decir, respecto a la original, se retira fuel de los *Outer* y de los *Inner* (51362 kg), sin dejar de mantener prácticamente todo el fuel suficiente para los motores durante el vuelo) y se coloca en el *Central* y en el *Trim*. Con esta distribución el CG del combustible queda a 6.4467 metros por detrás del origen de referencia. El vector de costes sería:

$$C|_{final} = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 91.5784 \\ 34.4197 \\ 0.3973 \\ 82.9021 \\ 94.34 \end{bmatrix}$$

El CG objetivo está a 7.25 m del origen, por lo que la solución del AG está bastante más cerca del óptimo que la clásica.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La optimización heurística aplicada asegura que prácticamente todo el fuel que será consumido por los motores se encuentra en los *Inner*. Recordamos que esta cantidad de fuel es del 80% de la original. Es decir, el AG inteligentemente ha sabido retirar toda la cantidad de fuel que sobra respecto a la que se consumirá por los motores.

Esta cantidad que se retira es utilizada para llenar gran parte del *Trim Tank* de forma que se retrase el CG. Pero también es utilizada, junto con algunos kg de los *Outer*, para llevar fuel al *Central* con dos objetivos: primero, mejorar la homogenización del peso distribuido en las alas (mejora de la carga estructural) y, por otro, mejorar globalmente el desplazamiento del CG durante el despegue.

Por otra parte, la jerarquía de diseño clásica da lugar a una solución bastante buena. Esto es lo esperado, pues es consecuencia del estudio de expertos del tema. El hecho de que no nos separemos mucho de esta solución quiere decir que el diseño de nuestra función objetivo está en la línea del conocimiento experto del problema de repostaje.

Además vale la pena notar que la convergencia del algoritmo a la solución final es buena.

Como trabajos futuros se está abordando el problema de la distribución de combustible durante el vuelo con técnicas inteligentes, en concreto con lógica borrosa. También se propone el plantear una

optimización multiobjetivo, con varios costes simultáneos [2].

Por otro lado, sería interesante validar los resultados de la optimización antes de su aplicación real puesto que el componente aleatorio de esta técnica heurística puede hacer que la solución generada no siempre sea mejor que la tradicional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Red Temática Control Inteligente (DPI2015-71320-REDT), del Ministerio de Economía y Competitividad).

Referencias

- [1] Airbus, (2017) <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/a330-200/>
- [2] Alonso Zotes, F., Santos, M. (2017) Una revisión de técnicas de optimización heurística para el diseño de trayectorias interplanetarias en misiones espaciales. RIAI, 14 (1) 1-15, 2017
- [3] Jimenez, J.F., Girón-Sierra, J.M., Insaurralde, C., Seminario, M., (2007). A simulation of aircraft fuel management system. Simulation Modelling Practice and Theory 15(5) 544-564.
- [4] Langton, R., Clark, C., Hewitt, M. and Richards, L., (2009) Aircraft fuel systems. John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Mongeau, M., Bes, C., (2003) Optimization of aircraft container loading. IEEE Trans. on Aerospace & Electronics Systems 39(1) 140-150.
- [6] Plaza Alonso, E. (2016) Sistema de control para la distribución de combustible en una aeronave basado en técnicas de la inteligencia artificial, TFM, UNED
- [7] Santos, M., de la Cruz, J.M. (2009) Algoritmos genéticos. En: Métodos de Procesamiento Avanzado e Inteligencia Artificial en Sistemas Sensores y Biosensores, Reverté, cap. 15, 321-333.
- [8] Turgut, E.T., Rosen, M.A., (2012) Relationship between fuel consumption and altitude for commercial aircraft during descent: preliminary assessment with a genetic algorithm. Aerospace Science and Technology, 17(1) 65-73.