

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Núñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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 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/>	
Control Inteligente	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN

Guillermo Bejarano, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas, Manuel G. Ortega
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
gbejarano@us.es, sufagui@gmail.com, {mvargas, mortega}@us.es

Resumen

En este trabajo se estudia el modelado dinámico de un sistema de almacenamiento de frío basado en material de cambio de fase, que permita la gestión del frío generado por una planta experimental de refrigeración por compresión de vapor, basada en criterios económicos y de satisfacción de la demanda. Se describe el diseño del sistema de almacenamiento y se propone un modelo dinámico simplificado que permita estudiar la carga y descarga del mismo. Se incluyen algunas simulaciones de carga y descarga, realizadas considerando condiciones de contorno entálpicas y másicas del refrigerante y fluido secundario acordes a las generadas por la planta experimental.

Palabras clave: Sistemas de refrigeración, Almacenamiento de energía térmica, Materiales de cambio de fase, Modelado dinámico.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía requerida por los sistemas de refrigeración se ha convertido en un pilar esencial en la estructura energética. Esta demanda está creciendo significativamente en los últimos años, tanto en aplicaciones industriales y comerciales, como para sistemas de refrigeración doméstica [16]. Algunos informes elevan al 30 % el total de la energía consumida en todo el mundo asociada a sistemas de acondicionamiento de aire o HVAC (del inglés Heating, Ventilating and Air Conditioning) [4, 9], mientras que el informe más reciente sobre consumo de energía doméstica en EEUU señala que el 28 % de la energía consumida en hogares norteamericanos se debe a refrigeradores y sistemas HVAC [24].

La generación de frío mediante sistemas de compresión de vapor, véase la Figura 1, es sin duda el método más utilizado a nivel mundial. Se utiliza un fluido refrigerante para extraer calor del flujo secundario de un evaporador a baja presión, de manera que dicho calor es cedido al ambiente mediante un condensador que trabaja a presión más alta. El compresor se encarga de elevar la presión

del refrigerante, constituyendo el principal aporte energético externo para el funcionamiento del ciclo.

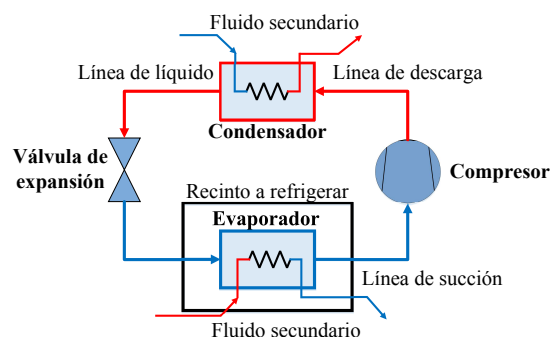


Figura 1: Sistema de refrigeración por compresión de vapor

Este método ha venido siendo utilizado desde hace décadas, si bien en sus orígenes el rendimiento energético dejaba mucho que desear. La aparición en los últimos años de nuevos diseños de sus elementos, así como el hecho de que el control automático ha permitido la incorporación de algoritmos que adaptan de forma continua los parámetros del sistema a las condiciones de trabajo, tanto en estado estacionario como en transitorio, ha permitido mejorar sensiblemente el Coeficiente de Comportamiento (*COP*, del inglés Coefficient of Performance). A pesar de ello, y debido a la creciente escasez de fuentes energéticas, el interés en seguir mejorando la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los sistemas actuales se ha visto incrementado en los últimos años.

Recientemente están apareciendo trabajos enfocados no solo a la generación de frío, sino también a la gestión del mismo. Una línea muy destacada es la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía (TES, del inglés Thermal Energy Storage) para frío, de manera que se utilicen como reservorios donde almacenar excesos de *energía frigorífica* y extraerla cuando sea necesario. Entre las ventajas ofrecidas por estos sistemas de almacenamiento, destacan la oportunidad de flexibilizar las condiciones de operación, el diseño de equipos más

Tabla 1: Nomenclatura

Símbolos latinos		Subíndices y superíndices	
COP	Coefficiente de Comportamiento	$cond$	conducción
c_p	Calor específico a presión constante [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]	$conv$	convección
e	Espesor [m]	env	entorno
h	Entalpía específica [$J\ kg^{-1}$]	ext	exterior
\dot{m}	Caudal másico [$kg\ s^{-1}$]	in	entrada
n	Número de elementos	$ints$	interno
PCM	Material de cambio de fase	$intm$	fluido intermedio
\dot{Q}	Potencia térmica [W]	lat	estado latente
R	Resistencia térmica [$K\ W^{-1}$]	$lat-$	entalpía mínima en zona latente
r	Radio interior [m]	$lat+$	entalpía máxima en zona latente
T	Temperatura [K]	out	salida
TES	Sistema de almacenamiento de energía	pcm	PCM
t	Tiempo [s]	pcm_l	PCM en fase líquida
V	Volumen [m^3]	pcm_s	PCM en fase sólida
Símbolos griegos		ref	refrigerante
α	Coefficiente de transferencia de calor por convección [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]	ref_v	refrigerante en fase vapor
ε	Eficiencia del intercambio de calor	ref_2	refrigerante en zona bifásica
ζ	Fracción de la longitud total del intercambiador	sec	fluido secundario
κ	Conductividad térmica [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]	$wall$	pared
ρ	Densidad [$kg\ m^{-3}$]		

pequeños, un uso más eficiente de los mismos, así como la reducción del consumo de energía [7]. De hecho, el hecho de disponer de un sistema auxiliar capaz de almacenar el exceso de frío evita que el equipo sea sobredimensionado para hacer frente a los períodos de alta demanda [10].

En el contexto de un sistema de refrigeración, la posibilidad de aprovechar el precio bajo de la energía eléctrica durante los períodos de menor demanda se valora positivamente. Sin embargo, la demanda de frío debe ser satisfecha en tiempo real, por tanto la idea de disponer de un almacén de frío que pueda ser usado en períodos de alta demanda puede evitar la necesidad de generar frío en dichos períodos, con el consiguiente ahorro económico (*peak-shifting*) [6, 18].

En el diseño de estos reservorios de frío, los sistemas basados en materiales de cambio de fase (PCM, del inglés Phase-Change Material) se han impuesto como la opción más atractiva por encima de los materiales de calor sensible, debido a sus buenas propiedades termodinámicas para el intercambio de calor, no solo por una adecuada capacidad calorífica, sino también porque la temperatura de dichos materiales no varía apreciablemente siempre que se encuentren en zona latente [11]. Esto permite almacenar la misma cantidad de energía en un volumen inferior y permite un intercambio de calor más eficiente, ya que la diferencia de temperatura entre la fuente de frío y el fluido receptor permanece uniforme a lo largo del intercambiador de calor. Por ejemplo, Oró *et*

al. ofrece una clasificación de materiales actuales de cambio de fase sólido-líquido para aplicaciones de almacenamiento de frío, indicando temperatura de fusión y capacidad calorífica en la zona latente, además de otras propiedades físicas [14].

Pero si bien es importante el diseño del sistema, tanto desde el punto de vista de la elección del material como de su capacidad de almacenamiento, no lo es menos la gestión del mismo, a fin de optimizar índices de comportamiento. Una introducción sobre esta tecnología puede encontrarse en los trabajos publicados por Wang *et al.* [25, 26, 27]. En el primero de ellos se aborda el diseño de una planta de gran escala para un sistema de aire acondicionado apoyado por un anillo de TES basados en PCM [25]. En el segundo se muestra el modelado del sistema [26], mientras que en el tercero se propone una estrategia de control básica para la gestión del mismo, consistente en la activación de módulos situados en distintos emplazamientos de la instalación [27]. Asimismo, otros trabajos presentan un análisis exergético para medir el comportamiento de un sistema de aire acondicionado cuando se incorporan múltiples TES basados en PCM, tomando como estrategia de control el uso combinado de los distintos módulos [12, 13].

Trabajos más recientes utilizan control predictivo para la gestión de sistema de refrigeración. Por ejemplo, Shafiei *et al.* presenta un esquema de control MPC para minimizar las desviaciones de consumo de energía eléctrica respecto a un consumo de referencia en una planta de refrigeración de

gran escala [21]. Para ello utiliza la energía cargada y descargada del PCM, introduciendo en el problema de optimización una referencia de la temperatura de evaporación como una variable manipulable ficticia. Posteriormente, Shafiei *et al.* presenta un controlador predictivo para la gestión del sistema de refrigeración de un camión con cámara frigorífica, al cual se le incorpora en paralelo un tanque con PCM [20]. Se utilizan el perfil de la ruta e información del tráfico, así como de las condiciones ambientales, para predecir la demanda de carga térmica durante períodos de tráfico denso. Por su parte, Schalbart *et al.* presenta la aplicación del control MPC a la gestión de un almacén frigorífico de helados conectado a un TES basado en PCM [19]. El controlador está basado en las curvas estáticas del ciclo de refrigeración y en el balance energético entre el ciclo y el tanque, tratando de garantizar la calidad del helado mientras intenta reducir el consumo de energía. En esta configuración el depósito PCM está en serie, de manera que un sistema de refrigeración de potencia variable carga al TES, y este a su vez es descargado para enfriar el almacén frigorífico.

En el presente trabajo se aborda el modelado dinámico de un tanque TES dedicado al almacenamiento de frío generado en una planta experimental de refrigeración por compresión de vapor, lo que determina las condiciones de contorno de los fluidos de carga y descarga. El diseño estructural del sistema de almacenamiento es propio, así como el enfoque de modelado, que es totalmente parametrizable y permite tanto la simulación dinámica de procesos de carga y descarga completos, como el diseño de los parámetros de la instalación (propiedades del PCM, número y diámetro de esferas de PCM, longitud y diámetro de tubos, etc). Así, en la Sección 2 se describe el tanque TES a modelar y su conexión con la planta experimental; en la Sección 3 se describen las suposiciones realizadas y se detalla el modelo dinámico del sistema, mientras que en la Sección 4 se analizan algunos resultados de simulación obtenidos para procesos de carga y descarga. Finalmente, en la Sección 5 se resumen las principales conclusiones y se proponen algunos trabajos futuros.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

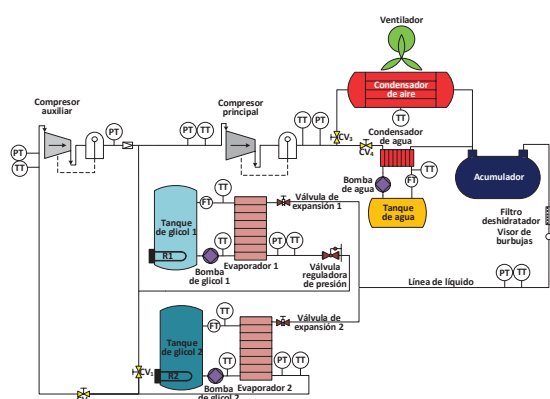
La Figura 2(a) muestra un diagrama de la planta experimental a la que se pretenden incorporar bloques TES basados en PCM. Aunque se han incluido dos compresores y dos evaporadores con sus respectivas válvulas de expansión, la planta se puede configurar para operar con una o dos etapas de compresión y con uno o dos recintos.

Se dispone de variadores de frecuencia para los dos compresores y todas las bombas de líquido, para un control más preciso de su velocidad. Ambos evaporadores son intercambiadores de placas, conectados a dos bucles de fluido secundario (solución acuosa de glicol) controlados en flujo (por las bombas de líquido) y temperatura (mediante las resistencias eléctricas). El Evaporador 1 debe trabajar en torno a 5°C y el Evaporador 2 aproximadamente a -20°C, ya que son niveles de referencia para refrigeración. Existen dos posibilidades para el condensador: bien un intercambiador de flujo cruzado refrigerado por aire o bien un intercambiador de placas que utiliza agua como fluido secundario. Las válvulas de expansión electrónica se controlan mediante modulación por ancho de pulso (PWM), mientras que el refrigerante usado es R404a. La planta tiene instrumentación completa: se han instalado termopares y transductores de presión en todos los puntos relevantes del ciclo, para poder calcular las entalpías específicas, y se mide el caudal volumétrico de los fluidos secundarios mediante caudalímetros magnéticos de inducción. Se puede consultar más información sobre los componentes de la planta en [2].

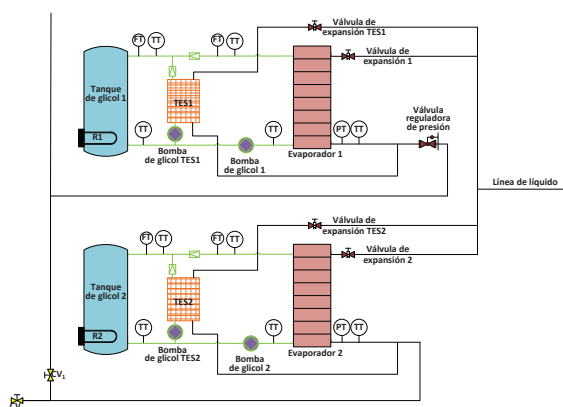
Se pretende añadir a esta planta dos bloques TES basados en PCM en paralelo con los dos recintos a refrigerar, uno para el recinto a 5°C (TES1) y otro para el recinto a -20°C (TES2), lo cual implicaría modificar la planta con dos líneas adicionales de refrigerante, con sus correspondientes válvulas de expansión, de manera que se habilite la posibilidad de cargar los TES. La descarga de los mismos se realizará mediante dos bombas que permitan recircular el fluido de los recintos a refrigerar por los TES correspondientes, tal como se muestra en la Figura 2(b).

En cuanto al diseño de los bloques TES, el PCM debe ser encapsulado de forma que las dos fases (sólido y líquido) permanezcan en contacto. Existen tres tipos de encapsulado [14, 17]: a granel, en el cual el PCM se almacena directamente dentro del tanque; el macroencapsulado, en el cual el PCM está formado por estructuras de diámetro superior a 1 cm recubiertas por una película polimérica, y por último el microencapsulado, donde las estructuras encapsuladas son aún más pequeñas e igualmente están recubiertas por un polímero.

En esta aplicación se ha seleccionado el macroencapsulado, de forma que el tanque de almacenamiento contiene esferas de PCM bañadas en un líquido de alta conductividad térmica y baja capacidad calorífica que constituye el lecho. En contacto con el mismo se instalan dos haces de tubos que atraviesan el tanque. El primero está destina-



(a) Diagrama esquemático de la planta experimental



(b) Detalle de la incorporación de bloques TES a la planta experimental de refrigeración

Figura 2: Planta experimental de refrigeración

do a la circulación del refrigerante, por tanto el tanque actúa como un evaporador donde el refrigerante se evapora mientras extrae calor del lecho y por tanto de las esferas de PCM. Por su parte, la solución acuosa de glicol circula por el segundo haz de tubos, cediendo calor al lecho y por tanto a las esferas de PCM. Esta estructura es similar a la propuesta por Tay *et al.* [23], mientras que el lecho está basado en la tecnología STL desarrollada por CRISTOPIA Energy Systems [5]. El esquema propuesto para el tanque TES se muestra en la Figura 3.

3. MODELADO DINÁMICO

Para el modelado dinámico del tanque TES se realizan algunas simplificaciones:

- (a) Se considera que el fluido intermedio que baña los tubos y las esferas de PCM tiene la misma temperatura en cualquier punto del tanque, debido a su alta conductividad térmica [1]. Esto simplifica el modelado ya que se trata de un modelo de parámetros concentrados

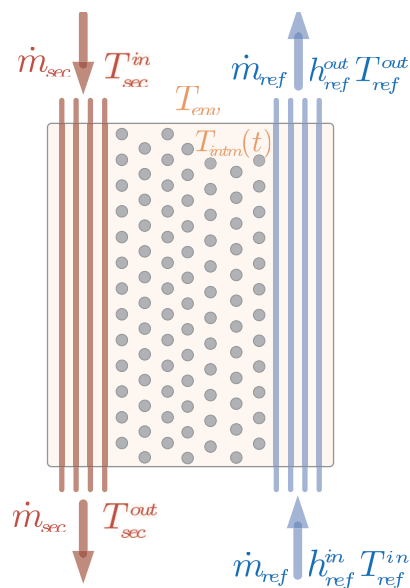


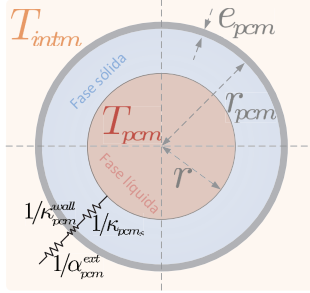
Figura 3: Esquema del tanque TES

y por tanto no se considera variación espacial del lado del fluido intermedio. Por tanto, este actúa simplemente como un integrador, interactuando con las potencias térmicas intercambiadas con las esferas de PCM, los tubos y el ambiente.

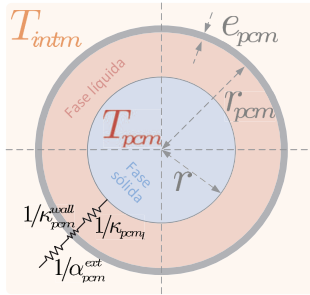
- (b) El superenfriamiento es un fenómeno bien conocido en el ámbito de PCM [22]. Este fenómeno consiste en que es necesario bajar la temperatura por debajo del punto de congelación para que dé comienzo la solidificación. Esta anomalía ocurre principalmente en fases iniciales de la solidificación, de forma que como este estudio se centra en la zona latente sin abordar específicamente el comienzo de la solidificación, el subenfriamiento es despreciado.
- (c) Otra propiedad de las mezclas homogéneas es que el cambio de fase ocurre en un pequeño rango de temperaturas en vez de a una única temperatura, como es el caso de sustancias puras [22]. Este es el caso del PCM, que es agravado por el hecho de que este rango de temperaturas depende de si se trata de un proceso de congelación o de fusión, con lo que se genera un ciclo de histéresis entre carga y descarga. Este efecto es despreciado en este estudio.

3.1. ESFERAS DE PCM

Durante el proceso de carga de frío, se asume que un único frente de congelación avanza hacia el interior de la esfera PCM. La Figura 4(a) muestra el modelo de una esfera PCM durante la carga.



(a) Diagrama esquemático de la esfera de PCM durante la carga de frío



(b) Diagrama esquemático de la esfera de PCM durante la descarga de frío

Figura 4: Modelo de la esfera de PCM en carga y descarga

Se define $r(t)$ como el radio instantáneo del límite esférico entre la fase sólida y líquida dentro de la cápsula. El núcleo fundido decrece mientras la corteza esférica exterior congelada va creciendo hacia el interior de la cápsula. Se considera que el sistema se encuentra completamente descargado antes de la fase de carga, por tanto $r(t=0) = r_{pcm}$ y $h_{pcm}(t=0) = h_{pcm}^{lat+}$, y que la fase de carga finaliza cuando $r(t)$ se anula.

Por otro lado, durante el proceso de descarga de frío, se asume que un único frente de fusión avanza hacia el interior de la esfera PCM. La Figura 4(b) muestra el modelo de la esfera PCM durante la descarga. En este caso el núcleo sólido decrece mientras la corteza esférica exterior fundida va creciendo hacia el interior de la cápsula. Se considera que el sistema se encuentra completamente cargado antes de la fase de descarga, por tanto $r(t=0) = r_{pcm}$ y $h_{pcm}(t=0) = h_{pcm}^{lat-}$, y que la fase de descarga finaliza de nuevo cuando $r(t)$ se anula.

Nótese que en la Figura 4 se utiliza la analogía eléctrica para modelar la transferencia de calor entre el núcleo en zona latente de la esfera PCM y el fluido intermedio que la baña. La evolución de $r(t)$ viene definida por (1), donde $\dot{Q}_{pcm}(t)$ es la potencia térmica transferida entre el fluido intermedio

y la esfera PCM, que se calcula mediante analogía eléctrica utilizando (2). Es importante señalar que $\dot{r}(t) < 0$ en carga y descarga.

$$\dot{Q}_{pcm}(t) = \mp \rho_{pcm} h_{pcm}^{lat} 4\pi r(t)^2 \dot{r}(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{pcm}(t) &= \frac{T_{intrm}(t) - T_{pcm}}{R_{pcm}(t)} = \\ &= \frac{T_{pcm} - T_{intrm}(t)}{R_{pcm}^{cond,int}(t) + R_{pcm}^{cond,wall} + R_{pcm}^{conv,ext}(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

T_{pcm} es la temperatura del núcleo de la esfera de PCM, de forma que la corteza esférica exterior actúa simplemente como una capa conductora entre el núcleo y el fluido intermedio a temperatura $T_{intrm}(t)$. $R_{pcm}(t)$ es la resistencia térmica global, compuesta por tres términos: conducción a través de la corteza esférica exterior de PCM congelado/fundido ($R_{pcm}^{cond,int}(t)$), conducción a través del recubrimiento polimérico de la esfera de PCM ($R_{pcm}^{cond,wall}$) y convección natural en el exterior de la esfera ($R_{pcm}^{conv,ext}(t)$).

3.2. FLUIDO INTERMEDIO

El fluido intermedio se encuentra contenido en el tanque a presión atmosférica, bañando las cápsulas de PCM y los haces de tubos de refrigerante y fluido secundario. Como se ha comentado anteriormente, debido a su alta conductividad térmica, se supone que su temperatura $T_{intrm}(t)$ es homogénea en todo el tanque. El balance de potencias térmicas que afectan a este fluido viene determinado por (3).

$$\begin{aligned} -\rho_{intrm} V_{intrm} c_{p,intrm} \frac{dT_{intrm}(t)}{dt} &= \\ &= n_{ref} \dot{Q}_{ref}(t) + n_{sec} \dot{Q}_{sec}(t) + n_{pcm} \dot{Q}_{pcm}(t) - \dot{Q}_{env}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$\dot{Q}_{ref}(t)$ es la potencia térmica transferida con cada tubo de refrigerante, mientras que $\dot{Q}_{sec}(t)$ es la potencia térmica transferida con cada tubo de fluido secundario. Por su parte, $\dot{Q}_{env}(t) > 0$ representa las pérdidas térmicas con el entorno. Durante el proceso de carga, no circula fluido secundario a través del tanque y por tanto $\dot{Q}_{sec}(t) = 0$, de forma que el refrigerante proporciona frío al fluido intermedio ($\dot{Q}_{ref}(t) > 0$) mientras que las cápsulas de PCM almacenan dicha energía tomándola del fluido intermedio ($\dot{Q}_{pcm} < 0$). Durante el proceso de descarga no circula refrigerante y por tanto $\dot{Q}_{ref}(t) = 0$, de forma que las cápsulas de PCM transfieren frío al fluido intermedio ($\dot{Q}_{pcm}(t) > 0$), y el fluido secundario lo toma del fluido intermedio ($\dot{Q}_{sec}(t) < 0$).

3.3. REFRIGERANTE Y FLUIDO SECUNDARIO

Durante la carga, el refrigerante circula a través de sus tubos bañados por el fluido intermedio. Se ha hecho uso del enfoque denominado *moving boundary* para modelar el comportamiento del refrigerante [15], que entra en el tanque en zona bifásica y puede salir del mismo como vapor sobrecalentado (*modo 1*), o bien como una mezcla bifásica con mayor título de vapor que a la entrada (*modo 2*).

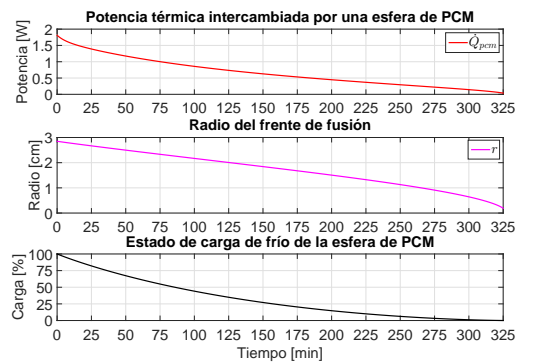
La Figura 5 muestra un diagrama de la transferencia de calor dentro del tanque, incluyendo también la transferencia con el fluido secundario. En cuanto al refrigerante, se ha representado el *modo 1*, en el cual se ha dividido el tubo en dos zonas de longitud variable, donde el refrigerante es bifásico y vapor sobrecalentado, respectivamente.

Se utiliza el método ε - NTU [3, 8] para el cálculo de las potencias térmicas \dot{Q}_{ref} y \dot{Q}_{sec} , así como la analogía eléctrica representada en la Figura 5. Nótese que las resistencias térmicas globales en los tubos incluyen la convección forzada del fluido circulante en el interior del tubo, la conducción a través de la pared y la convección libre del fluido intermedio en torno al tubo.

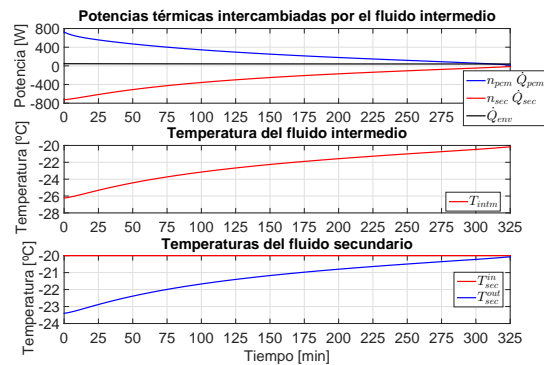
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación se analizan simulaciones de carga y descarga completas en zona latente del tanque TES. Se ha seleccionado el que debe trabajar con el fluido secundario a -20°C , de forma que su temperatura de fusión es -30°C . La Figura 6 muestra la evolución dinámica de algunas variables durante un proceso de descarga completa en zona latente, en el que se parte de la esfera de PCM completamente sólida (sistema cargado) y se inyecta un

caudal constante de fluido secundario a través de los tubos, en condiciones similares a las utilizadas en el evaporador de la planta experimental de refrigeración. Se observa cómo a medida que r tiende a 0 la potencia intercambiada \dot{Q}_{pcm} disminuye en valor absoluto, debido a que la resistencia térmica de conducción debida a la capa fundida es mayor. Como consecuencia, el fluido intermedio aumenta su temperatura, y la temperatura de salida del fluido secundario cada vez es más cercana a la de entrada, al transferirse menos frío desde el fluido intermedio.



(a) Variables de una esfera de PCM



(b) Balance de potencias y temperaturas del fluido intermedio y fluido secundario

Figura 6: Descarga completa en zona latente

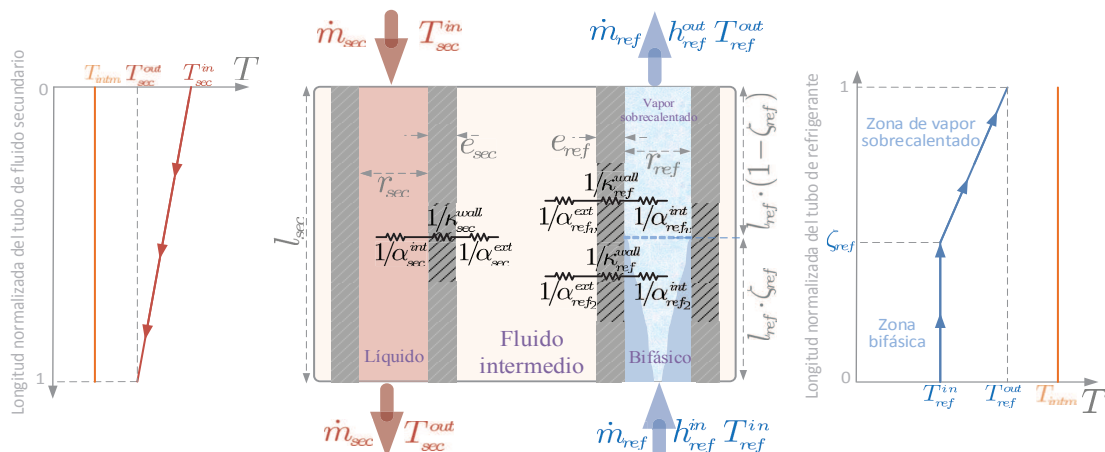
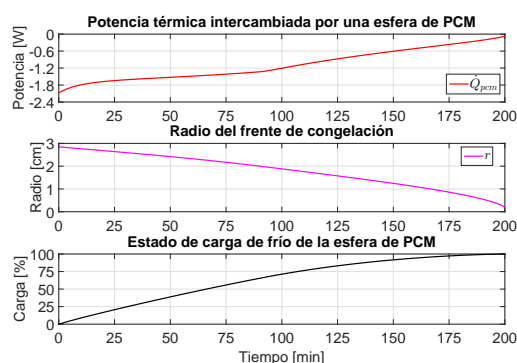
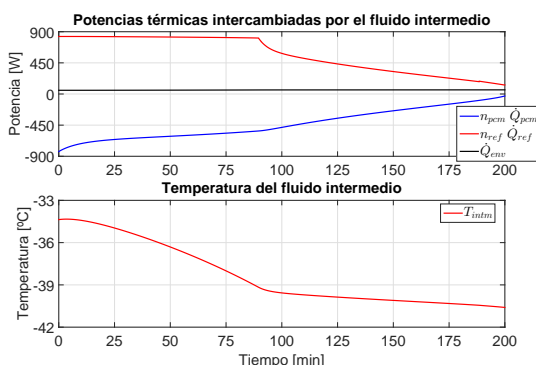


Figura 5: Diagrama de transferencia de calor a lo largo de los tubos de refrigerante y fluido secundario

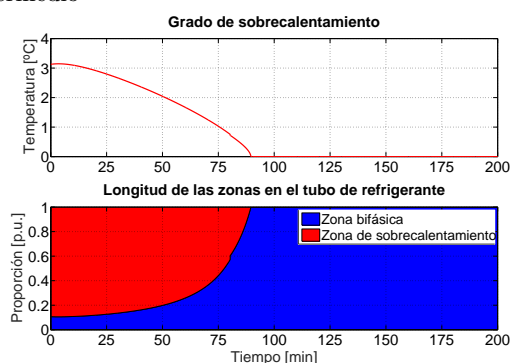
La Figura 7 muestra la evolución de algunas variables durante una carga completa en zona latente, en el que se parte de la esfera de PCM completamente fundida (sistema descargado) y se inyecta un caudal constante de refrigerante a través de los tubos, en condiciones entálpicas y de presión propias de la salida de la válvula de expansión correspondiente al evaporador a -20°C de la planta experimental de refrigeración. Nótese cómo \dot{Q}_{PCM} también disminuye en valor absoluto conforme la capa congelada crece. Por tanto, la potencia transferida desde las esferas de PCM al fluido intermedio también disminuye y el refrigerante disminuye su sobrecalentamiento a la salida del tanque TES, de forma que aproximadamente a la mitad de la carga empieza a salir del mismo en estado bifásico.



(a) Variables de una esfera de PCM



(b) Balance de potencias y temperatura del fluido intermedio



(c) Sobrecalentamiento y distribución de zonas del refrigerante

Figura 7: Carga completa en zona latente

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha propuesto un modelo dinámico simplificado para un tanque TES basado en PCM, de acuerdo al diseño del mismo para ser acoplado a una planta experimental de refrigeración. Este tanque TES permitirá la gestión del frío generado por la planta según criterios económicos. De acuerdo con las simplificaciones propuestas, se ha desacoplado el modelo en ecuaciones diferenciales para las esferas de PCM y el fluido intermedio que constituye el lecho, de forma que las variables de estado son el radio del frente de fusión/congelación en la esfera y la temperatura del fluido intermedio. Se han presentado resultados de simulaciones de carga y descarga completas, donde se ha observado la influencia del crecimiento de la corteza esférica sólida/fundida en la potencia térmica transferida por la esfera de PCM y por tanto en su velocidad de carga y descarga, así como en las condiciones del refrigerante y el fluido secundario a la salida de los tubos.

Este modelo solo es válido para procesos de carga/descarga completos, ya que si por ejemplo a una carga parcial le sigue una descarga, se crea un nuevo frente de fusión/congelación debido a que el cambio de fase siempre comienza desde la periferia de la esfera. Esto multiplica el número de estados en operaciones parciales, por lo que se plantea como trabajo futuro desarrollar un modelo discretizado que permita estudiar la operación parcial del sistema sin aumentar el número de estados.

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] N. A. M. Amin, M. Belusko, and F. Bruno. An effectiveness-NTU model of a packed bed PCM thermal storage system. *Appl. Energy*, 134:356–362, 2014.
- [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 *23rd Mediterranean Conf. on Control and Autom., Torremolinos (Spain)*, pages 537–544, 2015.
- [3] T. L. Bergman, F. P. Incropera, A. S. Lavine, and D. P. Dewitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 7th edition, 2011.

- [4] L. O. S. Buzelin, S. C. Amico, J. V. C. Vargas, and J. A. R. Parise. Experimental development of an intelligent refrigeration system. *Int. J. Refrig.*, 28(2):165–175, 2005.
- [5] Cristopia Energy Systems. <http://cristopia.com/>.
- [6] I. Dincer. On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Build.*, 34(4):377–388, 2002.
- [7] I. Dincer and M. Rosen. *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [8] J. P. Holman. *Heat transfer*. MacGraw-Hill Inc, 8th edition, 2001.
- [9] K. A. Jahangeer, A. A. O. Tay, and M. R. Islam. Numerical investigation of transfer coefficients of an evaporatively-cooled condenser. *Appl. Therm. Eng.*, 31(10):1655–1663, 2011.
- [10] M. M. MacCracken. Thermal energy storage myths. *Energy Eng.*, 101(4):69–80, 2004.
- [11] H. Mehling and L. F. Cabeza. *Heat and cold storage with PCM*. Springer, 2008.
- [12] A. Mosaffa, L. G. Farshi, C. I. Ferreira, and M. Rosen. Advanced exergy analysis of an air conditioning system incorporating thermal energy storage. *Energy*, 77:945–952, 2014.
- [13] A. Mosaffa, C. I. Ferreira, F. Talati, and M. Rosen. Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Convers. and Manag.*, 67:1–7, 2013.
- [14] E. Oró, A. De Gracia, A. Castell, M. Farid, and L. Cabeza. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Appl. Energy*, 99:513–533, 2012.
- [15] B. P. Rasmussen and A. G. Alleyne. Dynamic modeling and advanced control of air conditioning and refrigeration systems. Technical report, Air Cond. and Refrig. Cent., Coll. of Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign., 2006.
- [16] B. P. Rasmussen, A. Musser, and A. G. Alleyne. Model-driven system identification of transcritical vapor compression systems. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 13:444–451, 2005.
- [17] A. F. Regin, S. Solanki, and J. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renew. and Sustain. Energy Rev.*, 12(9):2438–2458, 2008.
- [18] B. Rismanchi, R. Saidur, G. BoroumandJazi, and S. Ahmed. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. *Renew. and Sustain. Energy Rev.*, 16(8):5741–5746, 2012.
- [19] P. Schalbart, D. Leducq, and G. Alvarez. Ice-cream storage energy efficiency with model predictive control of a refrigeration system coupled to a PCM tank. *Int. J. of Refrig.*, 52:140–150, 2015.
- [20] S. E. Shafiei and A. Alleyne. Model predictive control of hybrid thermal energy systems in transport refrigeration. *Appl. Therm. Eng.*, 82:264–280, 2015.
- [21] S. E. Shafiei, J. Stoustrup, and H. Rasmussen. Model predictive control for flexible power consumption of large-scale refrigeration systems. In *Am. Control Conf. (ACC), 2014*, pages 412–417. IEEE, 2014.
- [22] W. Streicher, J. Bony, S. Citherlet, A. Heinz, P. Puschnig, H. Schranzhofer, and J. Schultz. Simulation models of PCM storage units. Technical report, Report of IEA Solar Heat and Cool. Program., 2008.
- [23] N. Tay, M. Belusko, and F. Bruno. Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Appl. Energy*, 90(1):288–297, 2012.
- [24] US Energy Information Administration. Residential energy consumption survey (RECS). Technical report, Energy Inf. Adm., Washington D.C, USA, 2009.
- [25] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2893–2901, 2007.
- [26] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: Dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2902–2910, 2007.
- [27] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2911–2918, 2007.