

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

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



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



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

## Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

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

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



## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

# OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

David Rodríguez, José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega  
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla  
 {drgarcia, jalonso9, gbejarano, mortega}@us.es

## Resumen

*Este artículo analiza la eficiencia energética de un ciclo de refrigeración, generando un optimizador de referencias para el control basado en aproximaciones lineales. Se plantean dos enfoques de control: el control de potencia, en el cual se propone un controlador robusto descentralizado para la regulación de la potencia frigorífica dada por el ciclo, y el control de temperatura de recinto, en el cual se considera también la dinámica del recinto a refrigerar y se propone una estructura de control en cascada donde un controlador externo genera las referencias de potencia frigorífica al controlador interno del ciclo de refrigeración. Se analizan en simulación y también experimentalmente el seguimiento de referencias y el rechazo de perturbaciones en ambas estrategias de control.*

**Palabras clave:** Sistemas de refrigeración, Optimización estática, Control en cascada, Planta experimental.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor constituye el método más extendido para la generación de frío. Estos sistemas se utilizan en áreas tan diversas como regulación de la temperatura en estancias habitadas, almacenamiento y transporte de alimentos y múltiples procesos industriales. Dado el considerable impacto causado por el consumo energético de estos sistemas en los balances económicos y medioambientales, detallado por múltiples informes [9, 15, 16], así como teniendo en cuenta la escasez creciente de fuentes de energía fósiles y el desarrollo todavía lento de tecnologías de energía renovable, la operación óptima en términos de eficiencia energética de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor existentes se presenta como un problema clave.

En un ciclo de refrigeración se extrae energía térmica del recinto a refrigerar (en concreto del fluido secundario del evaporador) y se aporta calor al fluido secundario del condensador. Las variables manipulables son la velocidad de giro del

compresor  $N$  y la apertura de la válvula de expansión  $A_v$ , considerándose los caudales de los fluidos secundarios y sus temperaturas de entrada perturbaciones al ciclo. El principal objetivo de control es proporcionar la potencia frigorífica demandada  $\dot{Q}_e$ , lo que puede reflejarse en una referencia para la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador ( $T_{e,sec,out}$ ). Como se dispone de dos acciones de control, se plantea un segundo objetivo, consistente en producir la potencia frigorífica requerida maximizando la eficiencia energética, descrita mediante el Coeficiente de Comportamiento ( $COP$ ), cuya definición se incluye en (1).

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{comp}} \quad (1)$$

La eficiencia del evaporador (su capacidad de extraer calor de su fluido secundario), depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor. Este es mucho mayor para flujo bifásico que para vapor sobrecalentado, debido al cambio de fase, de forma que se alcanzaría alta eficiencia energética si el flujo de refrigerante en el evaporador fuese totalmente bifásico. Sin embargo, puesto que la salida del evaporador coincide con la aspiración del compresor, se debe evitar la presencia de gotas de refrigerante líquido en la succión del mismo. Esto se consigue tradicionalmente en la industria operando el sistema con un cierto grado de sobrecalentamiento del refrigerante ( $T_{SH}$ ) a la salida del evaporador, que se suele mantener bajo para alcanzar un alto  $COP$ .

Sin embargo, es posible plantear una optimización global cuya solución sea un ciclo que genere la potencia frigorífica requerida con máxima eficiencia energética. En esta línea, Jain y Alleyne plantean una optimización global que minimiza la exergía destruida [6]; se genera un ciclo óptimo a la vez que se calculan valores óptimos de las variables manipulables, útiles para estrategias de control *feed-forward*. Por su parte, Bejarano *et al.* proponen un optimizador global no lineal cuyo criterio de eficiencia es el propio  $COP$  [3, 4]. Sin embargo, la carga computacional de este optimizador no es despreciable, debido a la propia no linealidad del proceso y la exploración exhaustiva necesaria pa-

Tabla 1: Nomenclatura

Símbolos latinos		Símbolos griegos	
$A_v$	Apertura de válvula [%]	$\alpha$	Coficiente de pérdidas por convección entre el recinto y el ambiente [ $\text{W K}^{-1}$ ]
$c_p$	Calor específico a presión constante [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	$\rho$	Densidad [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$f$	Pendiente de recta de aproximación	$\omega$	Frecuencia [ $\text{rad s}^{-1}$ ]
$G(s)$	Función de transferencia	<b>Subíndices y superíndices</b>	
$\dot{m}$	Caudal másico [ $\text{kg s}^{-1}$ ]	<i>amb</i>	ambiente
$N$	Velocidad de giro del compresor [Hz]	<i>c</i>	condensador
$P$	Presión [bar]	<i>e</i>	evaporador
$\dot{Q}_e$	Potencia frigorífica [W]	<i>in</i>	entrada
$\dot{Q}_R$	Potencia térmica de la resistencia eléctrica [W]	<i>min</i>	mínimo
$R$	Resistencia eléctrica	<i>nom</i>	nominal
$T$	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	<i>out</i>	salida
$T(s)$	Función de sensibilidad complementaria	<i>ref</i>	referencia
$T_{SH}$	Grado de sobrecalentamiento [ $^{\circ}\text{C}$ ]	<i>sec</i>	fluido secundario
$V$	Volumen [ $\text{m}^3$ ]	<i>tanque</i>	tanque
$\dot{W}_{comp}$	Potencia mecánica del compresor [W]		
$W_T(s)$	Ponderación de la función de sensibilidad complementaria		

ra evitar extremos locales. En el presente trabajo se analizan los resultados en régimen permanente del sistema en cuanto a la eficiencia energética y se propone una optimización estática basada en aproximaciones lineales calculadas en base a la característica estática del sistema, de forma que se reduce el tiempo de cálculo en gran medida.

En cuanto al control, la dificultad de controlar este tipo de proceso reside en las altas inercias térmicas, el alto acoplamiento de las variables del sistema y su carácter fuertemente no lineal. En este trabajo se plantean dos enfoques de control: control en potencia y control de temperatura de recinto. En el control en potencia, se le exige al ciclo que satisfaga una cierta demanda de frío  $\dot{Q}_e^{ref}$ , la cual, dada una cierta temperatura de entrada del fluido secundario del evaporador  $T_{e,sec,in}$  y un cierto caudal  $\dot{m}_{e,sec}$ , se refleja en una referencia para  $T_{e,sec,out}$ , de acuerdo a (2).

$$T_{e,sec,out}^{ref} = T_{e,sec,in} - \frac{\dot{Q}_e^{ref}}{c_{p,e,sec} \dot{m}_{e,sec}} \quad (2)$$

Las técnicas lineales de control más utilizadas en la literatura son el control descentralizado [8, 17], el control multivariable por desacoplo [14], control LQG [12, 13], control predictivo [5, 10] y control robusto  $H_{\infty}$  [1, 7]. En este trabajo se presenta un controlador robusto descentralizado diseñado con el método de la parametrización afín por cancelación de dinámica, que se prueba en simulación tanto en seguimiento de referencia de potencia, co-

mo en rechazo de perturbaciones al ciclo.

En el caso del control de temperatura de recinto, es necesario tener en cuenta también la dinámica del mismo, en el cual hay un cierto volumen de fluido secundario almacenado, del cual se extrae un cierto caudal que se hace pasar por el evaporador del ciclo y se recircula al propio recinto. Para simular la carga térmica se supone que existe un aporte externo de calor al recinto. En este caso  $T_{e,sec,in}$  se coincidiría con la temperatura del tanque  $T_{tanque}$ , supuesta homogeneización de la temperatura del fluido, y es esta la variable a controlar, actuando la potencia frigorífica generada por el ciclo como acción de control para el controlador de la temperatura del recinto. Se propone en este trabajo una estructura de control en cascada, en la cual un controlador externo genera la referencia de potencia para el ciclo, mientras que un controlador interno se encarga de satisfacer dicha demanda mediante la variación de  $N$  y  $A_v$ . Se analizan en simulación el seguimiento de referencia de la temperatura del recinto, así como el rechazo de perturbaciones sobre el aporte externo de calor.

Ambas estrategias de control han sido asimismo aplicadas a una planta experimental de refrigeración situada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, cuya descripción puede consultarse en la bibliografía asociada [2]. El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se dan algunos detalles sobre el simulador del ciclo de refrigeración y se describe el modelo térmico del recinto a

refrigerar. La Sección 3 está dedicada a la optimización estática de las referencias para el control del ciclo, mientras que en las Secciones 4 y 5 se analizan en simulación y experimentalmente los resultados de la aplicación del controlador de potencia frigorífica y de temperatura de recinto, respectivamente. Finalmente, en la Sección 6 se resumen las principales conclusiones y se proponen algunos trabajos futuros.

## 2. SIMULADOR DEL SISTEMA

La Figura 1 muestra el simulador dinámico desarrollado para el ciclo de refrigeración, que se conecta al simulador del recinto a través del fluido secundario.

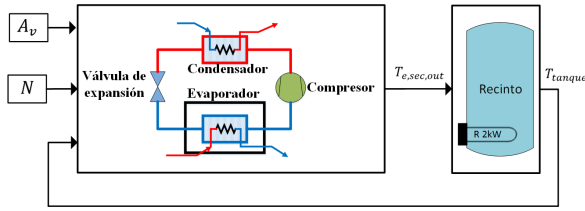


Figura 1: Simulador del ciclo de refrigeración y el recinto a refrigerar

Para el desarrollo de este simulador se ha asumido que la dinámica del condensador es dominante sobre el resto de los componentes del sistema [3]. El modelo térmico del recinto se muestra en (3), donde se aplica un balance de potencia incluyendo la potencia frigorífica generada por el ciclo  $\dot{Q}_e$ , el aporte externo de calor (modelado como una resistencia eléctrica que genera la potencia térmica  $\dot{Q}_R$ ) y las pérdidas térmicas con el ambiente.

$$\begin{aligned} \rho_{e,sec} c_{p,e,sec} V_{tanque} \frac{dT_{tanque}}{dt} = \\ = \dot{Q}_R - \dot{Q}_e - \alpha (T_{tanque} - T_{amb}) \end{aligned} \quad (3)$$

Las pérdidas térmicas se consideran pequeñas en comparación con las otras potencias, de forma que se desprecian en los cálculos siguientes. El sistema cuenta con dos entradas manipulables que se corresponden con el porcentaje de apertura de la válvula de expansión  $A_v \in [10, 100] \%$  y la velocidad de giro del compresor  $N \in [30, 50] \text{ Hz}$ . Como variables de interés se tienen  $T_{e,sec,out}$ ,  $T_{e,sec,in}$  (que será considerada como la temperatura del recinto  $T_{tanque}$ , ya que en la planta experimental a partir de la que se ha desarrollado el simulador no se tienen medidas directas de la temperatura del recinto, como se muestra en la Figura 2),  $T_{SH}$  y  $\dot{Q}_e$ . Como perturbaciones del sistema se tienen  $T_{c,sec,in}$ ,  $\dot{m}_{c,sec}$ ,  $P_{c,sec}$ ,  $\dot{m}_{e,sec}$ ,  $P_{e,sec}$ ,  $T_{amb}$  y  $\dot{Q}_R$ , cuyos valores nominales, mínimos y máximos esperados se recogen en la Tabla 2. El simulador

del ciclo ha sido ajustado a la planta experimental citada anteriormente mediante identificación en régimen permanente de los parámetros de cada uno de los elementos del ciclo [11].

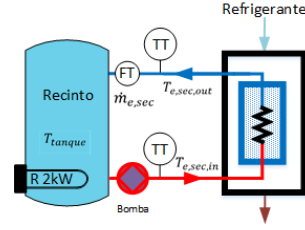


Figura 2: P&ID del recinto experimental

Tabla 2: Condiciones nominales de las perturbaciones al sistema y valores mínimos y máximos considerados.

Perturbación	Valor nominal	Valor mínimo	Valor máximo
$T_{c,sec,in}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	30	27	33
$\dot{m}_{c,sec}$ [ $\text{kg s}^{-1}$ ]	0.150	0.125	0.175
$P_{c,sec}$ [bar]	1	-	-
$\dot{m}_{e,sec}$ [ $\text{kg s}^{-1}$ ]	0.0645	0.0545	0.0745
$P_{e,sec}$ [bar]	1	-	-
$T_{amb}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25	-	-
$\dot{Q}_R$ [W]	-	0	2000

## 3. OPTIMIZACIÓN ESTÁTICA

Se han realizado simulaciones bajo distintas condiciones de perturbaciones y de variables manipulables del ciclo, considerado los rangos indicados en la Tabla 2. En la Figura 3 se muestran los valores de  $COP$  en equilibrio para una cierta apertura de válvula constante e imponiendo diferentes valores de las perturbaciones al ciclo. Esta gráfica debe analizarse cualitativamente, ya que la tendencia es idéntica para todo el rango de  $A_v$ . Se observa que, para las condiciones de funcionamiento evaluadas, el valor máximo de  $COP$  se alcanza para la velocidad mínima de compresor.

Por otro lado, en la Figura 4 se muestra la variación de la potencia frigorífica para valores nominales de las perturbaciones e imponiendo diferentes valores de las variables manipulables, donde se pueden apreciar el rango de potencia que se consigue para cada velocidad del compresor. Se observa que, dada una cierta potencia frigorífica, esta puede generarse con todo el rango del compresor, excepto en los extremos del intervalo admisible de potencias. De este modo, la forma óptima de satisfacer una cierta demanda de frío es imponer la mínima velocidad del compresor siempre que sea posible. Esta imposición se realiza de cara al control mediante la referencia de  $T_{SH}$ , ya que la re-



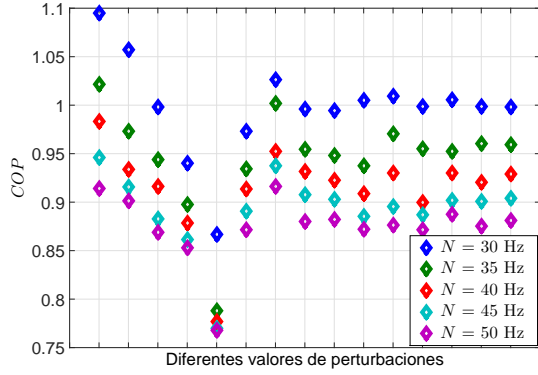


Figura 3:  $COP$  en régimen permanente para diferentes valores de perturbaciones, con  $A_v$  constante

ferencia de  $\dot{Q}_e$  o equivalentemente  $T_{e,sec,out}$  viene impuesta por la demanda de frío.

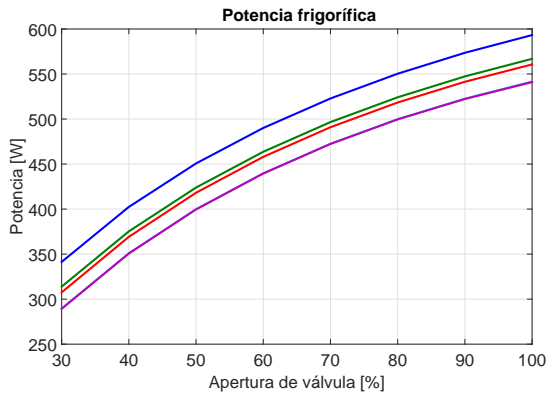


Figura 4: Rango de potencia frigorífica generada

En base a las conclusiones extraídas se ha diseñado un generador de referencia para el grado de sobrecalentamiento que fuerza al ciclo a una velocidad de compresor mínima para la obtención de la potencia frigorífica deseada. Para estimar la consigna  $T_{SH}^{ref}$  se ha realizado el siguiente método en base a datos de simulación. Manteniendo constante  $N = 30$  Hz, se ha barrido todo el rango admisible de  $A_v$  con diferentes valores de las perturbaciones  $T_{c,sec,in}$ ,  $\dot{m}_{c,sec}$ ,  $T_{e,sec,in}$  y  $\dot{m}_{e,sec}$ , despreciando esta última al no producir variaciones apreciables sobre  $T_{SH}$ . Una vez recogidos los valores de  $T_{SH}$  para los rangos indicados en la Tabla 2, se han buscado relaciones, mediante rectas con pendiente variable que han sido a su vez calculadas mediante simulación, con cada una de las perturbaciones y, en base a un punto de equilibrio precalculado para las condiciones nominales del sistema, se estima  $T_{SH}^{ref}$  como la suma de un valor nominal conocido y la aportación de cada una de las variaciones de las perturbaciones con respecto a las condiciones nominales, como se indica en (4). En la Figura 5 se muestran algunos resultados generados por el

estimador en comparación con los que genera el optimizador no lineal citado en la Sección 1 como referencias óptimas [4].

$$T_{SH}^{ref} = T_{SH,nom} + f(\dot{m}_{c,sec})(\dot{m}_{c,sec} - \dot{m}_{c,sec,nom}) + f(T_{c,sec,in})(T_{c,sec,in} - T_{c,sec,in,nom}) + f(T_{e,sec,in})(T_{e,sec,in} - T_{e,sec,in,nom}) \quad (4)$$

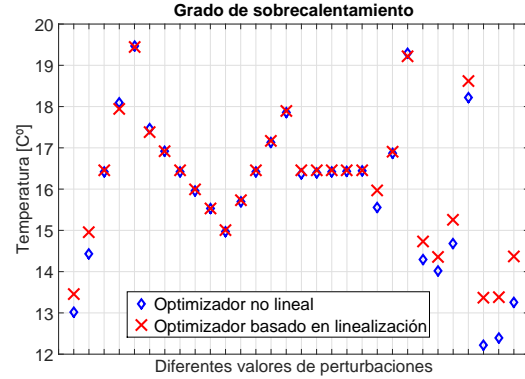


Figura 5: Estimador de valores admisibles de  $T_{SH}$  para  $N = 30$  Hz

## 4. CONTROL EN POTENCIA

### 4.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se utilizan técnicas de control robusto para diseñar un controlador descentralizado, donde  $T_{e,sec,out}$  se controla manipulando  $A_v$ , y  $T_{SH}$  se controla mediante  $N$ . En base a una función de transferencia nominal  $G_{nom}(s)$ , se consideran incertidumbres estructurales debido a la dinámica de evaporador, la cual, como se comentó en la Sección 2, había sido despreciada. Se han considerado también incertidumbres paramétricas en  $G_{nom}(s)$  debido a cómo se ve afectado el sistema según el punto de equilibrio del que parte. Posteriormente se ha definido la ponderación  $W_{T_{e,sec,out}}(s)$  de la función de sensibilidad complementaria  $T_{T_{e,sec,out}}(s)$  para  $T_{e,sec,out}$  con respecto a  $A_v$ , así como la ponderación  $W_{T_{SH}}(s)$  de la función de sensibilidad complementaria  $T_{T_{SH}}(s)$  de  $T_{SH}$  con respecto a  $N$ , de forma que se cumplan los criterios de robustez, como se muestra en las Figuras 6 y 7. Aplicando parametrización afín con cancelación de dinámica se han obtenidos los controladores desacoplados correspondientes.

Además, ya que el objetivo del optimizador, para una cierta demanda de frío, es calcular el valor de  $T_{SH}^{ref}$  tal que la velocidad del compresor sea mínima en régimen permanente, se ha realizado

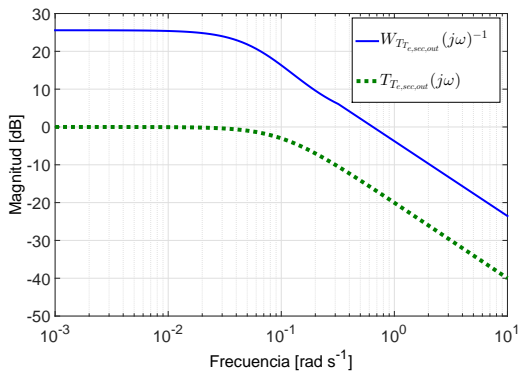


Figura 6: Ganancia de la función de sensibilidad complementaria  $T_{T_{e,sec,out}}(s)$  de  $T_{e,sec,out}$  respecto a  $A_v$  y su ponderación  $W_{T_{e,sec,out}}(s)$

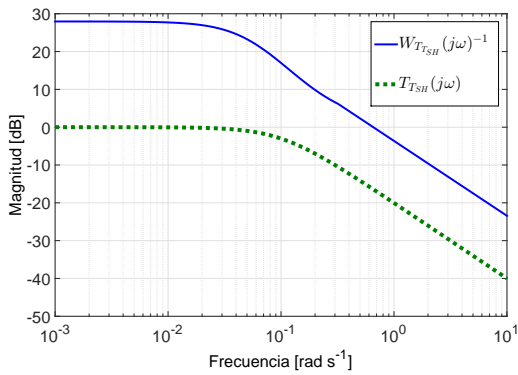


Figura 7: Ganancia de la función de sensibilidad complementaria  $T_{T_{SH}}(s)$  de  $T_{SH}$  respecto a  $N$  y su ponderación  $W_{T_{SH}}(s)$

una comparativa entre controlar  $T_{e,sec,out}$  y  $T_{SH}$  simultáneamente, y controlar solo  $T_{e,sec,out}$  dejando libre  $T_{SH}$  y fijando el compresor a su velocidad mínima. Para ello se han simulado ambos casos bajo el mismo perfil de perturbaciones mostrado en la Figura 8 y aplicando los cambios de referencia de  $Q_e$  mostrados en la Figura 9.

La Figura 10 muestra la evolución de  $T_{e,sec,out}$  y  $T_{SH}$ , cuando se controla explícitamente  $T_{SH}$  y cuando se deja libre, mientras que la Figura 11 muestra el  $COP$  alcanzado en ambos casos. Se puede observar que cuando se alcanza el equilibrio, el resultado entre controlar  $T_{SH}$  y dejarlo libre, fijando la velocidad del compresor a su valor mínimo, es prácticamente idéntico. Sin embargo, cuando el sistema experimenta una perturbación el  $COP$  obtenido para el caso del  $T_{SH}$  controlado es inferior al caso en que se deja libre, por lo que se llega a la conclusión que para las condiciones de funcionamiento del sistema la forma óptima de satisfacer la demanda de frío es manteniendo fija la velocidad del compresor a su valor mínimo.

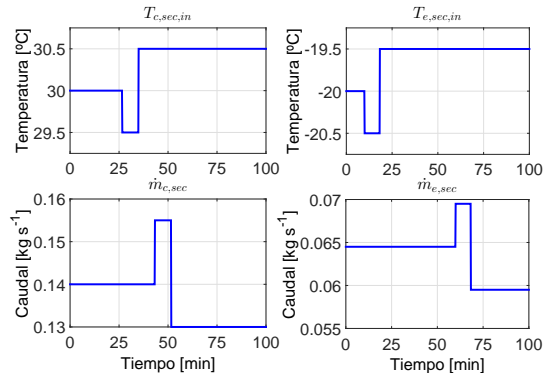


Figura 8: Perfil de perturbaciones

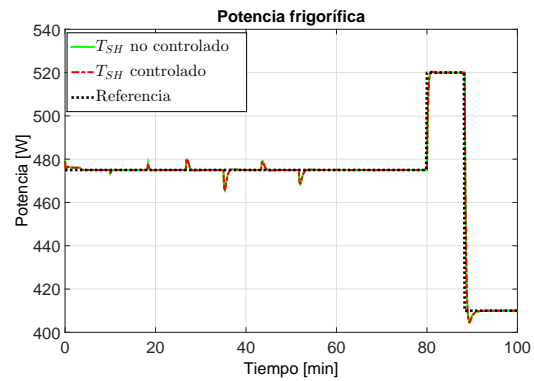


Figura 9: Potencia frigorífica generada

## 4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se pretenden replicar los resultados de simulación en un experimento real, para lo que se utiliza la planta experimental citada en la Sección 1 [2]. La planta puede configurarse con hasta 2 compresores y hasta 2 evaporadores. Cada evaporador está conectado por un circuito de fluido secundario a un tanque, de forma que se puede trabajar a temperaturas de referencia de 5°C y -20°C. Se dispone de sensores de temperatura y presión en los puntos característicos del sistema. Además, existe un sensor de caudal para cada fluido secundario, así como una bomba que permite su recirculación. Para simular la carga térmica en los tanques se dispone de dos resistencias eléctricas. El refrigerante utilizado es  $R404a$ , mientras que los fluidos de los circuitos secundarios son una solución acuosa de glicol. El condensador empleado es de flujo cruzado, cuyo fluido secundario es el aire exterior que se mueve mediante un ventilador.

Por motivos técnicos, los experimentos se han realizado en el tanque a 5°C. Esto implica un punto de funcionamiento diferente al estudiado en la simulación mostrada anteriormente, por tanto el controlador diseñado ha sido reajustado. Además,

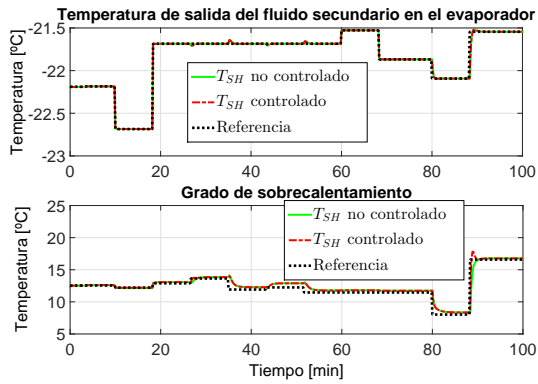


Figura 10: Resultados del control de  $T_{e,sec,out}$  y  $T_{SH}$

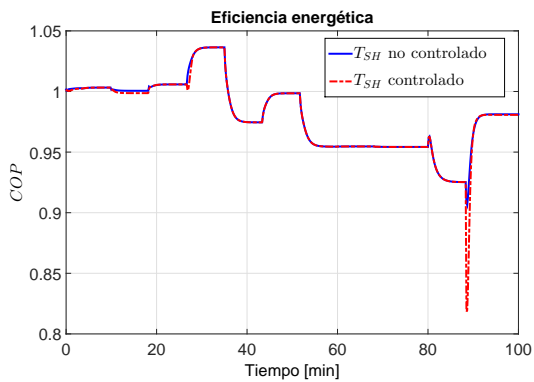


Figura 11: Eficiencia energética

debido al sobredimensionamiento del condensador se ha implementado un controlador *todo-nada* sobre el ventilador con el fin de ajustar la presión del condensador a la presión obtenida en simulación.

Siguiendo las conclusiones del estudio realizado en simulación, se decide no controlar  $T_{SH}$ , imponiendo  $N = 30$  Hz. En el experimento de la Figura 12 se replican los dos cambios de referencia de potencia de la Figura 9: el primero en el minuto 51 aproximadamente con un escalón de 50 W, mientras que el segundo se realiza en el minuto 64 con un escalón negativo de 100 W. Para mantener constante a  $5^{\circ}\text{C}$  la temperatura de entrada del fluido secundario al evaporador se ha diseñado un controlador que ajusta la potencia térmica aportada por la resistencia eléctrica  $\dot{Q}_R$ .

El rizado que se observa en la potencia frigorífica generada es debido al control *todo-nada* implementado para el ventilador del condensador, ya que la variación de la presión del condensador afecta a los caudales del ciclo y por tanto a la transferencia de calor del evaporador. En la segunda subfigura se puede observar que el controlador alcanza las referencias pedidas con un tiempo de subida de unos 74 segundos con una sobreoscila-

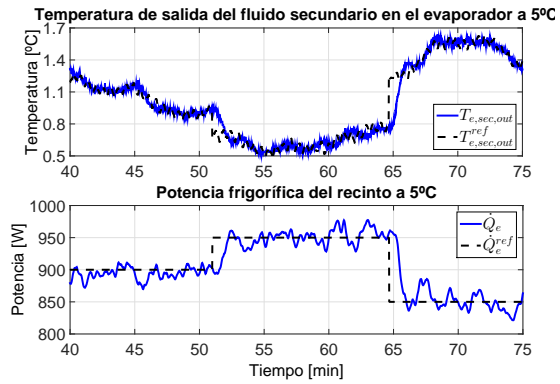


Figura 12: Experimento de control en potencia

ción del 20%. Los resultados de control se pueden considerar suficientes como primera aproximación para el control de este proceso. Asimismo, en la primera subfigura se puede observar que los cambios de referencia de potencia frigorífica provocan cambios de referencia sobre  $T_{e,sec,out}$ , que es la variable realmente controlada mediante  $A_v$ .

## 5. CONTROL DE TEMPERATURA DE RECINTO

### 5.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez diseñado el control de potencia se aplica la generación de frío para controlar la temperatura de un recinto. Para ello, como muestra la Figura 1, se ha añadido el modelo térmico del recinto basado en (3). Se propone la estrategia de control en cascada mostrada en la Figura 13. Dada  $T_{tanque}^{ref}$  y conocida  $T_{tanque}$ , la cual es indirectamente medida, se calcula el valor de potencia deseada  $\dot{Q}_e^{ref}$  mediante el controlador externo PI. Una vez conocida la referencia de potencia, el controlador interno se corresponde con el desarrollado en la Sección 4, el cual en base a las conclusiones extraídas se realizará únicamente controlando  $T_{e,sec,out}$  por medio de  $A_v$  y manteniendo el compresor a su velocidad mínima y dejando  $T_{SH}$  libre. En la Figura 14 se pueden observar los resultados del control de la temperatura del recinto y la potencia como acción de control del controlador externo.

### 5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se replica experimentalmente el control en cascada diseñado y aplicado en los resultados de simulación obtenidos en la Figura 14. De manera análoga al primer experimento, se han adaptado las ganancias del controlador para el recinto a  $5^{\circ}\text{C}$  de la planta experimental y se ha utilizado un con-

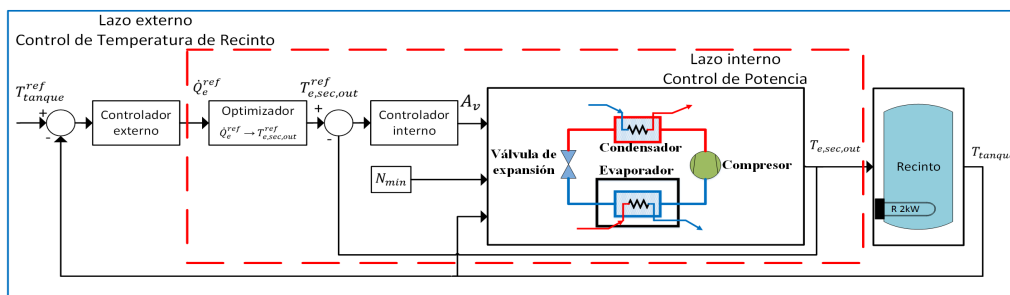


Figura 13: Estructura de control en cascada para la temperatura del recinto a refrigerar

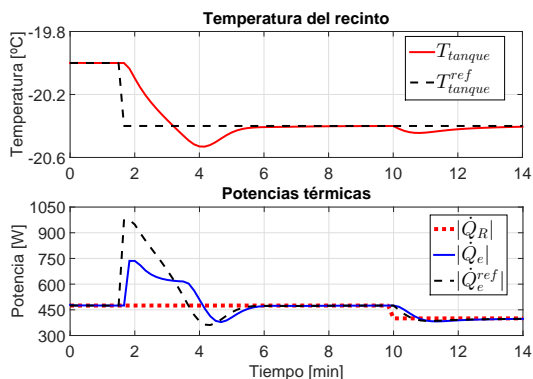


Figura 14: Resultados de simulación del control en cascada de la temperatura del recinto

trol *todo-nada* para la presión del condensador. En este caso la carga térmica del recinto simulada mediante la resistencia eléctrica actúa como una perturbación a la temperatura del recinto.

En la Figura 15 se muestran los resultados experimentales obtenidos, donde se realiza un cambio de referencia en la temperatura del tanque en el minuto 57 aproximadamente de  $-0.4^{\circ}\text{C}$ , mientras que se impone una reducción del 10% en la potencia térmica aportada por la resistencia en el minuto 87 aproximadamente.

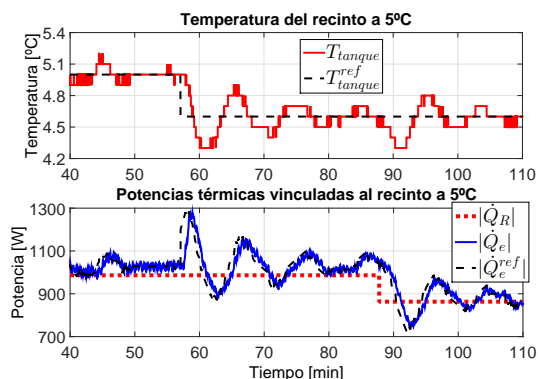


Figura 15: Resultados experimentales del control en cascada de la temperatura del recinto

En la primera subfigura se muestra la temperatura del tanque y su referencia, mientras que en la segunda aparecen la potencia frigorífica generada por el ciclo y su referencia (consecuencia del control en cascada), así como la potencia térmica generada por la resistencia. En el cambio de referencia se obtiene un tiempo de subida de 130 segundos y una sobreoscilación del 70%, mientras que se puede observar cómo el controlador rechaza la perturbación en la temperatura y cómo la potencia frigorífica se adapta rápidamente al cambio aplicado sobre la resistencia. Estos resultados preliminares significan un punto de partida para mejorar el control en futuros experimentos.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado un optimizador estático para la referencia del grado de sobrecalentamiento de un ciclo de refrigeración. En base al análisis estático del comportamiento del ciclo, se han generado una serie de aproximaciones lineales que permiten calcular el sobrecalentamiento correspondiente a la máxima eficiencia del sistema para una cierta demanda de frío, que coincide en un rango amplio de condiciones de la planta con la velocidad mínima del compresor.

Respecto al control de potencia, se ha comparado el desempeño en dos situaciones de un controlador robusto descentralizado diseñado con el método de la parametrización afín por cancelación de dinámica: por un lado controlando la potencia a través de la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador y el grado de sobrecalentamiento, y por otro lado controlando solo la potencia y fijando la velocidad del compresor a su valor mínimo. Se concluye que, sobre todo en el rechazo de perturbaciones, la eficiencia alcanzada es muy similar en ambos casos, incluso algo mejor en el controlador que deja libre el sobrecalentamiento. Se ha aplicado este controlador experimentalmente y se obtienen resultados preliminares que pueden ser mejorados mediante el reajuste de ganancias. Con

vista a un sistema real se propone en cualquier caso la implementación de un control de supervisión del grado de sobrecalentamiento, de forma que solo actúe cuando este alcanza valores cercanos a 0°C, y cuya función sería únicamente llevar el sobrecalentamiento a una zona segura de trabajo, sacrificando el objetivo de maximizar la eficiencia.

Respecto al control de temperatura, se propone una estrategia de control en cascada en la cual la potencia resulta ser la acción de control de un controlador jerárquicamente superior que regula la temperatura del recinto. Esta estrategia ha sido aplicada también experimentalmente, obteniendo resultados preliminares que igualmente pueden ser mejorados mediante reajuste de los controladores.

Como trabajo futuro, se propone reajustar los controladores experimentales así como extender el estudio de eficiencia a sistemas con múltiples recintos y/o múltiples compresores, pudiendo ser de interés el control de la velocidad del compresor.

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo, a través de los proyectos DPI2015-70973-R y DPI2016-79444-R.

### Referencias

- [1] J. A. Alfaya, G. Bejarano, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Controllability analysis and robust control of a one-stage refrigeration system. *Eur. J. of Control*, 26:53–62, 2015.
- [2] G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Design, automation and control of a two-stage, two-load-demand experimental refrigeration plant. In *23<sup>rd</sup> Mediterranean Conf. on Control and Autom., Torremolinos (Spain)*, pages 537–544, 2015.
- [3] G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and M. Vargas. On the difficulty of globally optimally controlling refrigeration systems. *Appl. Therm. Eng.*, 111:1143–1157, 2017.
- [4] G. Bejarano, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Optimización global estática de sistemas de refrigeración. In *XXXVII Jorn. de Autom., Madrid (Spain)*, pages 19–26, 2016.
- [5] H. Fallahsohi, C. Changenet, S. Placé, C. Ligeret, and X. Lin-Shi. Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator. *Int. J. of Refrig.*, 33(2):409–418, 2010.
- [6] N. Jain and A. G. Alleyne. A framework for the optimization of integrated energy systems. *Appl. Therm. Eng.*, 48:495–505, 2012.
- [7] L. S. Larsen and J. R. Holm. Modelling and multi-variable control of refrigeration systems. *ECOS 2003*, 2003.
- [8] J. Marcinichen, T. del Holanda, and C. Melo. A dual SISO controller for a vapor compression refrigeration system. In *Int. Refrig. and Air Cond. Conf.*, pages 2444, 1–8, 2008.
- [9] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Build.*, 40(3):394–398, 2008.
- [10] N. L. Ricker. Predictive hybrid control of the supermarket refrigeration benchmark process. *Control Eng. Pract.*, 18(6):608–617, 2010.
- [11] D. Rodríguez, G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. Castaño. Parameter identification of a multi-stage, multi-load-demand experimental refrigeration plant. *Control Eng. Pract.*, 60:133–147, 2017.
- [12] L. C. Schurt, C. J. L. Hermes, and A. Trofino-Neto. A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *Int. J. of Refrig.*, 32(7):1672–1682, 2009.
- [13] L. C. Schurt, C. J. L. Hermes, and A. Trofino-Neto. Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *Appl. Therm. Eng.*, 30(13):1538–1546, 2010.
- [14] Y. Shen, W.-J. Cai, and S. Li. Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems. *Control Eng. Pract.*, 18(6):652–664, 2010.
- [15] US Energy Information Administration. Residential energy consumption survey (RECS). Technical report, Energy Inf. Adm., Washington D.C, USA, 2009.
- [16] US Environmental Protection Agency. National action plan for energy efficiency: Sector collaborative on energy efficiency accomplishments and next steps.
- [17] J. Wang, C. Zhang, Y. Jing, and D. An. Study of neural network PID control in variable-frequency air-conditioning system. In *IEEE Int. Conf. on Control and Autom.*, pages 317–322, 2007.