

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

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

---

### Ingeniería de Control

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

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

---

### Visión por Computador

---

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

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

# Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos

Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalate, Ester Sales-Setién  
 Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño  
 Universitat Jaume I, Castellón, España  
 {csanahuj,ipenarro,rvidal,esales}@uji.es

## Resumen

*En este trabajo se presenta el problema de control de la red eléctrica de parques eólicos marinos que vierten su potencia a la red eléctrica terrestre a través de un enlace de corriente continua y convertidores por fuente de tensión. A día de hoy, el problema se resuelve mediante un control similar al de las redes eléctricas convencionales, en las que la frecuencia es una variable libre que deben controlar los generadores convencionales con gran inercia. Teniendo en cuenta que en las redes eléctricas marinas las conexiones se realizan mediante convertidores de electrónica de potencia AC/DC y DC/AC, se plantea una nueva estrategia en la que la frecuencia deja de ser un grado de libertad y se demuestra que, de esta forma, el sistema a controlar es lineal. Con esta propuesta, se pueden desarrollar controladores más robustos que los existentes hasta la fecha y se le pueden pedir mayores prestaciones a los parques eólicos.*

**Palabras clave:** Parque eólico marino, control de redes eléctricas, corriente continua de alta tensión (HVDC), convertidor por fuente de tensión (VSC).

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido una gran expansión de los parques eólicos marinos. De acuerdo con la Asociación Europea para la Energía Eólica (EWEA), en 15 años la potencia instalada en parques eólicos marinos superará la instalada en los terrestres [2, 4].

Para conectar cada parque eólico con la red eléctrica terrestre se utilizan enlaces de corriente continua de alta tensión (HVDC), ya que, para largas distancias, éstos son más adecuados que los enlaces de corriente alterna (HVAC) [10]. Además, se prevé que esta tecnología se use en el futuro en la *European Super Grid*, en la que se conectarán parques eólicos mediante redes HVDC multiterminal [12]. Como se explica en [6, 7], el uso de sistemas de transmisión con convertidores por fuente de tensión (VSC), que incluye convertidores modulares multinivel en ambos terminales

de la red, está incrementándose sobre el uso de convertidores de línea conmutada (LCC) gracias a las importantes ventajas en lo que respecta a sus capacidades de control y prestaciones.

Esta mayor controlabilidad es importante para desarrollar la mejor estrategia de control para el parque eólico y así responder a los nuevos requerimientos impuestos para este tipo de sistemas. En este sentido, el código de red para conexión de generadores publicado por ENTSO-E [11], establece diferentes requerimientos para las prestaciones de los generadores eólicos. Algunos de estos requerimientos son: apoyo al control de la frecuencia, apoyo al control de la tensión, sin fuentes de energía externa, funcionamiento en isla, capacidad de recuperación ante fallos de la red o control de los flujos de potencia. Por tanto, todos los generadores, incluyendo las fuentes de energía renovable, deben tener suficiente robustez para hacer frente a las perturbaciones de la red y facilitar la restauración del sistema tras un colapso. En este sentido, el uso de convertidores LCC y de estrategias de control convencionales dificulta el cumplimiento de estos requerimientos, por lo que es necesario desarrollar nuevas estrategias de control para parques eólicos marinos que permitan mejorar la integración de las fuentes de energía renovables en el sistema eléctrico.

Este trabajo se centra en el control de la red eléctrica marina existente entre los aerogeneradores y el rectificador VSC, presentando las técnicas básicas de control existentes hasta la fecha y planteando una alternativa a las mismas. En las técnicas de control convencionales, como las presentadas en [3, 5, 8, 14], la frecuencia de la red eléctrica es una variable a controlar que hace que el sistema sea no lineal. Para el control de las mismas se utiliza una linealización y desacoplamiento por realimentación que tiene problemas de robustez frente a las incertidumbres de los parámetros eléctricos disponibles y los ruidos de las mediciones, además de una elevada complejidad en la implementación. Para solventar este problema, en este trabajo se plantea una nueva estrategia de control en la que la frecuencia deja de ser una variable a controlar. Con esto, se consigue

un sistema lineal sobre el que se pueden aplicar controladores más avanzados con los que tratar de cumplir los requerimientos planteados por la ENTSO-E.

Este trabajo se organiza como sigue. Primero, en la Sección 2, se plantea el problema; así, se presenta la red eléctrica marina y el modelado de la parte que es objeto de estudio. En la Sección 3, se explica la solución convencionalmente adoptada desde el punto de vista de la ingeniería de control. También se incluye el control alternativo propuesto en este trabajo. Finalmente, en la Sección 4, se resumen las principales conclusiones del trabajo.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 Esquema y control de un parque eólico marino

La Figura 1 muestra un modelo completo de la red eléctrica de un parque eólico, desde los aerogeneradores hasta la red AC terrestre. El sistema se puede dividir en cuatro subsistemas. Primero, se tiene el aerogenerador, que incluye un rectificador (Back-End) y se conecta a un bus de continua. Segundo, se tiene el sistema integrado por las ramas que agregan las turbinas eólicas. Este subsistema se compone de cada inversor (Front-End), que genera una tensión alterna con un valor eficaz de línea del orden de 2 kV, y por un transformador que eleva la tensión hasta la tensión de la red común AC, del orden de 33kV. El número de sistemas de este tipo depende del número de agregaciones de turbinas eólicas. Las diferentes ramas se conectan entre sí a través del punto de conexión común (PCC). Tercero, se tiene el sistema existente entre el PCC y el rectificador VSC se compone de un condensador, un transformador que eleva de nuevo la tensión hasta unos 150 kV, y el rectificador VSC para convertir las corrientes AC en DC con una tensión de  $\pm 150$  kV. Finalmente, se tiene el inversor terrestre que convierte las tensiones de DC en AC y un transformador que eleva las tensiones para acomodarlas y poderse así conectarse con la red terrestre AC.

La presencia de las fuentes VSC (rectificador e inversor) en los dos terminales de un enlace de corriente continua y de los inversores Front-End de los aerogeneradores ofrece diferentes posibilidades de control sobre el sistema completo. En todos los inversores o fuentes mencionados el funcionamiento es tal que se puede manipular de forma directa la tensión que se genera en bornes del terminal de alterna, con lo que las acciones de control finales del sistema son las tensiones  $V_{W_i}$  ( $i = 1, \dots, n$ ),

$V_{R_{ac}}$  y  $V_{I_{ac}}$  mostradas en la Figura 1. Las variables a controlar en el sistema completo son: la tensión y la frecuencia de la red marina AC existente entre los transformadores; las potencias activas vertidas desde el parque a la red terrestre a través del enlace HVDC; la tensión HVDC del enlace de conexión con tierra. Por una parte, los aerogeneradores pueden dedicarse bien a controlar la potencia que generan, o bien a crear la red eléctrica marina. El rectificador marino puede usarse bien para crear la red eléctrica marina AC, bien para controlar la potencia vertida desde el parque en su conjunto, o bien para controlar la tensión del enlace HVDC. Por su parte, el inversor terrestre puede utilizarse bien para controlar la tensión del enlace HVDC, o bien para controlar las potencias que se inyectan desde el parque a la red eléctrica AC terrestre, contribuyendo a su vez al control de la tensión y de la frecuencia de la red convencional terrestre AC. Finalmente, los convertidores pueden dedicarse al control de la misma variable eléctrica y trabajar de forma coordinada. Este trabajo se centra en el control de los dos primeros subsistemas, i.e., los aerogeneradores y el rectificador marino.

### 2.2 Variables y objetivos de control de la red eléctrica marina AC

El equivalente monofásico de la red marina AC es el que se muestra en la Figura 2. Las tensiones mostradas como  $V_i$  corresponden a las tensiones generadas por cada convertidor Front-End vistas desde el lado de alterna (es decir,  $V_i = r_{t_i} V_{W_i}$ , con  $r_{t_i} \approx \frac{33}{2}$ ), mientras que las corrientes  $I_i$  representan las corrientes entregadas el por generador a la red común ( $I_i = r_{t_i}^{-1} I_{W_i}$ ). Las impedancias  $R_i$  y  $L_i$  representan el circuito equivalente del transformador y el cable desde el aerogenerador hasta el punto de conexión común. La corriente  $I_F$  representa la corriente suma entregada por todas las ramas, mientras que  $V_F$  representa la tensión del PCC, que se ha de controlar. De forma similar, la tensión  $V_R$  representa la tensión generada por el rectificador marino vista desde el lado de la red de alterna, esto es,  $V_R = r_t^{-1} V_{R_{ac}}$ , con  $r_t \approx \frac{150}{33}$ , y lo mismo ocurre con la corriente  $I_R$  ( $I_R = r_t I_{R_{ac}}$ ). Finalmente,  $I_C$  denota la corriente que se va por el condensador de compensación de reactiva  $C$ .

En el circuito monofásico anterior, las nuevas acciones de control son las tensiones  $V_i$  y  $V_R$ . Una vez calculadas estas acciones de control, se calcularán las acciones de control requeridas por el convertidor (i.e.,  $V_{W_i}$  y  $V_{R_{ac}}$ ) simplemente aplicando la relación de transformación pertinente para pasarlas a los niveles de tensión correspondientes.

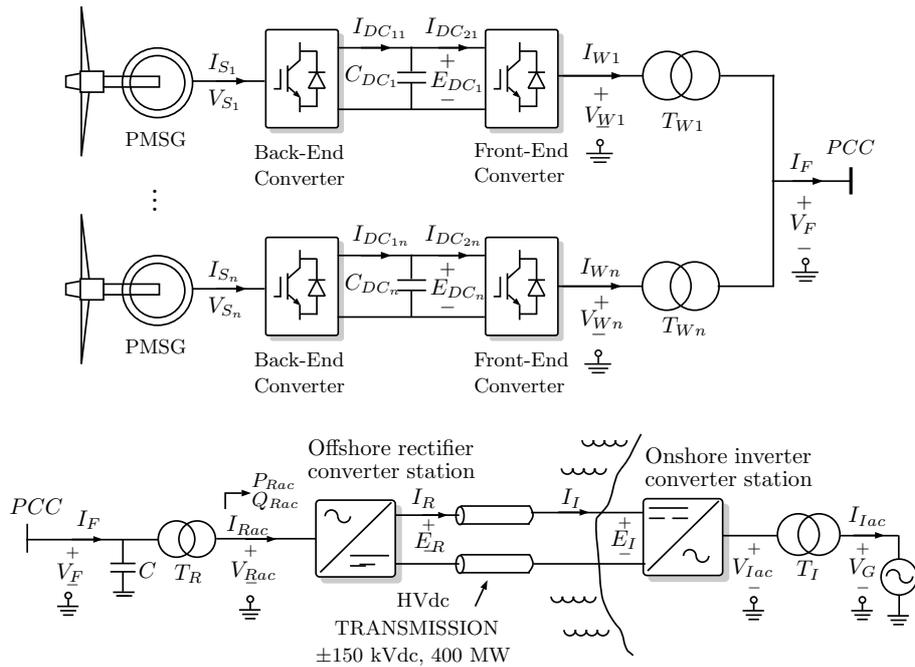


Figura 1: Esquema eléctrico de un parque eólico marino.

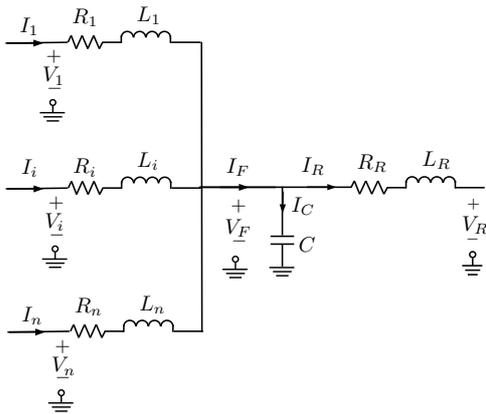


Figura 2: Circuito monofásico equivalente.

Los objetivos de control en la red marina son mantener cierta tensión  $V_F$  y proporcionar cierta potencia hacia el enlace HVDC. Para controlar la red marina existen dos posibilidades [3].

En primer lugar, se puede utilizar la tensión  $V_R$  para controlar la tensión  $V_F$ , y las tensiones  $V_i$  para controlar las potencias generadas en cada molino. Las potencias de referencia de cada aerogenerador pueden venir, bien del seguimiento del punto de máxima potencia disponible en función del viento incidente, bien de una consigna de potencia a generar por el parque más un sistema de reparto de potencias a lo largo de las máquinas del parque. Para proceder de esta forma, es necesario

que exista tensión en el enlace HVDC, que debería venir fijada por el inversor terrestre.

En segundo lugar, se puede utilizar la tensión  $V_R$  para controlar la potencia vertida por el parque eólico en su conjunto, y utilizar las tensiones  $V_i$  para controlar la tensión  $V_F$  de la red marina de forma coordinada. En este caso se puede energizar la red marina a partir de las turbinas con lo que, de esta forma, se puede funcionar de forma aislada de la red terrestre. Sin embargo, esta estrategia de control presenta la necesidad de coordinar los controladores de la tensión  $V_F$ , ya que todas las tensiones  $V_i$  (y los controladores que deciden dichas tensiones) buscan el mismo objetivo, lo cual cambia la dinámica del sistema en función de cuántos aerogeneradores haya en funcionamiento en cada momento, pudiendo incluso inestabilizar la red si el diseño no se hace de forma adecuada. Este problema todavía está abierto y es uno de los requerimientos del código ENTSO-E.

Este trabajo se centra en la primera posibilidad de control, donde la red marina se genera mediante la manipulación de  $V_R$ , y las tensiones  $V_i$  se manipulan para proporcionar la potencia requerida.

### 2.3 Modelado matemático de la red

Las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del sistema son

$$\dot{I}_i = \frac{-R_i}{L_i} I_i + \frac{1}{L_i} (V_i - V_F), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\dot{V}_F = \frac{1}{C} I_C, \quad (2)$$

$$I_R = I_F - I_C, \quad I_F = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (3)$$

$$\dot{I}_R = \frac{-R_R}{L_R} I_R + \frac{1}{L_R} (V_F - V_R), \quad (4)$$

donde cada ecuación se debe entender como un conjunto de tres ecuaciones iguales en las que se representan las tres fases del sistema, incluyendo el valor de la variable correspondiente en la fase correspondiente. Para el control del sistema, se toman las siguientes consideraciones: desde el punto de vista de los aerogeneradores, la tensión  $V_F$  se considera una perturbación que va a estar bajo control y va a tener pocas variaciones; desde el punto de vista del rectificador, la corriente  $I_F$  se considera una perturbación que va poderse medir y, además, va a tener pocas variaciones por estar bajo control gracias al control sobre  $I_i$  que se va a realizar en cada aerogenerador. Con esto, para el diseño de controladores, se divide el sistema entre el subsistema de los aerogeneradores, dado por la ecuación (1) y por el subsistema rectificador definido como (2)-(3) y (4).

Como se quiere controlar los valores eficaces de las tensiones y las potencias medias, no las instantáneas, es interesante transformar el modelo anterior de tres ecuaciones por variable eléctrica (i.e., una ecuación por fase) en un modelo que trabaje con los valores eficaces de las variables. De esta manera, las potencias activas y reactivas se pueden calcular con productos sencillos de tensión y corriente eficaces. Para este fin existen las transformaciones de Clarke y Park, [1]. La transformación de Clarke seguida de una transformación de coordenadas rectangulares a polares permite extraer la amplitud y el ángulo de una señal trifásica senoidal, y, en general, se denotará como  $(\bar{X}, \theta) = C(X_a, X_b, X_c)$ . Si esta transformación sólo se aplica a la tensión  $V_F$  se tiene un ángulo con el que las señales senoidales a generar deben sincronizarse; a su vez, su derivada proporciona la frecuencia  $\omega$  de la señal de referencia. La transformación de Clarke-Park permite reducir la representación trifásica de las variables eléctricas a una representación de otras dos variables que, en general, se denotará como  $(X_d, X_q) = P(X_a, X_b, X_c, \theta)$  y está referida al ángulo común a todo el circuito  $\theta$  (extraído de  $V_F$ ). En esta transformación, la primera variable

representa los valores eficaces (raíz cuadrada del valor cuadrático medio) de tensión o corriente en fase con el ángulo  $\theta$  (valores en el eje directo, con subíndice  $d$ ). La segunda, los valores desfasados  $90^\circ$  respecto de la señal anterior (en cuadratura, con subíndice  $q$ ).

Aplicando la transformación Clarke-Park, el conjunto de tres ecuaciones (una por fase) en (1) se traducen en

$$\dot{I}_{id} = \frac{-R_i}{L_i} I_{id} - \omega I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{id} - \frac{1}{L_i} V_{Fd}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_{iq} = \omega I_{id} - \frac{R_i}{L_i} I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{Fq}; \quad (6)$$

mientras que las ecuaciones en (2)-(3) y (4) se traducen en

$$\dot{V}_{Fd} = \omega V_{Fq} - \frac{1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (7)$$

$$\dot{V}_{Fq} = -\omega V_{Fd} - \frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq}, \quad (8)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{1}{L_R} V_{Fd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rd} - \omega I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rd}, \quad (9)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \frac{1}{L_R} V_{Fq} + \omega I_{Rd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rq}. \quad (10)$$

Con esta notación, la potencia generada en bornes del inversor Front-End viene dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{id} & V_{iq} \\ V_{iq} & -V_{id} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

siendo  $P$  la potencia activa y  $Q$  la potencia reactiva. Teniendo en cuenta las pérdidas en el transformador, la potencia efectiva que se vierte finalmente a la red vienen dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Fd} & V_{Fq} \\ V_{Fq} & -V_{Fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

## 3 PROPUESTAS DE CONTROL DE LA RED MARINA

Con esta transformación, las nuevas acciones de control en los convertidores que generan las señales trifásicas  $V_i$  y  $V_R$  son sus valores  $d$  y  $q$  así como el ángulo  $\theta$ . La utilización de estas nuevas variables es común debido al control vectorial interno en los inversores, que requieren dichas variables para su funcionamiento normal (el inversor se encarga internamente de generar las tensiones senoidales trifásicas a partir de los valores eficaces y del ángulo resultante de integrar la variable de frecuencia). Para crear una red AC sólo es necesario definir dos variables eléctricas sobre  $V_F$ , o bien la valor eficaz de la tensión y la frecuencia  $\omega$ , manteniendo la componente  $q$  de la tensión arbitrariamente a cero ( $V_{Fq} = 0$ ), o bien la tensión en el eje

$d$  y en el  $q$ , manteniendo fija la frecuencia en un valor determinado ( $\omega = \omega^*$ ). De igual forma, para definir el flujo de potencia, también es únicamente necesario definir dos variables, la potencia activa y la reactiva. A la vista de este comportamiento, cada convertidor tiene una variable de holgura.

### 3.1 Control convencional de la tensión de la red marina

En el control tradicional, el rectificador VSC controla la tensión y frecuencia de la red marina en bucle abierto, esto es, pasándose la referencia de estas magnitudes eléctricas de forma directa a  $V_R$  y con un ángulo obtenido simplemente por integración de la frecuencia deseada [9, 13]. Sin embargo, no se tiene un control sobre las corrientes, lo que puede llegar a dañar el convertidor ante un mal funcionamiento o perturbación. Ante esta falta de control interno de las corrientes, ante sobrecorriente únicamente proponen apagar el convertidor.

Una alternativa para solucionar este problema es la siguiente, que se basa en una imitación en el parque eólico del control que se lleva a cabo en los sistemas de generación convencional. En estos, generalmente, existe una turbina con gran inercia que es la encargada de generar la frecuencia de la red eléctrica (50 Hz en Europa), siendo esta proporcional a la velocidad de giro del generador. Por este motivo, la mayoría de controles existentes hasta la fecha se basan en este funcionamiento, dejando libre la variable de la frecuencia, y fijan, de forma arbitraria, la tensión en el eje  $q$  de la red AC a cero  $V_{Fq} = 0$ . Con esto, se tiene un sistema no lineal dado por las ecuaciones

$$\dot{I}_{id} = \frac{-R_i}{L_i} I_{id} - \omega I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{id} - \frac{1}{L_i} V_{Fd}, \quad (13)$$

$$\dot{I}_{iq} = \omega I_{id} - \frac{R_i}{L_i} I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{iq}, \quad (14)$$

para el aerogenerador, y

$$\dot{V}_{Fd} = -\frac{1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (15)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{1}{L_R} V_{Fd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rd} - \omega I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rd}, \quad (16)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \omega I_{Rd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rq}, \quad (17)$$

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}} \left( -\frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq} \right), \quad (18)$$

para el rectificador. En este último sistema de ecuaciones se debe entender la frecuencia como una salida del sistema que viene dada por su medición a través de la señal  $V_F$ . Así, para obtener un sistema en representación interna (donde la derivada de cada variable de estado sólo depende

de variables de estado y entradas), se debe sustituir el valor de  $\omega$  dado por (18) en las ecuaciones anteriores. Para la generación de las tensiones del rectificador  $V_R$ , se debe utilizar el ángulo obtenido a partir de la tensión  $V_F$ .

Para el control de la red marina se asume que la tensión  $V_F$  es medible, lo que permite obtener, mediante la transformación  $D$ , el ángulo  $\theta$  y la frecuencia  $\omega$  resultante. También se consideran medibles las corrientes  $I_R$  y la corriente  $I_F$ . Se utiliza una estrategia de control por linealización y prealimentación que, simultáneamente, permite obtener un sistema lineal desacoplado. Así, las acciones de de control se definen como

$$V_{Rd} = -u_d + \hat{V}_{Fd} + \hat{\omega} \hat{L}_R \hat{I}_{Rq}, \quad (19)$$

$$V_{Rq} = -u_q - \hat{\omega} \hat{L}_R \hat{I}_{Rd}, \quad (20)$$

donde se ha utilizado el símbolo  $\hat{\cdot}$  sobre las variables que son, o bien medibles, o bien un parámetro del sistema disponible, y donde se han introducido las nuevas acciones de control virtuales  $u_d$  y  $u_q$ . Si las mediciones fueran perfectas y no existiera error en el modelo, la dinámica del sistema se reduciría a

$$\dot{V}_{Fd} = \frac{-1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (21)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{-R_R}{L_R} I_{Rd} + \frac{1}{L_R} u_d, \quad (22)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \frac{-R_R}{L_R} I_{Rq} + \frac{1}{L_R} u_q, \quad (23)$$

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}} \left( -\frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq} \right). \quad (24)$$

Nótese que se tiene un sistema desacoplado donde  $I_{Rd}$  sólo depende de  $u_d$  y  $I_{Rq}$  sólo depende de  $u_q$ , mientras que las variables a controlar son la tensión  $V_{Fd}$  y la frecuencia  $\omega$ . Asimismo, es interesante mantener la corriente  $I_R$  limitada durante los transitorios para evitar sobrepasar la potencia máxima del rectificador. Por este motivo, se opta por un control en cascada en el que  $u_d$  y  $u_q$  se utilizan para el control de las corrientes  $I_{Rd}$  y  $I_{Rq}$ , y en el que se utilizan las corrientes de referencia  $I_{Rd}^*$  y  $I_{Rq}^*$  para controlar la tensión  $V_{Fd}$  y  $\omega$ . El control de corriente se realiza mediante un control PID de la forma

$$u_d = PID(I_{Rd}^*, \hat{I}_{Rd}), \quad (25)$$

que se diseña teniendo en cuenta únicamente el polo ubicado en  $\frac{-R_R}{L_R}$ . De forma similar, se realiza y diseña el control de  $I_{Rq}$  mediante la acción de control virtual  $u_q$

$$u_q = PID(I_{Rq}^*, \hat{I}_{Rq}). \quad (26)$$

Para el control de la tensión  $V_{Fd}$  se tiene un sistema en el que la tensión sólo depende de la corriente controlada  $I_{Rd}$  y de la corriente  $I_{Fd}$ , considerada una perturbación medible. Entonces, se

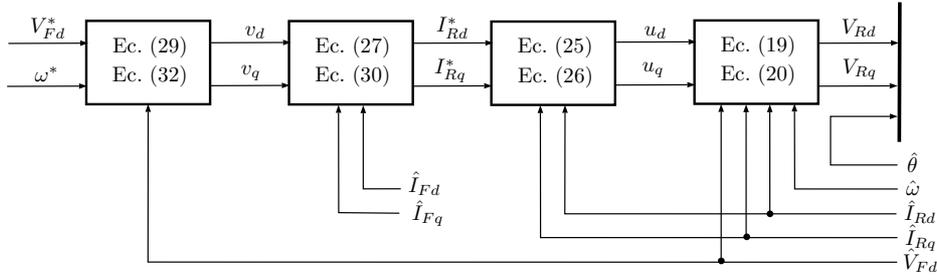


Figura 3: Esquema del control convencional.

propone definir la acción de control del control maestro de tensión como

$$I_{Rd}^* = \max\{-v_d + \hat{I}_{Fd}, I_{Rd,\max}\}, \quad (27)$$

donde se ha aplicado una saturación para evitar corrientes elevadas y se ha introducido la nueva acción de control virtual  $v_d$ . Si se asume que el control de corriente es suficientemente rápido (i.e.,  $I_{Rd} \approx I_{Rd}^*$ ) y que no se tiene error de medición, la ecuación de la dinámica de la tensión de la red marina es

$$\dot{V}_{Fd} = \frac{1}{C}v_d. \quad (28)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación, se define un controlador de tipo PID como

$$v_d = PID(V_{Fd}^*, \hat{V}_{Fd}). \quad (29)$$

Para el control de la frecuencia  $\omega$ , se tiene un sistema que depende de forma estática de la corriente controlada  $I_{Rq}$  así como de la corriente  $I_{Fd}$ , considerada una perturbación medible. Se propone definir la acción de control del control maestro de frecuencia como

$$I_{Rq}^* = \max\{-v_q + \hat{I}_{Fq}, I_{Rq,\max}\}, \quad (30)$$

donde se ha introducido la nueva acción de control virtual  $v_{Rq}$ . Bajo el supuesto  $I_{Rq} \approx I_{Rq}^*$  y error de medición nulo, se tiene que la frecuencia viene dada por la ecuación estática

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}C}v_q. \quad (31)$$

Con esto, se plantea un control estático por inversión para conseguir la frecuencia deseada  $\omega^*$  que viene dado por

$$v_q = \hat{V}_{Fd} \hat{C} \omega^*. \quad (32)$$

La Figura 3 resume el controlador convencional. Como se puede observar, el funcionamiento de este control convencional depende fuertemente de la bondad de las mediciones y de los parámetros disponibles para su correcto funcionamiento. Esta falta de robustez hace que sea necesaria la búsqueda de técnicas de control alternativas para poder dotar al parque eólico de mayores prestaciones que permitan llevar a cabo los requerimientos marcados por ENTSO-E.

### 3.2 Control convencional de potencia

La potencia eléctrica vertida a la red por cada turbina eólica, viene dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = V_{Fd} \begin{bmatrix} I_{id} \\ -I_{iq} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

ya que, por definición se toma,  $V_{Fq} = 0$ . Así, para llevar a cabo el control de potencia se implementa un control de corriente como el explicado anteriormente sobre el modelo (5)-(6) y actuando sobre  $V_i$ , asumiendo como medibles la tensión del punto común  $V_{Fd}$ , la frecuencia  $\omega$  y el ángulo  $\theta$ . Esta medición se lleva a cabo junto al transformador del convertidor, con lo que se desprecia el efecto de los conductores que hay desde el transformador al PCC. Con estas mediciones, se calcula la referencia de corriente a seguir como

$$\begin{bmatrix} I_{id}^* \\ I_{iq}^* \end{bmatrix} = \hat{V}_{Fd}^{-1} \begin{bmatrix} P_i^* \\ -Q_i^* \end{bmatrix}. \quad (34)$$

### 3.3 Propuesta de control de la tensión de la red marina

En este trabajo, bajo la consideración de que no hay ninguna máquina rotativa cuyo giro sea quien proporciona la frecuencia de la red eléctrica, y bajo la consideración de que la red eléctrica sólo tiene conectados elementos de electrónica de potencia, se propone mantener fija la frecuencia en  $\omega = \omega^* = 2\pi 50$  y no considerarla una variable como se viene haciendo tradicionalmente. De esta forma, el sistema (7)-(10) es lineal (con  $\omega = \omega^*$  constante) y no se requiere que los ángulos de los convertidores tengan que depender de la medición de la tensión del punto común. Además, al tratarse de un sistema lineal, el diseño de los controladores es mucho más sencillo y su implementación no es tan dependiente del ruido de las señales medibles necesarias ni del error paramétrico para la linealización. Una vez fijada la frecuencia, se decide que el sistema de control incluya como referencia  $V_{Fq}^* = 0$ .

Al igual que en el control convencional, la idea es suponer el funcionamiento de la red en régimen

permanente. Como diferencia, el control propuesto mantiene fija la frecuencia a 50 Hz para todos los convertidores en lugar de considerarla como una variable y considerar la frecuencia como una variable en lugar de fijarla con  $V_{Fq} = 0$ . Esto lleva a una implementación directa de un control por realimentación del estado (sin necesidad de observador), para el que se le pueden pedir prestaciones mejores que las obtenibles con los controladores PI de la propuesta convencional.

Se plantea pues un control por realimentación del estado con integrador que tiene la forma:

$$e_{V_{Fd}} = \int (V_{Fd}^* - \hat{V}_{Fd}) dt, \quad (35)$$

$$e_{V_{Fq}} = \int (V_{Fq}^* - \hat{V}_{Fq}) dt, \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = -K_{V_F} \begin{bmatrix} \hat{I}_{Rd} \\ \hat{I}_{Rq} \\ \hat{V}_{Fd} \\ \hat{V}_{Fq} \end{bmatrix} + K_{e_{V_F}} \begin{bmatrix} e_{V_{Fd}} \\ e_{V_{Fq}} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

con el ángulo obtenido mediante  $\theta = \int \omega^* dt$ , y se esquematiza en la Figura 4. El controlador se implementa también con un mecanismo de saturación y antiwindup, de forma que cuando el módulo de la tensión  $\sqrt{V_d^2 + V_q^2}$  satura, se dejan de integrar los términos de error acumulado  $e_d$  y  $e_q$ . El diseño de las ganancias de este controlador ( $K_{V_F}$ ,  $+K_{e_{V_F}}$ ) se puede realizar tanto por asignación de polos como por control óptimo LQR tras extender el modelo del sistema para incluir los integradores.

Con este control se pierde la capacidad de limitar las corrientes del convertidor que se tenía en el control convencional. Para solucionar este problema, se plantea un control de la corriente  $I_R$  con corrientes de referencia igual a las máximas permitidas. Finalmente, se aplica la acción de control que menor módulo tenga, es decir, se aplica un control por override para conseguir dicha limitación:

$$e_{I_{Rd}} = \int (I_{Rd, \max} - \hat{I}_{Rd}) dt, \quad (38)$$

$$e_{I_{Rq}} = \int (I_{Rq, \max} - \hat{I}_{Rq}) dt, \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = -K_{I_R} \begin{bmatrix} \hat{I}_{Rd} \\ \hat{I}_{Rq} \\ \hat{V}_{Fd} \\ \hat{V}_{Fq} \end{bmatrix} + K_{e_{I_R}} \begin{bmatrix} e_{I_{Rd}} \\ e_{I_{Rq}} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = \arg_{V_R} \min \{ \|(37)\|, \|(40)\| \}. \quad (41)$$

Este control permitiría a su vez que el rectificador funcionara, si así se deseara, como control de potencia de todo el parque.

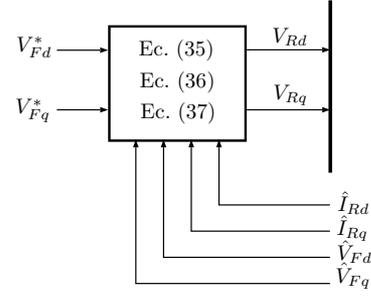


Figura 4: Esquema del control propuesto.

### 3.4 Propuesta de control de potencia

Para el control de potencia de los aerogeneradores, se utiliza la misma estrategia de alimentar los convertidores con una frecuencia fija  $\omega = \omega^*$ . Así, se tiene que el sistema (5)-(6) es lineal. Con esto, se implementa un control de corriente por realimentación del estado de forma similar al anterior, donde la tensión  $V_F$  se considera una perturbación. El control queda como

$$e_{id} = \int (I_{id}^* - \hat{I}_{id}) dt, \quad (42)$$

$$e_{iq} = \int (I_{iq}^* - \hat{I}_{iq}) dt, \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} = -K_i \begin{bmatrix} \hat{I}_{id} \\ \hat{I}_{iq} \end{bmatrix} + K_{ie} \begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$\theta = \int \omega^* dt. \quad (45)$$

Para obtener la corriente de referencia a partir de la potencia de referencia se necesita la medición de la tensión del punto común. Como se intenta evitar esta medición, se propone calcular la potencia de referencia utilizando la tensión aplicada  $V_i$ . La utilización de esta tensión puede llegar a inestabilizar el lazo dada la dependencia de la referencia a seguir de la propia acción de control que se está aplicando. Para evitar este, se pasa la tensión por un filtro paso bajo y el valor resultante se utiliza en el cálculo de las corrientes. Así, la dinámica del lazo de corriente y del cálculo de la corriente de referencia quedan parcialmente desacopladas. Mediante inversión de la ecuación (11) se tiene

$$\begin{bmatrix} I_{id}^* \\ I_{iq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{id} & \bar{V}_{iq} \\ \bar{V}_{iq} & -\bar{V}_{id} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_i^* \\ Q_i^* \end{bmatrix}, \quad (46)$$

con  $\bar{V}_{id}$  y  $\bar{V}_{iq}$  las tensiones filtradas.

## 4 CONCLUSION

En este trabajo, se ha planteado una estrategia alternativa de control de la red eléctrica AC de

parques eólicos marinos. En el control de ese tipo de sistemas, se tiene una variable de holgura que se debe fijar de forma independiente. A diferencia de los controles convencionales, que fijan la tensión reactiva en el punto de unión de los aerogeneradores a cero, el control propuesto fija la frecuencia de la red a un valor determinado. La alternativa convencional resulta en un sistema no lineal y, por ello, los controles convencionales se basan principalmente en linealizaciones y desacoplamientos por realimentación combinados con controladores PI. Con la propuesta de este trabajo, se consigue un sistema lineal que permite el diseño de controladores más avanzados y robustos a los errores de medición y de modelado. En este trabajo, se ha propuesto un control por realimentación del estado para el control de tensión de la red y otro para el control de la potencia vertida por los aerogeneradores. El trabajo futuro se centrará en probar el desempeño de estos controladores ante perturbaciones y colapsos de la red.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I de Castelló a través del proyecto con referencia P11B2015-42 2 por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos con referencia TEC2015-69155-R y DPI2014-53245-R. También se ha financiado a través de la ayuda predocctoral FPU14/01592 del MECED.

### Referencias

- [1] Paul M Anderson and Aziz A Fouad. *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, 2008.
- [2] European Wind Energy Association et al. *Wind energy-the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power*. Routledge, 2012.
- [3] Enrique Belenguer, Ricardo Vidal, Héctor Beltrán, and Ramón Blasco-Gimenez. Analysis of control alternatives for offshore wind farms connected through a vsc-hvdc link. In *11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems As Well As on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*, 2012.
- [4] Mehmet Bilgili, Abdulkadir Yasar, and Erdogan Simsek. Offshore wind power development in europe and its comparison with onshore counterpart. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2):905–915, 2011.
- [5] Ramon Blasco-Gimenez, Salvador Anovillalba, Johel Rodriguez-D’Derlée, Soledad Bernal-Perez, and Francisco Morant. Diode-based hvdc link for the connection of large offshore wind farms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(2):615–626, 2011.
- [6] D Das, J Pan, and S Bala. Hvdc light for large offshore wind farm integration. In *Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), 2012 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [7] Oriol Gomis-Bellmunt, Jun Liang, Janaka Ekanayake, Rosemary King, and Nicholas Jenkins. Topologies of multiterminal hvdc-vsc transmission for large offshore wind farms. *Electric Power Systems Research*, 81(2):271–281, 2011.
- [8] Shuhui Li, Timothy A Haskew, and Ling Xu. Control of hvdc light system using conventional and direct current vector control approaches. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12):3106–3118, 2010.
- [9] SM Muyeen, Rion Takahashi, and Junji Tamura. Operation and control of hvdc-connected offshore wind farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(1):30–37, 2010.
- [10] N Barberis Negra, Jovan Todorovic, and Thomas Ackermann. Loss evaluation of hvac and hvdc transmission solutions for large offshore wind farms. *Electric power systems research*, 76(11):916–927, 2006.
- [11] ENTSO-E Network. Code for requirements for grid connection applicable to all generators. *ENTSO-E: Brussels, Belgium*, 2012.
- [12] Dirk Van Hertem and Mehrdad Ghandhari. Multi-terminal vsc hvdc for the european supergrid: Obstacles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9):3156–3163, 2010.
- [13] Ricardo Vidal-Albalade, Hector Beltran, Alejandro Rolán, Enrique Belenguer, Rubén Peña, and Ramon Blasco-Gimenez. Analysis of the performance of mmc under fault conditions in hvdc-based offshore wind farms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(2):839–847, 2016.
- [14] Lidong Zhang, Lennart Harnefors, and Hans-Peter Nee. Modeling and control of vsc-hvdc links connected to island systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2):783–793, 2011.