

WWME 2021 III. Jardunaldia



**III Jornada INTERNACIONAL
WWME 2021**

Wind (and) Marine Energy



**Irakaskuntzaren Berrikuntza Kontrol
Ingeniaritzan Itsas Energian**

**Innovation and Lecture Notes in Control
Engineering for Ocean Energy**

**Innovación y Docencia en la Ingeniería de Control
para Energía Marina**

16 de diciembre del 2021

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

**Irakaskuntzaren Berrikuntza, Kontrol
Ingeniaritzako Itsas Energiaren Arloan**

**Innovation and Lecture Notes in Control Engineering
for Ocean Energy**

**Innovación y Docencia en la Ingeniería de Control
para Energía Marina**

*RTI2018-094902-B-C21 eta C22 proiektuen
III. Jardunaldiako Monografia*

Monografía de la III Jornada Internacional de
los proyectos RTI2018-094902-B-C21 y C22

WWME 2021 III. Jardunaldia / III Jornada WWME 2021

**Irakaskuntzaren Berrikuntza, Kontrol
Ingeniaritzako Itsas Energiaren Arloan**

**Innovation and Lecture Notes in Control Engineering
for Ocean Energy**

**Innovación y Docencia en la Ingeniería de Control
para Energía Marina**

*Itsasoko Energia, RTI2018-094902-B-C21 eta C22 proiektuen
III. Jardunaldiako Monografia*

Monografía de la III Jornada Internacional de
Energía Marina, proyectos RTI2018-094902-B-C21 y C22

*Aitor J. Garrido, Matilde Santos, Fares M'zoughi, Izaskun Garrido
(arg./eds.)*

Jornada Internacional de Energía Marina (3ª. 2021)

Irakaskuntzaren berrikuntza kontrol ingeniartzan itsas energian [Recurso electrónico] = Innovation and lecture notes in control engineering for ocean energy = Innovación y docencia en la ingeniería de control para energía marina / Aitor J. Garrido ...[et al.] (arg./eds.). – Datos. – Bilbao : Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua = Servicio Editorial, [2022]. – 1 recurso en línea : PDF (105 p.)

En port.: Monografía de la III Jornada Internacional de Energía Marina, WWME [Wind (and) Wave Ocean Energy] 2021 III. Jardunaldia.

Textos en español, euskara e inglés.

Modo de acceso: World Wide Web

ISBN. 978-84-1319-379-3.

1. Recursos energéticos marinos - Congresos. 2. Energías renovables - Congresos. I. Garrido, Aitor J., ed. II, Tít.: Innovation and lecture notes in control engineering for ocean energy. III. Tít.: Innovación y docencia en la ingeniería de control para energía marina.

(0.034)620.91(063)

Batzorde zientifikoa / Comité científico

Koordinatzailea / Coordinador

Fares M'zoughi (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Kideak / Miembros

Carlos Serrano-Barreto (Universidad Complutense de Madrid)

Enrique López (Universidad Complutense de Madrid)

Giordy Alexander Andrade Aimara (Universidad Complutense de Madrid)

Matilde Santos (Universidad Complutense de Madrid)

Pablo-Andrés Buestán-Andrade (Universidad Complutense de Madrid)

Segundo Esteban San Román (Universidad Complutense de Madrid)

Jesús Enrique Sierra-García (Universidad de Burgos)

María de los Ángeles López (Universidad Nacional de Educación a Distancia)

Mikel Burguera (General Electric)

M. Tomas-Rodriguez (City, University of London)

Sandra Piernikowska (City, University of London)

Ravi Pandit (University of Exeter)

Aitor J. Garrido (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Edorta Carrascal-Lekunberri (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Francisco J. Asensio (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Goretti Sevillano-Berasategui (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Iñigo J. Oleagordia (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Irfan Ahmad (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Itziar Martija (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Izaskun Garrido (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

José Antonio Cortajarena (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

José I. San Martín (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Manuel De La Sen (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Patxi Alkorta (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Payam Aboutalebi (Universidad del País Vasco, UPV/EHU)

Enpresa parte-hartzaileak/ Empresas participantes

Christian Blanco Gamote	Boslan
David Carrascosa Francis	SAITEC Offshore Technologies
Francisco Javier Díaz Guadamillas	Solute
Patxi Etxaniz Olaiz	IDOM
Luis Miguel García González	Blue Float Energy
Alex Raventós Agusti	X1 Wind
Tomás Romagosa Cabezudo	Asociación Eólica Empresarial
Marcos Suárez García	Clúster de Energía
Yago Torre-Enciso	BiMEP

Aurkibidea / Índice

<i>Introduction / Prólogo / Sarrera,</i>	<i>1</i>
<i>Aitor J. Garrido, Matilde Santos, Fares M'zoughi, Izaskun Garrido</i>	

Komunikazioak / Comunicaciones

<i>Aire-fluxuaren kontrol-estrategia itsasoko flotatzaile eolikoetan integratutako ur-zutabe oszilagarrien plataforma-egonkortasunerako.....</i>	<i>3</i>
<i>Fares M'zoughi, Goretti Sevillano-Berasategui, Izaskun Garrido, Aitor J. Garrido and Manuel De La Sen</i>	
<i>Itsas aerosorgailu flotatzaileen oszilazioak murrizteko kontrol-teknika bat.....</i>	<i>9</i>
<i>Payam Aboutalebi, Fares M'zoughi, Edorta Carrascal-Lekunberri, Izaskun Garrido and Aitor J. Garrido</i>	
<i>Modelado y Validación de Modelos Híbridos OWC-FOWT basados en ANN para Estabilización Plataformas Flotantes</i>	<i>17</i>
<i>Irfan Ahmad, Fares M'zoughi, Izaskun Garrido and Aitor J. Garrido</i>	
<i>Virtual Instrumentation System for the Characterization of the NTC Temperature Sensor</i>	<i>23</i>
<i>Iñigo J. Oleagordia Aguirre, Izaskun Garrido, Aitor J. Garrido and José I.San Martín</i>	
<i>El Aprendizaje basado en Proyectos Bajo una Perspectiva de Género para Mejorar la Integración de la Mujer en los Grados de Ingeniería.....</i>	<i>29</i>
<i>Francisco Javier Maseda, Itziar Martija and Patxi Alkorta</i>	
<i>A Comparative Study Between DTC and DTC-SVPWM Control of Induction Machines of Wind and Marine Turbines.....</i>	<i>35</i>
<i>Fahimeh Shiravani, Jose Antonio Cortajarena and Patxi Alkorta</i>	
<i>Ejemplos de Gemelos Digitales Aplicados a Parques Eólicos Marinos: Un Estudio Preliminar.....</i>	<i>41</i>
<i>Pablo-Andrés Buestán-Andrade, Matilde Santos and Ravi Pandit</i>	

<i>Impact of Inerter in Vibrational Control in Floating Offshore Wind Turbines.....</i>	<i>47</i>
<i>Sandra Piernikowska and M. Tomas-Rodriguez</i>	
<i>Modelo a Escala de Aerogenerador para Control.....</i>	<i>53</i>
<i>Giordy Alexander Andrade Aimara and Segundo Esteban San Román</i>	
<i>Control Borroso Inteligente Optimizado para la Extracción de Energía en Grandes Turbinas de Viento.....</i>	<i>59</i>
<i>Carlos Serrano-Barreto, Matilde Santos and J. Enrique Sierra-García</i>	
<i>Data Fault Detection for Digital Twin Learning Action Decision of a Wind Turbine.....</i>	<i>65</i>
<i>William Chicaiza, Fabio Rodriguez, Adolfo J. Sánchez and Juan M. Escaño</i>	
<i>Software de Desarrollo para el Análisis de los Desplazamientos de una Plataforma Flotante Sobre Ensayos en Modelo Físico.....</i>	<i>71</i>
<i>Vicente Negro Valdecantos, César Sastre Gil and Jose Luis Orts Egío</i>	
<i>Arquitectura Hardware Asequible para Implementar Controles de Pitch en una Turbina Offshore.....</i>	<i>77</i>
<i>Martín Fernández de Diego, Belén Sánchez Centeno, Segundo Esteban San Román and Matilde Santos</i>	
<i>Primera aproximación al control multi-objetivo de turbinas eólicas.....</i>	<i>83</i>
<i>David José Suárez, Lía García Pérez and Matilde Santos</i>	
<i>Interfaz Gráfica para Adquisición de Datos y Control para un Modelo a Escala de una Turbina Marina Flotante.....</i>	<i>89</i>
<i>Carlos Serrano and Adrian Estevez</i>	
<i>Primera Aproximación al Control Estructural Semiactivo de Turbinas Eólicas Marinas Flotantes.....</i>	<i>93</i>
<i>Alejandro Ramírez, Matilde Santos and Maria Tomas-Rodriguez</i>	

Introduction

Research on Marine Energy has matured during the last decade and many effective applications of this technology are now successfully deployed. This International Workshop on Wind (and) Marine Energy (WWME) provides a forum to present and discuss the latest scientific developments and their current applications, to assess the impact of these new renewable energies approach, and to facilitate technology transfer.

WWME has started as a local initiative, associated to projects RTI2018-094902-B-C21 and C22, led both by ISCAR group at University Complutense of Madrid (<http://www.floatingwindturbineucm.com>) and by the Automatic Control Group at UPV/EHU (<https://www.ehu.eus/en/web/acg/ikerketa>). It has become in a short time a yearly platform to present, discuss, and disseminate the latest developments and the most important outcomes related to Ocean energy applications in research and education. It provides a unique opportunity to bring multi-disciplinary experts, academics and practitioners together to exchange their experiences in the latest developments, discuss and debate the major issues. Other stakeholders should be rewarded with a better understanding of the potential and challenges on Wind (and) Marine Energy.

Prólogo

La investigación sobre energía marina ha madurado durante la última década y actualmente esta tecnología presenta muchas y diversas aplicaciones. Esta Jornada Internacional sobre Energía Eólica (y) Marina, WWME, proporciona un foro para presentar y discutir los últimos avances científicos y sus aplicaciones actuales, para evaluar el impacto de estos nuevos enfoques de energías renovables y para facilitar la transferencia de tecnología.

WWME ha surgido como una iniciativa local, asociada a los proyectos RTI2018-094902 - B - C21 y C 22, liderada tanto por el grupo ISCAR de la Universidad Complutense de Madrid (<http://www.floatingwindturbineucm.com>) y como por el Grupo de Control Automático de la UPV / EHU (<https://www.ehu.eus/en/web/acg/ikerketa>). En poco tiempo se ha convertido en es una plataforma anual que permite presentar, discutir y difundir los últimos desarrollos y los resultados más importantes relacionados con las aplicaciones de la energía oceánica en la investigación y la educación. Además, brinda una oportunidad única para reunir a expertos de diversas disciplinas, académicos y profesionales para intercambiar sus experiencias sobre los

últimos desarrollos, discutir y debatir los principales problemas. Todas las personas interesadas serán recompensadas con una mejor comprensión del potencial y los desafíos de la energía eólica (y) marina.

Sarrera

Itsas Energiaren inguruko ikerkuntzak heldutasun maila lortu du azken hamarkadan eta une honetan garapen fase esperantzagarrian dago. Haize (eta) Itsas Energiari buruzko nazioarteko jardunaldi honek, WWMEk, arlo honen azken garapen zientifiko eta horien aplikazioak aurkezteko eta amankomunean jartzeko eztabaidagunea eskaintzen du, non energia berriztagarrien ikuspuntu berrien eragina azter daitekeen eta teknologia trukaketa erraz daitekeen.

WWME bertoko ekimen gisa sortu da, RTI2018-094902 - B - C21 eta C 22 proiektuei lotuta, Madrilgo Unibertsitate Konplutenseko ISCAR (<http://www.floatingwindturbineucm.com>) eta UPV/EHUko Kontrol Automatikoko Taldea (<https://www.ehu.es/eu/web/acg/ikerketa>) ikerketa-taldeen eskutik. Epe laburrean, jardunaldia gune arrakastatsu bihurtu da: bertan aurkezten, eztabaidatzen eta zabaltzen dira ikerkuntza eta hezkuntza arloei dagozkien energia ozeanikoaren aplikazioen azken garapen eta emaitza garrantzitsuenak. Jardunaldiak, arloko diziplina desberdineko adituak, akademiko zein profesionalak, biltzeko aukera eskaintzen du. Hor, sektorean sortutako azken garapenari buruzko esperientziak truka daitezke eta agertzen diren arazo nagusiei aurre egiteko konponbideak aztertu eta eztabaida daitezke.

2021eko abendua.

Aitor J. Garrido

Matilde Santos

Fares M'zoughi

Izaskun Garrido

III Jornada Internacional de Energía Marina
jardunaldiaren antolatzaileak,
RTI2018-094902-B-C21 eta C22 proiektuak

Aire-fluxuaren kontrol-estrategia itsasoko flotatzaile eolikoetan integratutako ur-zutabe oszilagarrien plataforma-egonkortasunerako

Fares M'zoughi
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
Faculty of Engineering of Bilbao,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-2935-3830

Goretti Sevillano-Berasategui
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
Faculty of Engineering of Bilbao,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-1358-9104

Izaskun Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
Faculty of Engineering of Bilbao,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-9801-4130

Aitor J. Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
Faculty of Engineering of Bilbao,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-3016-4976

Manuel De La Sen
Automatic Control Group - ACG,
Department of Electricity and Electronics,
Faculty of Science and Technology,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0001-9320-9433

Abstract—This article presents a new type of control applied to a multipurpose barge-type floating platform capable of harnessing wind and wave energy simultaneously. In addition, wave energy collectors are composed of oscillating water columns (OWC) that will help stabilize the platform and the floating wind turbine (FOWT) by reducing the longitudinal displacement of the upper part of the tower. For this, an airflow control strategy is implemented by acting on the valves of the capture chamber of the OWC devices. The comparative study between a standard FOWT and the FOWT on the platform equipped with the proposed OWC controlled devices shows a considerable improvement in the stability of the system.

Keywords—airflow control; barge platform; floating offshore wind turbine; oscillating water column; wave energy; wind energy.

Laburpena— Artikulu honek haizearen eta olatuen energia aldi berean aprobetxatzeko gai den gabarra motako plataforma flotatzaile bati aplikatutako kontrol mota berri bat aurkezten du. Horrez gain, olatuen energiaren kolektoreak ur-zutabe oszilatzaileez (OWC) osatuta daude, eta plataforma eta flotatzaile eolikoa (FOWT) egonkortzen lagunduko dute, dorrearen goiko zatiaren luzetarako desplazamendua murriztuz. Helburu hori betetzeko, OWC gailuen harrapaketa-ganberaren balbuletan eragingo duen aire-fluxua kontrolatzeko estrategia bat ezartzen da. FOWT estandar baten eta proposatutako kontrolatutako OWC FOWT plataformaren arteko azterketa konparatiboak sistemaren egonkortasunean hobekuntza nabarmena erakusten du.

Hitz Gakoak— aire-fluxuaren kontrola; gabarra plataforma; itsas aerosorgailu flotatzailea; ur-zutabe oszilatzailea; olatuen energia; energia eolikoa.

I. SARRERA

Azken urteotan, energia berriztagarriek izandako bultzada itsasoko aerosorgailuen erabilera sustatzen ari da erabilera

anitzeko plataforma gisa, horrela erabilera hobea, eraginkorragoa eta merkeagoa lortzeko.

Gehien ezagutzen diren plataformak haize-sorgailuak eta olatuen energia-bihurgailuak (WEC) konbinatzen dituzten plataforma mistoak dira, olatuen eta haizearen energia aprobetxatzen dutenak [1-3]. Artikulu honetan gabarra motako plataforma OWC aerosorgailu batekin batera erabiltzea proposatzen da etorkizun handiko emaitzak erakutsiz. J.M. Kluger et al. [4]-ek OC3-Hywind FOWT deritzon Spar motako FOWT eta WEC matrize baten konbinazioaren erabilera ikertu zuen National Renewable Energy Laboratory (NREL). Ondoren, A. Slocum et al. [5]-ek FOWT baterako barneko eta kanpoko puntu xurgatzaileen erabilera aztertu zuen. M. Kamarlouei et al. [6]-ek WEC matrize bat instalatzeak FOWT plataformaren mugimenduak igoeran eta ukurrean gutxitu ditzakeela ondorioztatu zuen. Hala ere, orain arte erabilitako ikuspegiak ez dute OWC erabili gabarra motako FOWT plataformetan.

Desplazamenduak murrizteko FOWT ezberdinetan OWC-ak aplikatu badira ere, batez ere Spar motakoak, OCW-ren erabilera gabarra motako FOWT-ak egonkortzeko ez da oraindik aztertu. Lan honek itsasoko aerosorgailu flotatzaile bat eta ur-zutabe oszilatzaile bat konbinatu nahi ditu, olatuen energia eta energia eolikoa aprobetxatzeko eta OWC-aren erabileraren bidezko FOWT-aren egonkortzea aztertzeko. Kontuan hartu den FOWT-a 5 MW-ko NREL aerosorgailua da gabarra motako ITI Energy plataforman muntatuta dagoena. ITI Energy gabarra Glasgow eta Strathclyde Unibertsitateetako Itsas Arkitektura eta Itsas Ingeniaritza Sailak ITI Energy-rekin duen kontratu baten bidez garatu tako kontzeptua da (ikus [7] gai honi buruzko azalpen zehatza lortzeko). Lan honetan proposatutako ideia OWC-ak ITI Energy gabarra plataforman integratzean datza desiragarriak ez diren mugimenduak murrizteko xedearekin. Hau OWC

bakoitzeko aire-balbulak kontrolatuz lor daiteke aire-fluxua kontrolatzeko estrategia bat erabiliz [8-10] harrapaketa-ganberen aire-fluxua eta presioa doitzeko.

Gainerako artikulua honela antolatuta dago: 2. atalean FOWT eredu eta bere ekuazioak aurkezten dira. Ondoren, 3. atalean aire-fluxuaren kontrol bat proposatzen da, ganberetako aire-fluxua eta presioa erregulatzeko ezarria, FOWT egonkortuko duena. 4. atalean ITI Energy gabarra estandarren eta OWC-n oinarritutako gabarraren arteko FOWT plataformaren azterketa konparatiboa ematen da. Azkenik, 5. atalak lortutako ondorio batzuekin ixten du dokumentua.

II. OWC-AN OINARRITUTAKO FOWT PLATAFORMA EREDUA

Lan honetan aztertzen den turbina hiru palako turbina bat da, abiadura aldakorra, eta 126 m-ko diametroa duen pauso kontrolatuko errotorea izango duena. Palek dorrearen goialdeko kaxan instalatutako sorgailu bat gidatzen dute abatzean, 90 m-ko altueran. Haize turbina lastatutako gabarra moduko plataformara batean muntatuta dago, katenaria-lerroen bidez ainguratuta, noraeza murrizteko eta egonkortasuna hobetzeko. 5 MW-ko aerosorgailuaren eta ITI gabarra plataformaren zehaztapen zehatzak [11]-n aurkitu daitezke, nahiz eta oinarritzko parametro batzuk 1. taulan adierazita egon.

I. TAULA: NREL 5 MW AEROSORGAILUAREN ETA ITI GABARRA PLATAFORMAREN PARAMETROAK.

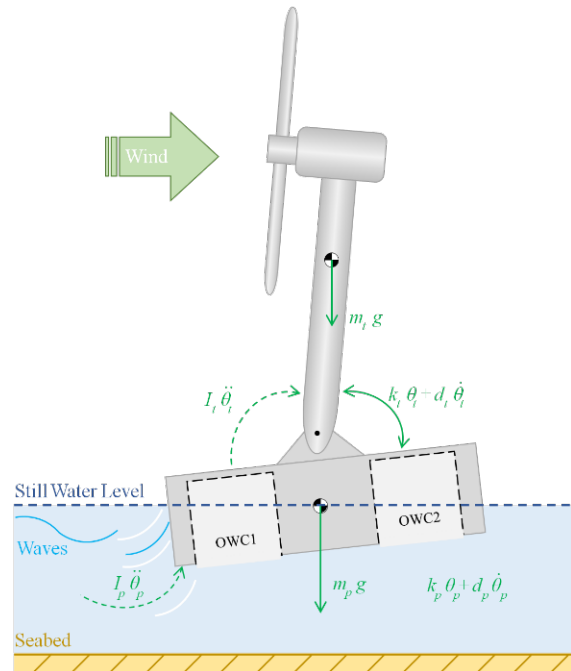
Ezaugarri	Balioa
Potentzia nominala	5MW
Kontrola	Abiadura aldakorra
Haizearen abiarazte abiadura, abiadura izendatua, gelditze abiadura	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Errotorearen abiadura, abiarazte abiadura eta abiadura izendatua	6.9 rpm, 12.1 rpm
Dorrearen -masa	347, 460 kg
Errotorearen diametroa	126 m
Abatzaren altuera	90 m
Plataformaren tamaina	40 m x 40 m x 10 m
Plataformaren masa	5,452,000 kg
Amarratze-lerro kopurua	8
Aingura-sakonera	150 m
Lerroaren diametroa	0.0809 m
Masa-dentsitate lineala	130.4 kg/m

Ikerketa ugariaren arabera, plataforma flotatzaileek bertikalean desplazamendu handia izan arren, jakina da gabarraren ukur-mugimenduak direla eragin handiena dutenak dorrearen makurduran [12]. Y ardatzaren inguruko gabarraren ukurdura honek dorrearen goiko zatiaeren desplazamenduan eragiten du X ardatzaren norabidean, beraz, luzetarako desplazamendua ere oso garrantzitsua da FOWT-en egonkortasunaren azterketan. Hori dela eta, ukur modua soilik gaitu egingo da. Ikuspegi hau FOWT-en egitura-bibrazioa kontrolatzeko eraginkortasun nahikoa eskaintzen duela frogatu da [13-15]. Hortaz, sistemaren ereduak aerosorgailuaren bi modu hartzen ditu kontuan, plataformaren inklinazio-mugimendua eta dorrearen flexio-modua lehenik

hain zuzen ere. Horrez gain, artikulua honetako lanak uhinekin estu lotuta dauden FOWT-en bibrazioen dinamikan arreta jartzen du. Era berean, haize-efektua aerosorgailuan alde batera utzi da, eredu sinplifikatu bat lortzeko eta kontrol egokia diseinatzeko.

A. OWC-n Oinarritutako FOWT Baten Eredu Dinamikoa

Gabarra motako FOWT-rako, aerosorgailuaren turbinaren dorrearen egituraren kargetan eragina duten askatasun-gradu garrantzitsuenak plataformaren inklinazio-mugimendua eta dorrearen luzetarako makurduraren lehen modua dira [16,17]. Hori dela eta, biak erabiltzen dira orden murriztuko aerosorgailu sinplifikatuaren ereduaren diseinuan, dagokien eskema 1. irudian adierazten da.



I. IRUDIA: ITSASOKO AEROSORGAILU FLOTATZAILAREN BATEAN EREDU SINPLIFIKATUA.

n koordenatu orokortuak dituen sistema ez kontserbadore baten Euler-Lagrange ekuazioak (1) eta (2) erabiliz adierazten dira:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

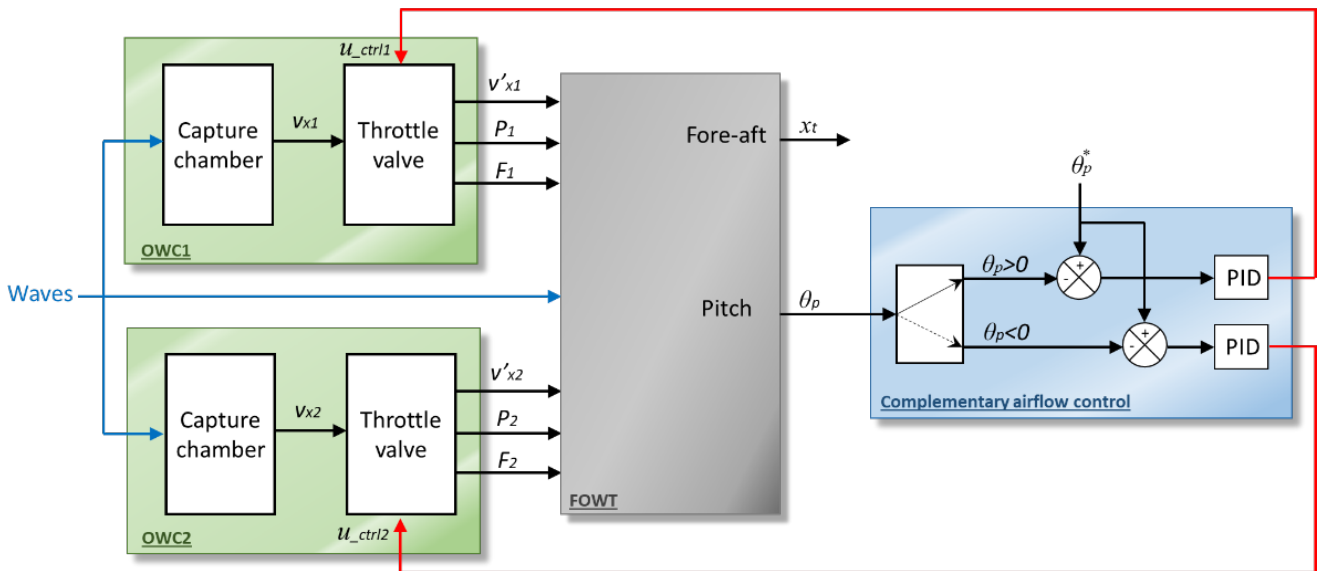
$$L = T - V \quad (2)$$

non T eta V sistemaren energia zinetiko osoa eta energia potentzial osoa diren, hurrenez hurren. L Lagrange-ren operadorea da. Gabarra motako aerosorgailu flotatzailearen energia zinetiko osoa eta energia potentzial osoa honela adieraz daitezke:

$$T = \frac{1}{2} I_t \dot{\theta}_t^2 + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}_p^2 \quad (3)$$

$$V = \frac{1}{2} k_t (\theta_t - \theta_p)^2 + \frac{1}{2} k_p \theta_p^2 + m_t g R_t \cos \theta_t - m_p g R_p \cos \theta_p \quad (4)$$

non k malguki baliokidearen zurruntasun-koefiziente den, θ z ardatz bertikalaren inguruko biraketa-angelua den, I masa-zentroaren inguruko inerti momentua den. m masa da, g grabitazio-azelerazioa eta R masa-zentrotik dorrearen euskarrira dagoen distantzia. p eta t azpiindizeek plataformara eta dorrea adierazteko erabiltzen dira, hurrenez hurren.



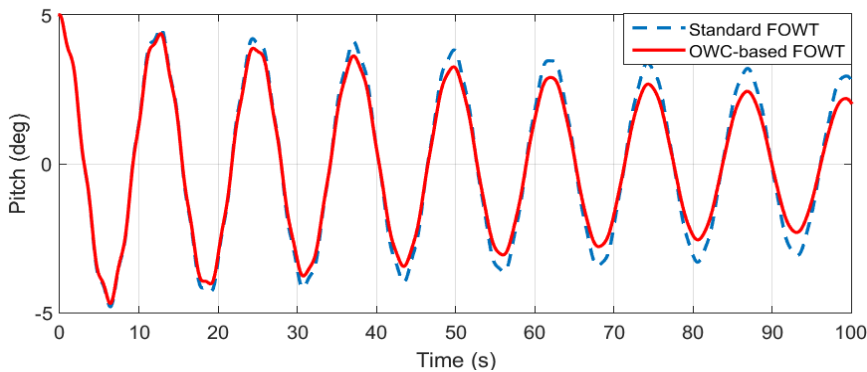
II. IRUDIA: FOWT EGONKORTZEKO PROPOSATUTAKO AIRE-FLUXUAREN KONTROLA OSAGARRIA.

IV. EMAITZAK ETA EZTABAIDAK

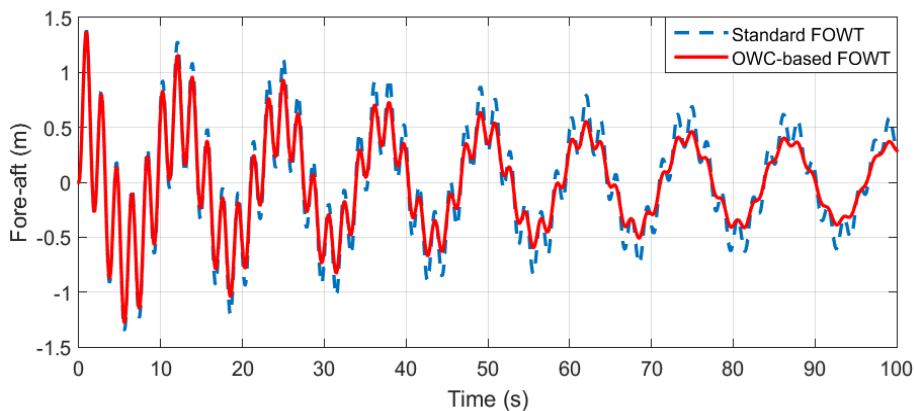
Ikerketa honetan, bi egiturak alderatzen dira haien erantzuna eta perturbazioen moteltzea inolako kitzikatzerik gabe ulertzeko. Zentzu honetan, errotorean ez da inolako karga aerodinamikorik egon behar ezta olatuen kargarik euskarriaren egituraren ere. Beraz, $V_{wind}(t)$ abatzaren altueran dagoen haizearen abiadura eta $Z(t)$ olatuen altuera alde batera utzi behar dira. Ondoren, sistemari hasierako perturbazioa ematen zaio, zehazki plataformaren hasierako 5 graduko inklinazio-angelu baten moduan. Lortutako emaitzak 3. eta 4. irudietan ikusi daitezke.

3. Irudian bi egituren plataformaren ukurdura erantzun moteldua ikusten da eta bi sistemek hasierako perturbazio bezala sartutako 5 gradutan hasten direla ikus daiteke. Antzeman daiteke denboran zehar, simulazioan, plataformaren ukurdura moteldu egiten dela, baina proposatutako OWC-n oinarritutako FOWT-arekin ukurdura hori murrizten da FOWT estandarrekin alderatuta.

4. Irudian, goiko dorrearen luzetarako desplazamendua bi egituretarako irudikatzen da. Hemendik ondoriozta daiteke; luzerako desplazamendu-oszilazioak murrizten direla OWC-n oinarritutako FOWT-an, FOWT estandarrekin alderatuta.



III. Irudia: Erortze askeko erantzuna plataformako FOWT estandarrean eta OWC-n oinarritutako FOWT-ean.



IV. Irudia: FOWT estandarrean eta OWC-n oinarritutako FOWT dorrearen goialdearen luzetarako desplazamendurako desintegrazio askearen erantzuna.

V. ONDORIOAK

Dokumentu honetan, ur-zutabe oszilatzaileak ITI Energy gabarra motako plataforman integratu dira itsasoko aerosorgailu flotatzaile baten eta aire-fluxuaren kontrol osagarri bat proposatu da OWC plataformen egonkortasuna hobetzeko helburuarekin, plataformaren eta dorrearen nahi gabeko inklinazio mugimendua murriztuz.

Horretarako, FOWT eredu lineal sinplifikatu bat garatu da, plataformaren ukurdura eta dorrearen goiko aldeko okerdura modelatzen dituen. Eredu horretatik abiatuta, OWC gailuen presioak eta indarrak integratu dira, OWC ganberak plataformak jasaten dituen indar hidrodinamikoei aurre egiteko duten gaitasuna aztertzeko. Horretarako, inklinazio angeluaren arabera kontrol-seinale egokia ezartzen duen kontrol-eskema bat inplementatu da, PID kontrolagailuen bitartez, hauek, aldi berean, OWC ganberetako emaria kontrolatzen duten balbuletan eragiten dute. Ganberen barruko presioak erregulatuz.

Emaitzek erakusten dute proposatutako OWC sistemetan oinarrituta dagoen FOWT-aren moteltze erantzunak beharokada handiagoa duela gabarran oinarritutako FOWT plataforma estandarrekin alderatuta.

AINTZATESPEN

Lan hau Eusko Jaurlaritzaren ITI207-19 proiektuaren bidez eta MCIU/MINECO RTI2018-094902-B-C21 eta RTI2018-094902-B-C22 (MCIU/AEI/FEDER, EU) proiektuen bidez laguntza jaso du du neurri batean.

EREFERENTZIAK

- [1] J. Hu, B. Zhou, C. Vogel, P. Liu, R. Willden, K. Sun, J. Zang, J. Geng, P. Jin, L. Cui, and B. Jiang, "Optimal design and performance analysis of a hybrid system combining a floating wind platform and wave energy converters", *Applied Energy*, vol. 269, p.114998, 2020.
- [2] J. Sarmiento, A. Iturrioz, V. Ayllón, R. Guanche and I.J. Losada, "Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting", *Ocean Engineering*, vol. 173, pp.761-773, 2019.
- [3] J. Yu, Z. Li, Y. Yu, S. Hao, Y. Fu, Y. Cui, L. Xu and H. Wu, "Design and Performance Assessment of Multi-Use Offshore Tension Leg Platform Equipped with an Embedded Wave Energy Converter System", *Energies*, vol. 13, no. 15, p.3991, 2020.
- [4] J.M. Kluger, A.H. Slocum and T.P. Sapsis, "A first-order dynamics and cost comparison of wave energy converters combined with floating wind turbines", In *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, July, 2017.
- [5] A. Slocum, J. Kluger and S. Mannai, "Energy Harvesting and Storage System Stabilized Offshore Wind Turbines", In *2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)* (pp. 1-6), July, 2019.
- [6] M. Kamarlouei, J.F. Gaspar, M. Calvário, T.S. Hallak, M.J. Mendes, F. Thiebaut and C.G. Soares, "Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform", *Renewable Energy*, vol. 152, pp.1171-1185, 2020.
- [7] W.J.M.J. Vijfhuizen, "Design of a Wind and Wave Power Barge", Master's Dissertation, Department of Naval Architecture and Mechanical Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, Scotland, September, 2006.
- [8] F. M'zoughi, I. Garrido, S. Bouallègue, M. Ayadi and A.J. Garrido, "Intelligent Airflow Controls for a Stalling-Free Operation of an Oscillating Water Column-Based Wave Power Generation Plant", *Electronics*, vol. 8, no. 1, p.70, 2019.
- [9] F. M'zoughi, I. Garrido, A.J. Garrido and M. De La Sen, "ANN-based airflow control for an oscillating water column using surface elevation measurements", *Sensors*, vol. 20, no. 5, p.1352, 2020.
- [10] F. M'zoughi, I. Garrido, A.J. Garrido and M. De La Sen, "Self-adaptive global-best harmony search algorithm-based airflow control of a wells-turbine-based oscillating-water column", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13, p.4628, 2020.
- [11] J.M. Jonkman, "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine", (No. NREL/TP-500-41958). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), (2007).
- [12] J. Jonkman, "Influence of control on the pitch damping of a floating wind turbine". In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 1306, 2008, January.
- [13] M.A. Lackner and M.A. Rotea, "Passive structural control of offshore wind turbines", *Wind energy*, vol. 14, no. 3, pp.373-388, 2011.
- [14] G. Stewart and M. Lackner, "Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp.1090-1104, 2013.
- [15] Y. Si and H.R. Karimi, "Gain scheduling H2/H ∞ structural control of a floating wind turbine", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp.6788-6793, 2014.
- [16] M.A. Lackner and M.A. Rotea, "Structural control of floating wind turbines", *Mechatronics*, vol. 21, no. 4, pp.704-719, 2011.
- [17] P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Garrido and A.J. Garrido, "Performance Analysis on the Use of Oscillating Water Column in Barge-Based Floating Offshore Wind Turbines", *Mathematics*, vol. 9, no. 5, p.475, 2021.
- [18] Y. Hu, J. Wang, M.Z. Chen, Z. Li and Y. Sun, "Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control", *Engineering Structures*, vol. 177, pp.198-209, 2018.
- [19] A. Aubault, M. Alves, A.N. Sarmento, D. Roddier and A. Peiffer, "Modeling of an oscillating water column on the floating foundation WindFloat", In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 44373, pp. 235-246, January, 2011.
- [20] J.C.C. Henriques, W. Sheng, A. Falcão and L.M.C. Gato, "A comparison of biradial and wells air turbines on the Mutriku breakwater OWC wave power plant", In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, June, 2017.

Itsas aerosorgailu flotatzaileen oszilazioak murrizteko kontrol-teknika bat

Payam Aboutaleb
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-2716-1894

Edorta Carrascal-Lekunberri
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz,
Spain
ORCID: 0000-0001-6886-2465

Fares M'zoughi
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-2935-3830

Izaskun Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-9801-4130

Aitor J. Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-3016-4976

Abstract— Artikulu honetan, itsasertzeko aire-turbina flotatzaileetan agertzen diren oszilazioak murrizteko Switching Control estrategia berria proposatzen da. Oszilazio horiek sistemaren eraginkortasuna, bizi-iraupena eta aire eta uhin energia jasotzeko ahalmena mugatzen dituzte. Sistemari nahi ez diren oszilazioak gutxitzea aztertzeke, batez ere goiko dorrearen pitch eta atzera-aurrera mugimenduetan, lau ur-zutabe kulunkari simetrikoko dituen plataforma karratuko gabarra proposatzen da. Ur-zutabe kulunkarien aire-fluxuaren balbulei esker, aire-zutabeak erabil daitezke olatuen mugimendu oszilakorrak eragindako gabarraren mugimenduak kontrolatzeko. Kontrol-eskema diseinatzen denean, erantzun-zabaltasuneko operadoreak erabili dira sistemaren errendimendua ebaluatzeko, uhin-maiztasuneko profil tarte batean. Erantzun-zabaltasuneko operadore horien analisiak aukera ematen du Switching Control estrategia bat ezartzeko, balbulak irekitzeko/ixteko trantsizioa behar bezala doitzeko. Lortutako emaitzak erakusten dute nola proposatzen den gabarra, ur-zutabe kulunkariaren kontrolean oinarrituta, errendimendua hobea duela gabarra tradizionalarekin alderatuta.

Keywords—*Itsas Turbina Eoliko Flotatzaile (Floating offshore wind turbine), Ur-Zutabe Kulunkariak (Oscillating Water Column), Olatuen energia, Switching Control*

I. SARRERA

Energia berriztagarrien baliabide iraunkorrak, hala nola energia eolikoak eta olatuak, gero eta arreta handiagoa erakartzen ari dira klima-aldaketaren eta berotze globalaren inpaktuen ondorioz. Arazo horien aurka borrokatzeko, ezinbestekoa da haizearen eta olatuen hornikuntzarako azpiegiturak garatzea. Itsas turbina eoliko flotatzaileek, Floating Offshore Wind Turbines-ek, (FOWT) zeregin garrantzitsua izan dute baliabide garbi eta berriztagarriak sortzeko haize eta olatuetatik, elektrizitate gehiago sortzen [1]. Mota horretako turbinak kostaldean zehar hedatu dira, hala nola Estatu Batuetan, Espainian, Japonian, Hego Korean, Norvegian eta Marokon [2].

FOWT egiturak ur-zutabe kulunkariak, Oscillating Water Column, (OWC) [3] gehitzeko aukera ematen du energia

eolikoaren eta olatuaren hornikuntzak aprobetxatzeko. OWC da olatuen energia-bihurgailuen klaserik ikertuena. FOWT-OWC sistema konbinatuak eragin handia izan dezake sistemaren kostuak orekatzeko orduan, eragiketa eta mantentze partekatuen eta sare komuneko azpiegituraren abantailak aprobetxatuz [4]. Gainera, sistemaren leundutako irteera-potentzia eta eraginkortasuna handitu ditzake [5].

Horrela, FOWTaren egonkortzea da sistemak planteatzen duen erronketako bat, plataformari nahi ez diren bibrazioak arintzeko eta ahalik eta energia gehien biltzeko [6]. Nahi ez diren mugimendu horiek eraginkortasun aerodinamikoa murrizten dute, dorrearen bizitza-aldi erabilgarria laburtzen dute eta tentsioak areagotzen dituzte paletan, errotorearen ardatzean, keinu-kojineteetan eta dorrearen oinarrian. Beraz, garrantzitsua da FOWTaren plataformaren mugimenduak mugatzea tarte egoki baten barruan [7].

FOWTaren mugimenduak murrizteko, proposamen desberdin topa daitezke bibliografian. Autore batzuek gabarra motako FOWT geldoen erabilera proposatu dute dorrearen desplazamenduak kontrolatzeko, hala nola Y. Zhang et al. [8]an eta Y. Hu et al. [9]an.

Zenbait artikulu FOWT-OWC sistematan oinarritutako gabarrak proposatu dituzte, sistemaren ekuazio ez-linealekin lan eginik. J.M. Jonkmanek [10] ilargi-igerileku karratu bat diseinatu zuen gabarraren erdian, turbina eolikoaren dorrean OWC bat gehitzeko aukera ematen duena; hala ere, sistema hibrido horren helburua ez zen sistema egonkortzea. P. Aboutaleb et al. [11]an gabarra hibridoan, FOWT-OWC-en, errendimendua aztertu zuten sistemaren egonkortasuna areagotzeko itsas egoera desberdinetan. Hala ere, aurretik ikusitako ikuspegiak ez dute proposatzen OWCetako balbulak kontrolatzeko inolako estrategiarik.

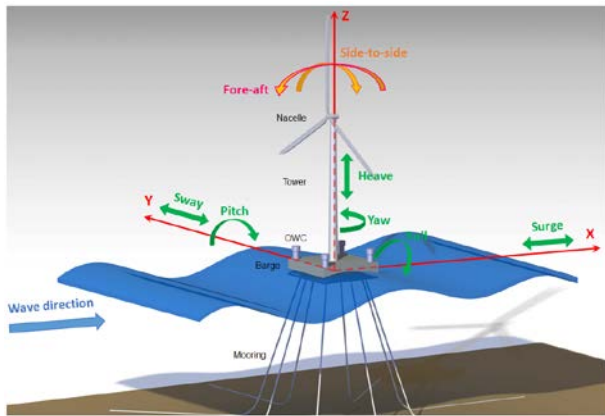
Ikerketa honetan, NREL 5-MWen gabarraren eredu ez-lineala ikertzen da. Lau OWC kokatu dira gabarran, itsasoko hainbat egoeretan oszilazioak murrizteko, batez ere goiko dorreko pitch eta fore-aft mugimenduak. Erantzun-zabaltasuneko operadoreak, Response Amplitude Operators

(RAO) erabilita, konmutazioa kontrolatzeko, Switching Control, estrategia bat proposatu da, OWCetako balbulak irekitzearen eta itxtearen arteko trantsiziotarako. Proposatzen den OWCn oinarritutako FOWT, gabarra tradizionalarekin alderatu da, proposatzen den sistema hibridoaren kontrolak ematen duen etekina aztertzeko.

Hau da ikerketaren gainerako egitura: II. Atalak, FOWT-OWC hibridoaren egitura azaltzen du bere mugimendu-ekuazioekin. III. Atalak, ikerketak aztertzen duen enuntziatua aurkezten du; proposatutako konmutazioa kontrolatzeko estrategian erabilitako RAOak aurkezten ditu. IV. Atalean, Kontrol-adierazpena aztertzen da. V. Atalak, proposatutako konmutazio-kontrolaren eraginkortasuna aztertzeko itsasoko hainbat egoeratan kasu bat aurkezten da. Azkenik, VI. Atalean, ikerketaren ondorioak aurkezten dira.

II. MODELUAREN ADIERAZPENA

Lan honetan, plataformaren izkinetan lau OWC jartzen dira, 1. irudian adierazten den bezala. Gabarra karratua, FOWT dorrearekin konektatzen da eta itsasoko urarekin lastatzen da zingo egokia lortzeko, olatu jarraituen eragina saihesteko egokia. Plataforma, zortzi katenaria-kableren bidez ainguratzen da, desbidera ez dadin. Lerroak izkinetatik ateratzen dira eta haien artean 45°tako angelua osatzen dute.



1. IRUDIA. FOWT gabarren plataforma 4 OWCekin eta horren askatasun graduak (DOF).

Azterketa honetan ez dira kontuan hartu haize-indarrak, ezta ondoko serboen indarrak: pitch, yaw eta sorgailua kontrolatzeko turbinaren eolikoarenak. Beraz, zortzi askatasun-maila, Degree of Freedom (DOF) ebaluatzen dira. Hauak, ingeles terminologian, surge, sway, heave, roll, pitch, yaw, fore-aft (aurre-hera) eta side-to-side (alborako) mugimenduak dira. FOWTaren erantzun dinamikoak, FAST programan erabili dira, mugimendu ez-linealen ekuazioak implementatzeko.

I. Taulak aurkezten ditu aztertuko diren ohiko gabarraren plataformaren ezaugarriak baita OWCak dituen plataformarenak.

OWC sistema duen plataforma batean dagoen turbinaren eoliko baten mugimenduari dagokion denboraren domeinuko ekuazio ez-lineal multzoa horrela adieraz daiteke:

$$M_{ij}(q, u, t)\ddot{q}_j = f_i(q, \dot{q}, u, t) \quad (1)$$

non M_{ij} , inertzia masikoaren matrizearen (i,j) osagaia den, u kontrol-sarrerak diren, t denbora den, \ddot{q}_j , j-garren DOF-aren bigarren deribatua den eta f_i kanpoko indar orokortua den. Horrek, palen eta gondolaren gaineko karga aerodinamikoak, plataformaren gaineko indar hidrodinamikoak, indar elastikoak eta serboak batzen ditu.

I. TAULA: ITI GABARRAREN EZAUGARRIAK [13]

Parameter	Value
Size (W×L×H) for both platforms	40 m × 40 m × 10 m
Size (W×L×H) for each OWC	5 m × 5 m × 10 m
Draft, Free board for both platforms	4 m, 6m
Water displacement for the simple barge	6400 m ³
Water displacement for the barge with OWC	5600 m ³
Mass, Including Ballast	5,452,000 kg
CM Location below SWL	0.281768 m
Roll Inertia about CM	726,900,000 kg.m ²
Pitch Inertia about CM	726,900,000 kg.m ²
Yaw Inertia about CM	1,453,900,000 kg.m ²
Anchor (Water) Depth	150 m
Separation between Opposing Anchors	773.8 m
Unstretched Line Length	473.3 m
Neutral Line Length Resting on Seabed	250 m
Line Diameter	0.0809 m
Line Mass Density	130.4 kg/m
Line Extensional Stiffness	589,000,000 N

Esan bezala, ikerketa honek ez ditu haize-indarrak kontuan hartzen ezta yaw-ren, pitch-en eta turbinaren eolikoaren kontrolatzeko erabiltzen diren serbo indarrak. Horrela, zortzi askatasun gradu hartzen dira kontutan: surge, sway, heave, roll, pitch, yaw, fore-aft eta side-to-side mugimenduak.

Maiztasun-domeinuko mugimendu-ekuazio linealen sistema honela idazten da:

$$I_{FOWT}(\omega)\ddot{q} + B_{FOWT}(\omega)\dot{q} + C_{FOWT}q = \vec{f}_{FOWT}(\omega) + \vec{f}_{PTO} \quad (2)$$

non I_{FOWT} , B_{FOWT} eta C_{FOWT} inertzia, indargetze eta zurruntasun matrizeak diren. $\vec{f}_{FOWT}(\omega)$ uhinek plataforman sortzen duten indar hidrodinamikoak eta herrestatze likatsua adierazten duen eta $\vec{f}_{PTO}(\omega)$ Power-Take-Off (PTO) hornikuntzak sortzen duen karga adierazten du. (2) Ekuazioan agertzen den q , DOF bektorea, horrela definitzen da:

$$q = \begin{bmatrix} surge \\ sway \\ heave \\ roll \\ pitch \\ yaw \\ fore - aft \\ side - to - side \end{bmatrix} \quad (3)$$

Inertzia-matrizea horrela adierazten da:

$$I_{FOWT}(\omega) = A_{Hydro}(\omega) + M_{Platform} + M_{Tower} \quad (4)$$

non $M_{Platform}$ and M_{Tower} plataformaren eta dorrearen masa-matrizeak diren. Dorrea plataformarekiko makurtzeko moduen elementuen akoplamendua M_{Tower} matrizean adierazita dago. $A_{Hydro}(\omega)$ plataformaren eta OWCren masa gehigarria den, maiztasunaren menpekoa, WAMITek

kalkulatua panelaren erradiazio-programatik abiatuta. 3. Ekuazioak sistemaren moduak aurkeztu ditu; lehenengo sei ek plataformaren mugimenduak adierazten dute eta azken bi ek dorrearen flexio-desplazamenduak.

Hauxe da indargetze matrizearen adierazpena:

$$B_{FOWT}(\omega) = B_{Hydro}(\omega) + B_{Tower} + B_{viscous} + B_{chamber} \quad (5)$$

non $B_{Hydro}(\omega)$ plataforma eta OWCen indargetze-matrizea den. WAMIT lortzen du panel-erradiazioko programa baten bidez. B_{Tower} dorre zinbelaren indargetze-matrizea den. $B_{viscous}$ plataformako arrastatze likatsu ez-lineala den. $B_{chamber}$ PTOk, kanpoko indar giza adierazita, dinamika orokorrean duen eragina den.

Zurruntasun-matrizea, C_{FOWT} , horrela definitzen da:

$$C_{FOWT} = C_{Hydro} + C_{Mooring} + C_{Tower} \quad (6)$$

non C_{Hydro} WAMIT bidez lortutako plataformaren eta OWCen leheneratze hidrostatiokoaren matrizea den. $C_{Mooring}$ -ek lokailu lerroen zurruntasun-koefizienteak adierazten dituen eta C_{Tower} dorrearen zurruntasun matrizea den.

2. Ekuazioaren eskuinaldeko gaia horrela idatz daiteke:

$$\vec{f}_{FOWT}(\omega) = \vec{f}_{Hydro}(\omega) + \vec{f}_{viscous}(\omega) \quad (7)$$

non $\vec{f}_{Hydro}(\omega)$ plataforma gainean uhinek sortzen duten indar hidrodinamikoak den eta $\vec{f}_{viscous}(\omega)$ indar likatsua. $\vec{f}_{Hydro}(\omega)$ WAMITen bidez lor daiteke.

MultiSurf softwarea erabiliz plataformen geometria diseina daiteke. Hiru plataforma alderatu dira. Lehenengo plataforma gabarra karratu bat da, gabarra plataforma estandarra deitua, 2a Irudian erakusten dena. Bigarren modeloa antzeko gabarra-plataforma da, lau OWC izkinetan dituen; kasu honetan OWCen balbulak itxita daude, 2b Irudian ikus daitekeen bezala. Hirugarren modeloa, 2c Irudian irudikatua, gabarra bera da, lau OWCak plataformaren izkinetan ditu, balbulak irekita daudela.

MultiSurfen plataformak diseinatu ondoren, WAMIT tresna erabili da A_{Hydro} , B_{Hydro} eta C_{Hydro} matrizeak ezagutarazteko. Software konputazional aurreratu horrek olatuen sarreren eta itsas plataforma flotatzaileen arteko elkarreaginaren analisia egiten du. WAMITek, uraren presioak hezeguneetan eragindakoa karga hidrodinamikoak kalkulatzen ditu. Hauek MultiSurfer konecta daitezke eredu geometriko flotatzailea erabiltzen denean.

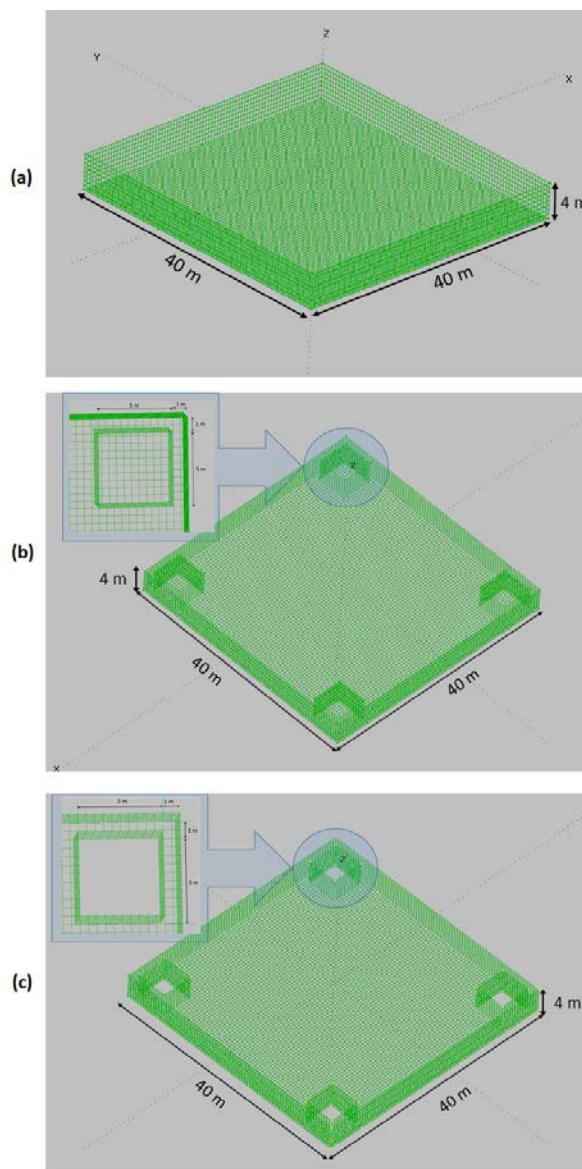
Plataforma saretua erabiliz, egindako kalkulu aurreratuak mugimenduen ekuazioetan sar daitezke, FAST eta MATLABen simulazioak egiteko.

III. IKERKETAREN ADIERAZPENEA

FOWTetan agertzen diren oszilazioak ez dira desiragarriak, mugimendu horiek ondorio negatiboak baitituzte sisteman; sistemaren egiturazko osagaien tentsioa eta energia haizearen eta olatuen energia atzipenaren murrizketa barne [14]. Sistemaren mantentze-kostuen handitzea agertzen den beste efektu bat da. Arazo horri aurre egiteko, sistema zehaztasunez aztertu behar da itsasoaren egoera desberdinentzako. Atal honetan, sistemaren mugimenduen azterketa azaltzen da. Horrek, kontrol

estrategia baten diseinua ahalbidetuko du Geroago, mugimenduaren analisia aztertuz.

Itsasoko egoera desberdinetan FOWTen mugimendua ebaluatze RAO-ak erabiltzea funtsezkoa da. Ikertzaileek, itsas sistemen mugimendua ebaluatze RAO-ak erabili dituzte hainbat aplikaziotan. Atal honetan, RAOak marrazteko prozedura azaltzen da sarrerako/irteerako sistemaren egoera desberdinentzat. Honako hau da sistemaren translazio- eta errotazio-egoerentarako RAO-ak lortzeko prozedura maiztasunaren eremuan: Lehenik eta behin, proposatutako hiru txalupen ereduak erabili dira WAMIT-en kalkulu aurreratuak egiteko eta horrela masa agregatuko matrizea, moteltze matrizea, matrize hidrostatioko eta matrizea hidrodinamiko lortzeko. Lortutako matrizeak mugimendu ez-linealen ekuazioetan erabiliko dira, sistemaren emaitzak lortzeko.



2. IRUDIA. Plataformaren geometria (a) gabarraren plataforma estandarrentzat. (b) 4 OWCtan oinarritutako gabarren plataformarentzat balbulak itxita dituela. (c) 4 OWCtan oinarritutako gabarren plataformarentzat balbulak irekita dituela.

Sistemaren modu bakoitzeko, RAOak kalkulatu dira sarrerako dentsitate autoespektralaren (uhinaren goratzea) eta sarrera/irteerako dentsitate espektral gurutzatuaren (sistemaren erantzunak) bidez. Horretarako, ondoko ekuazioa erabili da [14]:

$$RAO = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (8)$$

non $S_{xy}(\omega)$ eta $S_{xx}(\omega)$ sarrera $x(t)$ eta irteerako $y(t)$ dentsitate espektral gurutzatua eta dentsitate autoespektrala maiztasun domeinuan diren hurrenez hurren.

Prozedura sei aldiz burutu da ($M = 6$). Zarata zuriko uhinen sarrerak erabili dira hazi desberdinekin. Aldi iragankorreko efektuak kontuan hartu ez direla bermatzeko, ikerketaren hasierako 2000 s-ak baztertu ziren. Honetaz gain, uhin-sarreraren anplitudea metro batera egokitu da uhinen linealtasuna bermatzeko. Bukaeran, espektroa leuntzeko batez besteko multzoak kalkulatu dira.

Uhinak zero graduko norabidea dute, airea lasai dagoela. Gainera, linealtasun eza definitzen da dorrea malgutzat hartzerakoan, karga hidrodinamikoetan, efektu likatsuan eta lokailu-lerroetan. Sistemaren zortzi egoerako RAOak aztertzen dira: surge, sway, heave, roll, pitch, yaw, fore-aft eta side-to-side, 3.a-h irudietan ikus daitezkeen bezala. RAOen periodo-tartea 2 s eta 35 s artekoa da. 3. Irudian hiru kurba, berde, gorri eta urdin agertzen dira, gabarra plataforma estandarra, OWC irekietan oinarritutako gabarra plataforma eta OWC itxian oinarritutako gabarra plataforma irudikatzen dutenak, hurrenez hurren.

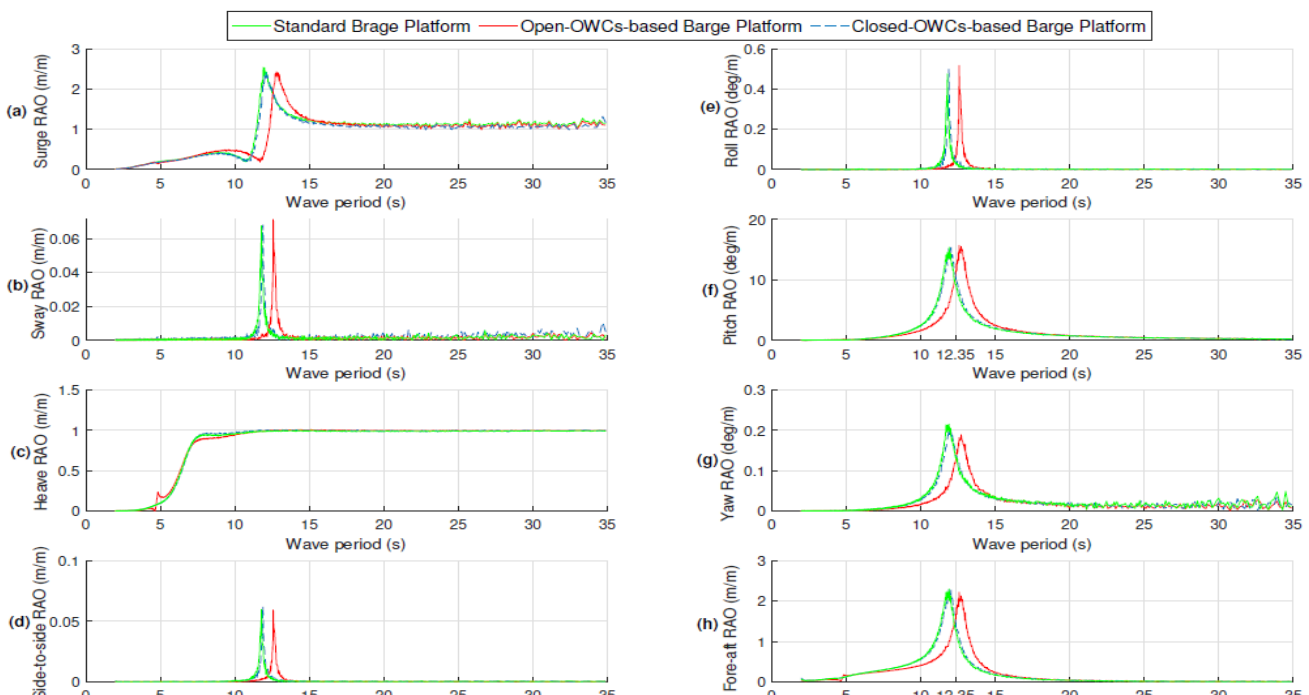
Irudiaren ikusten den puntu garrantzitsu bat nabarmendu behar da. Espero daitezkeen bezala, txalupa estandarren plataformaren eta OWC itxian oinarritutako gabarren plataformaren RAOen kurbak ia berdinak dira. Honek esan nahi du bien jokaera berdina izango dela hainbat kasuetan.

3. irudian surge-DOFari dagokion RAOa agertzen da. Ikus daitezkeenez, 2 eta 7,5 s tartean eta 15 eta 35 s tartean

hiru plataformen surge-ren RAOak berdinak dira. Honen interpretazioa zera da: plataforma guztiek surge-ren portaera bera dute denbora-tarte horientzat. Surge-ren erresonantzia-maiztasunak 11.9 s, 12.12 s eta 12.8 s-tan daude gabarra estandarren plataformetarako, OWCn oinarritutako gabarra itxietarako eta OWCn oinarritutako gabarra irekietarako, hurrenez hurren.

Ingurumen-baldintza gisa, uhinaren norabidea zero gradukoa dela eta airea geldirik dagoela suposatzen da. Beraz, sway-norabidean kitzikatutako egoerek oszilazio oso txikiak izatea espero da. 3b, d, e, g Irudiak har daitezke horren proba: hor, sway, side-to-side, roll eta yaw RAO-ak adierazita daude, hurrenez hurren. 3c irudian agertzen den heave-ri dagokion RAO aztertzerakoan hiru plataformek joera bera dutela ikus daiteke. Horrek esan nahi du oszilazio modu bera izango dutela altxatzerakoan.

3f eta 3h irudiak aztertzea oso garrantzitsua da ikerketa honetan. Pitch-aren RAOren (PRAO) eta Fore-aft-aren RAOren (FRAO) portaeraren azterketak proposatutako kontrol-estrategiaren ideia bat ematen baitu. PRAOen eta FRAOen kurbak ia berdinak dira, Gabarra estandarren eta OWC itxian oinarritutako gabarraren, oso alde txikiak agertzen dira gabarren artean. Irudietan ikusten den bezala, RAOa handitzen denean, modu horri dagokion oszilazioa ere handitzen da. 3 f irudiak erakusten du nola gabarren PRAOen periodo naturalak 11,9 s, 12,02 s eta 12,58 s-tan kokatuta dauden. Uhin-periodoak, gabarraren periodo naturala gaintzen duenean, plataformen PRAOa ia zerora iristen da. 2-12,25 s eta 2-12,35 s bitarteko periodo-tarteetan ikus daitezkeenez. OWC irekietan oinarritutako gabarraren PRAO askoz txikiagoa da gabarra estandarrena edo OWC itxian oinarritutako gabarrarena baino. Gainera, 12,25 s eta 12,35 s baino periodo handiagoentzat, gabarra estandarren edo OWC itxian oinarritutako gabarraren PRAOak txikiagoak dira OWC irekietan oinarritutako gabarrarena baino.



3. IRUDIA. RAOak uhin periodo desberdinetzat: (a) Surge. (b) Sway. (c) Heave. (d) Side-to-side. (e) Roll. (f) Pitch. (g) Yaw. (h) Fore-aft.

Plataformen FRAO-ek, PRAO-ek duten joera bera aurkezten dute. 4h Irudiak aurkezten du nola FRAQ-en periodo naturalak 11.79 s, 11.88 s eta 12.58 s-koak diren, gabarra estandarrentzat, OWC itxietan oinarritutako gabarrarentzat eta OWC irekietan oinarritutako gabarrarentzat hurrenez hurren. Periodo naturalaren ostean, plataformen FRAO-ak ia zeroraino jaisten direla ikus daiteke. PRAOetan bezala, OWC irekietan oinarritutako gabarraren FRAOren balioa txikiagoa da gabarra estandarrena edo OWC itxietan oinarritutako gabarrarena periodoak 12.25 s eta 12.35 s baino txikiagoak direnean. Periodoak 12,25 s eta 12,35 s baino handiagoak direnean, OWC irekietan oinarritutako gabarren FRAO balioa handiagoa da gabarra estandarrena edo OCW itxietan oinarritutako gabarrarena baino.

IV. KONTROLAREN ADIERAZPENA

Atal honetan, OWC-en konmutazioa kontrolatzeko estrategia bat proposatzen da, sistemaren oszilazioak gutxitzeko, bereziki pitch eta fore-aft. Aurreko atalean, itsasoaren egoera desberdinetan hiru plataformaren jarduna ebaluatu zen. Modu desberdinen artean, azken atalean deskribatutako ingurumen-baldintzak kontuan hartuta, atal honetan PRAO eta FRAO hautatu dira azterketa zehatzagoak egiteko.

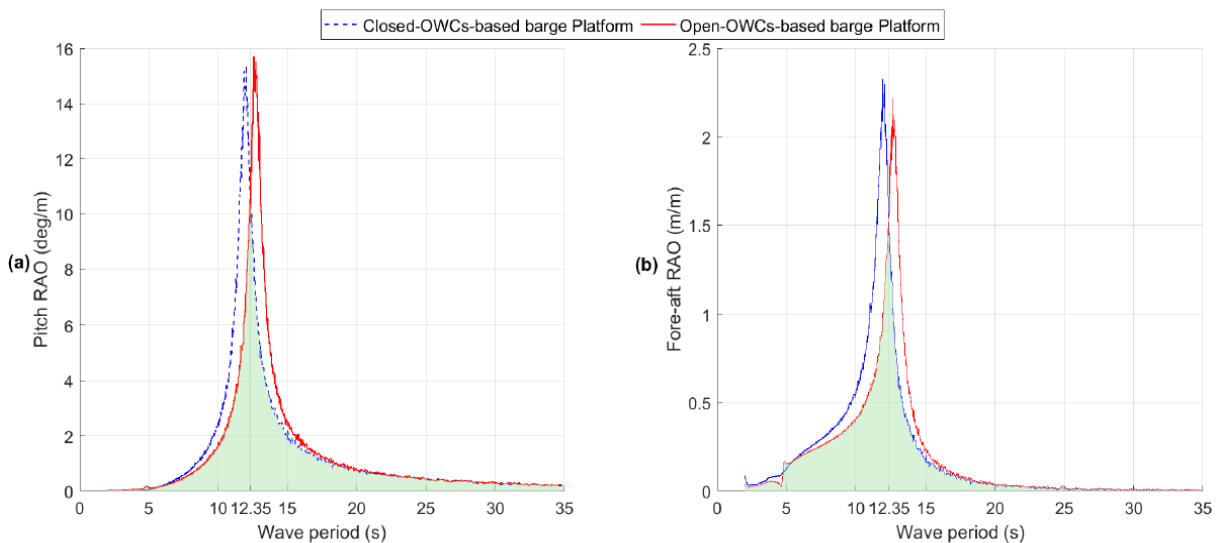
4a, b irudiak PRAO eta FRAO erakusten ditu OWC itxietan oinarritutako gabarretarako eta OWC irekietan oinarritutako gabarretarako, urdinez eta gorritz, hurrenez hurren. OWC itxian oinarritutako gabarra plataforma lau OWC-z hornituta dago balbulak itxita daudela; OWC

duela, hau da etekin handiago. Gainera, 12,35 s-tik gorako olatu-periodoentzat, OWC itxian oinarritutako gabarren plataformak OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformak baino oszilazio txikiagoa du, hau da etekin hobea. Beraz, 4a, b irudien eskualde berdeek errendimendu onena duten eskualde operatiboak adierazten dituzte.

4. irudiko plataformen jardunaren analisiak sistemaren oszilazioak murrizteko kontrol-estrategiaren ideia ematen du. FOWT kontrolatuaren bloke-diagrama 5. irudian adierazten da. Kontrol-sistema horretan, FOWTak dago, plataformaren behaldean, olatuen periodoa neurtzeko, sentsore bat duelarik. Sentsoreak neurtzen duen balioa, konmutazio-kontrolera pasatzen da. Konmutazio-kontrolak balbulak irekitzeko agintzen dio sistemari, uhin-periodoa 12,35 s baino txikiagoa denean. Kontrol-estrategia horrek aukera ematen dio sistemari eskualde berdeetan errendimendu optimoa izateko.

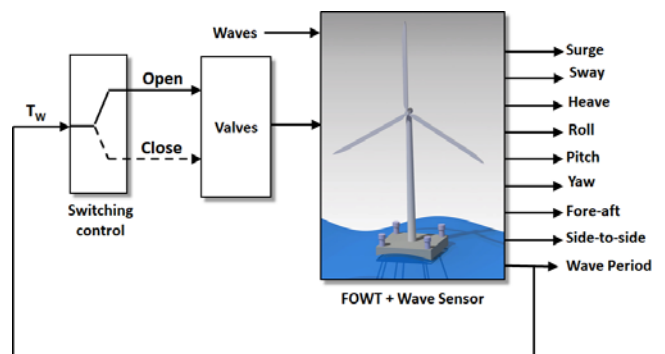
V. EMAITZAK ETA EZTABAIDA

Atal honetan, 4 OWCTan oinarritutako gabarraren plataforma kontrolatutakoaren etekina gabarraren plataforma estandarrekin, kontrolik gabekoa, alderatzen da. Aurrerago azaldu den bezala, hau da konmutazioa kontrolatzeko estrategia: OWCren balbulak irekita daude uhin-periodoa 12,35 s baino txikiagoa denean; kontrol-konmutazioak, berriz, OWCen balbulak ixtea agintzen du uhin-periodoa 12,35 s baino luzeago denean. Kontrol-estrategia horretan, 4. Irudian agertzen diren eskualde berdeak dira lan zonalde operatibo onenak.



4. IRUDIA. Pitch-en (a) eta Fore-aft-en (b) RAO-ak.

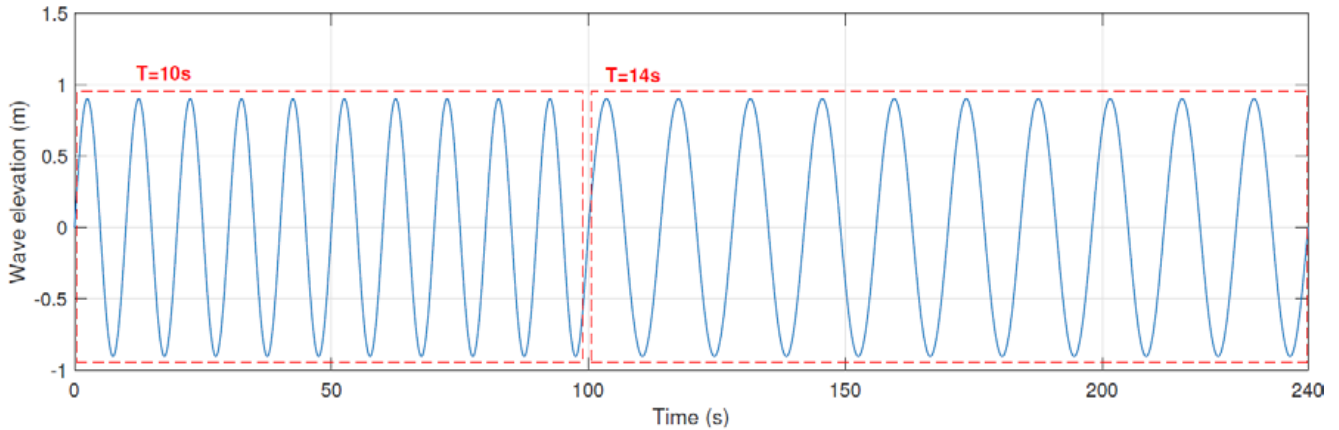
irekiet irekita duen iau OWC dituen gabarra plataforma da. 4a, b irudietan ikus daitekeenez, OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformaren PRAO eta FRAOk balio baxuagoak dituzte OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformarekin alderatuta, olatu-periodoa 12.35 s baino txikiagoa denean. Bestaldek, 12,35 s-tik gorako olatu-periodoentzat, OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformaren PRAO eta FRAO OWC, irekietan oinarritutako gabarren plataformaren baino altuagoak dira. Horrek esan nahi du 12,35 s baino gutxiagoko olatu-periodoetan OWC irekietan oinarritutako txalupa-plataformak OWC itxietan oinarritutako txalupa-plataformak baino oszilazio txikiagoa



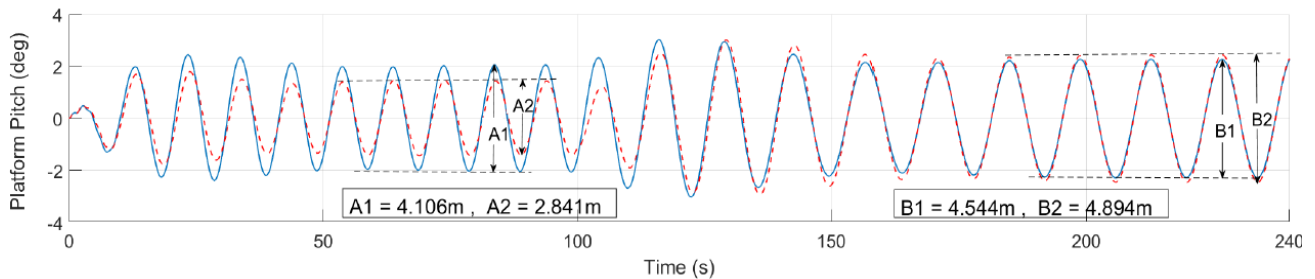
5. IRUDIA. Kontrolatutako FOWT-aren diagrama

Kontrol-sistemak denboraren eremua egonkortzeko duen gaitasuna erakusteko, bi uhin-periodo hautatu dira, bata 12,35 s baino txikiago eta bestea 12,35 s baino handiago. Aztertutako jokalekuan, 4 OWCetan oinarritutako gabarren plataformaren eta gabarra plataforma estandarren erantzuna

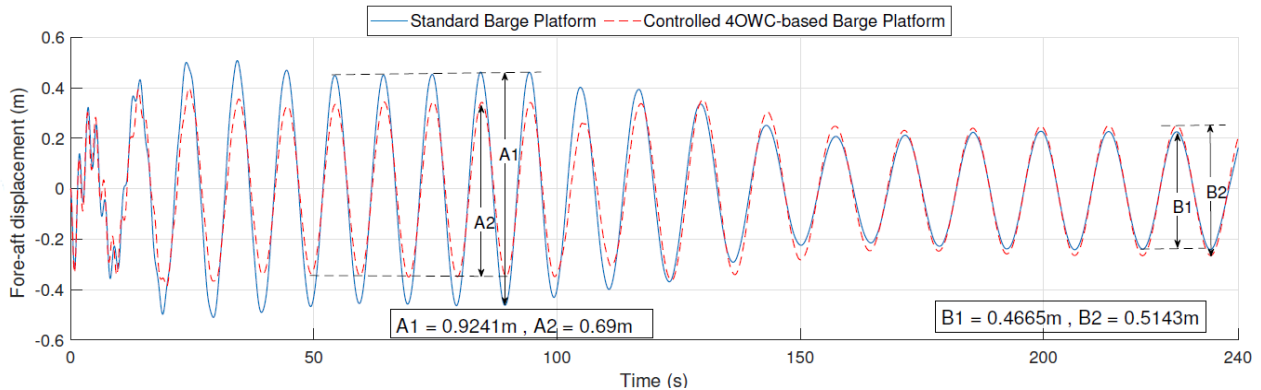
itsasoren bi egoera desberdinean aztertuko da. 0-100 s tartean, uhinen periodoa 10 s-koa izango da. 100-240s-ko tartean, uhin-periodoa 14 s-koa izango da. Uhinaren anplitudea 0,9 izango da bi kasuetan 6. Irudian ikus daitekeenez.



6. IRUDIA. Considered wave input.



7. IRUDIA. Plataformaren pitch angelua.



8. IRUDIA. Fore-aft displacement.

Kontrolaren helburua gabarren pitch eta fore-aft oszilazioak murriztea dela gogoratu behar da. 3f eta 4a irudietan ikus daitekeenez, OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformaren PRAOa gabarra estandarren plataformakoa baino txikiagoa da uhin periodoa 10 s denean. Periodo horrentzako, kontrolatzaileak balbula guztiak irekitzen ditu plataforman, plataformaren jokabidea OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformarena izan dadin. Beraz, 7. Irudian agertzen den denbora tarterako, Pitch-en oszilazioak %30,8 txikitzen dira 4,11 gradutik 2,84 gradutara pasatuz, kontrolatutako 4 OWC-tan oinarritutako gabarren plataforma erabiltzen denean. Bestalde, 4f eta 5a irudiak kontuan hartuta, 14 s-ko uhin-periodorako, OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformaren PRAOak baxuagoak

dira OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformakoa baino. Beraz, periodoaren balioa 14 s izatera pasatzen denean, 100 s ondoren, kontrolak balbula guztiak ixten ditu plataformak OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformak gisa jardun dezan. Irudian agertzen denez, oszilazio moduak antzekoak dira gabarra estandarrean eta OWC itxietan oinarritutako gabarren plataforman. PRAO aztertuta, aipatutako plataformen pitch-a ia berdina izatea espero da maiztasun guztietarako.

10 s-ko periodoa aztertzen denean, OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformarako PRAOa gabarra estandarren plataformakoa baino txikiagoa da, 3h eta 4b irudietan ikus daitekeen moduan. Horrek esan nahi du OWC

irekietan oinarritutako gabarren plataformakoak fore-aft oszilazio gutxiago gertatzea espero dela, gabarra plataforma estandarrekin alderatuta. 8. Irudian, 0 s eta 100 s artean 10 s uhin-periodo erabiltzen da. Kontrolak balbula guztiak irekitzen ditu plataformak OWC irekietan oinarritutako gabarren plataforma gisa jardun dezan. Horren ondorioz, irudian ikus daitekeenez, fore-aft oszilazioak % 25 murriztu ziren, 0,92 m-tik gabarra plataforma estandarerako, 0,69 m-ra 4 OWCn oinarritutako gabarren plataformarako. 14 s-tako uhin-periodorako, ordez OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformaren eta gabarra estandarren FRAOen kurbak OWC irekietan oinarritutako gabarraren plataformarenak baino txikiagoak dira. 100 s pasa ondoren, uhin periodoa 14s-koa izango da eta kontrolak balbula guztiak itxiko ditu. Irudian ikusten denez. Kasu honetan, gabarraren plataformaren eredia OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformarena izango da. Irudian ikus daitekeenez, gabarra estandarren eta OWC itxietan oinarritutako gabarren plataformaren oszilazioak ia berdinak diren.

VI. ONDORIOAK

Artikulu horretan, OWC-n oinarritutako gabarren plataformaren balbulen konmutazioa kontrolatzeko metodo bat proposatu da, FOWTren oszilazioak murrizteko; pitch eta goiko dorrearen fore-aft oszilazioak, batez ere. Helburu hori lortzeko, FOWTaren mugimenduak hainbat modutan ebaluatu ziren, RAOak erabiliz maiztasun domeinuan. RAOen analisiaren bidez, plataforman ezarritako OWCen balbulak irekitzeko/ixteko metodo berri bat proposatu zen. RAOen arabera, uhin-periodo laburretan ($< 12,35$ s) OWC irekietan oinarritutako gabarren plataformaren etekina hobea dela ikusi zen; horren ondorioz, kontrolak OWCren balbulak irekiko ditu. Bestalde, uhin-periodo luzeentzat ($> 12,35$ s), OWC itxietan oinarritutako gabarraren plataforma eta gabarraren plataformaren estandarren oszilazioek errendimendu hobea aurkezten dute OWC irekietan oinarritutako gabarraren plataformarena baino. Horren ondorioz, kontrolatzaileak OWCren balbulak itxiko pitch eta goiko dorrearen fore-aft mugimenduak murrizteko. Uhin ezaugarriak neurtzeko, gabarraren plataformaren behealdean ADCP bat muntatzea proposatzen da. Proposatutako kontrol-metodoaren jarduna erakusteko, hurrengo jokalekua proposatu zen: Uhin intzidenteen periodoa 10 s izango da 0 s eta 100 s bitarteko aldirian. Ondoren, 100 s eta 240 s tartean, uhin-periodoa 14 s-koa izango da. Emaitzek erakusten dute nola uhin intzidentearen periodoa 10 s-koa denean pitch eta goiko dorrearen fore-aft oszilazioak murrizten diren 4 OWCetan oinarritutako gabarraren plataforma kontrolatuarentzat, gabarra plataforma estandarrekin alderatuta. Beraz, frogatu da proposatutako kontrol-estrategiak sistemaren errendimendua hobetzen duela, kontrolik gabeko plataforma estandarrekin alderatuta oszilazioak murrizten baditu maiztasun desberdinentzako.

Lan horren zati bat Eusko Jaurlaritzak babestu du, IT1207-19 proiektuaren bidez, eta MCIUk/MINECok RTI2018-094902-B-C21/RTI2018-094902-B-C22 (MCIU/AEI/FEDER, UE) direlakoaren bidez.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Suzuki, Y. Sakai, Y. Yoshimura, H. Houtani, L.H. Carmo, H. Yoshimoto, K. Kamizawa and R.T. Gonçalves. "Non-Linear Motion Characteristics of a Shallow Draft Cylindrical Barge Type Floater for a FOWT in Waves," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, p. 56, 2021.
- [2] A. Benazzouz, H. Mabchour, H.; K. El Had, B. Zourarah and S. Mordane. "Offshore Wind Energy Resource in the Kingdom of Morocco: Assessment of the Seasonal Potential Variability Based on Satellite Data," *J. Mar. Sci. Eng.* vol. 9, p. 31, 2021.
- [3] M. Karimirad and K. Koushan. "WindWEC: Combining wind and wave energy inspired by hywind and wavelstar," In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, 20–23 November 2016; pp. 96–101.
- [4] E. Quevedo, M. Delory, A. Castro, O. Llinas, and J. Hernandez. "Modular multi-purpose offshore platforms, the TROPOS project approach," In Proceedings of the Fourth International Conference on Ocean Energy (ICOE), Dublin, Ireland, 17–19 October 2012; pp. 1–5.
- [5] A. Sharay and G. Iglesias. "The economics of wave energy: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 397–408, 2015.
- [6] M. A. Lackner. "An investigation of variable power collective pitch control for load mitigation of floating offshore wind turbines," *Wind Energy*, vol.16, no. 3, pp. 435–444, 2013.
- [7] M. N. Haji, J. M. Kluger, T. P. Sapsis, and A. H. Slocum. "A symbiotic approach to the design of offshore wind turbines with other energy harvesting systems," *Ocean Engineering*, vol. 169, pp. 673–681, 2018.
- [8] Y. Zhang, X. Zhao and X. Wei. "Robust structural control of an underactuated floating wind turbine," *Wind Energy*, vol. 23, pp. 2166–2185, 2015.
- [9] Y. Hu, J. Wang, M.Z. Chen, Z. Li and Y. Sun. "Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control," *Eng. Struct.*, vol. 177, pp. 198–209, 2018.
- [10] J. Jonkman. "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine," No. NREL/TP-500-41958. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2007.
- [11] P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Garrido, A.J. Garrido. "Performance Analysis on the Use of Oscillating Water Column in Barge Based Floating Offshore Wind Turbines," *Mathematics*, vol. 9, p. 475, 2021.
- [12] P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Martija, I. Garrido, and A. J. Garrido, "Switching control strategy for oscillating water columns based on response amplitude operators for floating offshore wind turbines stabilization," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 5249, 2021.
- [13] F. M'zoughi, P. Aboutalebi, I. Garrido, A.J. Garrido and M. De La Sen. "Complementary Airflow Control of Oscillating Water Columns for Floating Offshore Wind Turbine Stabilization," *Mathematics*, vol. 9, p.1364, 2021.
- [14] G.K.V. Ramachandran, A. Robertson, J.M. Jonkman, M.D. Masciola. "Investigation of Response Amplitude Operators for Floating Offshore Wind Turbines (No. NREL/CP-5000-58098)," National Renewable Energy Lab. (NREL): Golden, CO, USA, 2013.

Modelado y Validación de Modelos Híbridos OWC-FOWT basados en ANN para Estabilización Plataformas Flotantes

Irfan Ahmad

Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering,
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU,
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0001-6075-2464

Izaskun Garrido, Senior Member, IEEE

Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU,
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-9801-4130

Fares M'zoughi

Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU,
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-2935-3830

Aitor Garrido, Senior Member, IEEE

Automatic Control Group - ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU,
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-3016-4976

Abstract—In this work, an Artificial Neural Network (ANN) model for Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) with assimilated Oscillating Water Columns (OWCs) is presented and considered for floating platform stabilization purposes. To do so, a deep-layered feedforward neural network is trained to create a model by means of sigmoid and linear activation functions. It is shown that the FOWT ANN network predicts the generated power and rotational speeds from wind and wave data inputs. The model is validated using FAST output data in MATLAB/Simulink environment and it shows and accurate performance in diverse sea scenarios.

Keywords—artificial neural network, barge platform, floating offshore wind turbine, oscillating water column, mean squared error.

Resumen—En este trabajo se presenta un modelo de Red Neural Artificial (ANN) para Turbinas Flotantes Offshore (FOWTs) con sistemas de Columna de Agua Oscilante incorporados (OWCs) al objeto de mejorar la estabilidad de la plataforma. Para ello, se entrena una red neuronal feedforward con capas profundas para crear un modelo utilizando funciones de activación lineal y sigmoide. Se muestra cómo la red FOWT ANN predice tanto la potencia generada como la velocidad de rotación a partir de entradas de olas y viento. El modelo ha sido validado mediante datos de salida FAST en un entorno MATLAB/Simulink y muestra un rendimiento preciso para diversos estados de mar.

Palabras clave— red neuronal artificial, plataforma de barcas, turbina eólica marina flotante, columna de agua oscilante, error cuadrático medio.

I. INTRODUCCIÓN

Como resultado del cambio climático, los mercados emergentes y las economías en desarrollo, la demanda de energía aumentará un 4,6% en 2021, según recogen previsiones energéticas a nivel global [1]. Así, el mercado mundial se ve impelido hacia recursos energéticos limpios para hacer frente a necesidades básicas. Si bien existen diversas fuentes de energía disponibles, los recursos de energía limpia producidos por los vientos y las olas se han incrementado significativamente en la última década como

se muestra en la Figura 1, de forma que existen numerosas investigaciones en marcha en el área tan prometedora.

De acuerdo a algunas previsiones, para 2050 Europa habrá de contar con una infraestructura de energía marina que cubre aproximadamente el 10% del consumo su energía a partir de energía de las olas y mareas [2]. En este sentido, varios países, incluidos el Reino Unido y España, han participado en diferentes proyectos basados en el desarrollo de convertidores de energía undimotriz (WECs) [3].

Por otra parte, se dispone de un considerable potencial de recurso eólico terrestre y marino, en parte debido al calentamiento y enfriamiento diferencial de las superficies terrestres y marinas adyacentes, de manera que cabría potenciar la instalación de aerogeneradores cerca estas costas. Sin embargo, debido a la falta de disponibilidad de terrenos utilizable en el entorno costero y a los problemas medioambientales, las turbinas eólicas marinas, y en particular las flotantes, brindan una excelente alternativa. Como consecuencia, la producción eólica marina se ha incrementado notablemente como se puede ver en la Figura 1.

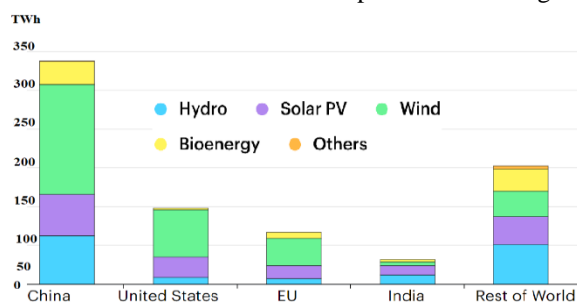


Figura. 1. Incremento de generación de energía por tecnología, país y región entre 2020 y 2021

Las turbinas eólicas flotantes marinas (FOWT) funcionan según el principio de la ley de conversión de la energía de energía cinética a energía eléctrica. La energía eólica implica el uso de turbinas eólicas para producir energía mecánica. Esta energía mecánica se utiliza luego para hacer girar generadores eléctricos para producir a su vez energía eléctrica. El otro sistema de generación que está integrado con la FOWT se llama columna de agua oscilante

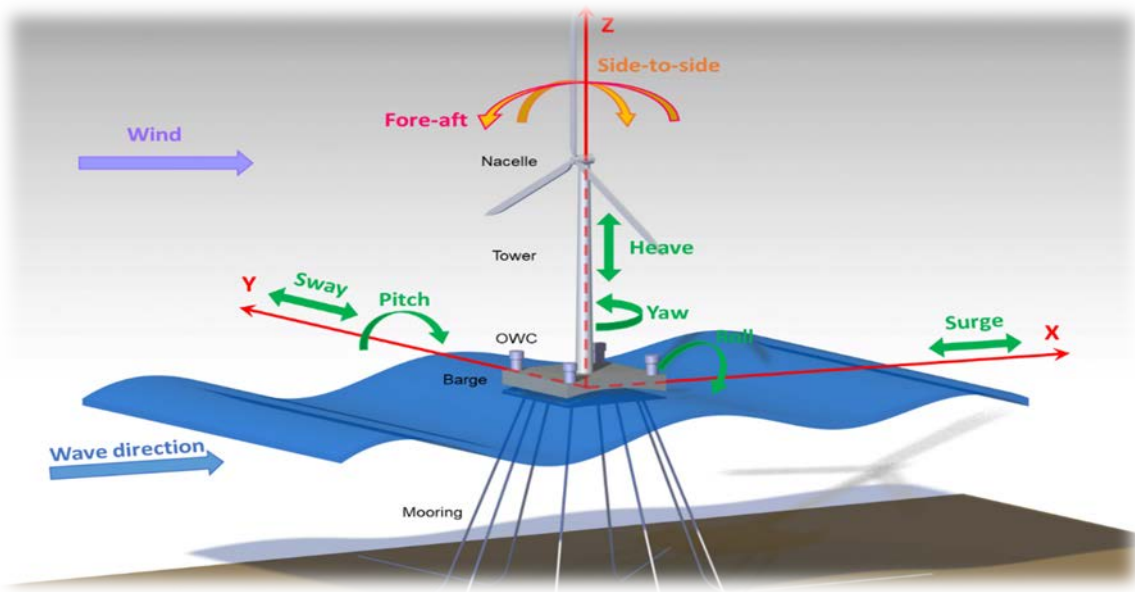


Figura. 2. Integración de OWCs en la plataforma tipo barcaza de la FOWT

(OWC). El principio operativo de los OWCs es simple: Consiste en una cámara cerrada que tiene una abertura inferior que permite que el agua fluya hacia arriba y hacia abajo, de modo que se comprime y descomprime el aire por efecto de la subida y bajada del agua, lo que hace que la turbina gire. Las turbinas están instaladas en la parte superior de las cámaras de manera que no tocan el agua. Este tipo de OWCs se ha instalado, e.g., en la central de Mutriku [4].

No obstante, los esfuerzos y la fatiga que son inducidos por el viento y las olas producen un impacto negativo en la vida útil de las estructuras de las plataformas flotantes [5]. Esto causa una reducción de la eficiencia, vibraciones no deseadas, altos costos de mantenimiento y fallos en el equipo. Actualmente se están llevando a cabo algunas investigaciones para tratar de estabilizar la estructura y mitigar estos efectos secundarios adversos [6]. Para controlar el movimiento no deseado de las plataformas tipo barcaza se plantean distintos métodos: Tuned Mass Damper (TMD), Inverters, Liquid Mass Dampers (LMD), líneas de amarre, etc. [7]-[9]. Al objeto de limitar el comportamiento en pérdida y mejorar la tensión en el FOWT se puede también cambiar el empuje del rotor ajustando el ángulo de inclinación de la pala. A modo de ejemplo, J. Jonkman et al. utilizaron una técnica proporcional-integral de ganancia ajustable que se utiliza en el simulador FAST (Fatiga, Aerodinámica, Estructuras y Turbulencia), diseñando un controlador de paso de pala colectivo para tres turbinas eólicas flotantes primarias [10].

FAST une la aerodinámica, la servodinámica hidrodinámica y la dinámica estructural, de modo que es posible también utilizar control estructural pasivo o activo para reducir la carga en aerogeneradores flotantes. Así, mediante un TMD montado en la góndola, M.A. Lackner et al. [11] desarrolló sobre FAST-SC el diseño de control estructural en FOWTs basado en FAST. También se ha utilizado control predictivo basado en modelo (MPC) para mejorar las limitaciones impuestas por el movimiento de la plataforma [12].

Cabe tener en cuenta, no obstante, que FAST y FAST-SC solo permiten la simulación y el control de FOWT mediante regulación de los ángulos de inclinación de las palas, control de par o control estructural pasivo (TMD e inversor) pero no ofrecen la posibilidad de control en lazo cerrado del control estructural activo, como es el caso de sistemas OWC integrados en la plataforma. Sin embargo, en [13], Aboutalebi et al. consiguen integrar 4 OWCs en una plataforma de este tipo con resultados prometedores. En este contexto, el presente trabajo propone la obtención de un modelo ANN para el sistema FOWT con los citados OWC integrados en la plataforma tipo barcaza (Figura 2) [14].

El resto del artículo está organizado como sigue: En la sección II se describe la estrategia ANN y se desarrolla el modelo FOWT basado en ANN. En la sección III se aportan las correspondientes simulaciones, validación y resultados. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones.

II. MODELO FOWT BASADO EN ANN

Una red neuronal artificial (ANN) es una estructura inspirada biológicamente que puede imitar y realizar tareas de manera análoga a como lo haría el cerebro humano, al menos en primera aproximación [15]. La ANN se utiliza para aprender de los datos con el fin de hacer predicciones futuras y es capaz de reconocer patrones y emitir juicios basados en la información previamente almacenada. En la figura 3 se muestra una estructura básica de este tipo: La conexión de la capa de entrada a la capa oculta se representa como un número llamado peso (w). Un ciclo completo a través del conjunto de datos de entrenamiento se define como época. La transferencia de datos desde la capa de entrada a la capa de salida se denomina red de alimentación directa. En general, una neurona tiene N número de entradas y pesos. Los vectores fila de las entradas y el peso

vienen representados por $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ y $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ respectivamente y su producto escalar está dado por en la ecuación 1.

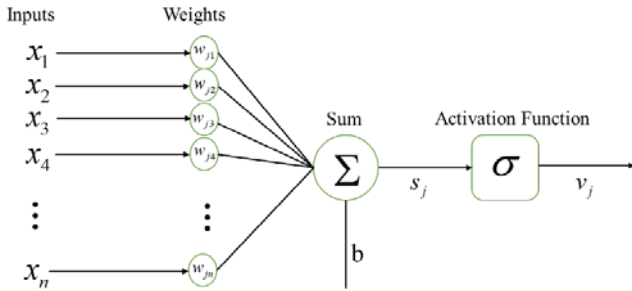


Figura. 3. Estructura típica de neurona artificial

Además, existe otro término llamado sesgo b , que se usa para tener en cuenta parámetros desconocidos. Así, la función de suma de k_{ih} neurona a N neuronas se puede representar como:

$$S_j = \sum_{k=1}^N w_{jk} x_k + b_j \quad (1)$$

donde S_j es la suma, w_{jk} es el peso que establece la conexión de j^{th} neuronas de la capa actual a la k^{th} neurona de la capa anterior, b_j es el sesgo y N es el número total de neuronas. Luego, esta suma S_j se pasa a través de una función de activación.

$$v_j = \sigma_j(S_j) = \sigma_k \left\{ \sum_{j=1}^N w_{jk} x_k + b_j \right\} \quad (2)$$

donde, v_j es la salida de la neurona y σ_j es el coeficiente de activación de la j^{th} neurona. Algunas funciones de activación tradicionalmente utilizadas son la sigmoide, unidad lineal rectificada (ReLU) y tanh, que se pueden definir como:

$$\sigma_j(S_j) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, & \text{Sigmoid/Logistic} \\ \frac{\sin(S_j)}{\cos(S_j)} = \frac{e^{S_j} - e^{-S_j}}{e^{S_j} + e^{-S_j}}, & \text{tanh} \\ \max(0, S_j), & \text{(ReLU)} \end{array} \right\} \quad (3)$$

Para funciones lineales y no lineales, el perceptrón multicapa (MLP) compone una red ANN de alimentación directa de uso común. Las estructuras de las redes, las características de las neuronas y los algoritmos de aprendizaje son los puntos clave del modelado de ANN. Para la selección del mejor modelo, se elige la red que tiene el error cuadrático medio (MSE) más bajo [16]. La expresión del MSE se puede definir como:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_k^n v_k - v'_k \quad (4)$$

donde, n es el número total de observaciones, v_k es el resultado objetivo y v'_k es el resultado estimado por ANN.

En base a todo ello, se ha desarrollado un modelo FOWT basado en ANN con OWC integrados para la estabilización de la plataforma, recopilando datos a través de FAST mediante la computación masiva y reiterada al objeto de obtener diferentes respuestas dinámicas del viento teniendo en cuenta una elevación de olas de amplitud constante. De esta forma, se ha incorporado el conjunto de datos de dos entradas [2x40000], viento (m/s) y ola (m) para la predicción de dos salidas, potencia generada (kW) y velocidad de rotación (rpm) que tienen en cuenta las propiedades aerodinámicas e hidrodinámicas en el desarrollo de la red ANN (Figure. 4). Esta red dispone de 10 capas ocultas en las que las neuronas utilizan una función de activación tipo sigmoide, mientras que utiliza una función de activación ReLU en la capa de salida. Al objeto de obtener resultados satisfactorios se ha considerado trabajado en base al error cuadrático medio (MSE).

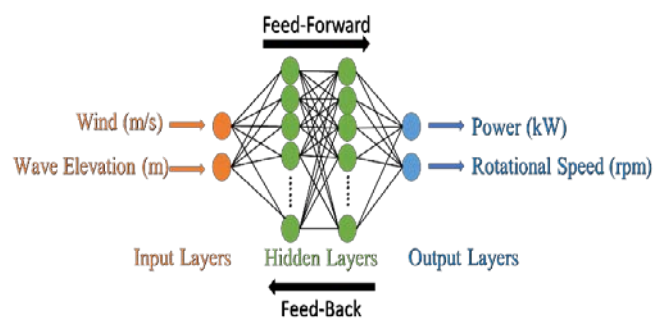


Figura. 4. Red ANN perceptrón multicapa

Además, se ha utilizado el algoritmo Levenberg-Marquardt (LM) con método de descenso de gradiente, que se encarga de actualizar los pesos y reducir el MSE objetivo. La estructura de funcionamiento recursivo se representa mediante el diagrama de flujo de la figura 5.

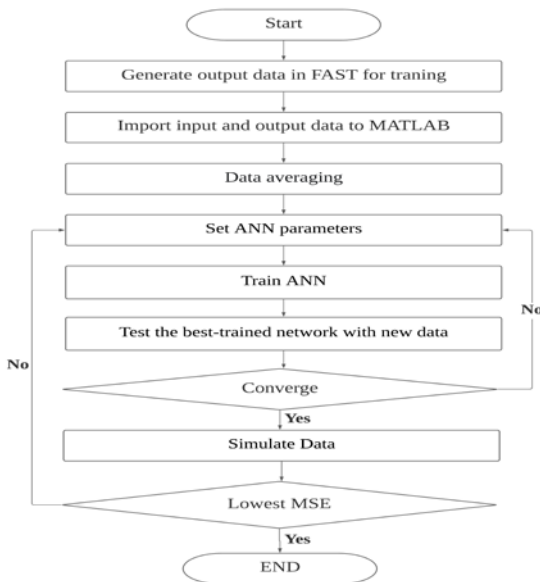


Figura 5. Diagrama de flujo diseño ANN

III. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del modelo obtenido al objeto de valorar su comportamiento. Se han utilizado datos de FAST durante 250s para cada velocidad del viento, recopilados mediante técnicas de promediado.

A. Resultados de entrenamiento:

Al objeto de obtener un mejor rendimiento y ajuste, se llevan a cabo numerosas simulaciones para encontrar el mejor ajuste. De esta forma, se alimentan datos entrenamiento de FAST a la estructura ANN proporcionando la velocidad de rotación y la potencia estimadas. Los datos se dividen en tres partes: 70% de los datos para entrenamiento (datos de entrenamiento), 15% de los datos para validación (datos de validación) y 15% de todos los datos para prueba (datos de prueba). Las gráficas correspondientes, esto es, de entrenamiento, pruebas y validación se muestran en las figuras 6 y 7, utilizando una línea azul para el entrenamiento, una línea verde para la validación y una roja para las pruebas. Como se puede ver en el historial de entrenamiento, el mejor desempeño de validación se ha encontrado para $MSE = 1784$ en 124 épocas, caso para el cual la regresión converge adecuadamente, por lo que se concluye que la relación entre entrada y salida es satisfactoria.

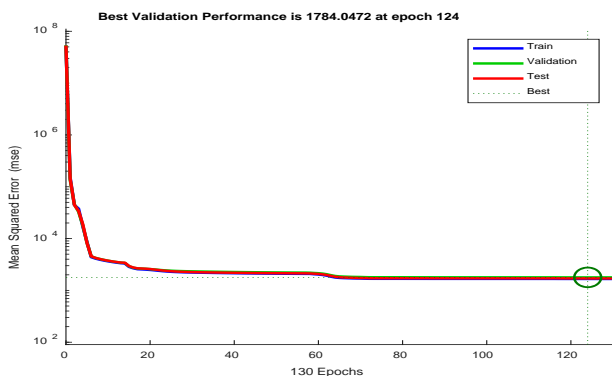


Figura 6. Historial de rendimiento de entrenamiento neuronal

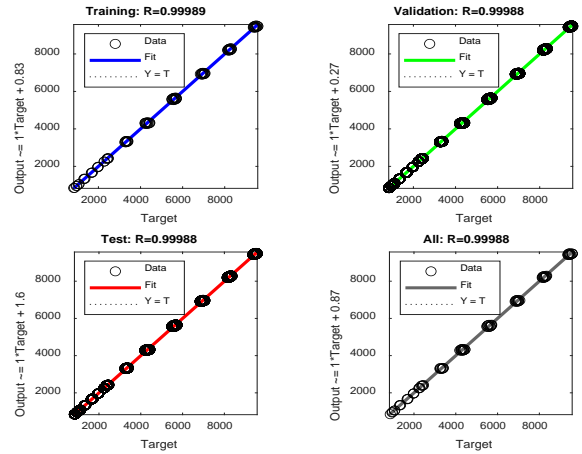


Figura 7. Curvas de regresión (validación y prueba)

Así mismo, las figuras 8 y 9 representan los datos de elevación de ola regular de entrada y velocidades de viento durante los 250 segundos.

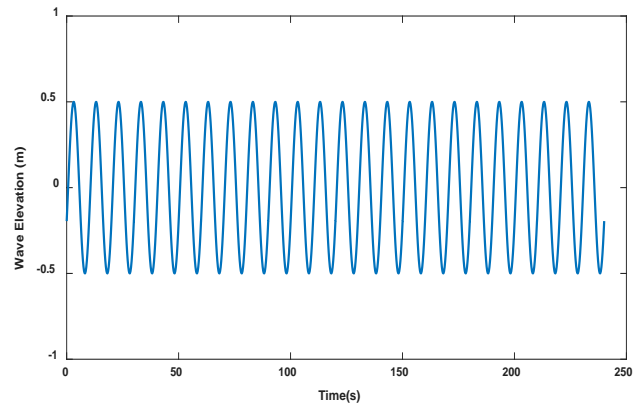


Figura 8. Elevación de la ola de entrada

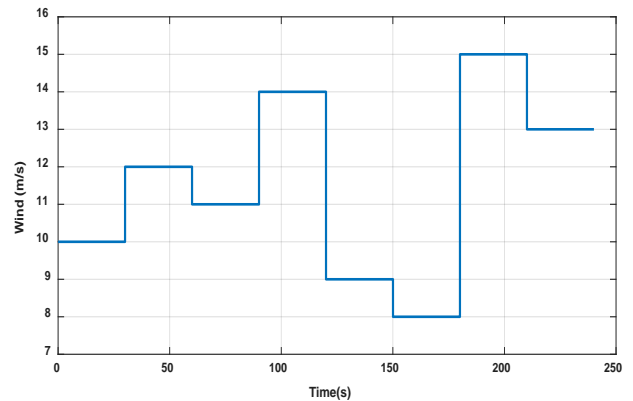


Figura 9. Velocidades de viento de entrada

Una vez establecido el modelo ANN, éste se puede validar ya directamente en el entorno Matlab / Simulink. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 10 y 11: la línea roja para corresponde al modelo ANN desarrollado y la línea azul discontinua a las salidas de FAST. Como se puede observar, a medida que aumenta la velocidad del viento, aumenta la velocidad de rotación generada. Se

puede ver además cómo la potencia supera su valor nominal de 5MW: por ejemplo, a una velocidad del viento de 15 m/s, la potencia supera los 9MW. Esto es así debido a la ausencia de control de ángulo de inclinación o control de par.

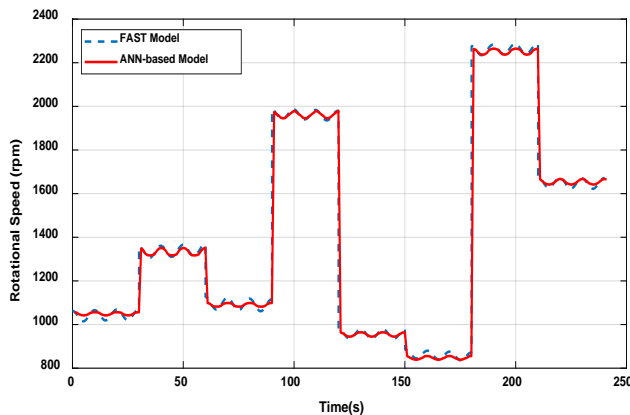


Figura 10. Velocidad de rotación FAST vs ANN

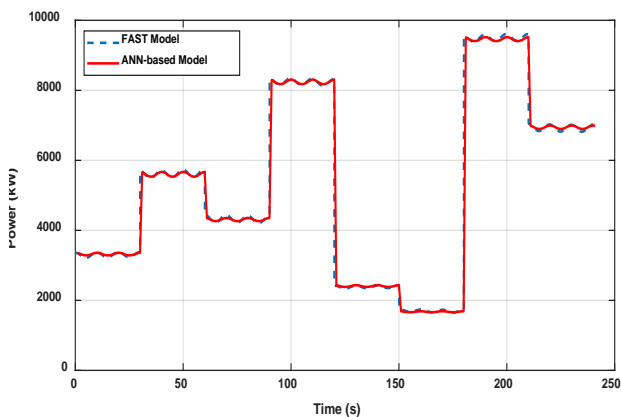


Figura 11. Potencia de salida FAST vs ANN

IV. CONCLUSIÓN

El presente documento presenta el desarrollo de un modelo FOWT basado en ANN con cuatro OWC integrados en la plataforma. Los datos se han obtenido incorporando las propiedades hidrodinámicas y aerodinámicas FAST para el sistema híbrido. La red ha sido entrenada con los parámetros adecuados para reducir el MSE objetivo. A continuación, se simuló la red con diversas velocidades del viento y condiciones de ola para demostrar la validez del modelo ANN obtenido. Los resultados del modelo FOWT basado en ANN se compararon con los del modelo FAST completo, resultado preciso en la predicción tanto de la potencia generada como de la velocidad de rotación.

REFERENCIAS

- [1] IEA, Renewable electricity generation increase by technology, country and region, 2020-2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-electricity-generation-increase-by-technology-country-and-region-2020-2021>.
- [2] V. Ramos, G. Giannini, T. Calheiros-Cabral, P. Rosa-Santos, and F. Taveira-Pinto, "Legal framework of marine renewable energy: A re-view for the atlantic region of europe," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, p. 110608, 2021.
- [3] A. Maria-Arenas, A. J. Garrido, E. Rusu, and I. Garrido, "Control strategies applied to wave energy converters: State of the

art," *Energies*, vol. 12, no. 16, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/16/3115>

- [4] F. M'zoughi, S. Bouallegue, and M. Ayadi, "Modeling and simulation of an oscillating water column for ocean energy conversion," in *The Sixth International Renewable Energy Congress (IREC 2015)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [5] J. Lekube, O. Ajuria, "Fatigue and aerodynamic loss in wells turbines: Mutriku wave power plant case," in *7th International Conference on Ocean Energy, Cherbourg, France*. Basque Energy Agency (EEE/EVE), 2018, pp. 1–6.
- [6] P. Aboutalebi, A. J. Garrido, F. M'zoughi, and I. Garrido, "Stabilization of a floating offshore wind turbine using oscillating water columns," in *Proceedings of the 2nd Workshop on Wind and Marine Energy (WWME)*, Online, vol. 17, 2020.
- [7] D. Leng, Y. Yang, K. Xu, Y. Li, G. Liu, X. Tian, and Y. Xie, "Vibration control of offshore wind turbine under multiple hazards using single variable-stiffness tuned mass damper," *Ocean Engineering*, vol. 236, p. 109473, 2021.
- [8] K. A. Shah, F. Meng, Y. Li, R. Nagamune, Y. Zhou, Z. Ren, and Z. Jiang, "A synthesis of feasible control methods for floating offshore wind turbine system dynamics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, p. 111525, 2021.
- [9] Y. Yang, M. Bashir, C. Li, and J. Wang, "Investigation on mooring break-age effects of a 5 mw barge-type floating offshore wind turbine using f2a," *Ocean Engineering*, p. 108887, 2021.
- [10] J. M. Jonkman and D. Matha, "Dynamics of offshore floating wind turbines—analysis of three concepts," *Wind Energy*, vol. 14, no. 4, pp. 557–569, 2011.
- [11] M. A. Lackner and M. A. Rotea, "Passive structural control of offshore wind turbines," *Wind Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 373–388, 2011. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.426>
- [12] K. A. Shah, Y. Li, R. Nagamune, Y. Zhou, and W. U. Rehman, "Platform motion minimization using model predictive control of a floating offshore wind turbine," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, p. 100295, 2021.
- [13] P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Garrido, and A. J. Garrido, "Performance analysis on the use of oscillating water column in barge-based floating offshore wind turbines," *Mathematics*, vol. 9, no. 5, p. 475, 2021.
- [14] P. Aboutalebi, F. M'zoughi, I. Martija, I. Garrido, and A. J. Garrido, "Switching control strategy for oscillating water columns based on response amplitude operators for floating offshore wind turbine stabilization," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 5249, 2021.
- [15] A. Ojo, M. Collu, and A. Coraddu, "A review of design, analysis and optimization methodologies for floating offshore wind turbine substructures," *Analysis and Optimization Methodologies for Floating Offshore Wind Turbine Substructures*, 2021.
- [16] F. M'zoughi, I. Garrido, A. J. Garrido, and M. De La Sen, "ANN-based air flow control for an oscillating water column using surface elevation measurements," *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1352, 2020.

Virtual Instrumentation System for the Characterization of the NTC Temperature Sensor

Iñigo J. Oleagordia Aguirre
Automatic Control Group – ACG,
Department of Electronics and Telecommunications,
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-1843-3683

Aitor J. Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group – ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering,
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-3016-4976

Izaskun Garrido, *Senior Member, IEEE*
Automatic Control Group – ACG,
Department of Automatic Control and Systems Engineering,
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-9801-4130

José I. San Martín
Automatic Control Group – ACG,
Department of Electrical Engineering,
Engineering School of Bilbao – EIB/BIE,
University of the Basque Country – UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0001-7603-8089

Abstract— The common thread of this work is the description, development and implementation of a modular system made up of various virtual instruments (VI) focused on the experimental analysis and characterization of NTCs thermistor temperature sensors. The functionality of these virtual instruments serves as a bridge between theory and their use in the industrial field. Its teaching application, as a didactic resource with different purposes, is located in the Electronic Instrumentation and Virtual Instrumentation subjects corresponding to the Bachelor's degree in Industrial Electronics and Automatic taught at the Engineering School of Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU).

Keywords—*Thermistor, NTC, Electronic Instrumentation, Virtual Instruments, LabVIEW*

I. INTRODUCTION

One of the most intensely measured physical variables in the monitoring and control of industrial processes is temperature. Among others, temperature sensors such as NTCs (Negative Temperature Coefficient), RTDs (Resistance Temperature Detector), thermocouples, and sensors based on semiconductor junctions are widely used in industry, measurement equipment, electronic instrumentation and capital goods. The overall didactic objective of this instrumentation system is to familiarize students with various methods to measure and record temperature using NTC sensors, as well as to identify and model their characteristics.

From the teaching perspective, this work is focused as a correlation and transversality, maintaining the unity of knowledge, between the optional Virtual Instrumentation course (4th Year) and the Electronic Instrumentation core (3rd Year). Both correspond to the Bachelor's degree in Industrial Electronics and Automation taught at the Engineering School of Bilbao. Methodologically active learning is used in both subjects. In the first, in its entirety, through Problem-Based Learning (PBL) [1] and in the second, this same methodology in 75% of its syllabus.

In its planning and development the hardware component corresponding to the signal conditioning circuits and the Virtual Instrumentation (VI) associated with the analysis, characterization, modeling and functionality of the referred sensor are worked together.

As will be indicated in the Evaluation and Monitoring section, this generated didactic material is useful since it allows the transfer outside the classroom of part of the teaching-learning process, that is, it enhances the individual-collaborative work of the students. In this way, more class time can be devoted to the development of more complex cognitive processes that favor active learning.

Even though the system has been developed from the perspective of Virtual Instrumentation, also for the subject of Electronic Instrumentation the students have a series of VIs, with an intuitive user interface, which without knowing how a VI is implemented can be used as a didactic resource to deepen the study and functionality of NTCs sensors. Likewise, the students who take the Virtual Instrumentation course have a series of reference examples to develop the syllabus using the PBL methodology. In its didactic application, you can also correlate it with the thematic content of another subject, Electronic Instrumentation, which you have already studied and which you complement by developing transversal skills by providing a more global and integrative vision of Instrumentation.

II. METHODOLOGICAL ASPECTS: THEORETICAL FRAMEWORK

The theoretical-practical framework to characterize the NTC thermistors as well as the corresponding conditioning circuits corresponds to the learning results of the Electronic Instrumentation course [2] and [3]. In the development and implementation of the virtual instrumentation, the following has been taken into account:

Calibration curves: Manufacturers offer for each NTC its corresponding calibration table which is nothing more than a list of R_T resistance values for each temperature T . This table is supplied either in electronic, printed or both. With the data from this, the NTC calibration curve is constructed, that is, the graph of the resistance R_T as a function of the temperature T . In this work the thermistor NTCLE201E3 has been used.

NTC calibration curve approximations: The simplest equation that models the behavior of a generic NTC is:

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

where R_T is the resistance of the thermistor at temperature T in °K, B is the thermal sensitivity index also in °K and R_0 is the resistance at temperature T_0 , normally at 298.16 (°K), (25°C).

$$T = \frac{B.T_0}{B + T_0 \cdot \ln(R_T/R_0)} \quad (2)$$

Equation (2) can be used in a PC to calculate the temperature knowing the resistive value of the NTC. However, this model is only valid for a reduced measuring range. For example, for a typical thermistor working between 0 and 50°C the error made is around $\pm 0.9^\circ\text{C}$ and in this work the measuring range is from 0°C to 100°C.

A much more exact model is the one proposed by Steinhart-Hart, allowing the errors incurred to be substantially reduced, achieving deviations of only $\pm 0.5^\circ\text{C}$. The empirical equation that relates T in °K and the resistance R_T is modeled by the expression:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R_T) + C(\ln R_T)^2 + D(\ln R_T)^3 \quad (3)$$

This last equation can be applied to the determination of the parameters A, B, C and D by measuring R_T at four different temperatures and solving the system of equations:

$$\begin{pmatrix} 1 & \ln R_{T1} & (\ln R_{T1})^2 & (\ln R_{T1})^3 \\ 1 & \ln R_{T2} & (\ln R_{T2})^2 & (\ln R_{T2})^3 \\ 1 & \ln R_{T3} & (\ln R_{T3})^2 & (\ln R_{T3})^3 \\ 1 & \ln R_{T4} & (\ln R_{T4})^2 & (\ln R_{T4})^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/T_1 \\ 1/T_2 \\ 1/T_3 \\ 1/T_4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

For this, a calibrated precision measuring equipment is used or extracted from the characteristics sheets of the thermistor manufacturer, the procedure followed in this work. They are also usually provided by the manufacturer.

Temperature measurement is the most common, but not the only, application of CNTs. A large part of this work is dedicated to its measurement. The problem to be solved is how to obtain an electrical quantity, for example, a voltage that depends on the temperature in the most linear way possible, although the calibration curve is not linear. The linearization techniques [2], [3], [4] are carried out in two domains: analog and digital. In the analog domain, a resistance is added in series or in parallel with the NTC to achieve a response as linear as possible, Fig. 1 (a), (b). In digital, the temperature measurement is done independently of linearity. For this, a PC is used that, by means of the NTC model, calculates the corresponding value of the temperature from the measurement of the resistive value of the NTC, acquiring the value of V_{NTC} , $R_T = \frac{V_{NTC}}{I_e}$, Fig.1(c).

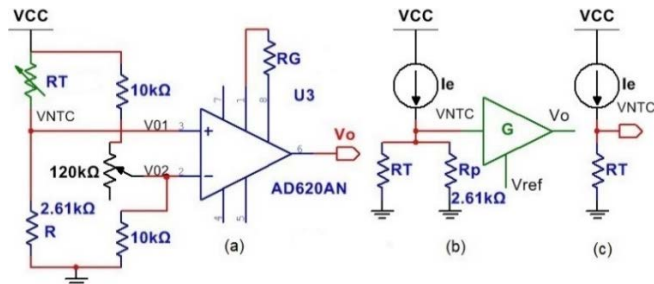


Fig.1. Linearization by resistive divider (a), parallelized (b) and measuring R_T (c).

The temperature measurement is carried out between the lower limit of $T_1=0^\circ\text{C}$ and the upper limit of $T_2=100^\circ\text{C}$, which corresponds to a measurement field (range) of T_2-T_1 of 100°C.

Linearization by resistive divider: In the circuit of Fig.1(a) the voltage $V_{NTC}(T)$ is:

$$V_{NTC}(T) = \frac{R}{R + R_T} V_{CC} \quad (5)$$

For this setup, the sensitivity $S(T)$ in (V/°K) is defined:

$$S(T) = \frac{dV_{NTC}}{dT} = \frac{R.R_T}{(R + R_T)^2} \frac{B}{T^2} V_{CC} \quad (6)$$

It is about calculating the value of R that meets the optimal linearization conditions, for which the value of the T_C temperature is taken at the midpoint of the measurement range, to which the inflection point of the new calibration curve will correspond $V_{NTC}(T)$ that is generated.

Defining $T_C = (T_1 + T_2)/2$ (°K) the value of the resistance R that linearizes the circuit by the criterion of the inflection point is:

$$R = \frac{B - 2.T_C}{B + 2.T_C} . R_{TC} \quad (7)$$

where R_{TC} is the value of the NTC in T_C . For this value of R , the sensitivity $S(T)$ at the midpoint of the T_C measurement interval turns out to be:

$$S(T_C) = \frac{V_{CC}}{B} \left(\frac{B^2}{4.T_C^2} - 1 \right) \quad (8)$$

and the calibration line is modeled by the linear equation:

$$V_{NTC}(T) = V_{NTC}(T_C) + S(T_C)(T - T_C) \quad (9)$$

Particularizing these equations for the temperature $T_C=323.16$ (°K), of the characteristic sheets $B=3977$ (°K) and $R_{TC}=3605\Omega$, the value of $R=2597\Omega$ is calculated, choosing a commercial precision resistance of 2.61kΩ. In the calculation of the supply voltage V_{CC} , the maximum power dissipated and therefore the self-heating have been taken into account.

$$V_{CC,max} = 2 \cdot \sqrt{\Delta T \cdot \delta \cdot R} \quad (10)$$

The ΔT has been set at 0.5% of the measuring range. The NTC used has a dissipation coefficient or thermal conductance $\delta=7\text{mW}/^\circ\text{C}$. With these specifications $V_{CC,max}=6.04\text{V}$. In practice, the value of thermally stabilized 5V is chosen. With these values, the equation of the resulting calibration line with the temperature measured in °K is expressed by the linear equation:

$$V_{NTC}(T) = 2,175 + 0,0359(T - 323,16) \quad (11)$$

As a design specification, the conditioning circuit must provide 0V when the temperature is 0°C and 10V at 100°C. Using the conditioning circuit of Fig.1(a), from the calibration line, $V_{NTC}(T)=V_{o1}(T)$ it results that $V_{o1}(0^\circ\text{C})=0.38\text{V}$ and $V_{o1}(100^\circ\text{C})=3.97\text{V}$.

$$\begin{array}{l} 0^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{has}} V_{o1} = 0,38\text{V} \xrightarrow{\text{wanted}} V_o = 0\text{V} \\ 100^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{has}} V_{o1} = 3,97\text{V} \xrightarrow{\text{wanted}} V_o = 10\text{V} \end{array}$$

Taking into account that $G=2,86$, $V_o=G(V_{o1}-V_{o2})$ and $10=G(3,97-0,38)$. Using the differential instrumentation amplifier AD620 results in $R_G = \frac{49,4}{G-1} = 25,56\text{K}\Omega$.

To adjust the gain, a precision 30kΩ potentiometer is used. Likewise, to adjust the output voltage to 0V when the temperature is 0°C, a 120kΩ one is used to obtain $V_{o2}=0.38\text{V}$.

The next step is to obtain the relationship of temperature with linear voltage, $V_o=2.86(V_{o1}-0.38)$. Substituting in this

equation the mathematical model of the calibration line $V_{NTC}(T) = V_{01} = 2,175 + 0,0359(T - 323,16)$ it is obtained that:

$$T = \frac{V_0 + 28,028}{0,12674} \quad (12)$$

This will later be implemented in the corresponding VI, Fig. 10.

Linearization by parallelization: From the electrical circuit in Fig.1(b) $R_p(T) = R \cdot R_T/R + R_T$, the output voltage V_{NTC} already linearized to be measured, will be determined by $V_{NTC}=R_p I_e$. Therefore, in this case the objective is to calculate the value of R that makes $R_p(T)$ meet optimal linearity conditions. Applying the inflection point method to $R_p(T)$ results in a value for the resistance in parallel R equal to the previous case (7).

The sensitivity at the center point of the measurement field, T_C , is calculated by the equation:

$$S_p(T_C) = \left. \frac{dR_p(T)}{dT} \right|_{T=T_C} = -\frac{B}{T_C^2} \cdot \frac{R_{T_C}}{(1 + R_{T_C}/R)^2} \quad (13)$$

Substituting R of equation (7), the sensitivity becomes:

$$S_p(T_C) = -\frac{1}{4} \cdot \frac{(B - 2T_C)^2}{B \cdot T_C^2} R_{T_C} \quad (14)$$

The new calibration line, $R_p(T)$ whose slope is $S_p(T_C)$ is:

$$R_p(T) = R_p(T_C) + S_p(T_C)(T - T_C) \quad (15)$$

Particularizing these design equations for this case $R=2.61k\Omega$, $R_p(T_C)=1513.93\Omega$ and $S_p(T_C)=-24.072\Omega/^{\circ}K$, the calibration line according to (14) results:

$$R_p(T) = 1513.93 - 24.072(T - 323.16) \quad (16)$$

From this equation the temperature value in $^{\circ}K$ is obtained:

$$T = \frac{(6167.78 - R_p(T))}{24.072}; \quad R_p(T) = \frac{V_{NTC}}{I_c} \quad (17)$$

Equation that will later be used to calculate the temperature after reading the VNTC voltage value in the corresponding virtual instrument, Fig. 7.

For the calculation of the maximum intensity of the constant intensity generator, the same considerations of the previous case have been taken into account.

$$I_{e \max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \delta \cdot \Delta T}{R}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2610}} = 2,31mA \quad (18)$$

The value $I_e=0.1mA$ is chosen to use the same current generator as the non-linearized NTC direct reading method. In this case, the design specifications are summarized as:

$$\begin{array}{l} 0^{\circ}C \quad \xrightarrow{\text{has}} \quad V_{NTC} = 241,6 \text{ mV} \quad \xrightarrow{\text{required}} \quad V_0 = 10V \\ 100^{\circ}C \quad \xrightarrow{\text{has}} \quad V_{NTC} = 53,7mV \quad \xrightarrow{\text{required}} \quad V_0 = 0V \end{array}$$

The corresponding conditioning circuit is modeled by the equation $V_O=G \cdot V_{NTC}+V_{REF}$, obtaining a gain $G=53,21$ and a reference voltage $V_{REF}=-2.857V$, Fig.1(b).

In this work, other procedures have been applied to calculate R , such as an analytical method that consists of forcing three points of passage in the resulting resistance-temperature curve, for example, three equidistant temperatures ($T_C-T_1=T_2-T_C$). The results obtained are similar to that described.

Direct reading non-linearized NTC: In this case, the schematic circuit corresponds to Fig.1(c) in which the NTC used is supplied with a current generator and by measuring the voltage drop V_{NTC} the value $R_T=V_{NTC}/I_e$ is determined and from R_T the value of T using the Steinhart-Hart equation (3). Fig. 2 shows the electronic circuit of the 0.1mA current generator used in both this case and the previous one.

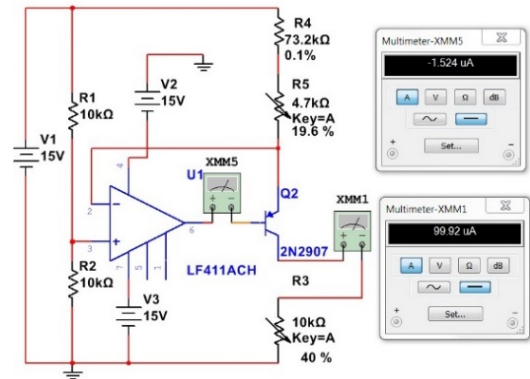


Fig.2. Used intensity generator.

From the didactic perspective, once all the electronic conditioning circuits have been designed and calculated, their operability and functionality have been simulated with Multisim as a prior step to their assembly on a printed circuit board. The Instruments XS Instruments Temp6 thermometer was used to measure the temperature.

III. VIRTUAL INSTRUMENTATION

The virtual instrumentation implemented covers three thematic blocks: I) Calculation of the Steinhart-Hart coefficients, II) Acquisition and III) Analysis of the results.

A. Calculation of Steinhart-Hart coefficients

The first Virtual Instrument (VI) developed is to obtain the coefficients that best fit the Steinhart-Hart expression of the NTC thermistor used, equation (3). For this, by means of the resistance and temperature data file provided by the manufacturer, the coefficients that characterize it are obtained in two ways. In Fig.3 the Front Panel (FP) is shown where the calibration curve $[R_T, T]$ is represented with the parameters A , B , C and D calculated.

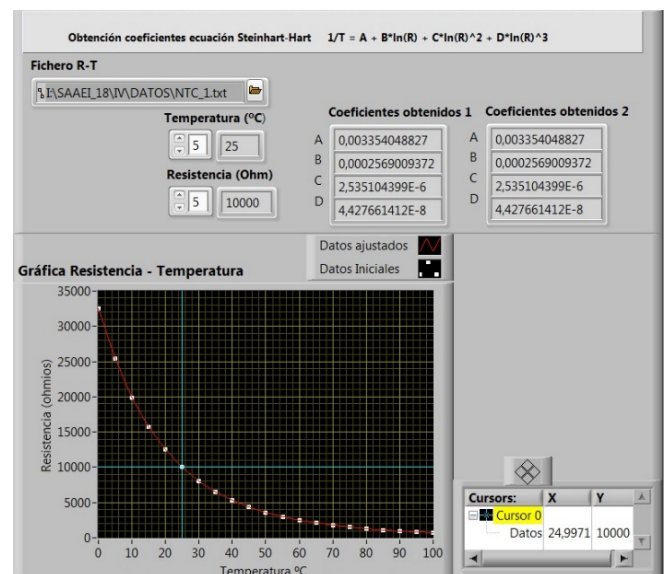


Fig.3. Graph $[R_T, T]$ and parameters of the Steinhart-Hart equation.

Figure 4 corresponds to the programming of this VI with the implementation of both calculation methods.

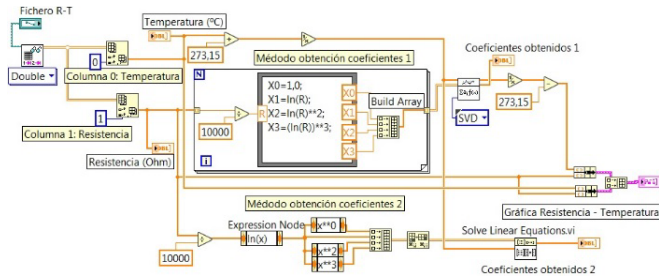


Fig.4. Calculation of parameters A, B, C, D and graphing $[R_T]$.

Table I shows the value of the coefficients provided by the manufacturer and those calculated.

TABLE I. PARAMETERS OF THE STEINHART-HART EQUATION

Parameter	Manufacturer	Calculated
A	3,353821 E-3	3,3540488271 E-3
B	2.569355 E-4	2,5690009372 E-4
C	2,626311 E-6	2,5351043392 E-6
D	6,752782 E-8	4,4276614115 E-8

Once the coefficients have been obtained, another VI has been designed that allows the results obtained in the resistance-temperature conversion to be compared by means of the coefficients provided by the manufacturer and with those obtained experimentally in the manner set out above. The results obtained are presented on the FP both numerically and graphically. Fig. 5 corresponds to a partial section of the FP where the adjustment of the calibration curve is graphically represented with the calculated parameters and those provided by the manufacturer, the errors in the temperature measurement and the difference between them.

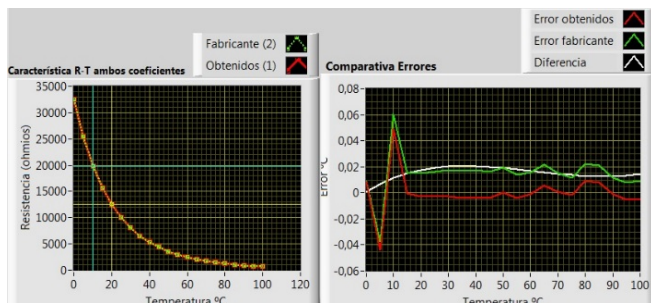


Fig.5. Partial section of the FP of the VI for the comparison of the coefficients.

B. Acquisition

This VI allows to acquire the input voltage signal of the three types of assemblies (direct reading, linearization by parallel resistance and by resistive divider) of Fig.1. Therefore, given that the form of conversion of the voltage signal that is acquired to the temperature magnitude is different in the three methods, three different sections must be programmed despite sharing basic functions regarding the management of the acquisition and storage of data in a file. In this way, it is possible to work with any of the three circuits and characterize the NTC independently. In Fig. 6 a partial detail of the front panel is shown.



Fig.6. Acquisition modes.

Fig. 7 corresponds to the programming associated with the "Parallel resistance linearization" tab. Data acquisition is carried out continuously. Taking into account the nature of the physical magnitude to be measured, such as temperature, the sampling frequency is 10 S/s. Concurrent to the continuous acquisition, using the streaming to disk technique, the samples are continuously stored in a file using the functions *Open/Create/Replace File*, *Write to Text File* and *Close File*. Prior to the processing to obtain the temperature and resistance R_T , as digital filtering, an averaging of five samples is carried out. As can be seen to obtain the value of the temperature T (°K), equation (17), this has been implemented in the Formula Node structure, and from the acquired samples of V_0 to obtain the value of the parallelized resistance R_{pt} the mathematical sequence has been programmed:

$$V_{NTC} = \frac{V_0 - V_{Ref}}{G}; R_{pt} = \frac{V_{NTC}}{I_e} \quad (19)$$

In Fig. 8 a partial view of the FP is represented in which the linearized graph of the $R_p(T)$ relationship is shown as well as the quantification of the previously referenced parameters.

The programming of the other two tabs is similar in relation to the acquisition and storage, and it differs only in the programming of the Formula Node structure for the temperature calculation and other associated calculations such as the resistance of the NTC. Fig. 9 and Fig. 10 show the programming of these aspects corresponding to Direct Reading using the Steinhart-Hart formula, Fig. 9 and obtaining the temperature by linearization by resistive divider, Fig. 10.

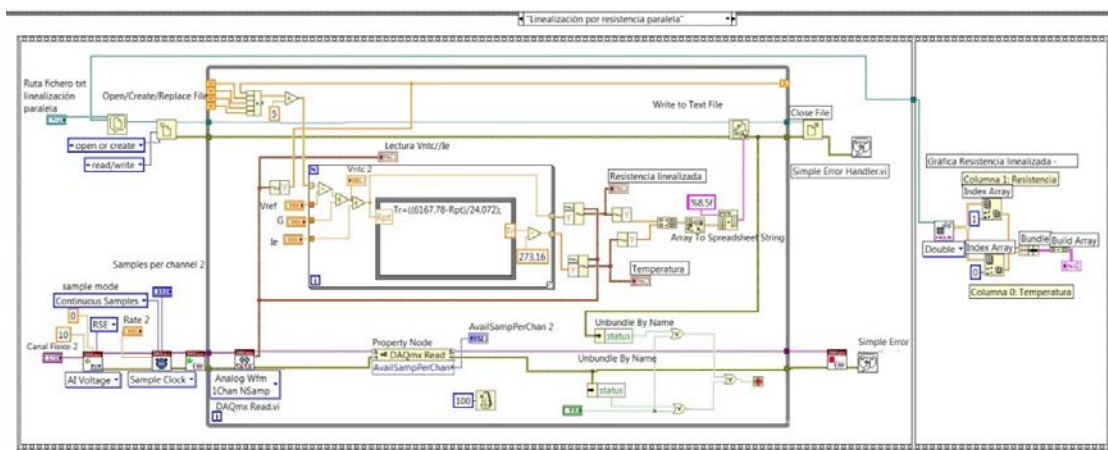


Fig.7. Graph $[R_T]$ by parallelization linearization.

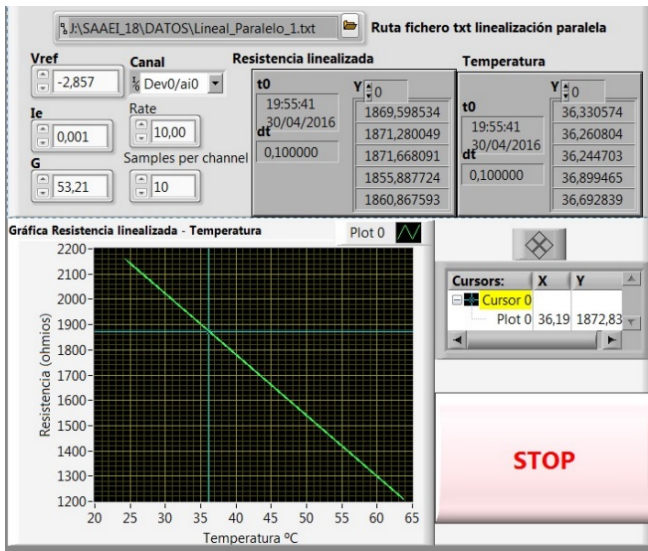


Fig.8. PF section of the acquisition linearization by resistance in parallel.

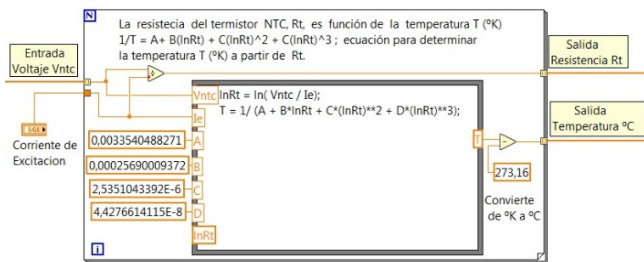


Fig.9. Programming section of direct reading acquisition.

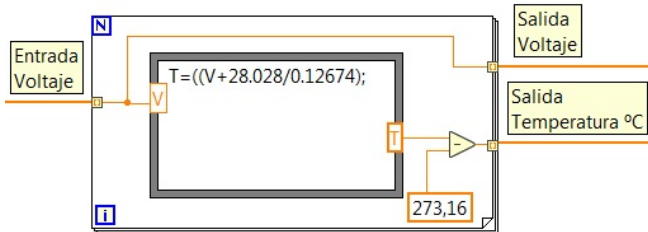


Fig.10. Programming section of the acquisition linearization by resistive divider.

C. Analysis of the results

Since the characterization and functionality of the NTC has been carried out in different ways, it is necessary to have another virtual instrument that allows the analysis and visualization of each of the results individually. In Fig. 11 a section of the FP is shown where through the different tabs it is possible to access the analysis of the experimental results of all the possible operating combinations.



Fig.11. Selection tabs of the analysis type for the NTC results.

As an example, Fig. 12 shows the comparison between the results obtained in the direct reading of the voltage at the terminals of the NTC, Fig. 1 (c) and with those obtained by linearization with the resistance in parallel, Fig. 1 (b). Through the tabs "Analysis Linearization by parallelization" and "Linearization by resistive divider" you can access an exhaustive analysis of both the theoretical data and the experimental data acquired. From the results of the analysis, the representation of the linearization carried out and its errors is obtained. In addition, it allows you to compare these results

with those corresponding to the curve fit performed using the Linear fit function. In Fig. 13 two graphs are represented, one with the theoretical data corresponding to the design equations and the other with the experimental data. Along with these graphs, on the front panel, the theoretical and experimental errors of both the calibration line and those due to the linear fit of the curve are also represented.

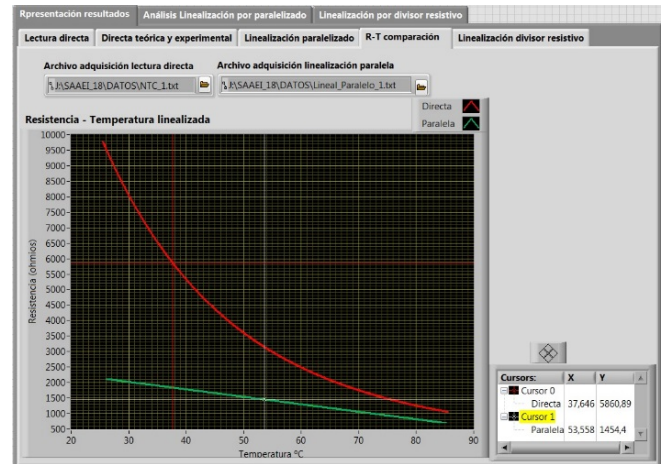


Fig.12. Direct acquisition comparison graph - parallel linearization

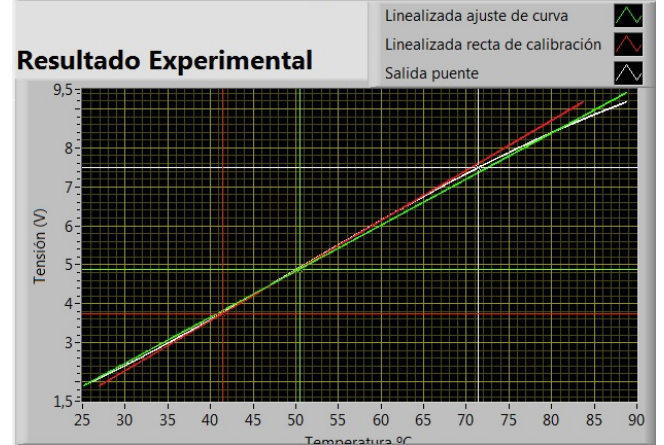
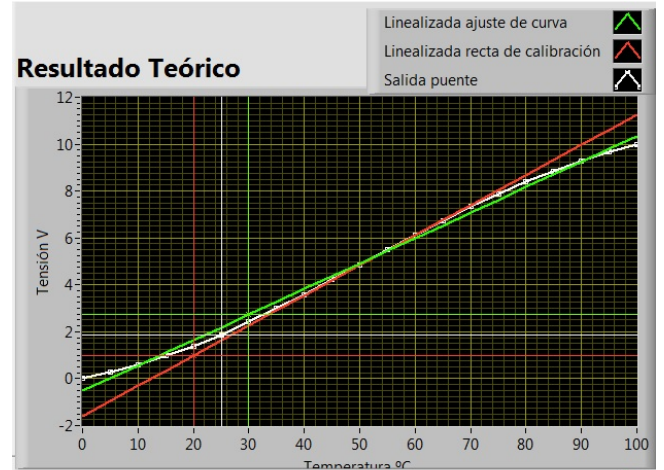


Fig.13. Analysis section of "Linearization by resistive divider".

IV. EVALUATION AND MONITORING

The concept of evaluation is approached from a functional perspective, as a systematic, valid and reliable activity on the identification and analysis of the factors and implications that modulate the teaching effectiveness and efficiency of the didactic material generated and its implementation.

During the academic year (2016/2017) an evaluation of this teaching material was carried out by 78 students in Electronic Instrumentation (IE) and 25 in Virtual Instrumentation (IV). For this, the students were given a rubric with 40 items using a 5-point Likert scale (1-total disagreement to 5-total agreement). In summary, Table II shows the partial content of the rubric used.

TABLE II. PARAMETERS OF THE STEINHART-HART EQUATION

Nº	Items	Rating scale				
		1	2	3	4	5
1	The virtual instrumentation formulated covers various multidisciplinary objectives.	1	2	3	4	5
2	The VIs developed reflect a current situation.	1	2	3	4	5
3	The virtual instrumentation is appropriate to the cognitive level of the students.	1	2	3	4	5
4	The VIs designed cover/complement the didactic objectives of the subject.	1	2	3	4	5
5	The VI is well structured.	1	2	3	4	5
6	Degree of learning versus effort made.	1	2	3	4	5
7	Degree of motivation of the VI used.	1	2	3	4	5
8	Promotion of creativity.	1	2	3	4	5
9	Encourage teamwork.	1	2	3	4	5
10	Promotion of cooperative learning.	1	2	3	4	5
11	Appropriately address scheduled skills	1	2	3	4	5
12	The teacher properly guides the students.	1	2	3	4	5

In Fig. 14 the partial results corresponding to the 12 items in Table II are shown.

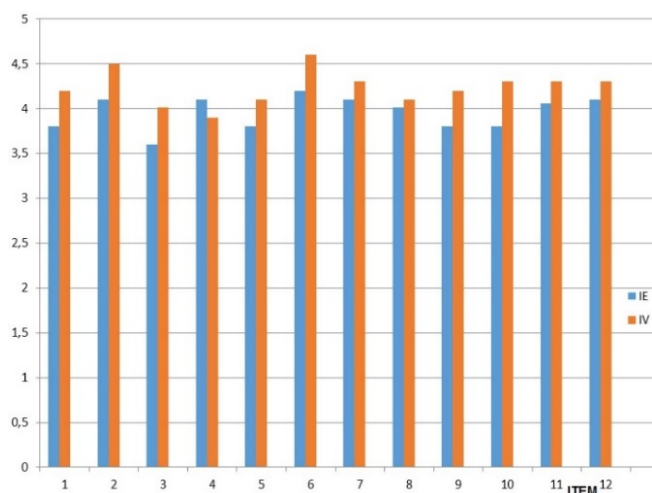


Fig. 14. Results of the teaching evaluation by the students.

In the absence of a more in-depth evaluation by the students on the teaching effectiveness of the virtual instrumentation implemented in their first application course, we agree to indicate its positive effect on the students in their learning process in both subjects. For the students of the Electronic Instrumentation subject, it provides a new environment to deepen the study and application of the NTC temperature sensor, while for the students of the Virtual Instrumentation optional subject, it implies an update of the didactic material for teaching practice through the PBL methodology with a significant transversality and correlation with this other related subject already taken while maintaining the unit of knowledge.

V. CONCLUSIONS

The teaching functionality of this work has two relevant aspects. First, there is the integration of the theory and practice associated with the NTC thermistor temperature sensor with

the virtual instrumentation. Second, but not least, the students have been provided with teaching material in the context of an active learning methodology such as PBL.

Consolidated teaching methodologies have been followed in the planning, design, development and implementation of the system, which can be summarized as follows:

- The integration of theory with more practical experiences.
- Learning based on PBL problems.
- The design of real applications.
- Creativity and innovation.

The use of VI provides an excellent environment for integrating theory and practice. Due to its flexibility, functionality and operability, it provides both students and design, test and measurement engineers with a set of essential technological means that allows them to face a wide range of challenges by being able to implement instrumentation systems that can be used throughout of the entire life cycle of a product, from design and simulation to final testing.

With the edition and implementation of this teaching material, the emphasis is on doing more practices in the learning process, emphasizing that in engineering knowing is doing. Even though its implementation is only one academic year (2016/2017), from the results of the evaluation and teaching practice it is deduced the adequacy of the system to the teaching and active learning of the Electronic Instrumentation and Virtual Instrumentation subjects.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the FEDER and MINECO for the financial contribution through the research project DPI2015-70075-R (MINECO/FEDER, EU).

REFERENCES

- [1] I.J. Oleagordia, J.I. San Martín, A.J. Garrido, P. Rodríguez, "Curso de Instrumentación Virtual mediante Aprendizaje Basado en Problemas (ABP)." *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, Resumen Actas SAAEI 2017*, pp. 24, Valencia, España, 2017.
- [2] R. Pallás. "Sensores y Acondicionadores de Señal". Ed. Marcombo, 4ª Ed. Barcelona, 2005.
- [3] M. A. Pérez García. "Instrumentación Electrónica". Ed. Paraninfo, Madrid, 2014.
- [4] R. Pallás, J. G. Webster. "Sensors and Signal Conditioning" Ed. Wiley-Interscience, 2.Ed. New York, 2008.
- [5] J. G. Ewbster, H. Eren. "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook". Ed. CRC Press. Massachusetts, 2014.
- [6] E.O. Doebelin, "Measurement Systems Applications and Design", 5Th. Ed. McGraw-Hill, London, 2004.
- [7] J. Fraden, "Handbook of Modern Sensors" Ed.Springer-Verlag, New York 2010.
- [8] I.J. Oleagordia, J.J. San Martín, J.I. San Martín, "Instrumentación Virtual aplicada a la ingeniería. Aprendizaje asistido por ordenador." *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, Resumen Actas SAAEI 2010*, pp. 24, Bilbao, España, 2010.
- [9] I.J. Oleagordia, J.A. Cortajarena, J. de Marcos, "Procesado de señales con instrumentación virtual." *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, Resumen Actas SAAEI 2010*, pp. 24, Bilbao, España, 2010.
- [10] T. Schwartz, B. M. "Facilitating Interdisciplinary Hands on Learning using LabVIEW". *LabVIEW Applications in Engineering Education. International Journal of Engineering Education16* (3), 26-34.

El Aprendizaje Basado en Proyectos Bajo una Perspectiva de Género para Mejorar la Integración de la Mujer en los Grados de Ingeniería

F. Javier Maseda Rego
Automatic Control Group – ACG,
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
University of the Basque Country –
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0003-0624-4519

Itziar Martija López
Automatic Control Group – ACG,
Department of Mechanical Engineering,
School of Engineering of Bilbao,
University of the Basque Country –
UPV/EHU
Rafael Moreno 3, 48013 Bilbao, Spain
ORCID: 0000-0002-0153-6179

Patxi Alkorta
Department of Automatic Control and
Systems Engineering,
School of Engineering of Gipuzkoa,
University of the Basque Country -
UPV/EHU
Avenida Otaola 29, 20600 Eibar, Spain
ORCID: 0000-0003-0734-0326

Abstract—Promoting women visibility in the technological environment is a necessity. The University of the Basque Country is engaged in the triangle Research & Learning & Environment for improving this industrial and social requirement. The active teaching and learning methodologies with gender perspective and educative scenarios based on clean energy generation could help for this transformation. Floating Offshore Wind Platforms are used for implementing the educative project presented in this paper.

Keywords—Engineering Education, Women in Engineering, Renewable Energy, Floating Offshore Wind Platform.

Resumen—Promover la visibilidad de las mujeres en el entorno tecnológico es una necesidad. La Universidad del País Vasco impulsa el triángulo Investigación & Aprendizaje & Medio Ambiente para mejorar esta exigencia industrial y social. Las metodologías activas de enseñanza y aprendizaje con perspectiva de género y escenarios educativos basados en la generación de energías limpias podrían ayudar a esta transformación. Las plataformas eólicas flotantes marinas se utilizan para implementar el proyecto educativo presentado en este trabajo.

Palabras clave: Educación en ingeniería, mujeres en ingeniería, energías renovables, plataforma eólica marina flotante.

I. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre formación en ingeniería basada en metodologías activas y cooperativas ha ido creciendo en muchas escuelas de ingeniería en las últimas dos décadas, como respuesta educativa a los desafíos tecnológicos presentes y futuros en diferentes campos de trabajo de los ingenieros, tales como, energías limpias, fábricas inteligentes, inteligencia artificial, entre otros [1] - [4]. Sin embargo, si este desarrollo no va acompañado de políticas de género adecuadas, el impacto que se obtendrá será injusto y estará por debajo de sus expectativas [5] - [7]. De esta forma, la Universidad del País Vasco está desarrollando diferentes proyectos de innovación educativa, siendo uno de los más importantes el impulso del triángulo educativo “Investigación & Aprendizaje & Medio Ambiente”, pero desarrollándolo bajo una perspectiva de género.

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) es una metodología educativa muy utilizada en la enseñanza de la ingeniería [8] - [10]. Esta metodología se basa en la recreación de escenarios de diseño tecnológico para el desarrollo de las

actividades de enseñanza y aprendizaje. Las plataformas eólicas flotantes (Floating Offshore Wind Platform - FOWP) como escenarios industriales tienen un conjunto de cualidades que permiten utilizarlas como caso de estudio en este trabajo [11]. El viento ha dado lugar a una tecnología de generación de energía eléctrica que ha ido mejorando durante los últimos cuarenta años, tanto en calidad como en cantidad de energía generada. Por otro lado, la generación de energía marina es una tecnología joven con grandes esperanzas para la próxima década [12] - [13]. Su fusión en nuevas plataformas eólicas marinas busca maximizar sus funcionalidades, constituyendo un gran desafío tecnológico. La sinergia obtenida no solo se basa en la mayor producción de energía sino en las posibilidades de estabilización que pueden proporcionar las turbinas marinas incluidas en las plataformas.

Por último, el impulso de la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres en la educación es un objetivo que podría ayudar a corregir la baja representación de las mujeres en muchas carreras de ingeniería y a romper barreras en la brecha de género en la industria y que desaparezcan expresiones como "techo de cristal" o "suelo pegajoso", entre otros [14] - [17].

II. DATOS OBJETIVOS

La Figura 1 muestra la evolución del grupo de 963 estudiantes que inician sus estudios, en once titulaciones de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, en 2016/17. Están separados en hombres y mujeres, y muestra cuántos de ellos terminaron sus estudios en 2019/20.

El gráfico incluye en el eje izquierdo el número de estudiantes, situando en el eje derecho el porcentaje de mujeres que iniciaron estudios con una línea naranja y el porcentaje de mujeres que terminaron estos estudios con una línea roja.

Se puede observar que la evolución de las mujeres es mejor que la de los hombres, en 10 de los 11 grados. El porcentaje de mujeres que finalizan sus estudios es claramente superior al porcentaje de mujeres que empezaron. Este es un indicador que muestra la seriedad e interés con el que las mujeres abordan sus estudios.

La mejora en la visibilidad de este dato debe servir para incentivar la elección de la ingeniería entre las niñas cuando terminan sus estudios de secundaria, ya que se demuestra que están muy bien preparadas para abordar estos estudios y aportar su talento. Contribuir a revertir el descenso de

vocaciones que se detecta es una obligación de la Universidad.

La Figura 2 muestra, por otra parte, el porcentaje total de mujeres de nueva matriculación que, como se puede apreciar, presenta una línea plana en los últimos ocho años.

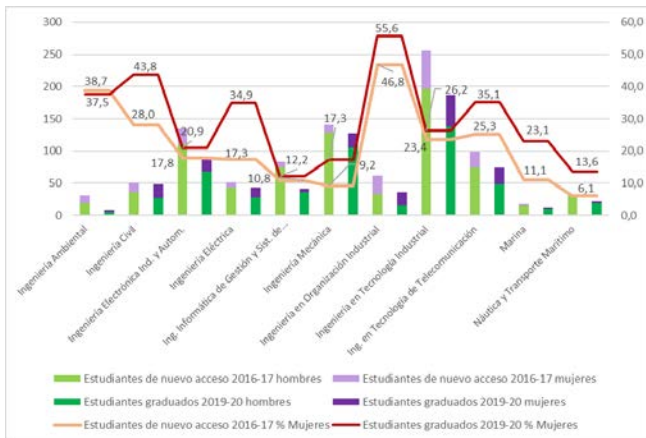


Fig. 1. Evolución académica de la mujer en los grados de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

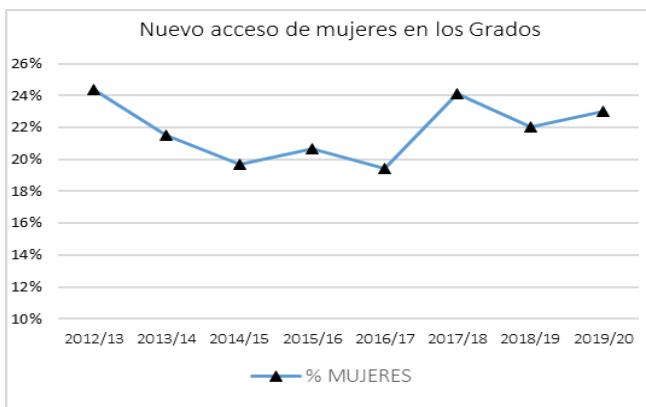


Fig. 2. Matriculación de alumnas de nuevo ingreso en los grados de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

III. APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS CON PERSPECTIVA DE GÉNERO

La metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos apoyada en el triángulo “Investigación & Aprendizaje & Medio Ambiente” fomenta la permeabilidad entre la actividad investigadora sobre los desafíos tecnológicos y las actividades de enseñanza y aprendizaje activas y cooperativas. En este artículo, se utiliza como caso de estudio un prototipo de una planta de generación de energía de 5,5 kW. Esta planta puede simular tanto la generación de energía eólica como energía marina, por lo que la hace ideal para promover el análisis de los procesos de interacción de estos sistemas de generación de energía renovable en las plataformas eólicas flotantes (FOWP).

La planta de energía usada como escenario educativo tiene dos componentes principales: un tanque de olas y un banco de pruebas basado en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) acoplado a un motor de inducción (IM) que hará las funciones de turbina. El sistema puede emular el funcionamiento de una turbina eólica o marina. La Figura 3 muestra la foto del equipo, en la que se puede ver el conjunto motor-generator y algunos de los equipos electrónicos a los que van conectados.



Fig. 3. Planta de generación de energía renovable.

A. Triángulo “Investigación & Aprendizaje & Medio Ambiente”

El triángulo propuesto es un ecosistema educativo completo desarrollado para combinar los efectos acumulativos de las tres áreas implicadas: los procedimientos de investigación, los procesos de enseñanza-aprendizaje y unos escenarios basados en la generación de energías renovables. La Figura 4 muestra sus aspectos educativos más relevantes.

Las metas de las metodologías de aprendizaje son mejorar la motivación de los estudiantes, lograr los objetivos educativos que se planteen, desarrollar competencias transversales complejas y mejorar los procesos de transferencia.

Los escenarios propuestos basados en entornos de energía renovable permiten a los estudiantes desarrollar actitudes positivas hacia una evolución del desarrollo tecnológico respetuoso con el medio ambiente, mejorar procesos de creatividad e impulsar sus habilidades tecnológicas.

Los procedimientos de investigación mejoran la visión de los estudiantes respecto a la actualización y futuro desarrollo profesional de sus estudios. Dentro de estos procedimientos, el uso de indicadores clave ayuda a medir los resultados educativos a lo largo del semestre y la utilización de encuestas y cuestionarios breves online, permite obtener una retroalimentación actualizada sobre la evolución de los estudiantes.



Fig. 4. Triángulo educativo propuesto.

B. Equipos de investigación en energías renovables como escenarios educativos

La planta de energía propuesta aquí es una combinación de estructuras de turbinas eólicas (WT) y de columna de agua oscilante (OWC). Esta combinación es propia de las

plataformas eólicas flotantes (FOWP) y busca mejorar sinergias, no solo en la producción de energía sino también en la estabilidad y mejor funcionalidad de las plataformas. Para los estudiantes, la producción de energía eólica es más conocida que la producción de energía por olas. La transformación de la energía de las olas en energía eléctrica tiene tres etapas principales: la energía de las olas se convierte en energía neumática en la cámara de captura, la presión neumática se transforma en energía mecánica en la turbina y, finalmente, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica en el generador eléctrico.

El tanque de olas es una estructura diseñada para contener agua, un motor lineal con pala plana para la generación de olas, sensores para la medición de los parámetros de las olas, una cámara de captura simulando las instalaciones de NEREIDA Mutriku, basada en una turbina Wells, y un PLC OMROM para controlar todo sistema.

El banco de pruebas que simula el sistema turbina-generador está basado en dos máquinas eléctricas: un motor de inducción de 7.5kW, que hará las labores de turbina, y un generador de inducción doblemente alimentado de 5.5kW.

Como se ha comentado, la tarea del motor de inducción es la imitación física de la turbina. Para conseguirlo, el modelo teórico de la turbina, que se desarrolla en Matlab, se conecta a un variador de frecuencia de la marca comercial Emerson, a través de una placa de instrumentación NI-6221 de la marca comercial National Instruments. El convertidor de frecuencia hace que la máquina de inducción traccione el generador mediante un control de par, como si fuese una turbina eólica o marina, emulando diferentes condiciones de viento o presión.

El generador DFIG tiene un convertidor Back-to-Back conectado en los anillos del rotor. Este convertidor permite que la máquina funcione en los cuatro cuadrantes motor-generador. Los modelos de control se desarrollan en Matlab / Simulink y se conectan al convertidor Back-to-Back a través de un servidor Linux NET COM. La figura 3 muestra la mayoría de estos componentes.

C. Aprendizaje Basado en Proyectos con Perspectiva de Género

La incorporación de la perspectiva de género es el proceso de evaluación de las consecuencias que tiene el conjunto de comportamientos y actitudes en cualquier actividad planificada sobre las mujeres y los hombres que conviven en la comunidad y por tanto en la universidad, de manera que se tengan en cuenta para lograr la igualdad. Las cuestiones de género se agruparían como normas, identidades y relaciones. A partir de estas premisas, el aprendizaje activo y cooperativo con perspectiva de género se convierte en una gran oportunidad para conseguir avances en este objetivo de desarrollo sostenible.

La Figura 5 muestra algunos de los temas que podrían resumir la relación entre la metodología propuesta y las mujeres desde una perspectiva de género.

El proyecto reseñado en este artículo intenta involucrar a las mujeres para que asuman un papel protagonista en la resolución de desafíos tecnológicos y las ayuden en su visibilidad profesional.

Los dos factores más determinantes para el desarrollo del proyecto son el bajo porcentaje de mujeres en los grupos de estudiantes y la idea de que las mujeres están bien integradas en estos grupos, "aparentemente".

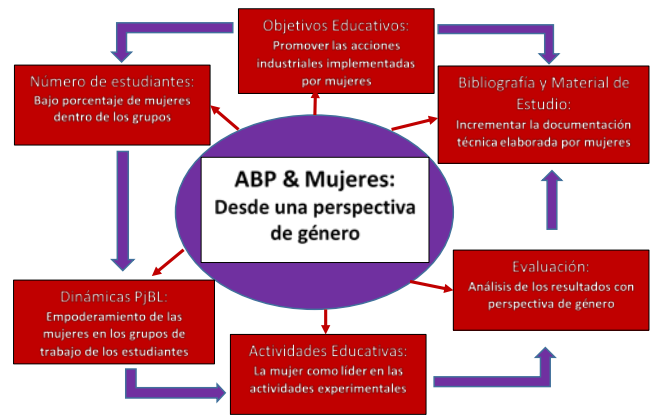


Fig. 5. Aprendizaje basado en proyectos con perspectiva de género.

La dinámica metodológica tiene que empoderar a las mujeres como líderes en el trabajo en equipo donde se encuentren. Se debe considerar que más del 50% de los grupos de estudiantes están compuestos solo por hombres.

Los objetivos y actividades educativas tienen que promover el liderazgo femenino en actividades experimentales relacionadas con el manejo de equipos industriales. Así como, normalizar el diseño industrial con un enfoque hacia la mujer.

La bibliografía y la selección de materiales de estudio elaborados por mujeres deben incluirse como referencias. Este es un aspecto importante porque en las referencias de ingeniería, los hombres escriben, casi exclusivamente, libros, revistas, artículos de primer autor, documentación técnica de empresas tecnológicas, etc.

La evaluación debe considerar diferentes aspectos relacionados con la situación de las mujeres en grupos de estudiantes con un 80% de hombres. Desarrollar herramientas para el análisis de resultados capaces de discriminar por sexo podría ayudar en este sentido.

IV. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio que se va a presentar se ha puesto en marcha en el curso 2020/2021 en la asignatura Electrónica de Potencia de tercer curso del Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática. El proyecto se va a ir aplicando progresivamente en otras asignaturas y grados, tanto en la Escuela de Ingeniería de Bilbao como en la Escuela de Ingeniería de Eibar.

En el proyecto presentado han participado 45 estudiantes de los cuales 12 eran alumnas. La asignatura se imparte bajo la modalidad de ABP desde el curso 2010/2011, y ha sido durante el pasado curso 2020/21 donde se ha empezado a aplicar con perspectiva de género. La utilización de infraestructuras de investigación como escenarios industriales dentro de la asignatura como motor de retos para los estudiantes se puso en marcha en el curso 2012/2013. La mayoría de los escenarios propuestos se basan en una planta fotovoltaica de 2kW que existe en la Escuela de Bilbao [18]-[19]. La ampliación de los posibles escenarios a la planta de energía eólica y marina se ha realizado simultáneamente con la nueva estrategia docente. El motivo de esa combinación está relacionado con utilización de retos más complejos que podría ser compatible con el factor de mayor preponderancia de las alumnas en los grupos de trabajo dado su mayor potencial en rendimiento académico.

Algunos de los resultados obtenidos por los grupos de estudiantes se pueden ver en las Figuras 6 y 7. La Figura 6 muestra diferentes modelos de turbina y la Figura 7 muestra la herramienta gráfica CTSof de programación del variador de Emerson que alimenta el motor que emula la turbina. Estarán conectados mediante una placa de instrumentación NI-622 que recibe salida del modelo y lo convierte en referencia en la entrada del variador.

Es difícil discriminar hasta dónde ha influido la nueva estrategia en la calidad de los resultados, pero lo que sí ha sido objetivo es el mayor nivel de satisfacción de los estudiantes con la asignatura, un mayor rendimiento académico y una mejor valoración del profesorado por parte de los estudiantes.

La progresiva aplicación de estas y otras medidas que impulsen el empoderamiento de la mujer en los grupos de estudiantes donde son una clara minoría, debería mejorar la visibilidad de las alumnas dentro de las Escuelas de Ingeniería.

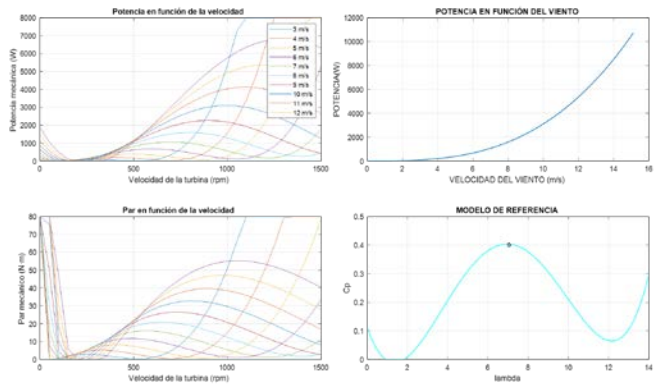
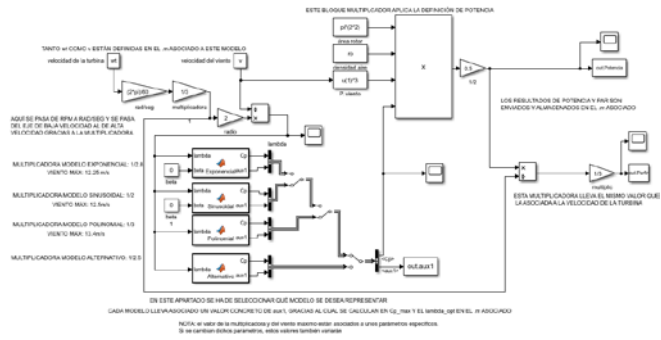


Fig. 6. Propuestas de diferentes formas de modelar turbinas y resultados de los modelos de simulación.

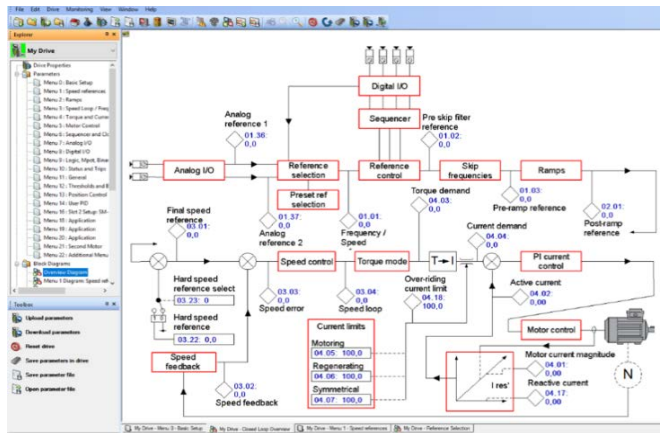


Fig. 7. Herramienta de programación gráfica CTSof.

V. CONCLUSIONES

La progresión en la formación en ingeniería es un objetivo estratégico de la Universidad del País Vasco. Sin embargo, esta progresión no se completará sin tener en cuenta el impacto de la mujer en los diferentes Grados de Ingeniería. La Figura 8 permite observar las mujeres que se matriculan en primer curso en los estudios de Ciencias e Ingenierías en las universidades públicas de España en el curso 2017-2018, [20]. El color naranja muestra diez de los doce grados de ingeniería de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

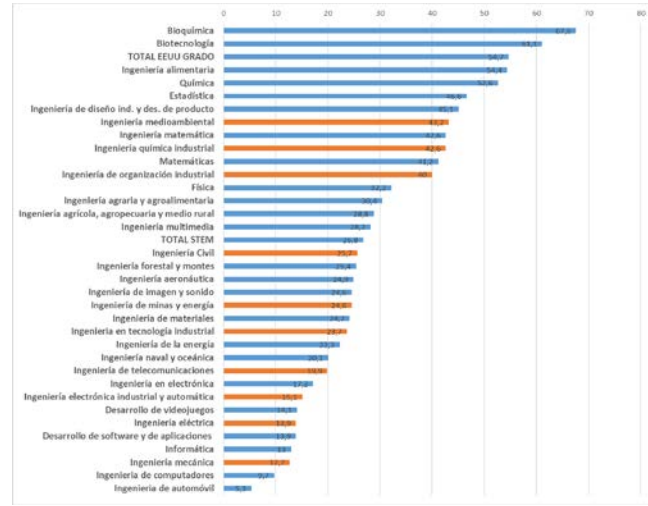


Fig. 8. Primera matriculación de mujeres en Universidades Públicas de España.

En este trabajo se ha propuesto un proyecto educativo que busca aplicar una metodología ABP con perspectiva de género basada en el triángulo Investigación & Aprendizaje & Medio Ambiente. Combinar años de experiencia en metodologías educativas tradicionales con una nueva visión del proceso de enseñanza-aprendizaje, y usar escenarios de investigación relacionados con desafíos industriales y sociales, es el camino para lograr el éxito en los objetivos propuestos. Pero estos objetivos no serán ni justos ni equilibrados, si no se tienen en cuenta las cuestiones de género.

La puesta en marcha del proyecto ha transformado profundamente la labor educativa diaria. Los roles del profesor y de los estudiantes cambian, volviéndose más proactivos con su propio aprendizaje. La mejora en la comprensión de los conocimientos teóricos, que son básicos para la gestión de nuevos equipos industriales dentro de los sistemas de energía renovable, promueve la transferencia entre la teoría y su aplicación práctica. El cambio positivo de las actitudes relacionadas con la perspectiva de género, ha hecho que las alumnas dentro de los grupos de estudiantes tengan una mayor visibilidad y protagonismo.

En resumen, si se quieren revertir las curvas de tendencia de matrícula en los grados de ingeniería afectados por una seria disminución del número de nuevos estudiantes, promoviendo que más mujeres los elijan cuando entran en la universidad, así como un cambio de la visión de los estudiantes sobre los avances de la ingeniería en diferentes áreas tecnológicas con un fuerte impacto social, se deben promover cambios en diferentes paradigmas, como por ejemplo, el de la generación de energía basado en fuentes renovables y el empoderamiento de las mujeres en aplicaciones industriales de ingeniería.

RECONOCIMENTOS

Este trabajo fue apoyado en parte por el Gobierno Vasco, a través del proyecto IT1207-19 y por el MCIU / MINECO a través de RTI2018-094902-B-C21 / RTI2018-094902-B-C22 (MCIU / AEI / FEDER, UE).

REFERENCES

- [1] J. Chen, A. Kolmos and X. Du, "Forms of implementation and challenges of PBL in engineering education: a review of literature", *European Journal of Engineering Education*, vol. 46, no. 1, pp. 90-115, 2021.
- [2] P. Morais, M. J. Ferreira and B. Veloso, "Improvement Student Engagement With Project-Based Learning: A Case Study in Software Engineering", *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 16, no. 1, pp. 21-28, 2021.
- [3] K. A. Smith, "Guest Editorial: Continuing to Build Engineering Education Research Capabilities", *IEEE Transactions on Education*, vol. 49, no. 1, pp. 1-3, 2006.
- [4] L. Mann, R. Chang, S. Chandrasekaran, A. Coddington, S. Daniel, E. Cook, E. Crossin, B. Cosson; J. Tumer, A. Mazzurco, J. Dohaney, T. O'Hanlon, J. Pickring, S. Walker, F. Maclean and T. D. Smith, "From problem-based learning to practice-based education: a framework for shaping future engineers", *European Journal of Engineering Education*, vol. 46, no. 1, pp. 27-47, 2021.
- [5] N. Ayuso, E. Fillola, B. Masiá, A. C. Murillo, R. Trillo-Lado, S. Baldassarri, E. Cerezo, L. Ruberte, M. D. Marical and M. Villarroya-Gaudó, "Gender Gap in STEM: A Cross-Sectional Study of Primary School Students' Self-Perception and Test Anxiety in Mathematics", *IEEE Transactions on Education*, doi: 10.1109/TE.2020.3004075, 2020.
- [6] M. R. De Carvalho Fernandes, V. R. Madeira, H. C. A. Da Gama Afonso, K. Da Silva Duarte, A. L. L. De Souza and A. Peixoto, "A Study on the Support for Women in Engineering Courses", *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 1237-1240, 2019.
- [7] L. F. Neglia, K. S. C. Tragodara, J. V. Paragulla and M. R. C. Caceres, "The presence of women in the Engineering Programs of the University of Sciences and Humanities. Motivations, permanence and monitoring", *IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, pp. 1-4, 2020.
- [8] Z. Zhang, C. T. Hansen and M. E. A. Andersen, "Teaching Power Electronics with a Design-Oriented Project-Based Learning Method at the Technical University of Denmark," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59(1), pp. 32-38, 2016.
- [9] B. Johnson and R. Ulseth, "Professional Competency Attainment in a Project-Based Learning Curriculum", *Frontiers in Education (FIE)*, pp. 844-847, 2014.
- [10] S. Chidhachack, M. A. Schulte, F. D. Ntow, J. L. Lin and T. J. Moore, "Engineering Students Learn ABET Professional Skills: A Comparative Study of Project-Based-Learning (PBL) versus Traditional Students", *ASEE Conference*, Fargo, North Dakota, 2013.
- [11] M. Tomas-Rodriguez and M. Santos, "Modelado y control de turbinas eólicas fotantes", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, pp. 381-390, 2019.
- [12] J. Lekube, A. J. Garrido, I. Garrido, E. Otaola and F. J. Maseda, "Flow Control in Wells Turbines for Harnessing Maximum Wave Power," *Sensors*, 18(2), 2018.
- [13] A. J. Garrido, E. Otaola, I. Garrido, J. Lekube, F. J. Maseda, P. Liria, and J. Mader, "Mathematical Modeling of Oscillating Water Columns Wave-Structure Interaction in Ocean Energy Plants," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, ID. 727982, 11 pages, 2015.
- [14] N. A. Fouad, R. Singh, K. Cappaert, W. Chang and M. Wan, "Comparison of women engineers who persist in or depart from engineering", *Journal of Vocational Behavior*, vol. 92, pp. 79-93, 2016.
- [15] N. A. Mozahem, C. M.Ghanem, F. K. Hamied and R. E. Shoujaa, "Women in engineering: A qualitative investigation of the contextual support and barriers to their career choice", *Women's Studies International Forum*, vol. 74, pp. 127-136, 2019.
- [16] J. E. Mills, J. Gill, R. Sharp and S. Franzway, "Getting it together: Feminist interdisciplinary research on women and engineering", *Women's Studies International Forum*, vol. 34, pp. 13-19, 2011.
- [17] M. C. Cadaret, P. J. Hartung, L. M. Subich and I. K. Weigold, "Stereotype threat as a barrier to women entering engineering careers", *Journal of Vocational Behavior*, vol. 99, pp. 40-5, 2017.
- [18] F.J. Maseda, I. Martija, and I. Martija, "An Active Learning Methodology in Power Electronic Education," in *Frontiers in Education, 2014. FIE*, 2014. pp. 1-5, 2014.
- [19] I. Martija, F.J. Maseda, and I. Martija, "Functional Dissection of Power Electronic Systems as Learning Technique," in *IEEE Global Engineering Education Conference 2013. EDUCON*, 2013, pp. 11-15.
- [20] CRUE Universidades Españolas, "La Universidad Española en Cifras 2017/18". Spain. Legal deposit M-3628-202, ISBN 978-84-09-18182-7, 2019. <https://www.crue.org/publicacion/espanola-en-cifras/> (accedido nov. 2021)

A Comparative Study Between DTC and DTC-SVPWM Control of Induction Machines of Wind and Marine Turbines

1st Fahimeh Shiravani

Department of Automatic Control and Systems Engineering, School of Engineering of Gipuzkoa – EIG/GIE, University of the Basque Country – UPV/EHU, Avenida Otaola 29, 20600 Eibar, Spain
fahimeh.shiravani@ehu.es

2nd Jose Antonio Cortajarena

Department of Electronic Technology, School of Engineering of Gipuzkoa – EIG/GIE, University of the Basque Country – UPV/EHU, Avenida Otaola 29, 20600 Eibar, Spain
josean.cortajarena@ehu.es

3rd Patxi Alkorta

Department of Automatic Control and Systems Engineering, School of Engineering of Gipuzkoa – EIG/GIE, University of the Basque Country – UPV/EHU, Avenida Otaola 29, 20600 Eibar, Spain
patxi.alkorta@ehu.es

Abstract—Many wind and marine turbines employ induction and/or synchronous machines as generators, which are operated usually through a mechanical gearbox to boost their rotational speed and performance for cost and dependability. With the Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) the Direct Torque Control (DTC) is one of the most popular methods of control for electric machines drive systems. The DTC-SVPWM scheme is presented and compared with the classical DTC. The torque ripple reduction achieved by this method is significant, and a very good torque and flux regulation is achieved in an induction machine.

Index Terms—DTC, DTC-SVPWM, Induction Machine, Experimental validation

I. INTRODUCTION

By the development of power electronics technology, three phase machines have been widely used in industrial applications due to their low cost, low maintenance, low moment of inertia, robust architecture, low price and operational reliability. Direct Torque Control (DTC) and Field Orientated Control (FOC) are the most used techniques as high performance vector controllers based on the decoupling of flux and torque [1]- [5]. It is also known that DTC drive is less sensitive than FOC to parameter-tuning [6]. Takahashi [7] suggested DTC for IM in the middle of the 1980s and this control technique is simple due to the absence of pulse width modulation (PWM), current controllers, and Park Transformations. It does not employ PI regulation loops, which should increase its dynamic capabilities and remove difficulties associated with PI regulator saturation. DTC enables great efficiency as well as precise and quick torque dynamics [8]. Although its simplicity, robustness, and speed, the DTC control has a few drawbacks. Many studies have been performed to tackle the DTC scheme's drawbacks, the most significant one is fluctuating switching frequency, particularly at low speeds. Many studies are now

The University of the Basque Country (UPV/EHU) [grant number PIF 18/127] has funded the research in this paper.

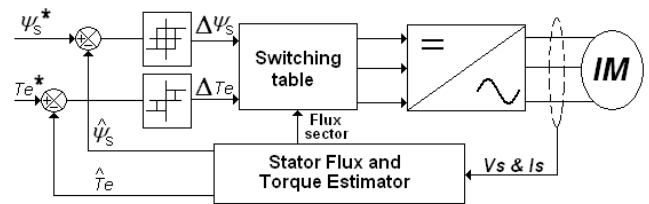


Fig. 1. Block diagram of a DTC control system.

concentrating their efforts on how to increase the performance of induction machines (IM) in terms of dynamic torque response at various operating speeds. Also, Torque ripple causes vibrations and noise. Moreover, current and flux ripple cause harmonics and power loss. There are a variety of ways to improve the quality of an IM's behavior, including developing a new algorithm [9]- [11]. For instance to generate the output vector control, by applying the PWM technique it is possible to obtain a constant switching frequency. In [12], SVPWM for fix time intervals has been used and the performance of the controller has improved. In this work, the performance of DTC and DTC-SVPWM for IM is studied, and the performance of the machine by using both methods is investigated practically.

II. DTC AND DTC-SVPWM METHODS

A. DTC

The DTC drive consists of stator flux, torque hysteresis controllers, a switching table, a stator flux and torque estimator and a voltage source inverter (VSI) as depicted in the figure 1. The function of the switching table is to select the appropriate stator voltage vector that will satisfy both the torque and the flux status output.

The mathematical equations for a three phase, squirrel cage induction motor in a general rotating reference system are:

$$\bar{v}_{s,dq} = R_s \bar{i}_{s,dq} + \frac{d\bar{\psi}_{s,dq}}{dt} + j\omega_g \bar{\psi}_{s,dq} \quad (1)$$

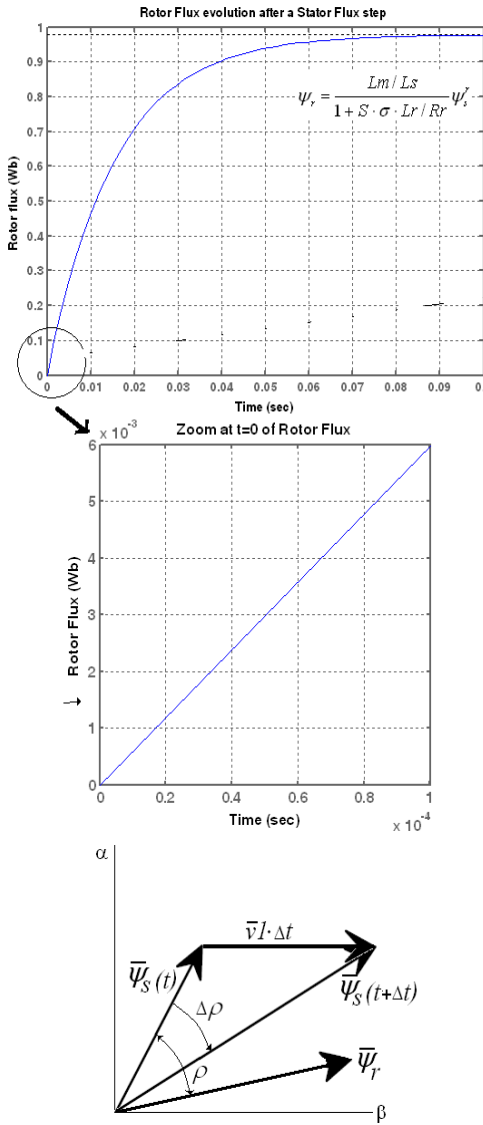


Fig. 2. Rotor flux evolution versus stator flux change and flux vector evolution.

$$0 = R_r \bar{i}_{r,dq} + \frac{d\bar{\psi}_{r,dq}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \bar{\psi}_{r,dq} \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_{s,dq} = L_s \bar{i}_{s,dq} + L_m \bar{i}_{r,dq} \quad (3)$$

$$\bar{\psi}_{r,dq} = L_r \bar{i}_{r,dq} + L_m \bar{i}_{s,dq} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}) = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} |\psi_s| |\psi_r| \sin \rho \quad (5)$$

where, dq and $\alpha\beta$ are the axis of the generic reference system and of the system fixed to the stator. $\bar{v}_{s,dq}$, $\bar{i}_{s,dq}$, and $\bar{\psi}_{s,dq}$ are the stator voltage, current and flux vectors. $\bar{i}_{r,dq}$ and $\bar{\psi}_{r,dq}$ are the rotor current and flux vectors. ω_r and ω_g are the rotor electrical and generic reference system speed. L_m , L_s , and L_r are the mutual, stator and rotor inductances. R_s and R_r are the stator and rotor resistances. T_e is the motor torque.

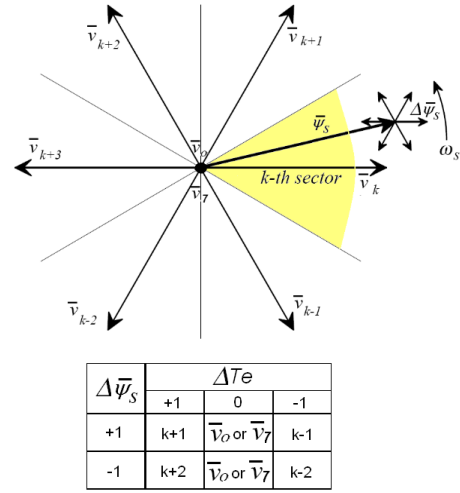


Fig. 3. Two level DTC operation and optimal vector selection table.

$\sigma = 1 - ((L_m)^2 / L_r L_s)$ is the total leakage coefficient. ρ is the angle between the stator and rotor flux vectors and P the number of pairs of poles. From the IM equations, written in a rotor reference frame, we can obtain,

$$\frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} \bar{\psi}_r + \frac{L_m \cdot L_r}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} \bar{\psi}_s^r \quad (6)$$

and by using Laplace transform the equation could be written as:

$$\bar{\psi}_r(s) = \frac{L_m/L_s}{1 + S \cdot \sigma L_r/R_r} \bar{\psi}_s^r(s) \quad (7)$$

Equation (7) shows that the relation between the stator flux and the rotor flux represents a low pass filter with time constant $\sigma L_r/R_r$. With the motor used for test (Table I) the response to a stator flux step can be seen in figure 2.

A sudden variation of the stator flux is followed with a delay for the rotor flux. The rotor flux it is assumed constant because the time of the control is much faster than $\sigma L_r/R_r$. As can be seen, the maximum rotor flux change in 100s for this motor is 6Wb after a unitary step. Then, the electromagnetic torque can be rapidly changed and controlled by means of changing the angle ρ (equation (5) and figure 2). This way, if a voltage vector is applied that changes the stator flux to increase the phase angle ρ between the stator flux and rotor flux vectors, then the torque produced will increase.

By ignoring the stator resistance drop, and integrating V_s (constant) over a sampling time interval ΔT , relation of equation 1 in the fixed stator reference frame becomes:

$$\bar{\psi}_{s(k+1)} = \bar{\psi}_{s(k)} + \Delta T \cdot \bar{v}_{s(k)} \quad (8)$$

This equation indicates that the stator flux always follows the direction of the voltage vector.

Decoupled control of the stator flux modulus and torque is achieved by acting on the radial and tangential components respectively of the stator flux-linkage space vector in its locus [11]. These two components are directly proportional ($R_s = 0$) to the components of the same voltage space vector in the

TABLE I
PARAMETERS OF THE M2AA 132M4 ABB INDUCTION MOTOR 7.5[rpm]
AND 1445[rpm].

symbol	rated value
B_v	0.0105 [Kgm/(rad/s)]
J	0.0503 [Kgm ²]
L_m	0.1125 [H]
L_s	0.1138 [H]
L_r	0.1152 [H]
σ	0.0346
R_r	0.400 [Ω]
R_s	0.729 [Ω]
p	4 poles
$\omega_m(n)$	151.32 [rad/s](1445[rpm])
ϕ_r	0.9030 [Wb]
I_{sd}	8.026 [A]
I_{sq}	20 [A]
I_s	15.3 [A]
V	380 [V]
P_N	7500 [W]
μ	87%

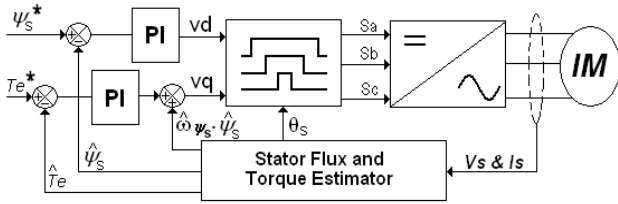


Fig. 4. Block diagram of a DTC-SVPWM control system.

same directions. With a two-level inverter is only possible to get six non-zero voltage vectors and two zero vectors. Then, it is possible to create a table that determines the voltage vector to apply based on the angle of the stator flux and the required changes in stator flux magnitude and torque (figure 3).

B. DTC-SVPWM

The DTC-SVPWM drive consists of a torque and flux controller to produce the reference voltage \bar{v}_s required for the SVPWM strategy. By using the SVPWM technique to regulate the VSI (voltage source inverter) the ripple of the stator current is low and the obtained waveforms for flux and torque are smooth [12]- [13].

If the equation (1) is considered in a revolving reference frame fixed to the stator flux vector, that is $\bar{\psi}_{sd}^{\psi_s} = \bar{\psi}_s$ and $\bar{\psi}_{sq}^{\psi_s} = 0$, then,

$$\begin{aligned} \bar{v}_{sd}^{\psi_s} &= R_s \dot{\bar{\psi}}_{sd}^{\psi_s} + \frac{d\bar{\psi}_{sd}^{\psi_s}}{dt} \\ \bar{v}_{sq}^{\psi_s} &= R_s \dot{\bar{\psi}}_{sq}^{\psi_s} + \omega_{\psi_s} \bar{\Psi}_s \end{aligned} \quad (9)$$

The developed torque from equations (5) and (9) is,

$$\bar{v}_{sq}^{\psi_s} = \frac{2 \cdot R_s \cdot T_e}{3 \cdot P \cdot \bar{\Psi}_s} + \omega_{\psi_s} \cdot \bar{\Psi}_s \quad (10)$$

So, the stator flux will be controlled with the stator voltage d component and the torque with the q component. At high speed the stator resistance voltage drop can be neglected and

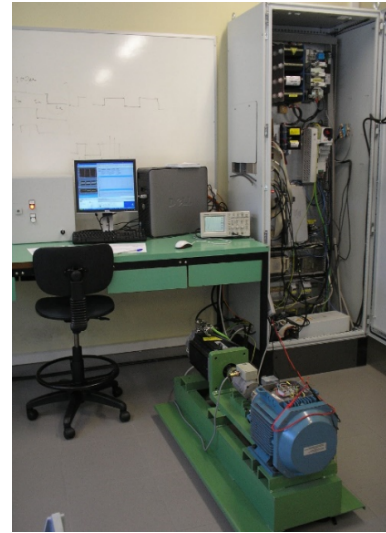


Fig. 5. Experiment platform for IM with load torque.

the flux changes are proportional to the applied voltage and switching time. At low speed the stator resistance voltage drop it is not negligible and the current-flux equations shown a cross-coupling in the d and q components. Two PI controllers are used as can be seen in figure 4 and these correct the coupling into the flux controller and the error in the torque controller due to the ω_{ψ_s} and $\bar{\psi}_s$ term.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

DTC and DTC-SVPWM techniques have been simulated and implemented in a real system under the platform DS1103. The experimental platform is shown in figure 5. For running the experiments DTC is running with a $25\mu s$ sample period and DTC-SVPWM to $10kHz$ PWM. Figures 6 and 7 shown real platform signals obtained with the motor of figure 1 and Table I. By comparing figures 6 and 7, superiority of DTC-SVPWM over DTC is evident.

IV. CONCLUSION

In this paper the DTC and DTC-SVPWM controllers are tested experimentally. The simplicity of the DTC controller in principle seems an interesting option, but the torque and current ripple and the variation of the modulation frequency make the DTC-SVPWM option more suitable. The implemented modulation techniques could be used in any kind of electric machine used as generator in the field of wind turbines and marine energy extraction, among others.

REFERENCES

- [1] I. Takahashi, and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Transactions on Industry applications, vol. 5, pp. 820-827, April 1986.
- [2] T. Muthamizhan, P. Saravanan, and R. Maharana, "Sensorless Control of Z Source Inverter fed BLDC Motor Drive by FOC-DTC Hybrid Control Strategy Using Fuzzy Logic Controller," In 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), pp. 358-363, IEEE, 2021.

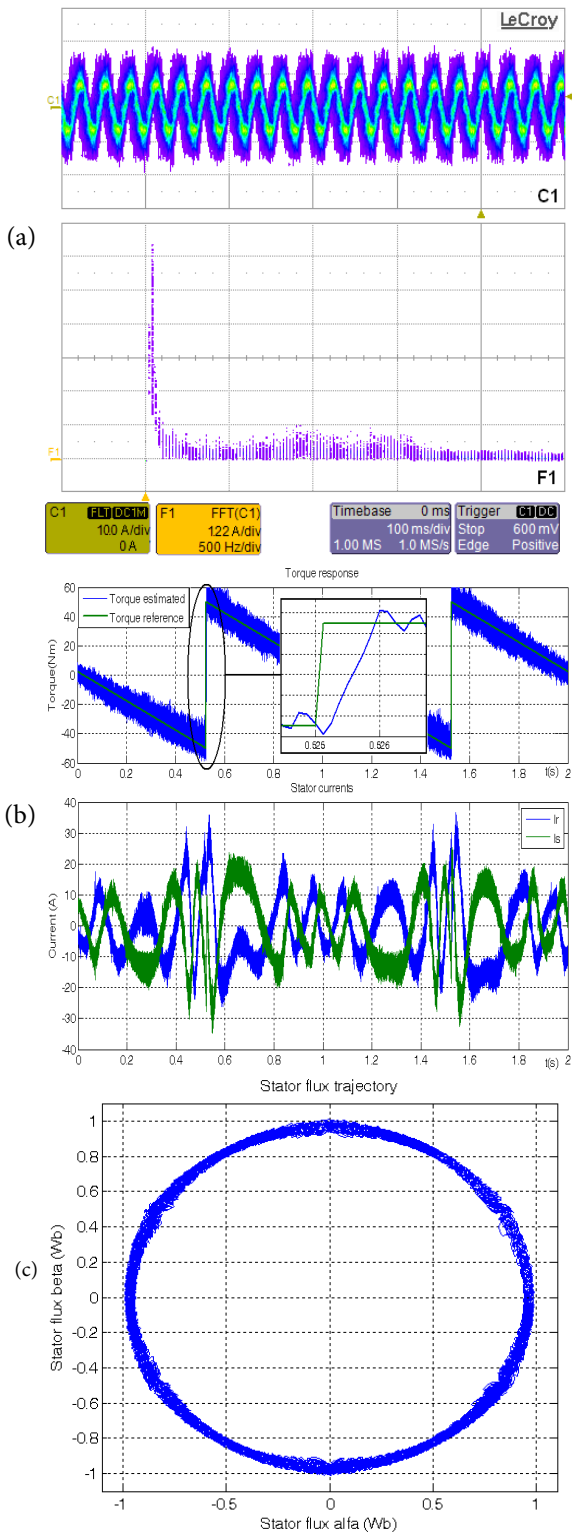


Fig. 6. DTC. (a) Stator current and its FFT (persistence plot), (b) Torque response and (c) flux trajectory.

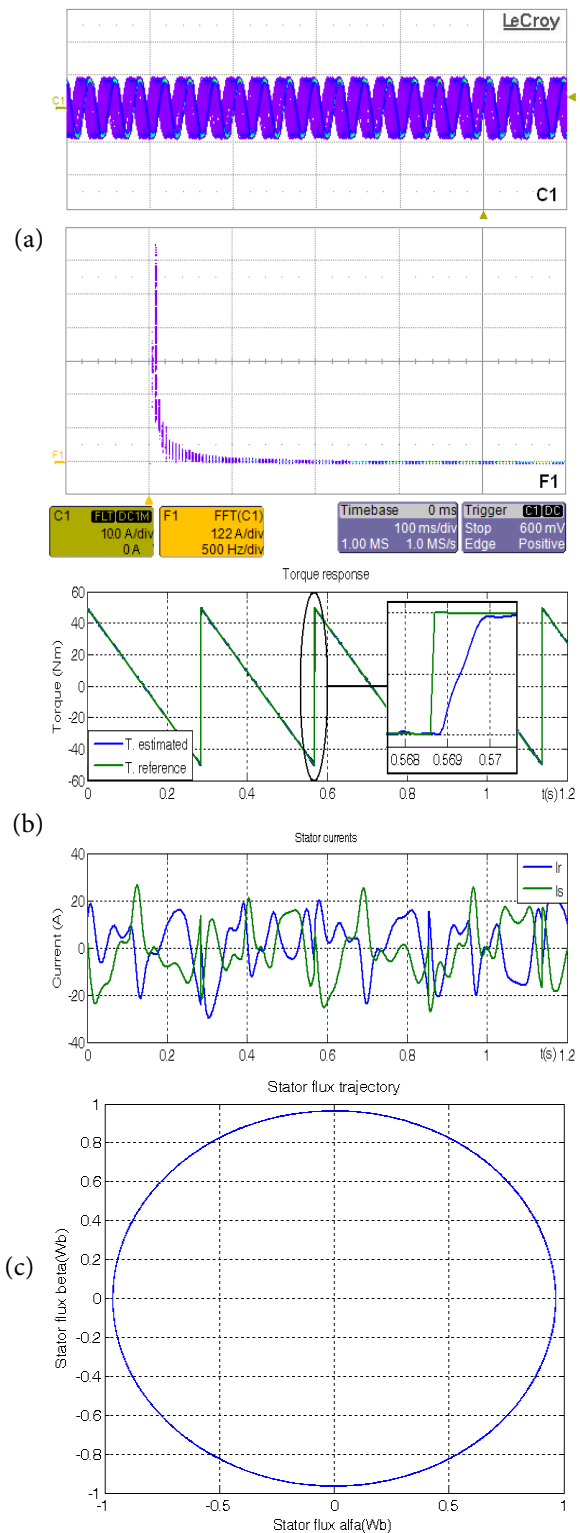


Fig. 7. DTC-SVPWM. (a) Stator current and its FFT (persistence plot), (b) Torque response and (c) flux trajectory.

- [3] Praveenkumar and V. Kuniseti, and V.K. Thippiripati, "Space Vector Modulated Direct Torque Control of an Open-end Winding Induction Motor Drive with Three-Level Inversion," In IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1–6. IEEE, 2021.
- [4] F. Wang, Z. Zhang, M. Xuezhu, J. Rodríguez, and R. Kennel, "Advanced control strategies of induction machine: Field oriented control, direct torque control and model predictive control," IEEE Transactions on Industry applications, vol. 11, 2018.
- [5] L. Zhang, Z. Xiaoyong, C. Ronghua, J. Rodríguez, and S. Han, "A Generalized Open-Circuit Fault-Tolerant Control Strategy for FOC and DTC of Five-Phase Fault-Tolerant Permanent-Magnet Motor," IEEE Transactions on Industry applications, 2021.
- [6] K.B. Nordin, D.W. Novotny, and D.S. Zinger, "The influence of motor parameter deviations in feedforward field orientation drive systems. IEEE Transactions on Industry Applications," IEEE Transactions on Industry applications, 1009–1015, 1985.
- [7] I. Takahashi, and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Transactions on Industry applications, 820–827, 1986.
- [8] N. El Ouanjli, S. Chebabhi, Y. El Mourabit, and , M. Taoussi "Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review. Protection and Control of Modern Power Systems," Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 4(1), pp. 1–2, 2019.
- [9] M. A. Kadir, S. Mekhilef, and H. W. Ping " Direct torque control permanent magnet synchronous motor drive with asymmetrical multi-level inverter supply," In 2007 7th International Conference on Power Electronics, vol. 4(1), pp. 1196–1201, 2007.
- [10] S. Belkacem, F. Naceri, and , R. Abdessemed "Improvement in DTC-SVM of AC drives using a new robust adaptive control algorithm," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 9(2), pp. 267–275, 2011.
- [11] J. Maes, and J. Melkebeek "IDiscrete time direct torque control of induction motors using back-EMF measurement," In Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242), vol. 1, pp. 407–414, 1998.
- [12] H. R. Keyhani, M. R. Zolghadri, and A. Homaifar "An extended and improved discrete space vector modulation direct torque control for induction motors," In 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551), vol. 5, pp. 3414–3420, 2004.
- [13] P. Vas "Sensorless vector and direct torque control," 1998.

Ejemplos de Gemelos Digitales Aplicados a Parques Eólicos Marinos: Un Estudio Preliminar

Pablo-Andrés Buestán-Andrade
Faculty of Informatics, Complutense
University of Madrid (UCM),
Postgraduate Academic Unit, Catholic
University of Cuenca-Ecuador,
Madrid, Spain
pbuestan@ucm.es

Matilde Santos
Institute of Knowledge Technology,
Complutense University of Madrid
(UCM),
Madrid, Spain
msantos@ucm.es

Ravi Pandit
Institute of Data Science and Artificial
Intelligence, University of Exeter,
Exeter, United Kingdom
r.pandit@exeter.ac.uk

Abstract— Currently there has been an increase in the number of wind farms for the generation of electrical energy. European and Asian countries have focused their research on improving the performance of wind turbines by applying the so-called digital twins, with the aim of minimizing production costs and maximizing the efficiency of electrical and electronic components. In the following work an analysis is carried out on the different models of digital twins applied in the field of renewable energies, specifically in offshore wind farms.

Keywords—digital twins, wind farms, renewable energy, mathematical models, artificial intelligence.

Resumen— Actualmente se ha incrementado el número de parques eólicos para la generación de energía eléctrica. Los países Europeos y Asiáticos han centrado su investigación en mejorar el rendimiento de los aerogeneradores mediante la aplicación de los denominados gemelos digitales, con el objetivo de minimizar los costes de producción y maximizar la eficiencia de los componentes eléctricos y electrónicos. En el siguiente trabajo se realiza un análisis sobre los diferentes modelos de gemelos digitales aplicados en el ámbito de las energías renovables, concretamente en parques eólicos marinos.

Palabras clave—gemelos digitales, parques eólicos, energía renovable, modelos matemáticos, inteligencia artificial.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de energía ha provocado inestabilidad y recientes recortes de suministro, con una escalada de precios en muchos países. Esta situación pone de relieve la necesidad de una producción estable de energía limpia. En este contexto, es innegable el impulso mundial a las energías renovables en general y a las energías marinas en particular. Según el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC) la capacidad de instalación del mercado de energía eólica a finales del 2019 es de 651 GW, considerando a la energía eólica marina como la apuesta al futuro debido a su rápido desarrollo. En el área del océano las condiciones son ideales para la construcción de parques eólicos y turbinas a gran escala, por lo que al momento es indispensable pensar en un cambio urgente para transportar la energía eólica terrestre a la energía eólica marítima. Los recursos de energía oceánica, abundantes y rentables siguen siendo poco explotados por falta de tecnologías adecuadas, a esto se suman grandes desafíos como la estabilidad y costes de mantenimiento de las estructuras flotantes de alta mar [1].

La industria 4.0 y la digitalización brindan innumerables áreas temáticas que están evolucionando día a día. Un impulsor de esta virtualización son los DT (Gemelos digitales por sus siglas en inglés “Digital Twin”).

Los DT son una representación digital de un objeto, proceso o servicio físico que incluyen datos de ingeniería, operación y descripción de comportamiento y tienen como objetivo permitir simular escenarios antes de la implementación de un proceso o creación de un objeto con el fin de seleccionar datos para pronosticar funcionamientos y posibles inconvenientes que se puedan presentar (Figura 1). La idea de un DT se remonta a la década de 1970, cuando la NASA implementó esta idea en su programa espacial tripulado Apollo. Tiempo después este concepto fue olvidándose hasta que en 2003 Michael Grieves y John Vickers presentan una transformación sobre la gestión del ciclo de vida de un producto, pasando los datos del producto del papel a un modelo digital. Esta publicación conlleva a pensar en modelos digitales como alternativas de simulación del mundo físico. Es así que en 2010 introduce nuevamente DT en la hora de ruta de la tecnología espacial con la intención de utilizar DT para implementar funciones integrales de diagnóstico y predicción de los sistemas de vuelo con el fin de garantizar un funcionamiento continuo y seguro durante su vida útil [2], [3].

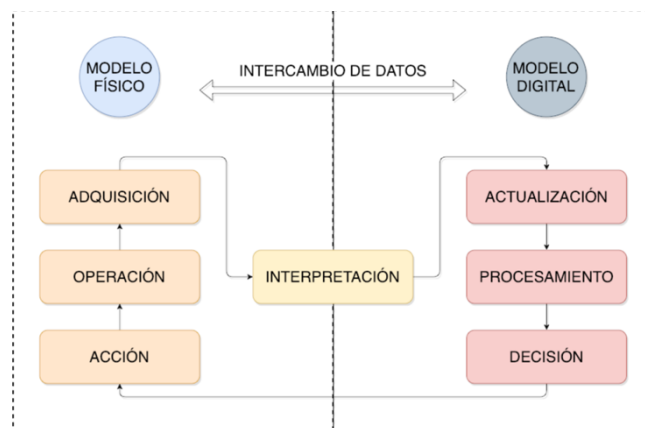


Figura 1: Funcionamiento de un DT y sus componentes.

Un DT hoy en día tiene una amplia variedad de usos, normalmente implementado para comprender el comportamiento de un sistema bajo condiciones ambientales y operativas variantes en el tiempo sin la necesidad de una implementación in situ, generando un ahorro de tiempo y dinero. Los DT han sido desarrollados para aportar con soluciones de los problemas que se presenten durante la ejecución de un proceso, corrección en el rendimiento y predecir fallas tiempo real, colaborando en entender como actuaría el sistema en condiciones extremas o riesgosas, así como proporcionar estimaciones que son complicadas de medir. Al final el modelo simulado debe ser capaz de adaptarse continuamente a su similar físico [3], [4].

A. Ventajas de un sistema DT

- Se pueden detectar anomalías en el funcionamiento del sistema previo a su implementación. En otras palabras se pueden generar mantenimientos preventivos.
- Aumentar la productividad por medio de la planificación y programación. Al ser un sistema generado mediante un historial del modelo y variables propias del sistema y del entorno, puede predecir eventos antes que ocurran en el mundo físico.
- Al permitir optimizar la producción, los beneficios aumentan, se generan ahorros y las ganancias de la compañía crece.
- Permite realizar ajustes a la producción y evaluar posibles escenarios, todo esto gracias a la simulación de todo el sistema.

B. Desventajas de un sistema DT

- Algunas de las empresas en donde se un sistema físico pueda vincularse con un DT no tienen un departamento encargado del desarrollo de soluciones IoT (Internet de las cosas por sus siglas en inglés “Internet of Things”); esto genera un importe de dinero para el contrato de personal especializado y la adquisición de sensores específicos para la recolección de datos y componentes para la simulación.
- Si un DT es desarrollado mediante IA (Inteligencia Artificial), que es la tendencia actualmente hay que mencionar lo siguiente: Al tratar con miles de datos de distintos sensores que generan diferentes variables una mala práctica de procesamiento de datos genera malos modelos y a su vez resultados erróneos con relación a la realidad [5].

C. Generación de energía eólica

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras y de gran crecimiento. La capacidad ha aumentado considerablemente y se ha convertido en la solución más rápida de implementación de tecnologías de energía renovable. Hoy en día se tienen dos tipos de energía eólica: terrestre y marítima, siendo esta última la opción con más ventajas con respecto a la primera. Temas como fuertes vientos, menos turbulencia, disponibilidad de amplias áreas marítimas y el impacto del ruido hacen que los campos eólicos marítimos sean la tecnología con mayor expectativa y potencial, sobre todo en países Europeos. Se había estimado que para el año 2020 el 34% de todo el consumo energético de la UE (Unión Europea) se cubra con energías renovables, del cual el 12% proviene de energía eólica.

La OWF (Figura 2) (Energía eólica marítima por sus siglas en inglés “Offshore wind farms”) difiere de la tradicional energía eólica terrestre de la siguiente manera:

- Se pueden obtener gran velocidad de los vientos y ser implementadas en gran área.
- Menos restricción en temas de impacto de ruido, por lo que se pueden utilizar turbinas más potentes y veloces.

- Alto costo de implementación y mantenimiento, ya que al estar en contacto directo con el agua salada las estructuras deben ser diseñadas para ese tipo de ambiente, así como resistir a fuertes oleajes.

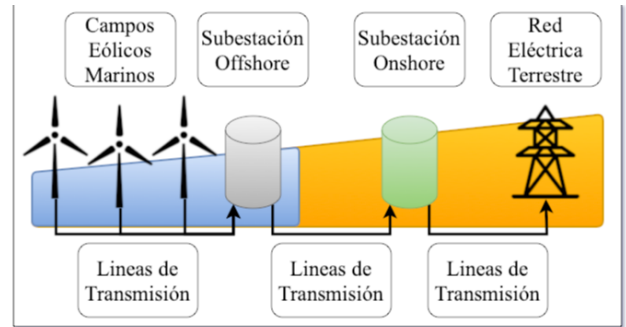


Figura 2: Diagrama de funcionamiento de un OWF.

En los últimos años alrededor de Europa se ha planificado la construcción de estos parques eólicos marinos; si bien la idea es llegar a ser la fuente principal de energía por toda la UE se presentan muchos desafíos, especialmente en la transmisión desde las turbinas eólicas marinas (ubicadas normalmente desde los 3km hasta los 100km de la costa) hasta los campos eólicos terrestres. Se espera que distintas tecnologías innovadoras apuesten a estas propuestas que vienen a crear oportunidades de negocio en la UE como todo el mundo con el objetivo de reducir los costos de implementación [6].

El interés de la industria siempre ha sido la reducción de costos de operación y mantenimiento, la confiabilidad, optimización y aumentar la vida útil de las turbinas eólicas. Estudios afirman [7] que del 20% al 25% del costo total de los sistemas de energía eólica está destinado a la operación y al mantenimiento de dicho sistema y es una cifra que tiende a subir debido a la complejidad de la infraestructura, del ambiente donde se encuentra implementado y la falta de personal calificado para realizar estos trabajos. Concretamente [7] identifica siete puntos muy importantes en donde se esta realizando la investigación actualmente:

- Operación y mantenimiento de parques eólicos (O&M).
- Tasa de fallas y análisis (FAIL).
- Confiabilidad (RELI).
- Sistemas de monitoreo de control (C_M).
- Estrategias de mantenimiento (M_STRA).
- Costo de mantenimiento y ciclo de vida (M_COST).
- Optimización de mantenimiento (M_OPT).

En la Figura 3 se puede apreciar lo mencionado anteriormente.

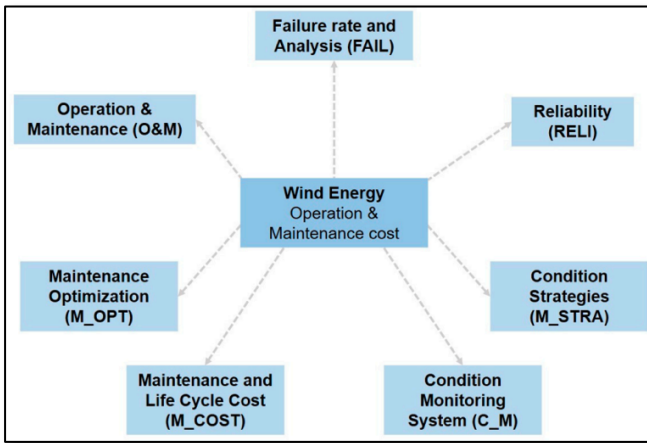


Figura 3: Esquema de los campos de costo de operación y mantenimiento de la energía eólica [7].

D. Sistemas de energía integrando gemelos digitales

La creciente adopción de convertidores de energía power-to-x (P2X) ha permitido sistemas de energía más interconectados e integrados. Un gemelo digital puede desempeñar un papel de un transformador con el propósito de mejorar el funcionamiento y la fiabilidad del sistema completo. Un ejemplo claro es la de un técnico electricista que tiene como responsabilidades el de monitorear el sistema tradicional de red eléctrica de un barrio residencial. Al pasar el tiempo el operador observa que tecnología diferente poco a poco comienza a formar parte de esta red eléctrica tradicional: iluminación y electrodomésticos inteligentes, implementación de paneles solares, entre otros. La idea mejor concebida es desarrollar un sistema DT a que permite pruebas y experimentación sobre como analizar el impacto de la adopción de nuevas tecnologías y la expansión necesaria del sistema de red eléctrica. Usando mediciones y efectuando una simulación lo más actualizada del sistema físico, el técnico eléctrico puede realizar predicciones del estado de la red y tomar acciones apropiada e inmediatas.

Centros de investigación, instituciones educativas, start-ups, multinacionales de países como: China, Dinamarca, Países Bajos, el Reino Unido, entre otros, han invertido un gran capital de dinero en la implementación de nuevas soluciones tecnológicas que permitan aumentar la confiabilidad del sistema y mejorar la efectividad de las turbinas eólicas. En el desarrollo de este documento se revisará los distintos modelos de gemelos digitales que actualmente operan en países del primer mundo.

II. DT EN CAMPOS EÓLICOS

A. Gemelo digital de la tensión de la línea de amarre de aerogeneradores marinos flotantes para mejorar el monitoreo, vida útil y seguridad (Reino Unido, Italia y Países Bajos).

El número instalado de turbinas eólicas marinas flotantes (Figura 4) (FOWT por sus siglas en inglés "Floating offshore wind turbines") ha crecido exponencialmente en la última década y se espera que siga aumentando durante los próximos años lo que generará una necesidad cada vez mayor de abordar los desafíos de estos sistemas que son: monitorear la integridad del sistema,

extender la vida útil de los componentes y mantener los FOWT de manera segura.

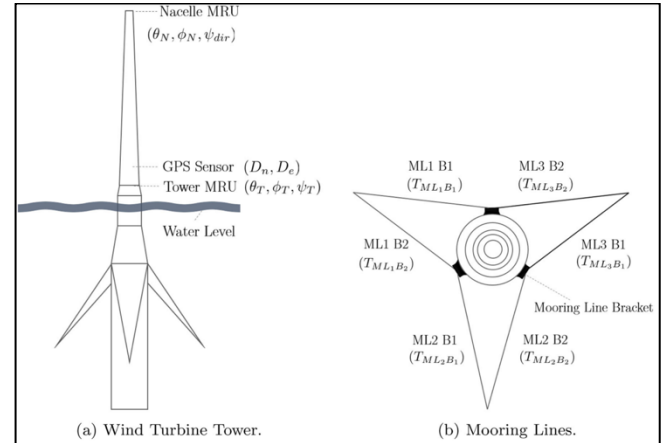


Figura 4: Esquema de un FOWT [8].

El trabajo desarrollado por [8] consiste en abordar uno de los componentes más críticos de las FOWT; las líneas de amarre (MoLs por sus siglas en inglés "Mooring Lines"), que se encargan de fijar la estructura al fondo marino. Los principales inconvenientes que se presentan en las MoLs son la carga extrema y la fatiga, las cuales son dependientes de la función de la tensión axial. Estos investigadores desarrollaron dos DT para predecir la tensión MoL en un FOWT utilizando métodos basados en los datos provenientes del primer parque eólico flotante comercial del mundo Hywind Pilot Park, obteniendo buenos resultados en condiciones óptimas que monitorean la desviación entre el comportamiento del sistema simulados con relación al físico, demostrando ser una solución eficaz a largo plazo en la respuesta mecánica de los MoL.

El segundo DT desarrollado utilizó datos pasados, presentes y pronosticados para predecir la tensión MoL a corto plazo, aproximadamente de 1 a 2 min, tiempo suficiente para que las FOWT operen eficientemente y generen alertas tempranas; esto generaría un aumento en la vida útil de los MoL cuando el operador intervenga y cambien la configuración operativa con antelación.

B. Caracterización experimental de la turbina H-VAWT para el desarrollo de un gemelo digital (Países Bajos).

Una de las posibles soluciones para reducir el costo nivelado de energía de las turbinas eólicas marinas flotantes es la transición a una orientación de eje vertical. Debido a un centro de gravedad más bajo y un umbral de inclinación máximo más alto que las orientaciones convencionales, puede ser que se reduzca la cantidad de acero requerido para la construcción de los soportes. Por otro lado, los efectos aerodinámicos, las estructuras inestables y los cambios en las condiciones ambientales son difíciles de predecir con certeza. En [9] se realizó una serie de pruebas de caracterización en la turbina y los componentes de una VAWT (Turbina eólica de eje vertical por sus siglas en inglés "Vertical Axis Wind Turbine"). Un modelo de elementos finitos (Figura 5) de la turbina se hizo para comprender el efecto de los cambios en carga aerodinámica sobre las cargas de reacción de las palas y el empuje. También se utilizó como verificación para diseñar adecuadamente las pruebas futuras con el fin de operar la turbina en condiciones estables. Al final, obtuvieron los

resultados esperados y se conoció sobre el comportamiento estructural del sistema, incluido la plataforma y turbina.

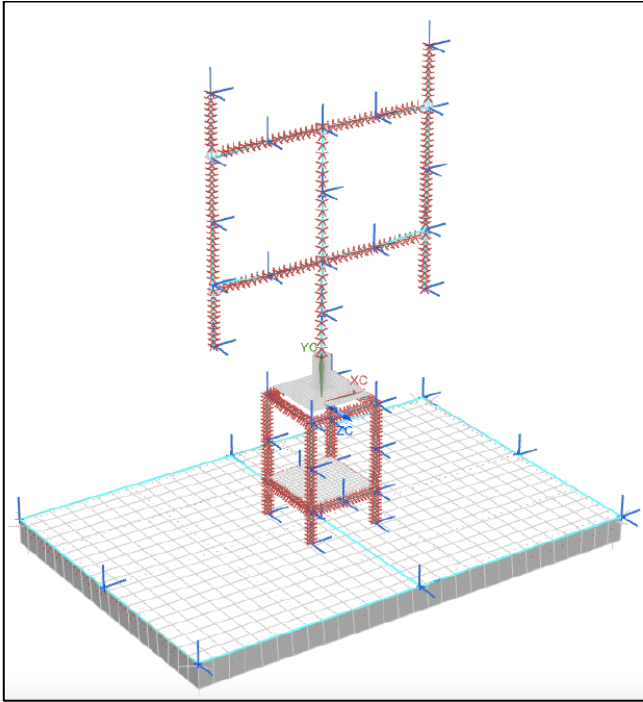


Figura 5: pruebas realizadas en el modelo de elementos finitos [9].

C. Actualización de la confiabilidad de las estructuras eólicas marinas mediante el uso de la información de gemelos digitales (Dinamarca).

En el trabajo realizado por [10] se presenta un framework probabilístico Figura 6 para actualizar la confiabilidad estructural de las subestructuras de turbinas eólicas marinas, basada en la información de DT con el fin de cuantificar y actualizar las incertidumbres asociadas a la dinámica estructural y los parámetros de carga en la acumulación de daños por fatiga. La información del DT se incluye constantemente en el framework actualizando la incertidumbre; esta variable se convierte posteriormente en incertidumbre de los rangos de tensión que se incluye en un modelo probabilístico de confiabilidad estructural. Se ha realizado el estudio en dos casos: el primero se considera la actualización de la rigidez del suelo y la carga de las olas y el segundo para optimizar nuevas estructuras mediante el uso de la teoría bayesiana pre-posterior para la futura calibración de la carga de las olas.

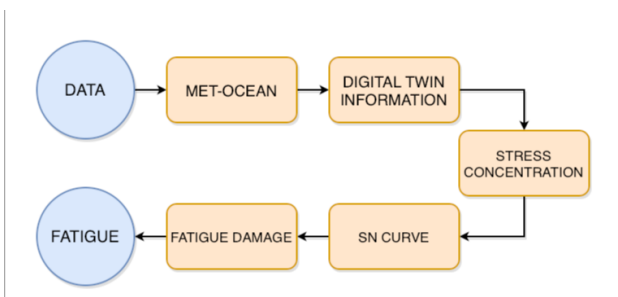


Figura 6: Variables que modelan la incertidumbre en la acumulación de daños por fatiga [10].

CONCLUSIONES

En la actualidad las energías renovables cumplen un papel importante alrededor del mundo. La tendencia es invertir en las OWF debido a sus ventajas con relación a otras tecnologías; sin embargo, se necesita que estos sistemas sean capaces de abastecer la demanda energética con el mínimo de pérdidas y para lograr cumplir con estas necesidades los DT son una alternativa debido a la simulación del entorno físico y a los distintos análisis que se pueden realizar con respecto a los datos adquiridos. Los gemelos digitales permiten comprender y modelar el rendimiento de una planta energética al presentar el estado, funcionamiento y características, prácticamente en tiempo real y muy cerca de la realidad.

Lo cierto es que para el futuro los gemelos digitales cumplirán una parte fundamental dentro de la industria debido a sus grandes ventajas previo a la implementación de un sistema, no solo en el área de energías renovables sino en las múltiples ramas en donde se puedan adaptar estos DT. Las desventajas actuales es la infraestructura y el software utilizado, incluida la potencia informática; con un sistema de DT más estandarizado se espera mejores prestaciones. Por otro lado la tendencia que paralelamente trabaja en mejorar el rendimiento y la eficacia de sistemas es el llamado aprendizaje por refuerzo (permite al sistema implementar nuevas estrategias efectivas en base a la experimentación con los datos). Sería interesante que estas dos tecnologías que son el estado actual del arte puedan fusionarse, complementarse mutuamente y obtener mejores resultados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades de España bajo el proyecto MCI/AEI/FEDER número RTI2018-094902-B-C21.

REFERENCIAS

- [1] M. Wang, C. Wang, A. Hnydiuk-Stefan, S. Feng, I. Atilla, and Z. Li, "Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions," *Ocean Engineering*, vol. 232. Elsevier Ltd, Jul. 15, 2021. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109168.
- [2] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decision Support Systems*, vol. 145, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.dss.2021.113524.
- [3] R. Xie, M. Chen, W. Liu, H. Jian, and Y. Shi, "Digital twin technologies for turbomachinery in a life cycle perspective: A review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 5. MDPI AG, pp. 1–21, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/su13052495.
- [4] X. Chen, M. A. Eder, A. S. M. Shihavuddin, and D. Zheng, "A human-cyber-physical system toward intelligent wind turbine operation and maintenance," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–10, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13020561.
- [5] D. Adamenko, S. Kunnen, R. Pluhna, A. Loibl, and A. Nagarajah, "Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin," in *Procedia CIRP*, 2020, vol. 91, pp. 27–32. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.146.
- [6] Staffordshire University and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) : proceedings : 1-4 September 2015, Stoke-on-Trent, United Kingdom. 2015.
- [7] Á. M. Costa, J. A. Orosa, D. Vergara, and P. Fernández-Arias, "New tendencies in wind energy operation and maintenance," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 4. MDPI AG, pp. 1–26, Feb. 02, 2021. doi: 10.3390/app11041386.
- [8] J. Walker, A. Coraddu, M. Collu, and L. Oneto, "Digital twins of the mooring line tension for floating offshore wind turbines

to improve monitoring, lifespan, and safety,” *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2021, doi: 10.1007/s40722-021-00213-y.

- [9] B. Leblanc and C. Ferreira, “Experimental characterization of H-VAWT turbine for development of a digital twin,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Mar. 2020, vol. 1452, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1452/1/012057.
- [10] D. Augustyn, M. D. Ulriksen, and J. D. Sørensen, “Reliability updating of offshore wind substructures by use of digital twin information,” *Energies*, vol. 14, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185859.

Impact of Inerter in Vibrational Control in Floating Offshore Wind Turbines

Sandra Piernikowska
Department of Mechanical Engineering & Aeronautics
City University of London
London, United Kingdom
sandra.piernikowska@city.ac.uk

Maria Tomas-Rodriguez
Department of Mechanical Engineering & Aeronautics
City University of London
London, United Kingdom
maria.tomas-rodriguez.1@city.ac.uk

Abstract—This paper presents initial results in the study on the effects of inerter implementation on the reduction in the oscillatory behaviour in the floating offshore wind turbine. FOWTs are subjected to extreme excitations that are modelled to represent the system's dynamic loading such as wind and waves, consequence of the geographical location of the structure. The system is analyzed by means of a MATLAB model and classical control strategies such as tuned mass-damper (TMD) system. The inerter is a physical device where the relative acceleration between its endpoints is proportional to the applied force. This article studies the response of a FOWT model with structural controller TMDI (tuned mass-damper-inerter) implemented in the nacelle. This work concludes that the presence of an inerter significantly reduces the amplitude of the system's oscillation and its return to the undisturbed state is faster than in the case of the TMD. These results are seen to agree with other research findings and are discussed against the current state-of-art in the field of vibrational control. The need of the optimisation of the device along with significance of the tuning of the inertance parameter are briefly discussed.

Keywords— FOWT, modelling, inerter, WT, TMD, TMDI, control, wind turbine, renewable energy

I. INTRODUCTION

The contribution of the wind power into an overall energy production has been gaining its importance since late 2010s. The technology is expanding rapidly due to the more noticeable shift into the renewable energy market as a consequence of significant exhaustion of the natural resources such as fossil fuels or coal. This leads to emphasising the idea of clean energy namely wind, water, or sunlight. Only in the UK, a remarkable 30% of total power production comes from renewable sources. Moreover, an impressive 52% is a combined contribution of onshore and offshore wind energy [1]. Wind energy is a mature technology with onshore wind turbines offering a reliable, cost-effective, and environmentally friendly energy source. Onshore wind turbines, however, have a large environmental impact, these could endanger bird species and has significant transportation cost through high-voltage cables. Moreover, due to the geographical location, the intensity of the wind may not always be enough to start the power generation process as the cut-in wind speed may not be easily reached. A suitable solution for these various issues is offered by the concept of offshore wind turbine technology, the **Floating Offshore Wind Turbines (FOWT)**. These structures are installed in freshwaters or seawaters, at depths greater than 50-60 meters. Hence, there is a reduction of the noise and visual impact created by these systems. FOWTs take full advantage of the strong coastal winds which improve the engagement and generation of the electrical power.

However, this technology is not free from some disadvantages. FOWTs are subjected to several adverse conditions: dynamic loads such as waves, strong winds, currents and mechanical loads coming from the coupled effect of wind and waves. Another challenge is the consequence of the type of foundation used for floating turbine. There are different types of floating foundations such as spar-buoy, tension-leg platform (TLP), pontoon barge-type or hybrid-type [2]. Despite the type of foundation, when compared to the fixed bottom turbines, FOWTs do experience self-induced vibrations appearing in the barge as a consequence of the blades' control performed at rotor level to optimize the power production. Self-induced vibrations are a natural phenomenon experienced by mechanical systems especially those of rotary nature. The structural costs of FOWT are primarily associated to floating foundation stabilization when undesired oscillations happen, rigidity to heavy loads and structure's fatigue reduction, always being the maximization of power production the main objective.

The main control objectives (amongst others) in FOWTs are (i) to achieve optimal energy harvesting and (ii) simultaneous mitigation of unwanted oscillations that may appear on the barge. To achieve (i) and maximize the power production, the control in this case is carried out at the nacelle/rotor unit and often deals with aerodynamic aspects as well and focuses on improvements in the aerodynamic performance by means of various methods such as the control of the local airflow surrounding turbine blades via active flow control ([3],[4]), blade's angle of attack (pitch) control ([3],[5]) or variable rotor diameter (VRD) control methods which adjust the size of the turbine blades ([3],[6]) just to mention a few.

Blade's pitching is a rotation of the blade around its spanwise axis to change the effective angle of attack to the wind on the blade and ultimately to maximize energy production in regimes beyond the rated speed. Pitch control uses a collective mode which mean that all blades are being adjusted simultaneously. More advanced pitching methods, however, introduce individual blade adjustments. The goal is to combine collective and individual pitch control to obtain two independent load reduction systems, one to keep the power at a desired level and a second one to minimize loads without affecting the power production. Methods of blade pitch control have proven to be effective for optimal power production but however, they increase blade losses and as mentioned above, tend to degrade other system performances such is the case of self-induced vibrations at the barge, which leads to the need for a method of controlling unwanted oscillations in the tower/barge subsystem. This is usually tackled by means of structural control methods. Structural

control is defined as the control performed by any device/material used in a mechanical structure to either enhance the damping properties or to generate forces that can control the system's structural response to disturbances. The most widely used control method is the implementation of tuned masses (TD), in particular TMDs. In this case, the controllers can be designed to be passive, active, or semi-active and they are typically installed on the tower, the nacelle, or the blades [3]. Other types of classical tuned dampers include tuned liquid dampers (TLD) [7], controllable fluid damper, e.g., magnetorheological fluid damper [8], tuned rolling balls damper [9] or pendulum-type systems [10].

This paper proposes to add an inerter in the TMD. The inerter is a device where the equal and opposite force applied at its two terminals is proportional to the relative acceleration between them with the constant of proportionality b , identified as inertance with a unit of a kilogram ([11],[12]). The idea of using inerters as a vibrational control method was first introduced in automobile systems and appeared under the name of J-damper [13]: the inerter was successfully incorporated into a racing car suspension. The device was able to tune the natural frequency of the tires and reduce the mechanical loading experienced by the vehicle. Naturally, the idea of incorporating the inerter into a structural application was conceived [14]. Since then, the device has been extensively implemented into civil engineering structures such as multi-storey buildings [15] or bridges ([16],[17]). However, there are numerous researches in other areas for instance locomotive [18] or for cycling purposes [19].

The concept of implementing a passive TMD with an inerter in FOWTs is a relatively new field of research going only a few years back. This methodology relies on the inerter ability of mass amplification. The combination of inerter with classic tuned mass-damper system provide greater vibrational control ([20]-[22]) by load mitigation and reduction in the amplitude of unwanted oscillations. Ultimately, it leads to major improvements in the overall structural stability.

II. MODELING OF THE SYSTEM

The complex floating offshore structure can be modelled by a set of differential equations derived from first principles. The basic model used in this work has been validated with benchmark models used in previous studies ([23]-[27]). The benchmark model chosen in here is the National Renewable Energy Laboratory (NREL) 5-MW baseline FOWT [28].

A. Structure with TMD

TMD (tuned mass-damper) is a structural control device which consists of auxiliary mass, spring, and damper. In the study here conducted, the system was installed in the nacelle. Prior selection and adjustment of the spring stiffness and damper coefficient, the tuned mass damper enables the auxiliary mass to oscillate with a phase shift to dissipate the accumulated energy originated by the motion of the structure. The application of TMD methods in civil engineering begin to gain their importance between 1960s and 1970s where TMDs were tested and implemented into the single-degree-of-freedom (SDOF) primary structures [29].

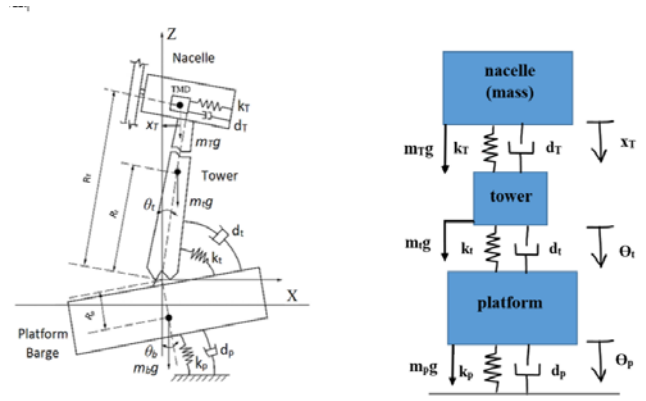


FIGURE 1: FOWT model and free body diagram

Based on a simplified model as the one in Fig.1, a 6 degrees-of-freedom FOWT structure can be described by a set of 3 single-degree-of-freedom second order differential equations as follows:

$$\begin{aligned} I_t \ddot{\theta}_t &= -m_t R_t \dot{\theta}_t - k_t(\theta_t - \theta_p) - d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) - k_T R_T(R_T \theta_t - x_T) - d_T R_T(R_T \dot{\theta}_t - \dot{x}_T) - m_T g(R_T \theta_t - x_T) \\ I_p \ddot{\theta}_p &= -d_p \dot{\theta}_p - k_p \theta_p - m_p g R_p \theta_p + k_t(\theta_t - \theta_p) + d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) \\ m_T \ddot{x}_T &= k_T(R_T \theta_t - x_T) + d_T(R_T \dot{\theta}_t - \dot{x}_T) + m_T g \theta_t \end{aligned} \quad (1)$$

These dynamic equations combine the forces experienced by the different bodies in the system upon isolation of the model from environmental factors (waves, winds, etc). These being the nacelle, tower, and barge.

The main parameters of the 5MW NREL FOWT are as follows: barge and tower inertias $I_b = 1.77 \cdot 10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_t = 3.34 \cdot 10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, masses of the three rigid bodies: $m_b = 5452000 \text{ kg}$, $m_t = 697460 \text{ kg}$ and $m_T = 4 \cdot 10^4 \text{ kg}$, the tower flexibility and torsion properties (represented by a spring and damper): $k_T = 1.25 \cdot 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ and $d_T = 2.87 \cdot 10^7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, the barge flexibility and torsion: $k_b = 1.89 \cdot 10^9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$, $d_b = 5.12 \cdot 10^7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, the barge center of mass: $R_b = 0.281 \text{ m}$, the tower center of mass: $R_t = 64 \text{ m}$ from the bottom of the structure (axis origin $Z = 0 \text{ m}$), the TMD in the nacelle: $R_T = 90.6 \text{ m}$ from the bottom with TMD spring and damper coefficients: $k_T = 2.8805 \cdot 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ and $d_T = 1.0183 \cdot 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ respectively.

B. Structure with TMDi

TMDi (tuned mass-damper-inerter) refers to a TMD system enhanced with the addition of an inerter. The force produced by the inerter can be expressed as follows where parameters a_2 and a_1 are two corresponding accelerations.

$$F_{\text{inerter}} = b(a_2 - a_1) \quad (2)$$

In the case study, the inerter was installed in the nacelle, in parallel to the existing TMD as shown in Fig.2.

The previously obtained equations of motion now account for the force exerted by the inerter and some additional force terms are added:

$$\begin{aligned} m_T \ddot{x}_T &= k_T(R_T \theta_t - x_T) + d_T(R_T \dot{\theta}_t - \dot{x}_T) + m_T g \theta_t + b(R_T \ddot{\theta}_t - \ddot{x}_T) \\ I_t \ddot{\theta}_t &= -m_t R_t \dot{\theta}_t - k_t(\theta_t - \theta_p) - d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) - k_T R_T(R_T \theta_t - x_T) - d_T R_T(R_T \dot{\theta}_t - \dot{x}_T) \\ &\quad - m_T g(R_T \theta_t - x_T) - b(R_T \ddot{\theta}_t - \ddot{x}_T) \\ I_p \ddot{\theta}_p &= -d_p \dot{\theta}_p - k_p \theta_p - m_p g R_p \theta_p + k_t(\theta_t - \theta_p) + d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) \end{aligned} \quad (3)$$

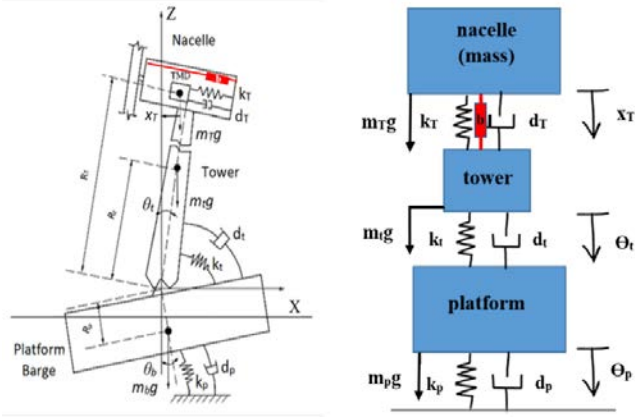


FIGURE 2: FOWT model and free body diagram with inerter

It can be seen that due to the location of the TMDI, the equation describing the platform dynamics is not influenced by the inerter's force. The system's parameters remained unchanged with the addition of the selected value for the inerter b .

III. SIMULATIONS

To demonstrate that inerters can positively impact the vibrational control of the FOWT structure, two case studies were carried out, simulations have been performed and the obtained data were analysed and compared.

A. Structure with TMD

The model presented in equations (1) has been validated against the benchmark model [28]. MATLAB simulations presented in Fig.3 show the response of the system's when a TMD is installed in the nacelle.

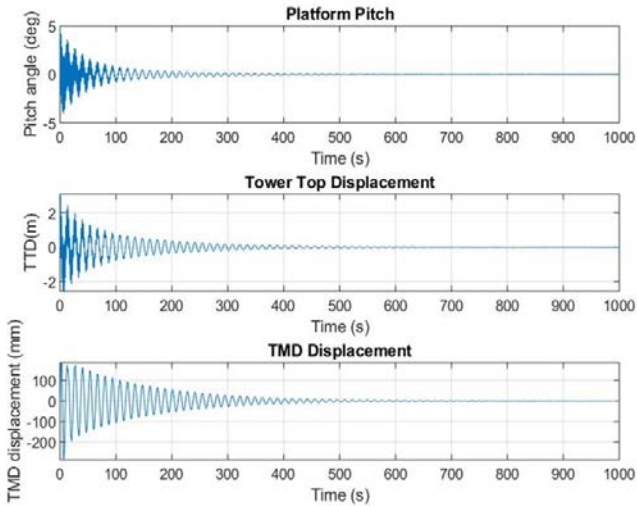


FIGURE 3: FOWT dynamic response with TMD

The resultant dynamic responses of the system agree with those of the benchmark model. The combined plots in Fig.3 show the barge angular (platform pitch), tower translational and the TMD translational displacements.

B. Structure with TMDI

The previous model implemented in MATLAB is now modified by adding an inerter in parallel with the existing structural control TMD, these corresponds to equations (3). The simulations carried out consisted of testing the dynamic response of the barge, tower and nacelle under the same

initial conditions. In this case, the inerter coefficient b was selected in the order of magnitude e^5 .

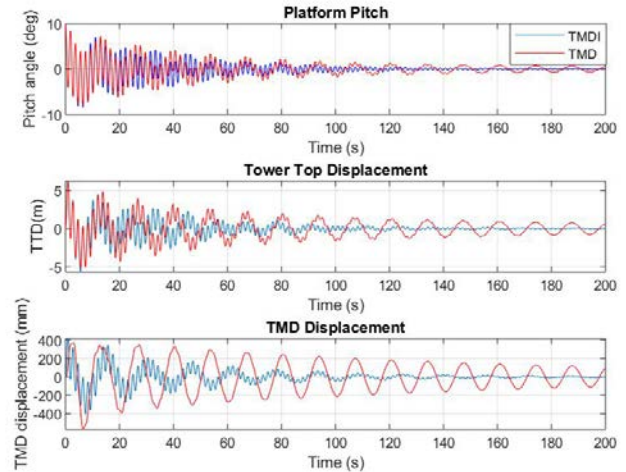


FIGURE 4: Dynamic responses with TMD (red) and TMDI (blue)

Fig. 4 shows the comparison of the system's response with TMD indicated in red and with TMDI highlighted in blue. The plot proves that the implementation of the inerter in the nacelle positively influence the model response and illustrates the significant improvement by means of reduction in the resultant displacement curves. The response amplitude was greatly reduced and decays towards the equilibrium considerably faster compared to the system with TMD only. However, for these first simulations, the value of the inerter has been selected intuitively. The order of magnitude e^5 was selected to demonstrate the effect the device has on the overall vibrational response of the system. Similarly, as for TMD, the optimization of the inerter parameter would require the application of more advanced algorithms. The obtained data however, mean promising results as the inerter can positively impact the oscillatory response of the model. Essentially, it can be concluded that inerter performs similarly to a damper and aims on dissipating the energy accumulated in the system. The obtained results would require further refinement due to the lack of inerter tuning but also due to the simplifications and assumptions made in the model equations.

IV. VIBRATIONAL CONTROL

As mentioned in the previous section, the model presented is a simplified approach convenient for vibrational analysis. All external loading such as aerodynamic, hydrodynamic, etc. were neglected and the system was isolated from any environmental factors. There are many additional factors which have to be included in the FOWT analysis to obtain the most relevant and accurate data.

The wind turbine simulator FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) provides state-of-art models and has been used in many previous studies interested in vibrational control of FOWTs ([23]-[27],[30]).

Research carried out in [30] focuses on implementation of TMDI at the top of the tower rather than in nacelle. The paper discusses a drastic improvement in the dynamic response of the system and validates the resultant derivations with the-state-of art FAST benchmark model. In this contribution, the difficulties in the optimization of the value of inerter were highlighted.

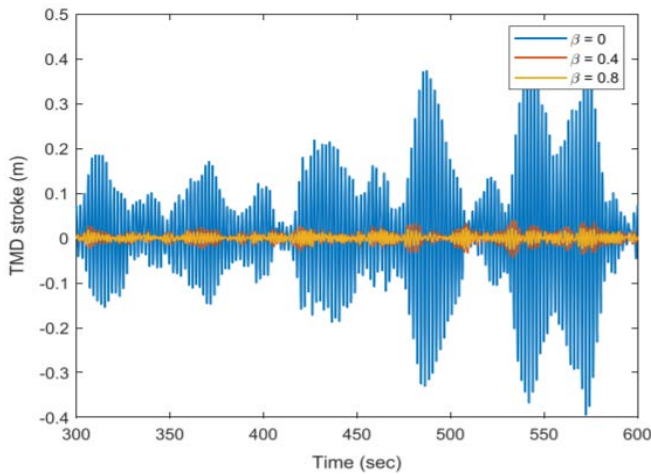


FIGURE 5: Comparison of TMD stroke (blue) and TMDI stroke (yellow) [30]

The multibody dynamic model in [30] was reduced, by applying the fixed bottom method in order to perform parametric optimization. The incorporation of inerter significantly increases the complexity of the model.

Fig.5 shows the comparison of the dynamic responses of the system with TMD and TMDI under uncontrolled tower side-to-side motion. The parameter β is the inerter ratio defined as the ratio of the inertance to the mass of the primary structure. Together with mass ratio, it is a key TMDI parameters. The resultant data show that a parallel connection of the inerter with TMD at the top of the tower reduces the stroke of the TMD and provides an overall enhanced stability for the structure subjected to the external excitation.

It is worth mentioning that the paper [30] provides all analytical data supporting the idea of implementation of TMDI into wind turbine structure which can be easily applied into further research, e.g., the comparison of the performance of TMDI in the nacelle versus TMDI at the tower top. The article also illustrates and agrees that the combination of TMD with inerter performs exceptionally well in marine application under both mild and violent loading conditions (wave-wind coupling).

The solution of connecting TMD with an inerter in parallel was also tackled in [31]. This work presents a study carried out in order to obtaining an optimal TMDI network configuration. The analysis investigates different inerter-based network configurations and concludes that the best performance is achieved when an inerter is connected to the spring in series. Ultimately, the most significant improvement was observed in the top fore-aft deflection performance.

The work conducted in [32] investigates the impact of a more complex inerter-enhanced vibration absorber i.e., a rotational inertia double tuned mass damper (RIDTMD). The device was mounted in the nacelle as a structural control tool and offers an alternative to the classic TMD. In this work, the performance of both RIDTMD and TMD systems is compared under the same operational conditions. The simulations performed (time and frequency domain) are based on a 17-DOF system model and prove that a RIDTMD suppresses the tower oscillation, in particular, tower side-to-side deflection, much better than a TMD and in general shows greater overall performance. The improvement in the

response of the system with RIDTMD is the result of an additional DOF (extra resonance) introduced to the device. This study also highlights that as a consequence of the amplitude reduction, there is a slight increase in the damper stroke; however, all other remaining parameters are comparable.

V. CONCLUSIONS

There are two different types of vibrational control usually implemented into FOWTs: rotor control, devoted mainly to achieve maximum wind power extraction and structural control, which is mainly devoted to reducing the oscillations appearing in various parts of the FOWT structure.

There exists numerous attempts and research interest in combining tuned dampers with inerters to create a mechanical network which can successfully and fully damp the unwanted oscillation appearing at the FOWT structure. In our work presented in here, the analysis performed on the nonlinear, isolated 6DOF system shows promising results and proves that inerters can be used in the vibrational control of FOWTs. The obtained dynamic responses agree with existing research data. In the simulations shown, the model with a parallel connection between TMD and the inerter was tested. However, based on the current state-of-art, it can be clearly seen that this controller can also provide excellent results connected in series or by installation in more complex mechanical network.

As a general conclusion, the inerter can be considered as a promising device to effectively reduce the vibrational behaviour of FOWTs. Its ability to amplify the mass of the tuned damper can be used firstly to provide better control but also to reduce the existing mass of the TMD. In consequence, that creates the opportunity to reduce the overall mass at the top of the tower or nacelle itself. A mass reduction would be beneficial in several aspects related to the installation and maintenance of the structure. Moreover, the structural stability aspect would also be very much influenced. The introduction of any additional mass at the turbine nacelle could cause structural imbalance, hence any possibility to reduce the components weights would be an advantage.

As indicated in by the results obtained in this work, the optimization of TMDI devices would require advanced optimization approaches in order to obtain the optimal TMD and inertance parameters.

REFERENCES

- [1] *Wind Energy*, RenewableUK, April 2021 [Online], Available; <https://www.renewableuk.com/page/WindEnergy>
- [2] M. Tomás-Rodríguez and M. Santos. "Floating Offshore Wind Turbines: Controlling the impact of vibrations". Presented at the 7th International Conference on System and Control, ICSC'18- October 24-26, 2018 Valencia, Spain.
- [3] A. Awada, R. Younes. and A. Ilinca, "Review of Vibration Control Systems for Wind Turbines", *Energies*, 2021, vol.14, no.11, pp.3058.
- [4] D. Berg, S.J. Johnson, C.P. "Case" van Dam. "Active Load Control Techniques for Wind Turbines". SANDIA REPORT. SAND2008-4809. Unlimited Release. Printed July 2008
- [5] E.A. Bossanyi. "Wind Turbine Control for Load Reduction". *Wind Energy. Special Issue: Special Review Issue on Advances in Wind Energy*. July/September 2003, vol.6, no.3, pp.229-244.
- [6] P.M. Jamieson. "Variable diameter wind turbine rotor blades" 2005, Google Patents, US6972498B2.

- [7] Y. Fujino. "Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures". *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, vol.118, no.10, pp.2017-2030.
- [8] P. Martynowicz and Z. Szydio. "Wind turbine's tower-nacelle model with magnetorheological tuned vibration absorber". Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2013. IEEE, pp.238-242.
- [9] J. Chen and C.T. Georgakis. "Tuned rolling-ball dampers for vibration control in wind turbines". *Journal of Sound and Vibration*, 2013, vol.332, no.21, pp.5271-5282.
- [10] P. Guimarães, M. de Moraes, and S. Avila. "Tuned mass damper inverted pendulum to reduce offshore wind turbine vibrations", *Vibration Engineering and Technology of Machinery*. Springer, Cham, 2015, pp. 379-388.
- [11] M.C. Smith. "Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter". *IEEE Transactions on Automatic Control*, October 2002, vol.47, no.10, pp. 1648-1662, doi: 10.1109/TAC.2002.803532.
- [12] M.Z.Q. Chen, Y. Hu, L. Huang and G. Chen. "Influence of inerter on natural frequencies of vibration systems". *Journal of Sound and Vibration*. March 2014, vol.333, no.7, pp.1874-1887.
- [13] M.C. Smith, and W. Fu-Cheng. "Performance Benefits in Passive Vehicle Suspensions Employing Inerters". *Vehicle System Dynamics*. Taylor-Francis Group. 2004, vol.42, no.4, pp. 235-257.
- [14] R. Ma, K. Bi and H. Hao " Inerter-based structural vibration control: A state-of-the-art review". *Engineering Structures*. September 2021, vol. 243, , 112655. ISSN 0141-0296.
- [15] I.F. Lazar, S.A. Neild.and D.J. Wagg. "Using an inerter-based device for structural vibration suppression". *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 2014, vol.42, no.8, pp.1129-1147.
- [16] K. Xu, K. Bi, Y. Ge, L. Zhao, Q. Han and X. Du. "Performance evaluation of inerter-based dampers for vortex-induced vibration control of long-span bridges: A comparative study". *Structural Control and Health Monitoring*. 2020, vol.27:e2529.
- [17] J. Dai, Z. Xu, P. Gai and Z. Hu. "Optimal design of tuned mass damper inerter with a Maxwell element for mitigating the vortex-induced vibration in bridges". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. vol.148:107180, ISSN 0888-3270.
- [18] H. Chen, W. Su, and F. Wang. "Modeling and analyses of a connected multi-car train system employing the inerter". *Advances in Mechanical Engineering*. August 2017, vol.9, doi:10.1177/1687814017701703
- [19] M. Shinpou, K. Hirata, Y. Nakamura, Y. Okano and K. Hatada. "Energy-efficient bicycling with passive mechanical network,". 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2019, pp. 187-192, doi: 10.1109/CoDIT.2019.8820650.
- [20] D. Villoslada., M. Santos and M.Tomas-Rodriguez. "Inerter-based Passive Structural Control for Barge Floating Offshore Wind Turbines". *IFAC PapersOnLine*. 2020, vol.53, no.2, pp: 12358-12363. Part of special issue: 21st IFAC World Congress: Berlin, Germany, 11-17 July 2020.
- [21] Y. Hu and M. Z. Q. Chen. "Passive structural control with inerters for a floating offshore wind turbine,". 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017, pp. 9266-9271, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028833.
- [22] Y. Hua, J. Wanga, M.Z.Q. Chen, Z. Li and Y. Sun. "Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control". *Engineering Structures*. December 2018, vol.177, pp.98-209. ISSN 0141-0296.
- [23] V.N Dinh and B. Basu. "Passive control of floating offshore wind turbine nacelle and spar vibrations by multiple tuned mass dampers". *Structural Control and Health Monitoring*. 2025, vol 22, no.1, pp.152-176. 10.1002/stc.1666.
- [24] J.M. Jonkman. "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine". No. NREL/TP-500-41958, National Renewable Energy Lab (NREL), 2007, Golden, University of Colorado.
- [25] J.M. Jonkman. "Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine". 2008 ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada , January 7-10.
- [26] M. Tomás-Rodríguez and M. Santos. "Floating Offshore Wind Turbines: Controlling the impact of vibrations". Presented at the 7th International Conference on System and Control, ICSC'18. October 24-26, 2018 Valencia, Spain.
- [27] M.A. Lackner and M.A. Rotea. "Passive structural control of offshore wind turbines". *Wind Energy*, 2011, vol.14, no.3, pp.373-388.
- [28] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott. "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development". Technical Report NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). February 2009.
- [29] F. Yang, R. Sedaghati and E. Esmailzadeh. "Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review". *Journal of Vibration and Control*. February 2021. doi:10.1177/1077546320984305.
- [30] S. Sarkar and B. Fitzgerald. "Vibration control of spar-type floating offshore wind turbine towers using a tuned mass-damper-inerter". *Structural Control Health Monitor*. 2020, vol27, no.1. 10.1002/stc.2471.
- [31] Z. Li., M.Z.Q. Chen and Y. Hu. "Structural control of floating offshore wind turbines with inerter-based low-order mechanical networks" . Proceedings of the 40th Chinese Control Conference. July 26-28, 2021, Shanghai, China
- [32] Z. Zhang and C. Høeg. "Inerter-enhanced tuned mass damper for vibration damping of floating offshore wind turbines". *Ocean Engineering*. 2021, vol.223, 108663. ISSN 0029-8018,

Modelo a Escala de Aerogenerador para Control

Giordy Alexander Andrade Aimara¹, Segundo Esteban San Román²

¹ *Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José García Santesmases, n°9, 28040, Madrid, España*
giordyan@ucm.es

² *Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid, C/ José García Santesmases, n°9, 28040, Madrid, España*
segundo@dacya.ucm.es

SCALE MODEL OF WIND TURBINE FOR CONTROL

ABSTRACT

This publication shows a laboratory scale model of a wind turbine. The model is composed of commercial hardware and ad hoc designs. The objective of the model is to test control algorithms of the wind turbine. For this purpose, the model is instrumented with electronic and mechanical devices. Two control loops are implemented, the inner loop commands the pitch of blades and the outer loop commands the electrical load. The working modes of a real wind turbine have been programmed too. Finally, some results obtained using classic controllers are shown.

KEYWORDS

Wind turbine, Scale model, Control systems, Wind energy, Microcontroller.

RESUMEN

En esta publicación se presenta un modelo a escala de laboratorio de un aerogenerador. Se expone el hardware comercial utilizado y las partes que han requerido un diseño ad hoc. El objetivo del modelo es realizar pruebas de algoritmos de control del aerogenerador. Para ello, se instrumenta el modelo con la electrónica y mecánica necesaria. Se implementan dos lazos de control, el interno maneja el ataque de las aspas o 'pitch' y el externo carga eléctrica del generador. También se han programado los modos de trabajo que imitan a los de un aerogenerador real. Finalmente se muestran algunos resultados obtenidos utilizando controladores clásicos.

PALABRAS CLAVE

Aerogenerador, Modelo a escala, Control de sistemas, Energía eólica, Microcontrolador.

I. INTRODUCTION

La primera crisis del petróleo en 1973 propulsó el desarrollo de las energías renovables teniendo como protagonistas a la energía eólica y a la solar. Los países occidentales afectados por la situación, junto con los de mayor tradición eólica, apostaron por programas de investigación para potenciar la instauración de esta fuente de energía en los principios del siglo XXI [1]. Durante esta época los problemas de control se resolvieron mediante soluciones electromecánicas.

Las Naciones Unidas propone como objetivo 7 "Garantizar el acceso a una energía asequible segura, sostenible y moderna" [2]. La comisión europea ha incluido

este objetivo en su agenda 2030 [3], comprometiéndose a multiplicar por cinco la energía eólica marina, alcanzando una producción mínima de 60 gigavatios, con proyecciones de llegar a quintuplicarlo en 2050.

Actualmente, la energía eólica está sufriendo otro desarrollo sin precedentes en todo el mundo. La aparición de turbinas flotantes denominadas como 'offshore' no tiene otra intención sino la de optimizar la generación de energía al no encontrar obstáculos geográficos que disminuyan la velocidad del viento y la hagan más inestable. A todo ello se le debe sumar la baja contaminación acústica para las zonas urbanas, y un mejor aprovechamiento de la superficie. Sin embargo, es de resaltar su coste adicional en mantenimiento e infraestructura, y la aparición de nuevas perturbaciones externas no deterministas como las mareas y vibraciones.

Los nuevos desarrollos, requieren de innovación tecnológica. Gracias al avance de la electrónica hoy en día no es necesario quedarse en las soluciones de control clásicas. Ya se pueden aplicar técnicas de control inteligente, como las propuestas al amparo del proyecto que soporta este trabajo [4].

Al ser técnicas novedosas, la industria siempre es reticente a los cambios, pues además requieren de nuevas tecnologías con capacidad de cómputo. Estas técnicas primero son desarrolladas de forma teórica o simulada. Para convencer a la industria de su posible implementación en este artículo se desarrolla un modelo del sistema real a escala de laboratorio. Este modelo incluirá hardware en el lazo y la dinámica real del sistema, escalada adecuadamente. Durante la adaptación de estas técnicas al modelo físico, aparecerán problemas que no se han manifestado durante la simulación y que deberán resolverse. La validación de estas técnicas sobre el modelo a escala facilitará el siguiente paso, que es la implementación sobre un molino real a escala media.

En el artículo primero se presenta el comportamiento a modelar de un aerogenerador. Posteriormente se explican cada uno de los subsistemas que se van a implementar en el modelo a escala. A continuación, se detallan los lazos de control implementados. Finalmente se presentan algunos resultados.

II. MODELO REAL

En primer lugar, se deben tener en cuenta las limitaciones de eficiencia ligadas a la propia naturaleza de las turbinas eólicas, ya que las leyes de la física demuestran que el viento se frena al pasar por una turbina, saliendo con una velocidad menor a la de la entrada.

En el caso ideal, para obtener la mayor potencia proporcionada por el viento, la velocidad de este a la salida tendría que ser cercana a cero, es decir, el aire no abandonaría la turbina. Esto supondría el nulo aprovechamiento de la

energía eólica, ya que tampoco se permitiría la entrada de aire al aerogenerador. Buscar una solución completamente extrema, en donde el viento no es ralentizado en absoluto por la turbina, tampoco permitiría extraer energía del viento. Es por ello, que la ley física fundamental para la aerodinámica de los aerogeneradores demuestra que una turbina ideal ralentiza el viento a la salida con una relación de 2/3 respecto a su velocidad inicial.

El libro publicado por el físico Albert Betz [5] proporciona gran parte del conocimiento básico sobre el funcionamiento de la energía eólica y aerogeneradores. En él, se encuentra el razonamiento que empleó el físico alemán para explicar la ley de Betz, la cual indica que puede aprovecharse la energía cinética del viento como máximo en un 59%. La potencia del viento a la entrada P_{in} se puede caracterizar con la siguiente expresión donde: ρ representa la densidad del viento, A , el área de barrido de las palas y V , la velocidad del viento.

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

La relación directa entre la potencia cinética de entrada y la potencia eléctrica de salida, o P_{out} , es conocida como el coeficiente de potencia C_p para cualquier aerogenerador eólico.

$$P_{out} = P_{in} C_p \quad (2)$$

Dicho coeficiente es el producto de las eficiencias tanto aerodinámicas, como mecánicas y eléctricas del sistema eólico que se llegue a implementar. En la mayoría de los casos, no se llega a alcanzar siquiera el límite establecido por Betz si se compara la eficiencia del aerogenerador con la 'tip to speed ratio' o TSR [6] (figura 1). Este factor es conocido por ser la división entre la velocidad tangencial de la punta de una pala y la velocidad real del viento. Si bien la mayoría de los aerogeneradores incorporan tres palas para un mejor aprovechamiento de la velocidad del viento, en este trabajo se empleará un bipala de alta velocidad para que sea más fácil escalar la velocidad angular de giro de una turbina convencional. Si trabajásemos a muy bajas revoluciones aparecerían efectos de fricción estática que no representarían el comportamiento de un aerogenerador real.

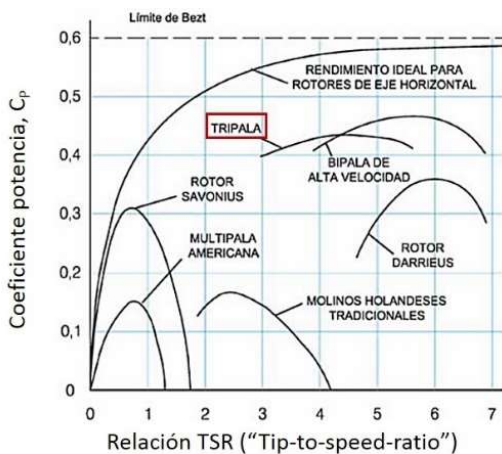


Figura 1: Límite Betz.

III. MODELO A ESCALA

Para generar un modelo lo más cercano a la realidad, se deben estudiar en primer lugar las partes que conforman un aerogenerador y su extrapolación a pequeña escala. Los componentes del aerogenerador presentados a continuación

serán abordados con mayor profundidad en los apartados posteriores.

A. Generador de potencia

Como generador eléctrico se utilizará un motor sin escobillas de avioneta de radiocontrol (figura 2). Este se comporta como un pequeño generador de señal trifásica cuya amplitud y frecuencia dependen de la velocidad de giro de la turbina. Esto es debido a la ley de Lenz, que demuestra que, al hacer girar el rotor imantado, se genera un campo magnético que induce una corriente desfasada 120° entre cada bobinado de las fases. A su vez, el par de giro de la turbina depende de la carga aplicada entre sus terminales y se estudiará la forma óptima de ajustar su valor de forma autónoma para estabilizar el número de revoluciones por segundo. Por ahora, la carga se aplicará entre dos de los terminales del generador, y el terminal restante se empleará para medir la señal.

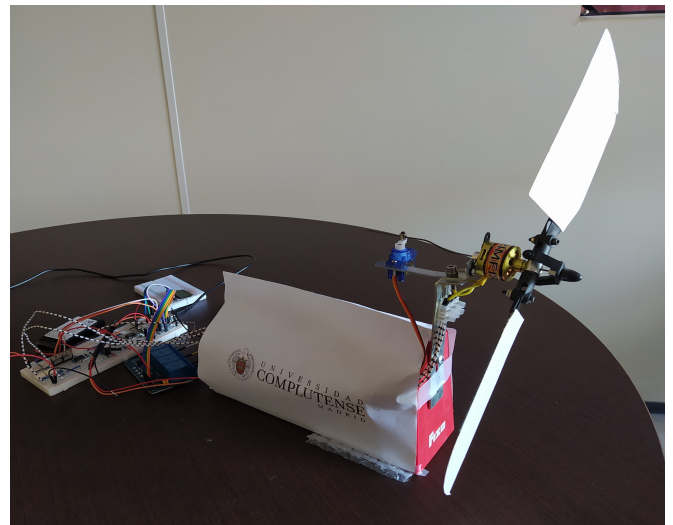


Figura 2: Modelo a escala de aerogenerador

B. Sistema de control

Todas las medidas tomadas y el control del aerogenerador se deben llevar a cabo con un único sistema integrado de pequeñas dimensiones, con una razonable potencia de cálculo, con bajo consumo energético y con un precio competitivo. En este caso, se ha seleccionado el módulo Arduino Nano 33 IOT por su buena eficiencia, su gran número de pines de entrada/salida y por su buena conectividad [7] (figura 3). Además de incluir un acelerómetro digital, en concreto el LSM6DS3, que permitirá adaptar en un futuro un control de 'pitch' activo para aerogeneradores flotantes. Aunque existen multitud de alternativas de precio similar o inferior, se trata de un sistema bien balanceado en relación calidad-precio.

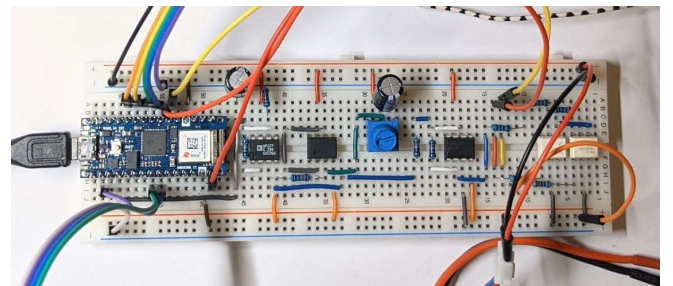


Figura 3: Sistema de control del modelo a escala de aerogenerador.

C. Control de carga

Para todo suministro de energía eléctrica existe un sistema de acoplamiento con la red eléctrica. Cuanta más potencia se suministre a la red eléctrica, más carga mecánica sufrirá también el molino, reduciendo sus revoluciones. En nuestro modelo se utilizará un banco resistencias diseñado para el proyecto que permitirá modificar la carga eléctrica del generador (figura 4). En este proyecto solo se controlará las revoluciones del molino, aunque se podría utilizar para modificar el acoplamiento con una red eléctrica escalada. Tras distintas pruebas con el motor 'brushless' en modo generador, se llega a la conclusión de que es necesario trabajar con cargas del orden de las decenas de ohmios para aplicar un buen control de la velocidad de giro.

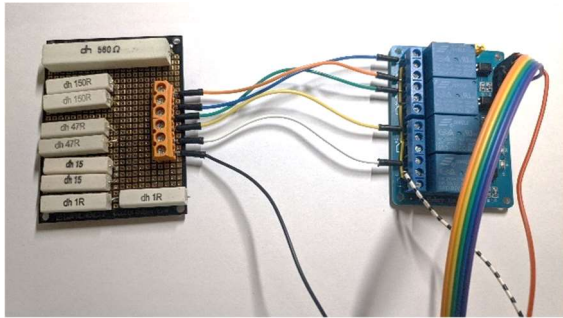


Figura 4: Banco de cargas diseñado.

D. Control de pitch

La velocidad de giro que adquiere un aerogenerador se ve repercutido casi por completo por el ángulo de ataque de las palas. Este ángulo es la variable de control que más modula el coeficiente de eficiencia, C_p . Por ello, se busca un sistema de actuación lo suficientemente preciso que utilice esta variable para controlar las revoluciones del molino. Para este diseño, se ha optado por incluir un pequeño servomotor SG90 RC 9g por su bajo requerimiento energético, capaz de rotar entre los 0 y 180 grados (figura 5). A diferencia del control por carga, este sistema genera una acción mucho más agresiva en la velocidad de giro.



Figura 5: Actuador de control de pitch.

E. Regiones de Funcionamiento

Una vez conocido el diseño de la turbina, se establecen las distintas regiones de funcionamiento respecto a la velocidad del viento que se llegarán a implementar con ayuda del microcontrolador [8] (figura 6):

- La primera región corresponde al arranque de la turbina, y es aquel estado en el cual la fuerza ejercida por el viento no es lo suficientemente grande como para provocar el movimiento de giro de las aspas de la turbina. En este estado, no se genera potencia y el aerogenerador debe situarse en la configuración óptima para el inicio del giro con la menor velocidad del viento. Dicha configuración se obtiene

aplicando la mayor carga disponible entre los terminales del generador y con el mayor ángulo de 'pitch' para situar a las palas lo más paralelo posible a la dirección del viento.

-La segunda región delimita la zona de trabajo deseada, en la cual, tras iniciar el arranque de la turbina, el ángulo de 'pitch' se ajusta gradualmente hasta alcanzar el valor óptimo y comienza el control por carga. El controlador del aerogenerador regula la potencia extraída del viento hasta estabilizar la velocidad angular del rotor al valor nominal previamente establecido. La conmutación entre los estados internos del control de carga debe ser lo más continuo posible, y llegado a un límite de velocidad, se accede a la tercera región de trabajo.

-En la tercera región, vuelve a actuar el control de 'pitch' para mantener la potencia (y con ello la frecuencia de la señal obtenida) lo más estable posible en el valor objetivo. Trabajar en esta región supone que el control de carga no es capaz de reducir la velocidad de giro lo suficiente como para evitar daños en la turbina. Llegados a este punto, el ángulo de ataque de las palas disminuye desde el óptimo de forma progresiva. Es una operación delicada debido a que un cambio rápido de 'pitch' puede provocar una caída brusca de la velocidad angular, que puede conllevar a tener que partir de nuevo de la primera región de arranque.

-La última zona de operación corresponde a la parada de emergencia tras superar la velocidad de corte del viento y al alcanzar un ángulo de 'pitch' mínimo, colocando a las palas en una posición perpendicular a la dirección del viento, frenando por completo la turbina. En esta región no se genera ninguna potencia, y se debe esperar hasta que la velocidad del viento disminuya lo suficiente para poder reiniciar el proceso con seguridad. Por simplicidad y al trabajar en un entorno de viento controlado, al modelo a escala se le aplicará un tiempo de espera fijo y se reiniciará el proceso por completo. No obstante, en implementaciones futuras, se podría incluir algún tipo de anemómetro para aumentar la seguridad del aerogenerador.

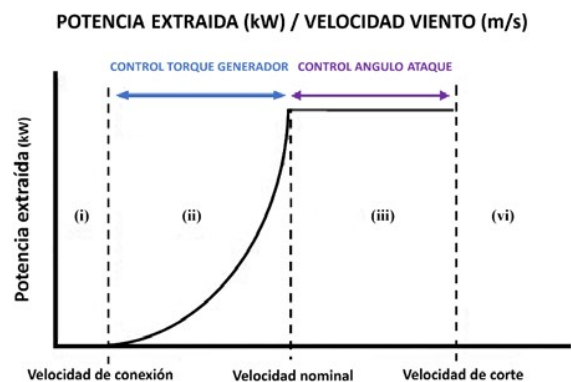


Figura 6. Regiones de control según la velocidad del viento.

IV. SISTEMA DE CONTROL

Tal y como se ha tratado con anterioridad, el sistema de control es fundamental para el correcto funcionamiento de la turbina y obtener la mayor velocidad de respuesta a las señales de entrada se convierte en una prioridad. Se encuentra un mayor desafío al trabajar con el entorno Arduino, puesto que no soporta de forma nativa el uso de multitarea a través de hilos o 'threads'. Por esa misma razón, se deben enfocar todas las operaciones de lectura de datos y control de manera consecutiva. El único tiempo de espera entre iteraciones del

bucle infinito ‘loop’ implementado en el código, corresponde al periodo de muestreo de la señal de entrada analógica empleada.

A su vez, es preciso recordar que aunque se trabaja con un modelo a pequeña escala, sigue siendo un sistema de electrónica de potencia. Por lo cual, las señales de entrada al controlador deben estar adecuadas para mantenerse dentro de un rango seguro de tensión y corriente para el controlador. Para ello, se diseñó un circuito con una alta impedancia de entrada para no afectar al control de carga, y cuyo valor de salida se encuentra entre los 0 y 3.3 V (figura 7).

La señal que entrega el generador pasa por un amplificador operacional en configuración de inversor cuya ganancia será controlada por la resistencia de entrada R_{1x} junto a dos optoacopladores MOC2041. Estos permiten abrir o cerrar un circuito con una salida digital del Arduino que enciende un diodo emisor de luz que activa el triac, lo cual aísla electrónicamente la señal de potencia del controlador. Otra ventaja de estos integrados reside en la incorporación de un circuito de cruce por cero que obliga a que el cambio de estado del circuito de abierto a cerrado se inicia siempre y cuando la señal cruce por cero. Esto garantiza que no se produzcan picos de tensión tanto negativos como positivos al realizar la conmutación.

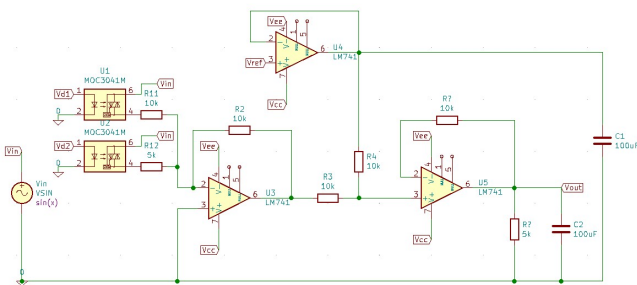


Figura 7: Esquemático para la entrada analógica.

La tensión que habilita dichos optoacopladores debe situarse en torno a los 5 V, junto a una resistencia de 220 ohmios para limitar la corriente. No obstante, las salidas digitales del controlador solo alcanzan los 3.3 V. Para obtener unas mayores señales de control, se conecta el colector y el emisor un simple transistor bipolar entre el pin de alimentación del Arduino de 5 V y tierra (junto a una resistencia ‘pull-down’). Finalmente, un pin analógico conectado a la base del transistor realizará la función de señal de conmutación.

La señal de entrada que proporciona el generador a altas frecuencias se aproxima a una señal sinusoidal centrada en cero. El controlador no será capaz de leer la parte negativa de la señal, por lo cual se inyectará una entrada ‘offset’ con un amplificador operacional en configuración de sumador no inversor. La tensión de referencia se puede ajustar con un simple potenciómetro entre la alimentación de 3.3 V y tierra. También es recomendable contar con un diodo de protección para la entrada analógica. La señal de salida finalmente puede ser leída por el uno de los pines analógicos que realiza la función de conversor analógico digital.

Una vez obtenida la señal del generador adaptada, se pueden realizar los últimos ajustes mediante ‘software’. A continuación se procede a calcular la frecuencia de la señal la cual es directamente proporcional a la velocidad angular de la turbina. Para evitar cálculos pesados que influyan mucho retardo en la ejecución, se trabaja con la librería FFT (‘Fast

Fourier Transform’) que devuelve el pico en frecuencia de la señal tratada. A su vez, se emplea una frecuencia de muestreo de 300 Hz, la cual es mayor que el doble de la frecuencia máxima que se obtendrá del generador, respetando el teorema de Nyquist. Se establece en 128 medidas de la entrada analógica por cada una de las iteraciones del bucle. Con el fin de ignorar los valores ruido, se implementa un pequeño filtro paso bajo que permite que únicamente se realice la transformada de Fourier a la señal del generador ya que la propia librería de Arduino permite eliminar la señal continua.

La potencia de la señal se obtiene calculando primero el valor RMS de la sinusoidal, el cual corresponde al valor pico dividido entre raíz de dos. Después, con la resistencia calculada en el siguiente apartado, se llega a obtener la potencia aparente.

V. DISEÑO DEL CONTROL DE CARGA

Para el caso de la entrada del sistema de control, con una gran impedancia a la entrada se puede garantizar su correcto funcionamiento para aerogeneradores más avanzados. Uno de los mayores desafíos del trabajo se atribuye al diseño del banco de cargas, el cual debe ser específicamente diseñado para la turbina que se emplee.

Una solución se obtiene con resistencias cerámicas de bajo valor colocadas en paralelo y seleccionadas a través de un relé de cuatro entradas. De tal forma se pueden obtener una gran variedad de valores de carga y con una conmutación sencilla a través de cuatro salidas digitales del microcontrolador.

TABLA 1. COMBINACIONES RESISTENCIAS EN PARALELO

$R_{2\Omega}$	$R_{7,5\Omega}$	$R_{23,5\Omega}$	$R_{75\Omega}$	$R_{eq}(\Omega)$	$R_{real}(\Omega)$
-	-	-	-	R_{max}	-
-	-	-	X	75	76,3
-	-	X	-	23,5	24,4
-	-	X	X	17,89	19,2
-	X	-	-	7,5	8,8
-	X	-	X	6,82	8
-	X	X	-	5,69	6,9
-	X	X	X	5,28	6,5
X	-	-	-	2	3,2
X	-	-	X	1,95	3,1
X	-	X	-	1,84	3,1
X	-	X	X	1,8	3,1
X	X	-	-	1,58	3
X	X	-	X	1,55	2,8
X	X	X	-	1,48	2,7
X	X	X	X	1,45	2,6

Con el relé se puede llegar a conseguir hasta 16 estados posibles. En el estado cero, para no tener un circuito sin carga y para que toda la potencia no se disipe en el circuito del controlador, se coloca una resistencia de 560 Ω a la que se le

ha denominado R_{max} . A efectos prácticos actúa de circuito abierto en comparación a las combinaciones en paralelo.

La configuración simple del relé (figura 8) se consigue conectando los terminales comunes entre sí y a uno de los terminales del aerogenerador. El otro extremo de las resistencias se conecta a la tierra común (cable negro). De tal forma que el relé pueda conmutar entre los terminales normalmente abiertos donde se encuentran las resistencias y los terminales normalmente cerrados, donde se sitúa únicamente una única resistencia R_{max} .

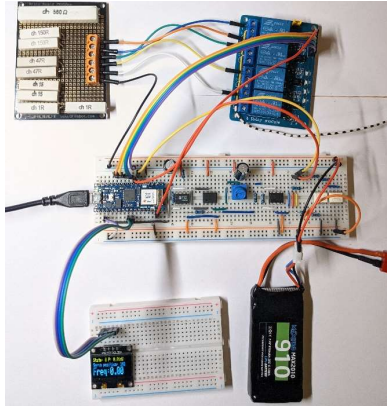


Figura 8: Sistema de control del módulo a escala de aerogenerador.

El control de carga no se trata de un control agresivo de la velocidad de giro de la turbina, ya que su acción de control es derivativa, es decir, proporcional a la rapidez con la que se produzcan las desviaciones de la señal de entrada.

$$y(t) = k_p t_d \frac{du(t)}{dt} + k_p u(t) \quad (3)$$

Tanto k_p como T_d representan parámetros ajustables al sistema que permiten establecer un tiempo determinado de espera para la estabilización de la frecuencia en un sistema PD (entrada $u(t)$).

VI. CONTROL DE 'PITCH'

El control de la velocidad angular llevado a cabo con el ángulo de ataque es el más rápido aplicado en el sistema de control. Esto es debido a que corresponde a un control tipo PID. En este sistema de control, se aplican tres diferentes tipos de acciones de control [9].

-Acción de control proporcional: minimiza de forma proporcional el error del sistema con un factor k_p (4). Cuanto mayor sea el error, mayor es la señal de control que tiende a minimizar la señal de error. Los beneficios de incluir una acción proporcional van desde el aumento de la velocidad de respuesta del sistema, hasta la disminución del error en el régimen permanente. No obstante, si se aumenta la acción proporcional, esto también conllevaría a un aumento considerablemente la inestabilidad del sistema

-Acción de control integral: calcula la integral de la señal de error, lo que ayuda a acumular pequeñas desviaciones con la constante k_i (4), y conseguir reducir la señal de error en el régimen estacionario. La principal desventaja de la acción de control integral se basa en el aumento de la inestabilidad del sistema al dotarlo de una cierta inercia. Para evitar este efecto, se combina con la acción derivativa.

-Acción de control derivativa: es proporcional a la derivada del error con un factor c_d (4), con la cual se obtiene la pendiente del error. No tiene efectos sobre el error del régimen permanente, sin embargo, sirve para decelerar los cambios bruscos sobre el valor deseado, y así evitar que sobrepase dicho valor. Aumenta la estabilidad del sistema.

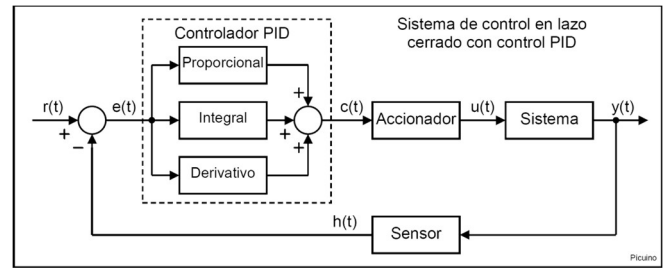


Figura 9: Controlador PID.

$$c(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

La anterior ecuación representa la señal del controlador PID en función de la señal de error $e(t)$ y los parámetros propios del controlador mencionados anteriormente. Para implementar el controlador PID discretizado se emplea la librería 'PIDController' basada en la librería ArduinoPID. De igual forma, este mismo controlador se puede aplicar al control de carga, solamente se debe anular el coeficiente de la acción integral.

VII. RESULTADOS

El modelo a escala obtenido es capaz de transmitir la información recogida por el microcontrolador por puerto serie y es procesado por el programa 'Simulink'. Para las pruebas iniciales, se implementó un control de carga secuencial de los dieciséis estados del relé con el objetivo de mantener la frecuencia de la señal obtenida entre los 80 y 85 Hz. Tras superar la velocidad de conexión marcado (en torno a los 30 Hz), se aplica un aumento progresivo del 'pitch' hasta llegar a la posición óptima previamente ajustada.

Las pruebas iniciales de carga aseguran que un control más rápido ayuda al sistema a alcanzar antes la zona óptima de trabajo. A su vez, la frecuencia necesita un tiempo para estabilizarse, y un control demasiado rápido no es apropiado al introducir demasiadas oscilaciones (figura 10 y figura 11).

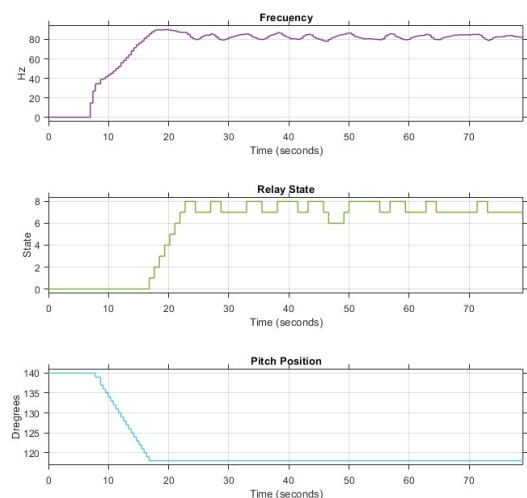


Figura 10: Respuesta de la frecuencia (morado), para un tiempo de conmutación de los estados del relé (verde) de 1 segundo, y posición del 'pitch' (azul).

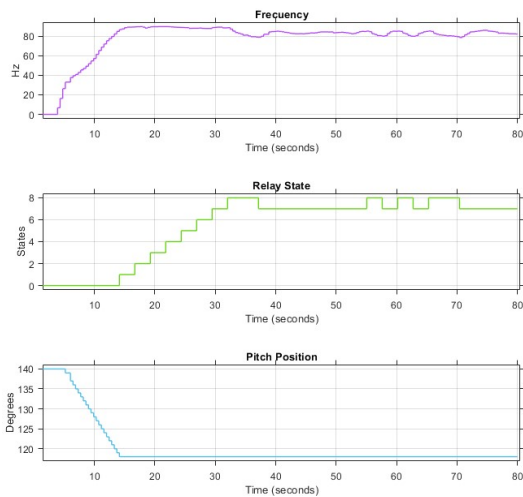


Figura 11: Respuesta de la frecuencia (morado), para un tiempo de conmutación de los estados del relé (verde) de 3 segundos, y posición del 'pitch' (azul).

Tras reiniciar el proceso del apartado anterior pero aplicando una mayor velocidad de viento, hasta llegar a superar la velocidad de corte, aparece la parada de emergencia llevada a cabo por el ángulo de 'pitch'. Se observa en la siguiente figura como al alcanzar el último estado del relé y al no ser capaz de reducir la frecuencia, aparece un nuevo estado dieciséis ficticio. En él, decrece el ángulo de cabeceo y con ello, la frecuencia durante un cierto tiempo establecido y regresando al estado de arranque pero partiendo del último estado del relé para mayor seguridad.

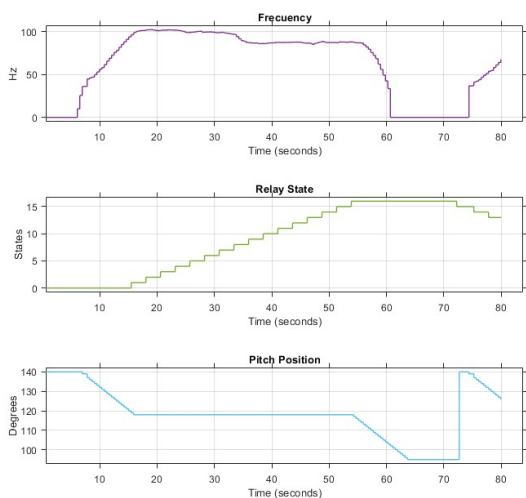


Figura 12: Respuesta de la frecuencia (morado), para un tiempo de conmutación de los estados del relé (verde) de 3 segundos, y posición del 'pitch' (azul) superando la velocidad de corte.

VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado el diseño de un prototipo de aerogenerador a escala de laboratorio. El trabajo se ha centrado en implementar la electrónica y mecánica necesaria para poder realizar pruebas de control en lazo cerrado de la velocidad angular del aerogenerador. Se han programado drivers que permiten sensorizar y actuar sobre el prototipo. Se han implementado dos lazos de control, uno externo que controla la carga eléctrica y uno interno que controla el pitch de las aspas. También se han programado los modos de funcionamiento típicos de un aerogenerador y verificado que el modelo conmuta entre los diferentes modos.

Actualmente se está desarrollando una comunicación inalámbrica para conocer el estado de funcionamiento, así como enviar alertas al gestor en caso de superar la velocidad de corte y poder incluso reiniciar el proceso de arranque de forma telemática. El propósito final del modelo de aerogenerador es que sea totalmente autónomo, con recopilación de datos y guardado en la nube, y que sea controlado telemáticamente por el gestor de la red.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia e innovación bajo el proyecto MCI/AEI/FEDER número RTI2018-094902-B-C21.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Oviedo-Salazar, M. H. Badii, A. Guillen and O. L. Serrato, "Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies". *Daena Int. J. Good Conscience*, vol. 10, no. 1, pp. 1-18, 2015
- [2] UN.ORG. (March. 22, 2015). *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [3] Eurostat, "Sustainable development in the European Union, Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context". *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, pp. 163-181, 2021.
- [4] C. L. Serrano-Barreto, M. Santos, J. E. Sierra-García, "Controlador de pitch híbrido optimizado con algoritmo genético para aerogeneradores flotantes". *XLII Jornadas de Automática. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións*, pp. 197-202, 2021.
- [5] A. Betz, *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [6] FTEXPLOING. (Oct. 18, 2015). *Wind Turbine Power Coefficient (Cp)*. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <http://www.ftexploring.com/wind-energy/wind-power-coefficient.htm>
- [7] ARDUINO (Oct. 11, 2021). *Arduino Nano 33 IoT*. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano-33-iot>
- [8] M. Tomás-Rodríguez, M. Santos, "Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, no. 4, pp. 381-390, 2019.
- [9] PICUINO (Nov. 24, 2021). *Control PID*. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <https://www.picuno.com/es/control-pid.html>

Control borroso inteligente optimizado para la extracción de energía en grandes turbinas de viento

Carlos Serrano-Barreto¹
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid
28040-Madrid, España
carsr06@ucm.es

Matilde Santos¹
Instituto de Tecnología del
Conocimiento,
Universidad Complutense de Madrid,
28040-Madrid, España
msantos@ucm.es

JEnrique Sierra-García¹
Universidad de Burgos, España.
09006-Burgos, España,
jesierra@ubu.es

Abstract— In this paper an intelligent controller is designed to obtain the maximum power of a large floating offshore wind turbine SPAR type. The control of these turbines is more complex due to the strong loads they are subjected to and the uncertainty that comes from the environment, mainly wind and waves, and from its non-linear dynamics. In this case, the control goal is to maximize the output power of the wind turbine by controlling the rotor speed. An incremental PD-type fuzzy controller has been implemented; it generates the pitch angle reference. The performance of this control scheme on the NREL 5MW floating offshore wind turbine has been compared with the internal control that is provided within the FAST software. Results are encouraging, showing that the intelligent control strategy is able to produce a better performance.

Resumen— En este trabajo se diseña un controlador inteligente para obtener la máxima potencia turbina eólica marina flotante tipo SPAR. El control de estas turbinas es más complejo debido a las fuertes cargas a las que están sometidas y a la incertidumbre que proviene del entorno, principalmente del viento y las olas, y de su dinámica no lineal. En este caso, el objetivo del control es maximizar la potencia regulando la velocidad del rotor. Para ello, se ha implementado un controlador borroso incremental tipo PD, que genera la referencia del ángulo de inclinación de las palas. El rendimiento de este esquema de control en la turbina eólica de alta mar flotante de 5MW de NREL se ha comparado con el controlador PI que se proporciona en el software FAST. Los resultados son prometedores, mostrando que la estrategia de control inteligente es capaz de proporcionar un mejor rendimiento.

Palabras Clave— Control inteligente, lógica difusa, ángulo de inclinación, turbina eólica marina flotante, energía renovable.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía sigue creciendo y muchos países han optado por promover las energías renovables para eliminar la contaminación y los residuos de carbono [1, 2]. La energía eólica ha demostrado ser una energía limpia muy eficiente [3, 4]. Sin embargo, la obtención de energía mediante el empleo de turbinas eólicas terrestres posee ciertas limitaciones que han llevado a dar el salto a la energía eólica marina [5].

Dentro de las turbinas eólicas marinas, las turbinas eólicas flotantes en alta mar (FOWT) tienen una serie de ventajas, como la eliminación del impacto visual y acústico debido a la instalación en aguas profundas, el aprovechamiento de un viento más intenso y constante, etc. Sin embargo, el hecho de que estas turbinas sean mucho más grandes, para un mayor aprovechamiento energético, plantea nuevos retos de control. Son sistemas altamente no lineales, con parámetros que cambian con el tiempo y una dinámica compleja [6]. Además,

están sujetas a fuertes cargas que producen vibraciones indeseables [7-9].

Esto ha llevado a investigar técnicas inteligentes [10-11], para abordar el control de estas turbinas flotantes y hacer frente a la incertidumbre que proviene tanto de su dinámica como del entorno (principalmente el viento y las olas) [12-14].

Este documento aborda el problema del control de las grandes turbinas. Específicamente, busca obtener la máxima potencia controlando la velocidad del rotor, que a su vez depende del control del ángulo de las palas. Para ello se ha diseñado un controlador PD borroso incremental combinado con una ley de control no lineal. El controlador se ha probado en simulación con el modelo de turbina eólica de NREL 5MW. Los resultados de la simulación con la estrategia de control borroso se han comparado con los obtenidos para la misma turbina definida dentro del software FAST (Fatiga, Aerodinámica, Estructuras y Turbulencia), con resultados prometedores.

La principal contribución de este trabajo es el control indirecto de la velocidad del rotor mediante la generación de la señal de referencia de pitch, de forma similar a [15], pero utilizando un controlador de lógica borrosa para una turbina marina flotante tipo SPAR. Otros trabajos se centran principalmente en el control del ángulo de inclinación, con técnicas convencionales [16-18] o inteligentes [5, 19, 20].

La estructura del trabajo es la siguiente. La sección II describe cómo funciona la turbina de viento. La sección III detalla el esquema de control de lógica borrosa. En la sección IV se presentan y discuten los resultados. El trabajo termina con las conclusiones y los futuros trabajos.

II. ECUACIONES DE POTENCIA DE TURBINAS EÓLICAS

Se empleó la turbina eólica marina NREL 5-MW, cuyos parámetros se listan en la Tabla I.

TABLA I. PARÁMETROS DE LA TURBINA EÓLICA [21].

Potencia nominal de salida	5 MW
Velocidad nominal del viento	12.5 m/s
Número de palas	3
Velocidad inicial del rotor	12.1 rpm
Potencia nominal del generador	5 MW
Longitud de las palas	61.609 m
Velocidad de corte del viento	3.5 m/s
Cantidad de generadores	1
Radio total	63 m

La máxima energía que puede obtener del viento viene dada por [4]:

$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (1)$$

Donde P es la potencia (W), ρ es la densidad del aire (Kg/m^3), A es el área barrida por las palas (m^2) y v es la velocidad del viento (m/s).

Existe un límite de la eficiencia máxima teórica de una turbina de viento (límite de Betz), lo que significa que a lo sumo sólo el 59,3% de la energía cinética del viento puede utilizarse para hacer girar la turbina y generar electricidad. Pero realmente este límite es teórico; la cantidad de energía que se puede obtener realmente es inferior y viene delimitada por el coeficiente C_p . El coeficiente C_p es una función del ángulo de la pala β y de la velocidad en la punta de la pala, λ [22]. Así pues, la potencia mecánica que puede extraerse mediante una turbina eólica viene dada por:

$$P_{ot} = 0.5\rho Av^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (2)$$

La función $C_p(\beta, \lambda)$ se suele determinar experimentalmente, aunque existen diferentes aproximaciones que se pueden emplear. En este trabajo se ha utilizado la siguiente aproximación [22].

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda i}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

Donde, la variable λi , que no tiene significado físico, está determinada por,

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \quad (4)$$

Donde λ es la relación entre la velocidad angular de las palas y la velocidad del viento, dada por [2]:

$$\lambda = \frac{w.R}{v} \quad (5)$$

Donde w (rpm) es la velocidad de rotación del rotor, y R el radio del rotor (longitud de las palas).

III. DISEÑO DE CONTROLADOR DIFUSO

La estructura de control se muestra en la figura 1. Se ha implementado un sistema de control inteligente basado en la lógica difusa combinada con una ley de control no lineal. El controlador regula la velocidad del rotor mediante el ángulo de inclinación de las palas tratando de obtener la potencia de salida nominal. Por tanto, el objetivo de nuestra arquitectura de control es proporcionar la referencia de inclinación correcta de las palas para controlar la velocidad del rotor.

Inicialmente, el ángulo de ataque de las palas se calcula aplicando la siguiente ley de control no lineal:

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{v}{w.R} \right) \quad (6)$$

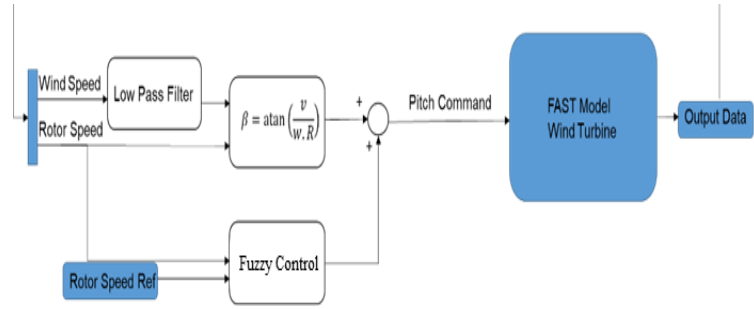


Fig 1. Estructura de control

Posteriormente, el sistema borroso calcula el incremento de la referencia del ángulo de inclinación corrigiendo el calculado previamente por la ley de control. Esta referencia de inclinación de las palas se suministra al modelo del aerogenerador incluido el simulador FAST.

El sistema borroso implementado es un PD difuso incremental, es decir, una base de reglas borrosas que representa un controlador PI que en este caso es no lineal debido a la implementación borrosa.

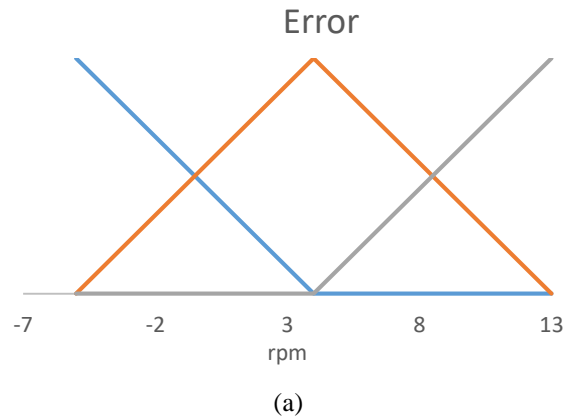
El controlador borroso calcula el aumento o disminución del ángulo de inclinación de las palas, que será la referencia para el control de la velocidad del rotor. Hemos implementado un regulador Fuzzy-PD incremental de Takagi-Sugeno que es equivalente a un controlador PI [23]. Las entradas del controlador son el error de la velocidad del rotor, w_e (rpm), y su derivada, \dot{w}_e (rpm/s). Donde el error de la velocidad del rotor se define como

$$w_e = w_{ref} - w \quad (7)$$

Donde la referencia w_{ref} ha sido fijada a 12,1 rpm, según [15].

Se han asignado tres conjuntos borrosos triangulares a cada entrada: Positivo (gris), Negativo (azul) y Cero (anaranjado), como se muestra en la Fig. 2.

El rango de error se encuentra en el intervalo [-5, 13] rpm, alcanzando su máximo a 12,5 rpm (par constante del generador) y el derivado del error se ha normalizado entre [-1, 1] rpm/s para producir una respuesta suave.



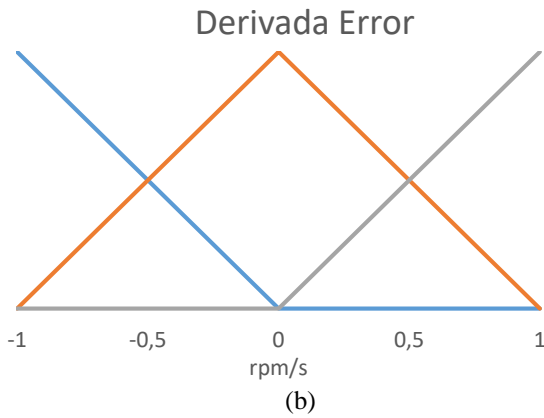


Fig. 2. Conjuntos borrosos de error (a) y su derivada (b).

Las reglas del controlador borroso de Takagi-Sugeno se expresan en la Tabla 2. Donde la salida es el incremento del ángulo de inclinación, Δu .

TABLA II. REGLAS BORROSAS DEL CONTROLADOR BORROSO.

- | | |
|----|---|
| 1. | Si w_e es negativo y \dot{w}_e es negativo, entonces Δu es -20. |
| 2. | Si w_e es negativo y \dot{w}_e es cero, entonces Δu es -10. |
| 3. | Si w_e es negativo y \dot{w}_e es positivo, entonces Δu es 0. |
| 4. | Si w_e es cero y \dot{w}_e es negativo, entonces Δu es -10. |
| 5. | Si w_e es cero y \dot{w}_e es cero entonces Δu es 0. |
| 6. | Si w_e es cero y \dot{w}_e es positivo, entonces Δu es 10. |
| 7. | Si w_e es positivo y \dot{w}_e es negativo, entonces Δu es 0. |
| 8. | Si w_e es positivo y \dot{w}_e es cero, entonces Δu es 10. |
| 9. | Si w_e es positivo y \dot{w}_e es positivo, entonces Δu es 20. |

Las reglas para el ángulo de inclinación se diseñaron teniendo en cuenta que el valor absoluto del máximo ángulo de inclinación para esta turbina en FAST es de 25° (típicamente está entre 0° y 10°).

IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para la simulación se utilizan los paquetes de software NREL FAST v8 [24] y Matlab. El controlador difuso propuesto va a ser comparado con el controlador interno de la librería DLL embebida en el simulador FAST, prueba 24.

El perfil de viento (a) y olas (b) se muestra en la Fig. 3. La velocidad del viento es una señal ruidosa con una media de 12,5 m/s. Como el viento es una señal ruidosa, se aplica un filtro de paso bajo (Figura 1). Para el caso de las olas tenemos un perfil de olas de altura significativa $H_s = 6$ metros y frecuencia pico $f_p = 0.1$ Hz basado en el espectro JONSWAP/Pierson-Moskowitz [25].

Para comparar la respuesta de la turbina eólica con y sin la estrategia de control borroso, el ángulo de inclinación de las palas con ambos enfoques se muestra en la Fig. 4. Se puede observar cómo a partir de los 22,5 segundos el controlador de FAST (línea roja) modifica la referencia del ángulo de inclinación, y el controlador borroso comienza a unos 18 segundos (línea azul).

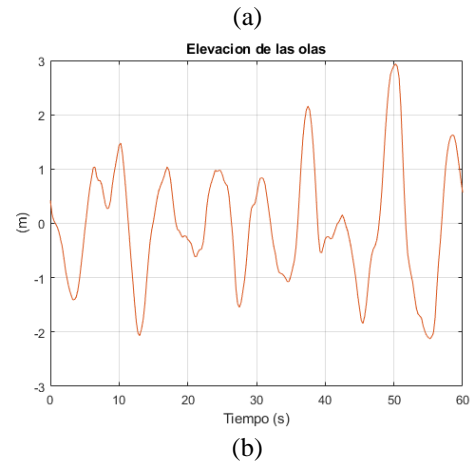
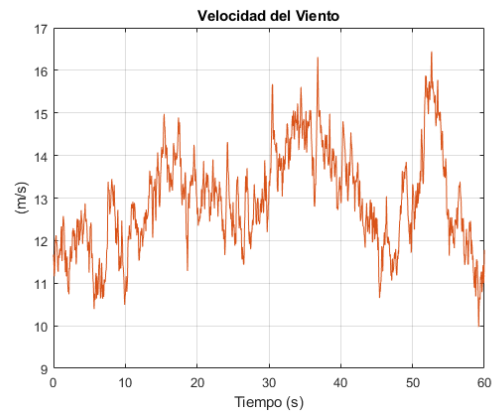


Fig. 3. Perfil de viento y olas

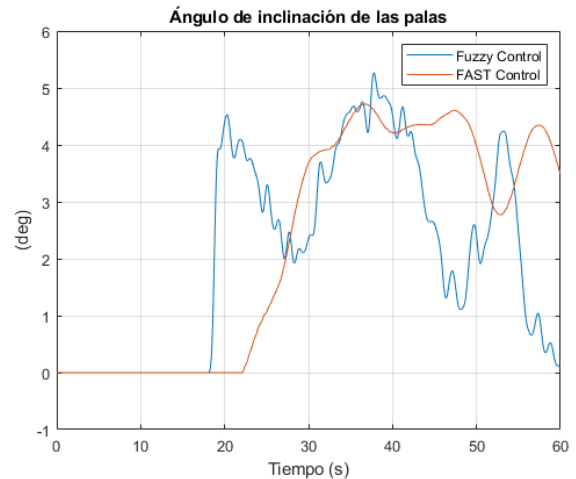


Fig. 4. Angulo de inclinación.

Según las características de la turbina eólica (Tabla 1), el rotor tiene una velocidad nominal de 12,1 rpm, para la simulación esta será la velocidad inicial (región de operación nominal). Las respuestas correspondientes de ambos esquemas de control se muestran en la Fig. 5 (arriba) y una vista detallada de la misma a partir de 14 segundos (debajo). La línea roja representa la respuesta del controlador de FAST y la línea azul la respuesta borrosa del controlador propuesto. Es posible ver cómo las respuestas son bastante similares hasta 18 s. A partir de ese momento ambos controladores tratan de mantener la velocidad nominal del rotor, aunque el

controlador borroso lo hace con un menor error cuadrático medio.

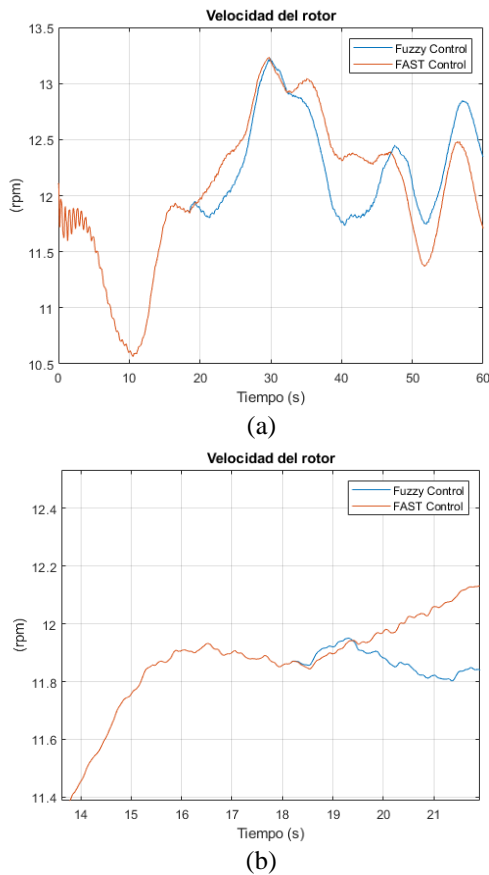


Fig. 5. Velocidad del rotor (a) y zoom (b), línea azul, control difuso; línea anaranjada, control FAST.

Como resultado, el controlador borroso consigue más estabilidad alrededor del valor nominal de potencia (5MW) del aerogenerador que controlador incluido en el simulador FAST (Fig. 6). Se puede observar como la potencia del generador decae en la zona de los 0 a 11 segundos de simulación, esto se debe a que la velocidad del viento no era suficiente para mantener la velocidad nominal del rotor y ambos controladores tienen la salida en cero para ese periodo que es el ángulo máximo para acelerar la turbina. Es importante destacar que operar por encima de la potencia nominal de la turbina induciría cargas excesivas en la estructura, comprometiendo el ciclo de vida de la turbina y su integridad, por eso el objetivo del control es conseguir estabilizarse en la referencia con las menores desviaciones posibles. Se puede observar como el controlador borroso realiza mejor esta tarea.

Para evaluar el rendimiento del controlador borroso, se propone emplear la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tanto para la velocidad del rotor como para la potencia de salida con respecto a sus valores nominales y normalizarla con respecto al controlador incluido en FAST. El RMSE está dado por la siguiente ecuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{ref} - y)^2}{n}} \quad (8)$$

Donde y_{ref} representa la señal de referencia, y la señal de salida del simulador FAST y n es el número de muestras.

TABLA III. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTO DE LOS CONTROLADORES

Controlador	RMSE Velocidad del rotor	RMSE Potencia	RMSE Velocidad del rotor Normalizado	RMSE Potencia Normalizado
FAST	0.65	237.71	1	1
Control Borroso	0.63	216.93	0.9624	0.9126

El RMSE de la potencia y de la velocidad del rotor se calcula a partir de 20 segundos que es cuando la turbina vuelve a alcanzar sus valores nominales y no se ve afectado por la baja velocidad del viento.

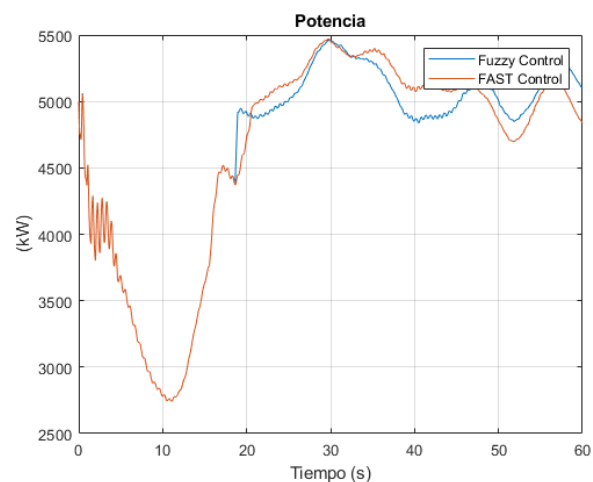


Fig. 6. Potencia de salida con los controladores FAST (rojo) y difuso (azul).

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha diseñado un sistema borroso que proporciona la referencia del ángulo de inclinación de las palas, conocido comúnmente como ángulo de pitch, para estabilizar la velocidad del rotor en torno a su valor nominal. El objetivo final es minimizar el error de la potencia de salida con respecto a su potencia nominal.

El controlador inteligente implementado es un control borroso incremental de tipo PD y se aplica a un modelo de turbina NREL de 5 MW.

El controlador borroso muestra un buen desempeño, siendo capaz de lidiar con la no linealidad e incertidumbre de la turbina de viento. Su respuesta ha sido comparada con la de un controlador convencional que viene incorporado FAST bajo las mismas condiciones, dando una respuesta más suave y con mejor rendimiento.

Este trabajo es un primer acercamiento a la aplicación del control inteligente a las turbinas flotantes. A medida que se trabaje en el futuro, se podrían probar diferentes tipos de controladores borrosos [26] y controladores borrosos adaptativos para mejorar la respuesta de la turbina eólica.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades MCI/AEI/FEDER Proyecto número RTI2018-094902-B-C21.

REFERENCIAS

- [1]. R. M. Aguilar, J. M. Torres, and C. A. Martín, "Aprendizaje automático en la identificación de sistemas. Un caso de estudio en la predicción de la generación eléctrica de un parque eólico," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, no. 1, pp. 114–127, 2019.
- [2]. I. L. R. Gomes, R. Melício, V. M. F. Mendes, and H. M. I. Pousinho, "Wind power with energy storage arbitrage in day-ahead market by a stochastic MILP approach," *Log. J. IGPL*, vol. 28, no. 4, pp. 570–582, 2020.
- [3]. M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system," *Renew. energy*, vol. 57, pp. 587–593, 2013.
- [4]. M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Modelado y simulación de un sistema conjunto de energía solar y eólica para analizar su dependencia de la red eléctrica," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, 2012.
- [5]. P. M. Rubio, J. F. Quijano, P. Z. López, J. J. F. Lozano, A. G. Cerezo, and J. O. Casanova, "Control inteligente para mejorar el rendimiento de una plataforma semisumergible híbrida con aerogeneradores y convertidores de oleaje: sistema de control borroso para la turbina," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 480–491, 2019.
- [6]. M. Tomás-Rodríguez and M. Santos, "Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 381–390, 2019.
- [7]. Z. Li and H. Adeli, "Control methodologies for vibration control of smart civil and mechanical structures," *Expert Syst.*, vol. 35, no. 6, p. e12354, 2018.
- [8]. C. Kim, E. Muljadi, and C. C. Chung, "Coordinated control of wind turbine and energy storage system for reducing wind power fluctuation," *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 52, 2018.
- [9]. E. Quiles, E. Garcia, J. Cervera, and J. Vives, "Development of a Test Bench for Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 06, pp. 907–913, 2019.
- [10]. Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(4), 327-335.
- [11]. Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Switched learning adaptive neuro-control strategy. *Neurocomputing*, 452, 450-464.
- [12]. M. Santos, "Un enfoque aplicado del control inteligente," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 8, no. 4, pp. 283–296, 2011.
- [13]. Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Lookup Table and Neural Network Hybrid Strategy for Wind Turbine Pitch Control. *Sustainability*, 13(6), 3235.
- [14]. Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Deep learning and fuzzy logic to implement a hybrid wind turbine pitch control. *Neural Computing and Applications*, 1-15.
- [15]. P. A. Galvani, F. Sun, and K. Turkoglu, "Aerodynamic modeling of NREL 5-MW wind Turbine for nonlinear control system design: A case study based on real-time nonlinear receding horizon control," *Aerospace*, vol. 3, no. 3, p. 27, 2016.
- [16]. L. Acho, "A proportional plus a hysteretic term control design: a throttle experimental emulation to wind turbines pitch control," *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1961, 2019.
- [17]. M. Nasiri, S. Mobayen, and Q. M. Zhu, "Super-twisting sliding mode control for gearless PMSG-based wind turbine," *Complexity*, vol. 2019, 2019.
- [18]. D. Kim and D. Lee, "Hierarchical Fault-Tolerant Control using Model Predictive Control for Wind Turbine Pitch Actuator Faults," *Energies*, vol. 12, no. 16, p. 3097, 2019.
- [19]. Z. Civelek, "Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [20]. M. M. Rocha, J. P. da Silva, and F. D. C. B. De Sena, "Simulation of a fuzzy control applied to a variable speed wind system connected to the electrical network," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 521–526, 2018.
- [21]. J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development," 2009.
- [22]. Z. Civelek, M. Lüy, E. Çam, and H. Mamur, "A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 708–717, 2017.
- [23]. M. Santos, J. M. la Cruz, S. Dormido, and A. P. De Madrid, "Between fuzzy-PID and PID-conventional controllers: a good choice," in *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing*, 1996, pp. 123–127.
- [24]. NREL FAST. <https://www.nrel.gov/wind/nwtc.html>. Last accessed 20/08/2020.
- [25]. W. J. Pierson Jr and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii," *J. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190, 1964.
- [26]. M. Santos, S. Dormido, and J. M. De La Cruz, "Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers," in *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*, 1996, vol. 3, pp. 1598–1604.

Data Fault Detection for Digital Twin Learning Action Decision of a Wind Turbine

William D. Chicaiza

Dept. of System Eng. & Automatic Control
Universidad de Sevilla
Seville, Spain
wchicaiza@us.es

Adolfo J. Sánchez

Dept. of Mech., Biomedical & Manufacturing Eng.
Munster Technological University
Cork, Ireland
adolfo.sanchezdelpozofernandez@mtu.ie

Fabio Rodríguez

Dept. of Applied Mathematics II
Universidad de Sevilla
Seville, Spain
frodriguex@us.es

Juan M. Escaño

Dept. of System Eng. & Automatic Control
Universidad de Sevilla
Seville, Spain
jescano@us.es

Abstract—This paper presents the design of a classifier of variable failures in a wind turbine system. The classifier is based on a structure formed by several TS fuzzy inference systems, with projections of the data onto components of a principal component analysis. The classifier is part of a discrepancy evaluator for triggering the learning mechanism of the digital twin of the wind turbine.

Index Terms—Fault Detection, Digital Twin, Neuro-Fuzzy

I. INTRODUCTION

The process of achieving higher levels of renewable energy penetration in industry is key to achieving substantial reductions in the sector's demand for fossil fuels and the sector's CO_2 emissions [4]. The optimal use of renewables in the industrial grid requires advanced control techniques. Model-based predictive control is a technique that has proven to be very efficient in the real-time optimisation of energy and industrial systems [1], [2]. Predictive control techniques require a dynamic model of the system to be controlled. The inclusion of these models in digital twins [6] allows the construction of virtual plants that help to uncover dynamic system behaviour problems, including process control problems. The digital twins need to communicate with the real plants, in order to update their parameters according to changes in the real plants. This update allows to have dynamic models perfectly adapted to the system, in order to control it efficiently. The question that arises then is the following: When is it considered that the change in real variables should trigger the update of the digital twins? The answer is not easy and needs analysis on the data collected in real time. For example, a failure or simply a drift in a sensor can trigger the learning mechanism of the twin in an undesired way. An important first step is to be able to detect such faults or false data in order to evaluate the decision to

start the learning routine. System model-based fault detection is well known and widely used [3]. The problem of detection in them lies in the impossibility of detecting two simultaneous faults. In order to solve this problem, another type of technique is proposed in this work. A fuzzy classifier-based evaluator has been proposed and designed for the detection of drifts in energy values produced by a wind turbine, from which only some variables are obtained in real time. In a previous work [5], it has been proved that, in order to obtain a model of the active power, the following variables are necessary: wind direction, ambient temperature, wind speed, pitch angle and the operational state of the machine. In this case, in addition to the active power, only the following variables will be available every 10 minutes, by means of SCADA: wind speed, rotor speed and reactive power. The rest of the article is organised as follows. Section II deals with the preparation of data for fuzzy inference systems and principal component analysis. Section III will discuss the design of fuzzy inference systems. Section IV will show evaluation results and the article will end with a conclusion section.

II. PREPARATION OF OPERATIONAL DATA

As mentioned above, data from the following interrelated variables are used to design the proposed evaluator: Wind speed (W_S), rotor speed (R_S), reactive power (Q), and active power (P). Individual faults have been added to the active power measurement. An additive offset with following the measured power profile under normal operating conditions. The faults induced in the active and reactive power (offset) are of 20% in the SCADA measurement of P (and Q). Additionally, real data from normal operation on different months are used, to which such faults in the active power variable have been added. In this work, we will initially detect specific added offset faults, classifying them in two different classes: normal operation and fault in the active and reactive power variables.

This work has received funding from the European Union's H2020 research and innovation programme under Grant Agreement n. 958339 and the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities under grant PID2019-104149RB-I00

The proposed method combines principal component analysis (PCA) with adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS). PCA is a multivariate statistical technique, which optimally represents observations from an n-dimensional space in a low-dimensional space, allowing the identification of latent or unobserved variables in the data. In addition, it transforms variables that may be generally correlated into new uncorrelated variables, allowing ANFIS to better converge in learning. The variables obtained from the SCADA must undergo an initial data normalisation process to prevent the different nature and magnitude of the variables, noise and inconsistencies from affecting the learning process.

A. Principal Component Analysis

Principal component analysis (PCA) is performed offline on each of the classes, obtaining a matrix \mathbf{R}_P^n , which represents the new set of in-correlated variables, called principal components for each class. Each principal component is a linear combination of the original variables. The index n denotes each class ($Norm, Fault$) and the subscript P denotes the variable associated with failure (in this case, active power).

The first principal component of each \mathbf{R}_P^n matrix contains the largest variance of the data, specifically over 99% of the variability. Therefore, we use it to represent the data in one dimension. Additionally, the PCA calculation of all the classes that make up the training set is carried out, obtaining the matrix *total*: \mathbf{R}_P^{Total} .

B. Obtaining projected prototypes in the main components

Once the PCA calculation of each of the classes \mathbf{R}_P^n has been carried out, as well as that of all the classes \mathbf{R}_P^{Total} , the projections of each class are determined for each of the components, that is, each class will be projected onto the first principal component of the different classes. We will call prototypes ($\mathbf{P}_{n_2}^{n_1}$) to the different projections obtained from the variables that make up each class, obtaining three new variables per class on a single axis in space, which we will use to assign the degree of belonging to the corresponding class when a new piece of data is evaluated. The prototype is equal to the scalar product of each class with the first principal component of each matrix \mathbf{R}_P^n .

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{Norm}^{Norm} &= \prod (\text{class}_{Norm} \cdot \mathbf{R}_P^{Norm}) \\ \mathbf{P}_{Fault}^{Norm} &= \prod (\text{class}_{Norm} \cdot \mathbf{R}_P^{Fault}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{Norm}^{Fault} &= \prod (\text{class}_{Fault} \cdot \mathbf{R}_P^{Norm}) \\ \mathbf{P}_{Fault}^{Fault} &= \prod (\text{class}_{Fault} \cdot \mathbf{R}_P^{Fault}) \end{aligned} \quad (2)$$

Additionally, a general prototype \mathbf{P}_g^n , of each class, is obtained from the product of each class with the matrix \mathbf{R}_P^{Total} .

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_g^{Norm} &= \prod (\text{class}_{Norm} \cdot \mathbf{R}_P^{Total}) \\ \mathbf{P}_g^{Fault} &= \prod (\text{class}_{Fault} \cdot \mathbf{R}_P^{Total}) \end{aligned} \quad (3)$$

Finally, the training sets for ANFIS learning are made up of the prototypes of each of the classes and their general prototype.

$$\mathbf{T}_{Norm} = [\mathbf{P}_{Norm}^{Norm} \quad \mathbf{P}_{Fault}^{Norm} \quad \mathbf{P}_g^{Norm}] \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_{Fault} = [\mathbf{P}_{Norm}^{Fault} \quad \mathbf{P}_{Fault}^{Fault} \quad \mathbf{P}_g^{Fault}] \quad (5)$$

The check set contains data from two days different from the training set and to obtain its prototypes, the procedure to follow is the same as described above. In addition, the \mathbf{R}_P^n matrices of each of the classes already calculated in the training set are used.

The data provided are from different days, the flow variable is rising in the middle of the time and then falling, so the time series has been segmented and the rising part has been taken to obtain the projected prototypes in the first principal component of each class.

III. DRIFT CLASSIFIER DESIGN IN ACTIVE POWER SENSOR

The prototype that defines the class_n is modelled by means of an ANFIS, using the prototypes of each class as inputs and the general prototype as output. In this way, several ANFIS are obtained, which, once trained, deliver the prototype estimation corresponding to each class. The training of each ANFIS is performed by first applying a clustering method (subtractive grouping), which initially estimates the number of clusters to determine the number of rules and membership functions (MF). Subsequently, the parameters of each ANFIS layer are updated using a hybrid learning method, which combines gradient descent to optimise the parameters of the antecedent and least squares to determine the linear parameters of the consequent. The parameters of the ANFIS architecture is the same in all cases due to the correlation of the data (similarity between each class, due to the addition of a positive and negative offset) and is shown in the table I.

TABLE I
ANFIS PARAMETERS FOR P AND Q

Description	ANFIS	
MF type:	<i>Gaussian</i>	
Optimization method:	<i>hybrid</i>	
Output MF type:	<i>linear</i>	
\mathbf{FIS}_v^n	\mathbf{P}^n	\mathbf{Q}^n
Number MFs:	3	3
Number rules:	3	3
Influence range	0.6	0.70
Epoch number:	100	100

The ANFIS learning process uses a relatively low number of epochs and the errors obtained in the training and check sets are low, indicating that the learning was generalised. The error rates obtained in the training of each model are shown in the table II.

The aim after having obtained the \mathbf{FIS}_P^n systems is to determine the class to which a new datum belongs, so we define a cost function that determines which system reaches the real prototype.

$$J_i = \|\mathbf{P}_{real}^* - \mathbf{P}_{\mathbf{FIS}_P^n}\|^2 \quad (6)$$

TABLE II
ANFIS VALIDATION FOR P AND Q

RMSE min of Training & Checking	ANFIS obtained	
	\mathbf{FIS}_P^{Norm}	\mathbf{FIS}_P^{Fault}
$RMSE_{Train}$	0.00319721	0.00324574
$RMSE_{Check}$	0.00368549	0.00514447
	\mathbf{FIS}_Q^{Norm}	\mathbf{FIS}_Q^{Fault}
	$RMSE_{Train}$	0.00093166
$RMSE_{Check}$	0.00146925	0.00133776

We use an Exhaustive Searching Algorithm (ESA) to determine the class to which a new piece of data to be classified belongs.

This algorithm evaluates the cost function with the output value provided by each fuzzy inference system \mathbf{FIS}_P^n and determines the class by direct comparison, choosing the one that minimises the cost function. The model with the minimum J_i defines the class to which the new data belongs.

A. Neuro-fuzzy classifier

The ANFIS-based classifier uses TS-type FIS. Figure 1 shows the structure of the wind turbine active and reactive power offset fault detection classifier. The first component of the PCA, obtained from each class \mathbf{R}_P^n and \mathbf{R}_Q^n , calculated previously, are kept as fixed parameters and serve to define the new prototypes in the dimension of each class. When the normal operation data set is multiplied by the first principal component $\mathbf{R}_P^{Fault}, \mathbf{R}_Q^{Fault}$, the projected prototype in the class $\mathbf{class}_{F_{neg}}$ will be obtained, multiplying the data by \mathbf{R}_P^{Norm} (and \mathbf{R}_Q^{Norm}), we will obtain the projection in the class \mathbf{class}_{Norm} and when it passes through \mathbf{R}_P^{Fault} (\mathbf{R}_P^{Fault}), it is projected in the class \mathbf{class}_{Fault} . The input data passes through the first component \mathbf{R}_P^n (\mathbf{R}_Q^n), where P and Q denote the active and reactive power, respectively, measured by the SCADA, and is projected into the class \mathbf{class}_n , thus obtaining the corresponding prototype. The calculated prototypes form the input vector with which each of the \mathbf{FIS}_P^n (\mathbf{FIS}_Q^n) systems are evaluated. Finally, passing the data through the first principal component of \mathbf{R}_P^{Total} (\mathbf{R}_Q^{Total}), we obtain the real prototype with which we have to evaluate the cost function in the **ESA** to determine the class to which it belongs. **ESA** performs a direct comparison by evaluating the cost function with the estimated value of each \mathbf{FIS}_P^n (\mathbf{FIS}_Q^n) and assigns the label of the FIS that minimises the cost function. For example, when the evaluated data has Negative Faults, the \mathbf{FIS}_P^n (\mathbf{FIS}_Q^n) system minimises the cost function, and that class is assigned to the data.

IV. EVALUATION OF THE NEURO-FUZZY CLASSIFIER

As can be seen in Figures 2 and 3, the new data is multiplied by each principal component, the input vector is formed and each FIS model is evaluated. Each \mathbf{FIS}_P^n (and \mathbf{FIS}_Q^n) system is evaluated with data from each class. If the input data contains active power faults, the FIS whose output will be closest to the actual prototype will be the \mathbf{FIS}_P^{Fault} (\mathbf{FIS}_Q^{Fault}), as seen

TABLE III
CONFUSION MATRIX P.

		PREDICTED	
		Norm	Fault
REAL	Normal	3418	107
	Fault	352	3663
Precision		90.66 %	97.16 %
Recall		96.96%	
Accuracy		93.91 %	

TABLE IV
CONFUSION MATRIX Q.

		PREDICTED	
		Norm	Fault
REAL	Normal	4017	3
	Fault	203	4217
Precision		95.19%	99.93%
Recall		99.93 %	
Accuracy		97.56 %	

in Figures ??, 3(b). Figures 2(a) and 3(a) show that, if the input data has no fault, the values estimated by the \mathbf{FIS}_P^{Norm} (\mathbf{FIS}_Q^{Norm}) will follow the actual prototype characterising the Normal class.

Figure 4 shows the difference of the real prototype with each of the FIS models. If the evaluated data contains faults, the \mathbf{FIS}_P^{Fault} will present the minimum error resulting from the difference as can be seen in Figure 4(b). Figure 4(a) similarly shows that, if the evaluated data is not faulty, the \mathbf{FIS}_P^{Norm} will present the minimum error. Moreover, if we evaluate the prototypes obtained from each \mathbf{FIS}_Q^n , with the real prototype of Q (see Figure 5), the minimum error resulting from the difference can be seen in Figure 5(a) with normal operation data and Figure 5(b) with failure data. As can be seen in the Figure 4 and 5, in both cases the minimum error (closest to zero) that defines the class to which the evaluated data belong is below the error of the class to which it does not belong.

The proposed algorithm for assigning the class to which the evaluated data belongs performs well as can be seen in Figure 6. **ESA^P** performs a direct comparison by evaluating the cost function with the estimated value of each \mathbf{FIS}_P^n and assigns the label ($\mathbf{class}_{Norm} \in 1, \mathbf{class}_{Fault} \in 2$) of the FIS that minimises this function. Similarly, the assignment of classes through **ESA^Q** by evaluating the cost function with the estimated value of each \mathbf{FIS}_Q^n performs well as can be seen in Figure 7.

Additionally, the confusion matrices (see table III and IV) have been performed to evaluate the proposed classifier, those matrices show the distribution of the classes assigned to the predicted data, compared to their true classes.

V. CONCLUSION

A classifier of offset faults in one of the variables of a wind turbine has been designed. The classifier is based on a structure formed by several TS fuzzy inference systems,

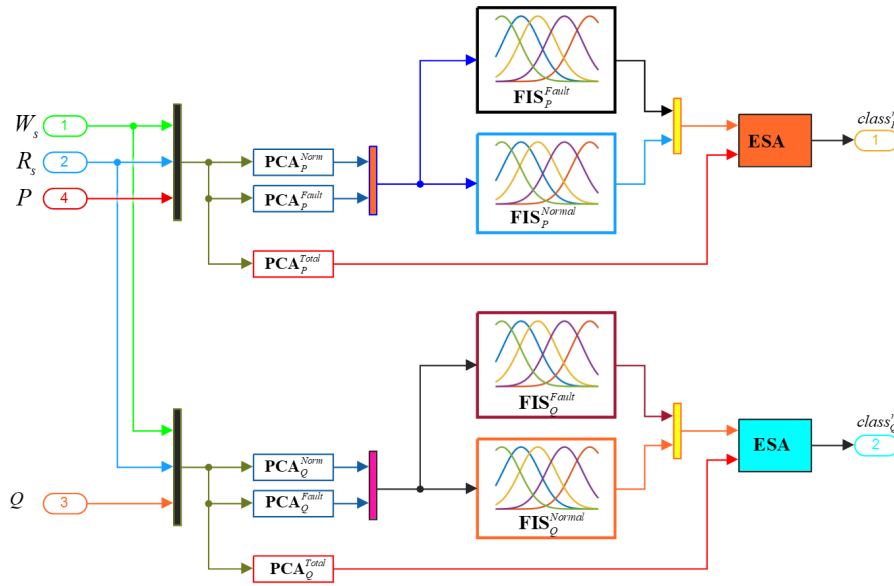


Fig. 1. Neuro-fuzzy classifier structure

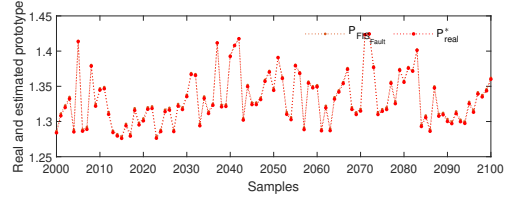
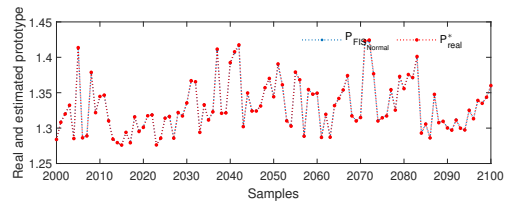
with projections of the data on components of a principal component analysis. The classification results show very good rates of accuracy and sensitivity. The classifier is part of a discrepancy evaluator for triggering the learning mechanism of the digital twin of the wind turbine. As future work, it is proposed to extend this methodology to the rest of the critical variables in all assets susceptible to digital twinning.

ACKNOWLEDGMENT

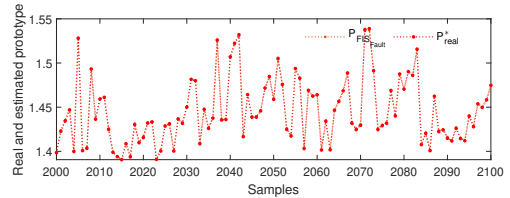
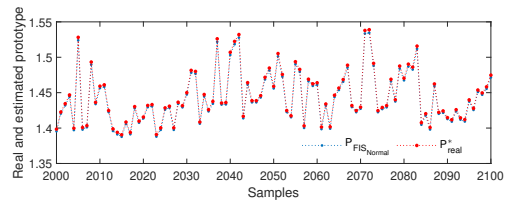
The authors would like to thank the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities under grant PID2019-104149RB-I00 and the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 958339 for funding this work.

REFERENCES

- [1] C. Bordons, F. Garcia-Torres, and M. A. Ridaio, *Model Predictive Control of Microgrids*. Springer International Publishing, 2020. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-24570-2>
- [2] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model predictive controllers*. Springer International Publishing, 2007, vol. 2.
- [3] S. X. Ding, *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [4] R. Kempener and D. Saygin, "Renewable energy in manufacturing: A technology roadmap for remap 2030," *IRENA*, June 2014. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2014/Jun/Renewable-Energy-in-Manufacturing>
- [5] M. G. Moreno, "Desarrollo y validación experimental de un gemelo digital para un aerogenerador," 2021. [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/127622>
- [6] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, pp. 2405–2415, 2019.

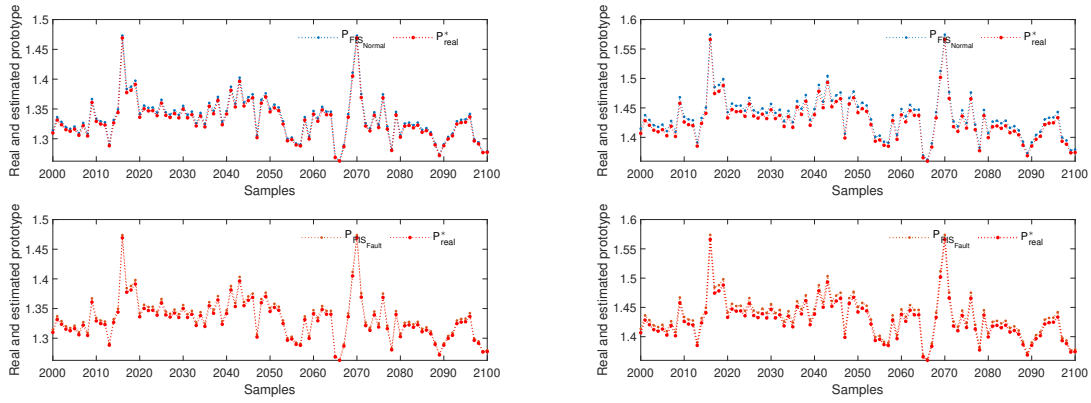


(a) Actual and estimated prototype for each FIS (of P) after evaluation with normal operating data



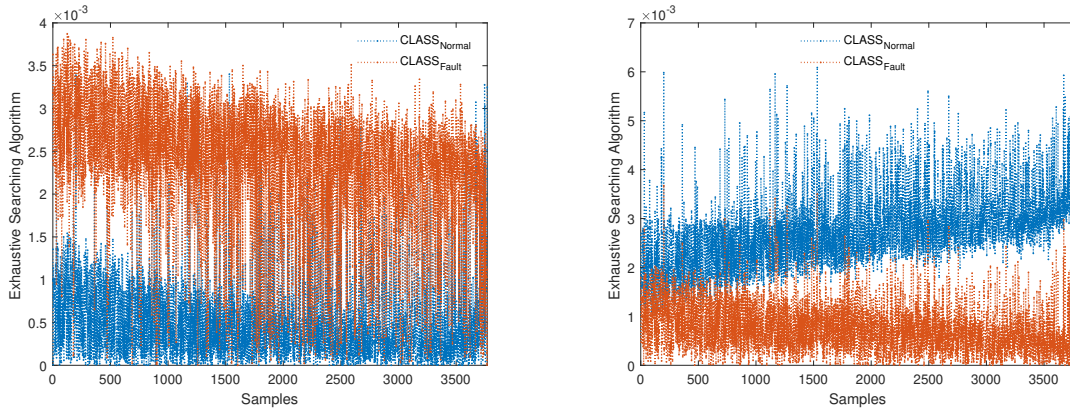
(b) Actual and estimated prototype for each FIS (of P) after evaluation with faulty data

Fig. 2. Prototypes obtained with failure and normal operation of P.



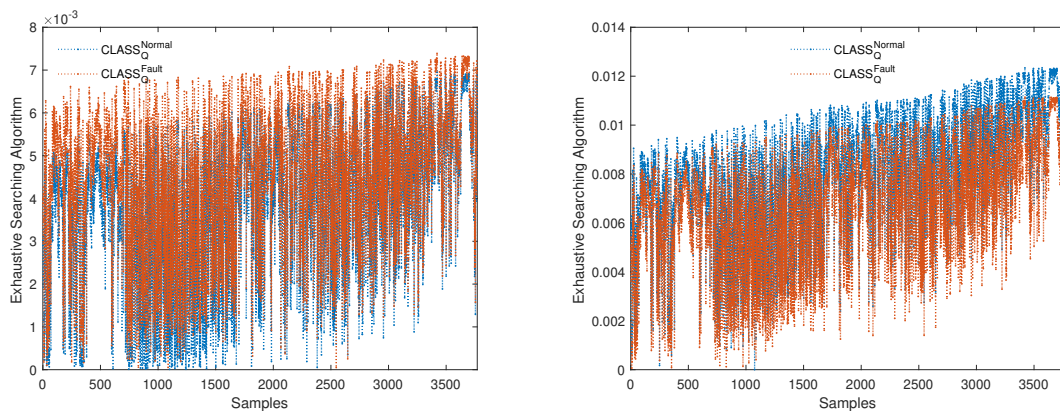
(a) Actual and estimated prototype for each FIS (of Q) after (b) Actual and estimated prototype for each FIS (of Q) after evaluation with normal operating data evaluation with faulty data

Fig. 3. Prototypes obtained with failure and normal operation of Q.



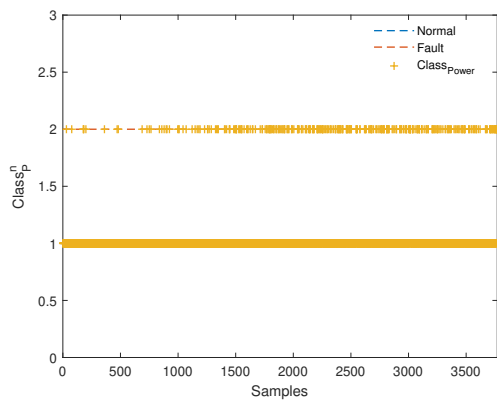
(a) Error obtained from direct comparison in the ESA between the (b) Error obtained from direct comparison in the ESA between the prototype of each FIS and the real prototype with normal operating prototype of each FIS and the real prototype with faulty data.

Fig. 4. Errors delivered by the ESA after minimising the cost function for FIS^p .

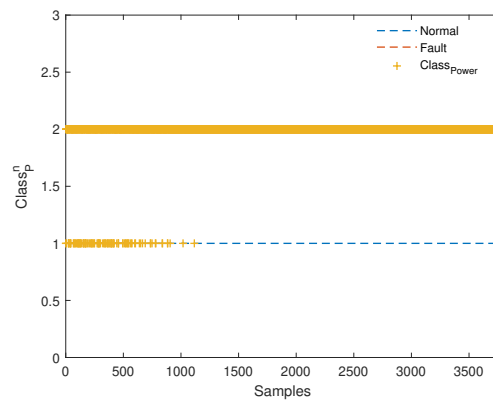


(a) Error obtained from direct comparison in the ESA between the (b) Error obtained from direct comparison in the ESA between the prototype of each FIS and the real prototype with normal operating prototype of each FIS and the real prototype with faulty data.

Fig. 5. Errors delivered by the ESA after minimising the cost function for FIS^Q .

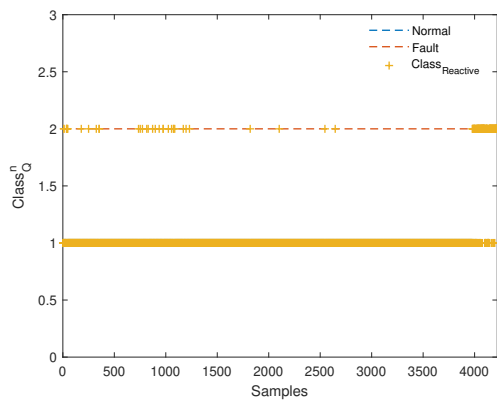


(a) Classification with normal operating data.

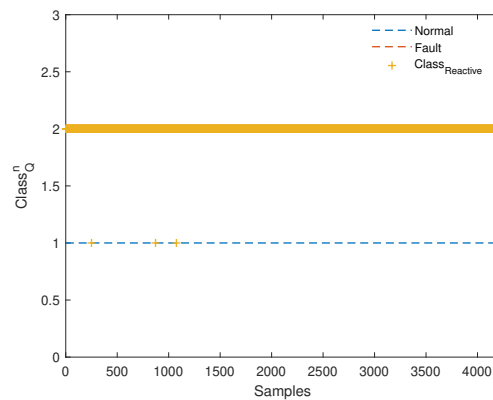


(b) Classification with faulty data.

Fig. 6. Class assignment by means of ESA with different P data.



(a) Classification with normal operating data.



(b) Classification with faulty data.

Fig. 7. Class assignment by means of ESA with different Q data.

Software de Desarrollo para el Análisis de los Desplazamientos de una Plataforma Flotante Sobre Ensayos en Modelo Físico

Vicente Negro Valdecantos
Enviroment Coast and Ocean Research
Laboratory (ECOREL-UPM).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, España
vicente.negro@upm.es

César Sastre Gil
Enviroment Coast and Ocean Research
Laboratory (ECOREL-UPM).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, España
cesar.sastre@ucm.es

Jose Luis Orts Egío
Enviroment Coast and Ocean Research
Laboratory (ECOREL-UPM).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, España
joseluis.orts@upm.es

Abstract— The 2030 Agenda and Sustainable Development Goals (SDG) warn about the climate emergency on the planet. The greenhouse gases with the increase in temperature and the change of pH in the oceans is causing a degradation that can be irreversible. If to this is added that the countries only offer minimal consensus positions at their COP 25 (Madrid, 2019), COP 26 (Glasgow, 2021) meetings, the risks are obvious. In this sense, the commitment to wind energy in the sea in great depth is a reality. For three years, different platforms have been tested to analyze their operation against the maritime climate and wind and to study their movements and turns. This research aims to describe its analysis and first results.

Keywords— 2030 Agenda, ODS 13, ODS 11, ODS 14, energy, marine energy, offshore platform, float facility, floating, wind waves, sensor, physical model, optitrack.

Resumen— La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas alertan sobre la emergencia climática en el planeta. Los gases de efecto invernadero con el aumento de la temperatura y el cambio de pH en los océanos está provocando una degradación que puede ser irreversible. Si a eso se añade que los países solo ofrecen posiciones de consenso mínimas en sus reuniones COP 25 (Madrid, 2019), COP 26 (Glasgow, 2021), los riesgos son evidentes. En ese sentido la apuesta por la energía eólica en el mar en gran profundidad es una realidad. Durante tres años se han ensayado distintas plataformas para el análisis de su funcionamiento frente al clima marítimo y viento y analizar sus desplazamientos y giros. Esta investigación pretende describir su análisis y primeros resultados.

Palabras clave— Agenda 2030, ODS 13, ODS 11, ODS 14, energía, energía eólica marina, plataforma offshore, flotador, flotante, oleaje, sensor, modelo físico, optitrack.

I. INTRODUCCIÓN

Es un hecho que el planeta está en “emergencia climática” y que tanto la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible muestran la preocupación por la situación, preferentemente en los conceptos de la “acción por el clima” ODS 13 y los efectos que pueden tener sobre las ciudades y comunidades (ODS 11) más cuando se encuentran en el litoral y sobre la vida en los ecosistemas, tanto marinos (ODS 13), como terrestres (ODS 14). Esta situación ha sido tratada ampliamente en la Conferencia de París (COP 21, 2015), en los acuerdos sobre Océano y Criosfera de Mónaco (2019) y es un efecto muy claro en el mundo [4] [12].

Los eventos extremos son cada vez más frecuentes, las inundaciones, sequías, temporales, maremotos y terremotos,

nevadas empiezan a convivir de forma cotidiana con el ser humano.

Con un análisis de las previsiones de las referencias científicas y sobre la base de los datos de oceanografía tomados del análisis de clima en España y el Reino Unido, como de corrientes y mareas, así como de modelos numéricos de propagación y de corrientes se plantearon un análisis de dispositivos “limpios” basados en las siguientes hipótesis en función de la definición de cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5W/m².

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6); dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX y analizar qué sucedería al planeta en situaciones donde no se actúe; donde se limiten las emisiones para que la temperatura solo se supere en dos grados, en 1.50 grados entre otros aspectos.

En este sentido la energía eólica en el mar ha sido una evolución desde que el primer campo funcionase en aguas someras en 1991 en Dinamarca. Su desarrollo ha sido tan vertiginoso que parece el proceso evolutivo de las especies en muy poco tiempo (Fig. 1). [3] [5].

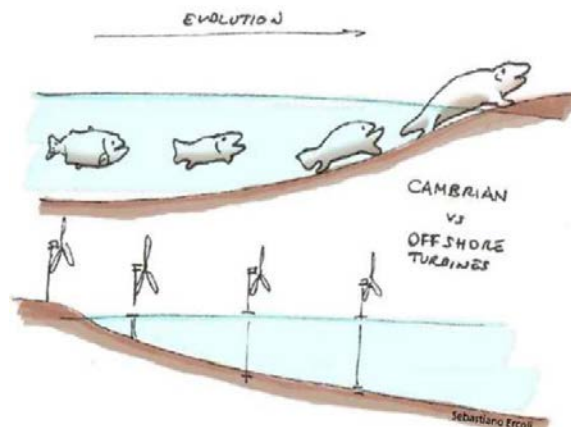


Fig. 1. Comparación de la evolución de la energía eólica con los períodos históricos

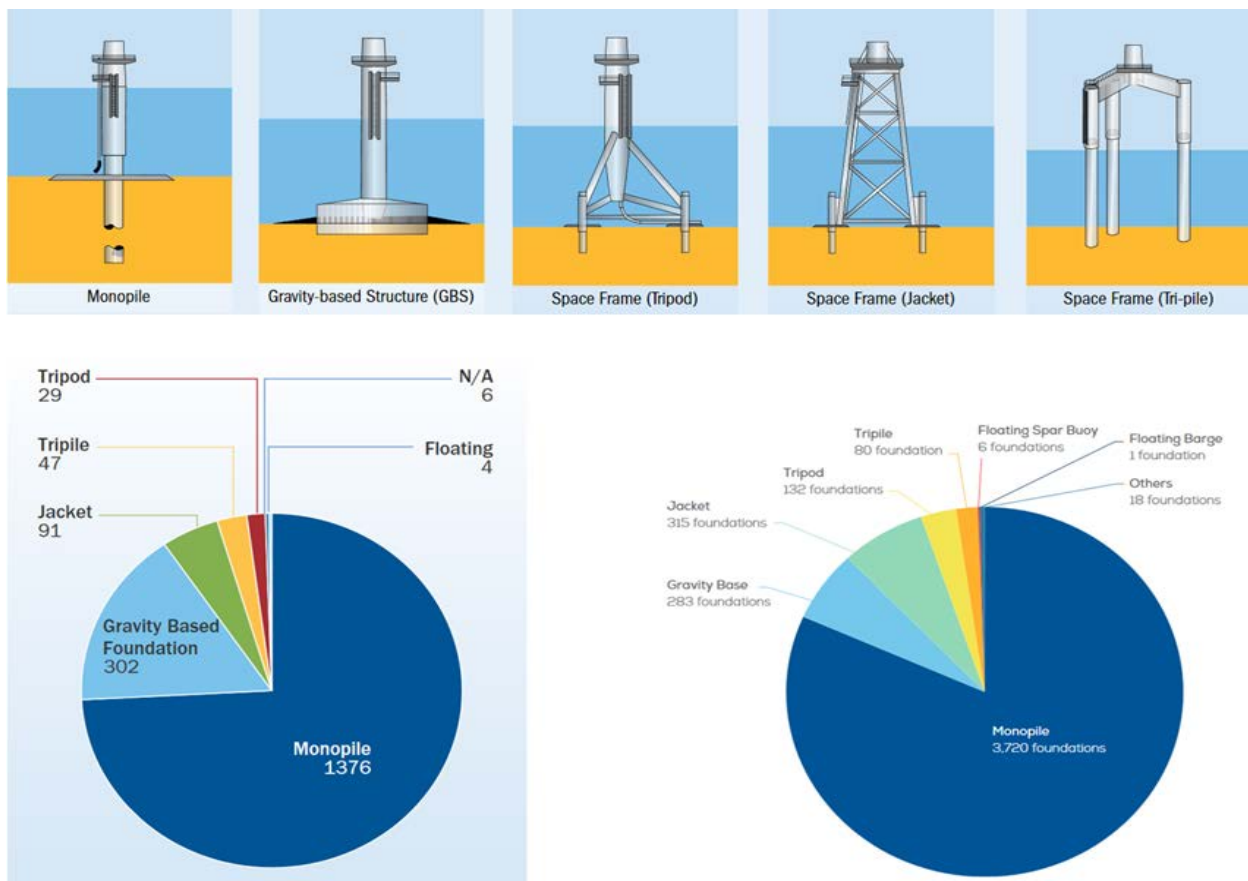


Fig. 2. Naturaleza de las cimentaciones y su evolución en parques [1] [8]

En esta evolución a tecnología ha desarrollado variaciones en las cimentaciones, desde pilotadas a gravedad, pasando por soluciones tipo trípode, plataforma offshore y flotantes. Un ejemplo se suele aplicar en la Fig. 2.

En el mundo la apuesta por el océano es evidente con plataformas cada vez más profundas y turbinas de gran capacidad. Esta tabla complica las posibilidades españolas no solo por acciones de clima para cimentaciones de gravedad. Solamente válidas hasta 30 m, sino por la naturaleza de nuestros terrenos que dificulta el empleo de pilotes en muchas zonas y la percepción del paisaje y del turismo en los casi 8000 km de línea de costa con más de 2000 km de playas.

TABLA 1. DATOS DE SOLUCIONES ENERGÍA OFFSHORE EÓLICA [12]

Location	Offshore Wind Farms (units)	Power installed (MW)	Water depth (m)	Distance from the coast (m)
North Sea	61	12933	23.4 m	30 km
Irish Sea	15	2938	13.1 m	10.1 km
Baltic Sea	20	2186	12.4 m	10.9 km
China	29	3939	5.30-7.50m	11.30-16.70 km

Por todo ello, los elementos flotantes están siendo la nueva tecnología para desarrollar. A fecha de hoy, finales de 2021, se pueden encontrar en diferentes grados de tecnología más de 20 dispositivos, desde las clásicas “spar” con sus diferentes soluciones; las plataformas semi sumergibles; las de tipo barge, las TLP, las híbridas, entre otras.

En la Fig. 3 se dispone un ejemplo de estas. La primera responde a una clásica “spar”, la segunda es un tipo “barge” y la tercera imagen es una “TLP” o de patas tensionadas.

Estas plataformas presentan gran sensibilidad a los desplazamientos y giros en estado límite de servicio y en estado límite último que pueden validar su comportamiento, desarrollo y uso [6] [7].

En el Laboratorio de Puertos de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid se han analizado durante tres años diferentes tipos de plataformas flotantes desarrollando un software propio que analiza los movimientos del flotador.

II. METODOLOGÍA

El flotador presenta tres desplazamientos y tres giros en su movimiento frente a las oscilaciones del clima marítimo, tal como se observa en la Fig. 4.

El problema del giro sobre el eje “z” o “yaw” y del desplazamiento sobre el mismo, es decir, alzada o “heave” condiciona en una plataforma variaciones inferiores a los 4° en estados límites de servicio y de menos de 11 grados en estados límites últimos frente a las oscilaciones del mar. Los elementos flotantes en experimentación siempre deben consolidar estos valores porque pueden hacer inviable su avance en el TRL tecnológico [18].

El Grupo de Investigación ECOREL – UPM dispone de un canal de longitud de 52 m, con sección transversal de 1.00 m de ancho por 1.50 m de altura y tiene una capacidad de generación de oleaje regular e irregular de hasta 0.45 m en una profundidad de 1.00 m. Presenta control de absorción del oleaje reflejado y controla la disipación mediante espuma de poliuretano.

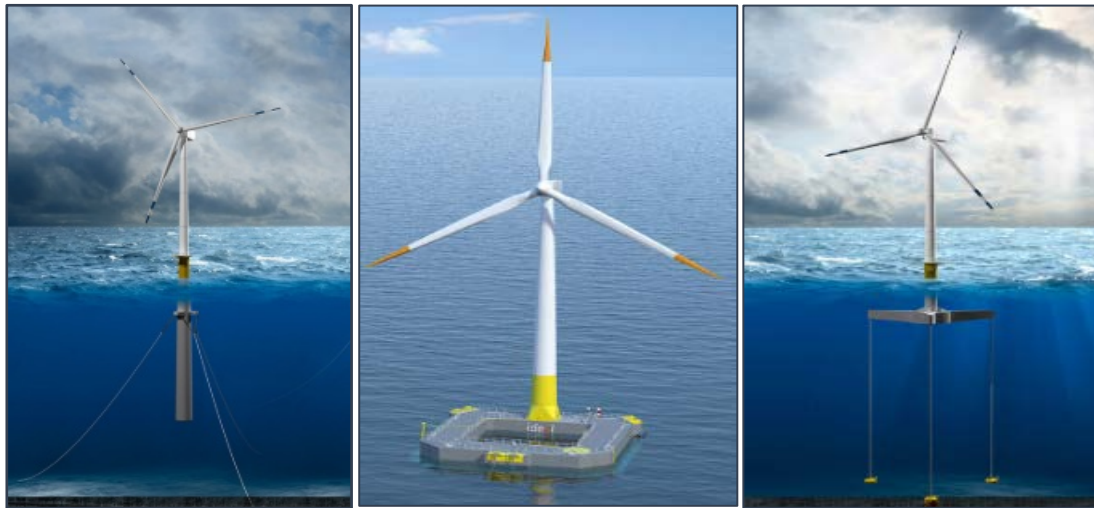


Fig. 3. Ejemplos de plataformas flotantes consolidadas a nivel tecnológico [13]

También se dispone de un tanque o piscina de ensayos tridimensionales, que ocupa la parte central de la nave, tiene una profundidad de 1.36 m, una anchura de 11 m y una longitud de 33 m. El fondo del mismo está terminado con pavimento de terrazo “in situ” y las paredes verticales en loseta continua, dotadas de un sistema de anti-reflexión mediante espumas de poliuretano de 10 ppi. Se genera oleaje multidireccional con control de absorción, con movimiento individual de palas, pudiendo llenar hasta 1.00 m. El aparato generador de oleaje está constituido por 16 paletas de 0.70 m de frente y 1.30 m de altura, con las prestaciones siguientes: $H = 0.25$ m en una lámina de agua de 0.60 m aproximadamente.

escala de la infraestructura así como los centros de gravedad y giro de la misma.

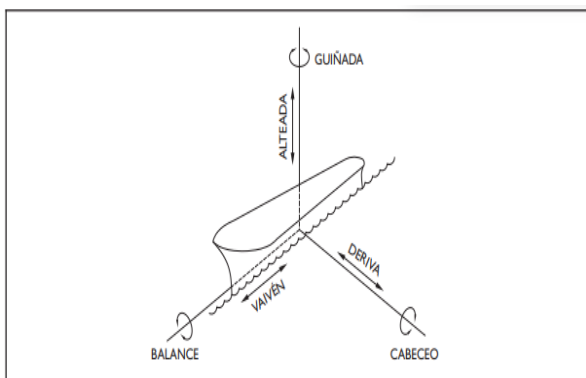


Fig. 4. Movimientos del flotador, desplazamientos y giros [15]

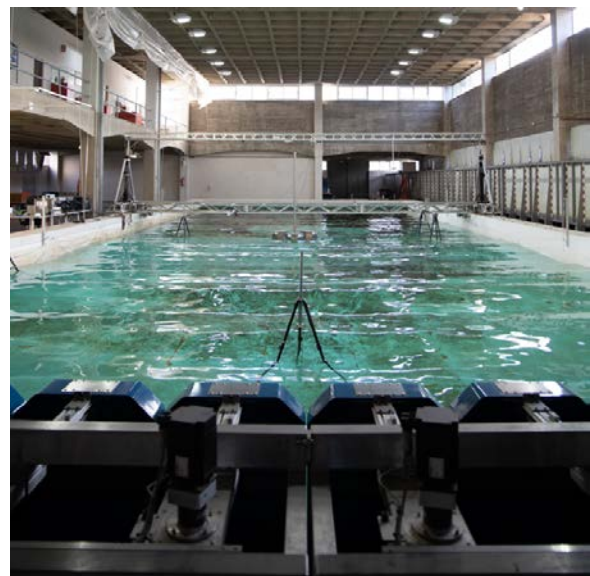


Fig. 5. Tanque de ensayos de ECOREL UPM

Además, dada la semejanza de Froude elegida como semejanza de escala y que, debida a esta cualquier medida en

El laboratorio con una superficie aproximada de 2100 m², también dispone de sala limpia, sala CNC o de mecanizado, taller, almacén y una bahía de carga.

La Fig. 5 muestra el tanque de ensayos sometido a un oleaje caótico tipo sea que corresponde en muchas ocasiones con la generación de los temporales en el mar del Norte donde se plantean este tipo de instalaciones flotantes.

Con estos antecedentes se planteó el ensayo en estado límite de servicio y último de una plataforma cuyo ejemplo se dispone a continuación en la Fig. 6.

Para la adquisición de datos en los diferentes ensayos mencionados era necesaria la utilización de sensorica de carácter no-intrusiva, de manera que esta no alterara el peso a

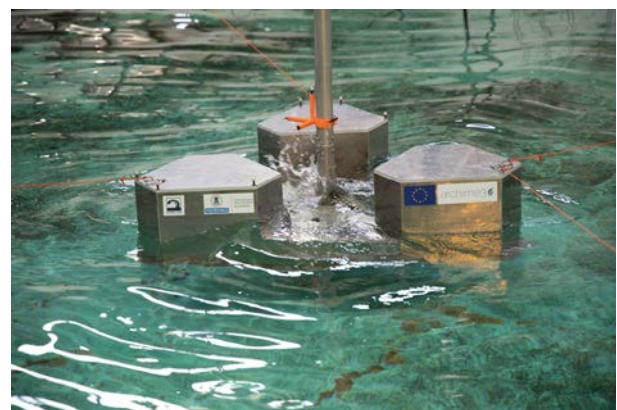


Fig. 6. Plataforma TRIWIND. Ejemplo de ensayo

modelo, se ve ampliada en prototipo, se requería de esta sensoría que fuera muy fehaciente en la medida y que por tanto los resultados fueran no sólo extremadamente precisos sino con altas tasas de velocidad de adquisición.

Dadas estas premisas, el equipo elegido fue Optitrack, un sistema de adquisición de análisis dinámico media reflexión de espectro infrarrojo. Este equipo, cumplía perfectamente con todas las necesidades impuestas ya que dado su alto grado de desarrollo, se obtuvieron medidas con errores totales menores a 1 mm en modelo o lo que es lo mismo, un 0,0008% de error sobre la eslora total del modelo y con tasas de 120 hz.

Para el procesamiento (que además se producía en tiempo real) se utilizó software propio de optitrack (Motive) que aunque muy utilizado en la industria del CGI en cine, en su rama de robótica es igualmente potente. (Fig. 7)

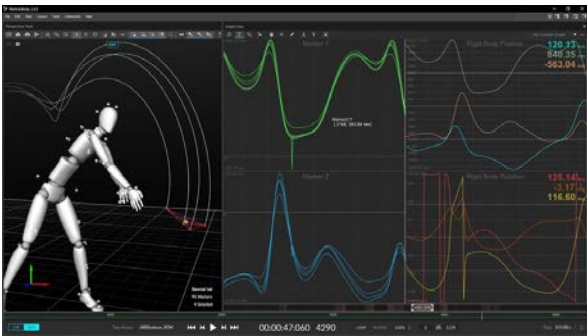


Fig. 7. Ejemplo de otras aplicaciones del software.

El funcionamiento del sistema radica en la colocación de “markers” en diferentes posiciones del modelo. Estos son capturados por hasta 8 cámaras de espectro infrarrojo previamente calibradas (Fig. 8) con las cuales se puede

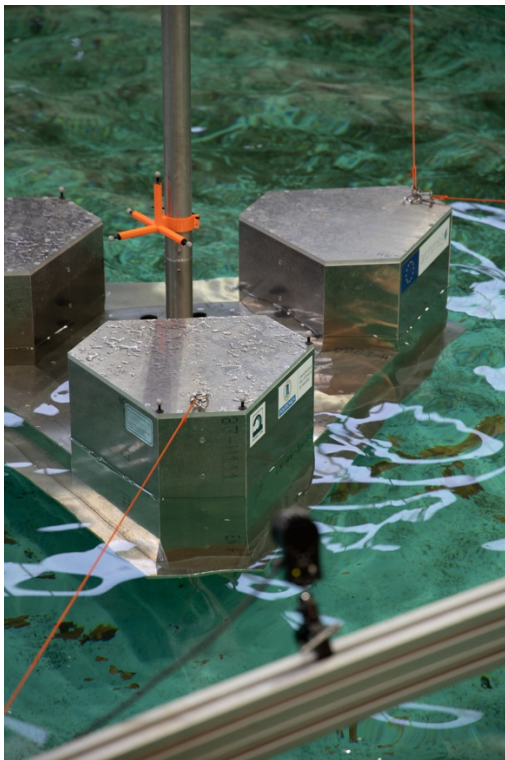


Fig. 8. Cámara infrarroja de posicionamiento apuntando a los markers del modelo

triangular la posición de cada uno de estos markers, que a su vez, componen un sólido rígido. Este proceso de posicionamiento ocurre 120 veces por segundo lo que permite situar este en el dominio del tiempo. (Fig. 9)

Tras este proceso de adquisición se procedieron, mediante software de desarrollo propio, a descomponer los diferentes datos de dinámica en los 6 grados de libertad [19] [20], tras lo cual, y mediante formulación analítica, se pasaron a obtener los canales matemáticos relevantes para el objeto de la investigación.

III. SOBRE LA DINÁMICA DEL FLOTADOR

Una de las cuestiones (y a su vez problemáticas) más importantes a resolver en los ensayos que aquí se presentan fueron la de evaluar la respuesta dinámica del flotador ante la acción incidente del oleaje, así como proponer y evaluar (en su caso) mejoras en el prototipo.

Como ya sabemos, esta respuesta dinámica del flotador ante la acción del oleaje se debe principalmente a la afección del periodo del mismo sobre la infraestructura y su acción resonante. Este fenómeno implica que, para el espectro de periodos comprendido en condiciones ondulatorias típicas de un oleaje formado por viento, la cantidad de movimiento, aunque amplificada por la energía en forma de altura de ola, se debe principalmente al periodo con el que el oleaje incida sobre la estructura y cómo de cerca, en el dominio de las frecuencias, se encuentren estos periodos incidentes de los periodos naturales de resonancia de dicha estructura para cada uno de los 6 grados de libertad, aunque prestado especial interés en Pitch, y Heave [14][2].

Para la discretización de estos periodos naturales en la infraestructura que nos atañe, así como para evaluar el coeficiente de “damping” (Helder) (Fig. 10) para cada grado de libertad, se desarrollaron una serie de baterías de ensayo

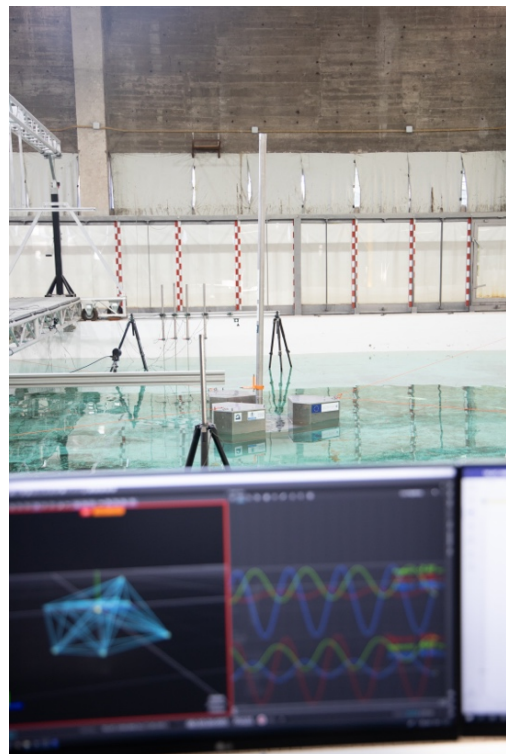


Fig. 9. Sistema de Adquisición de la dinámica del flotador trabajando en tiempo real durante un ensayo

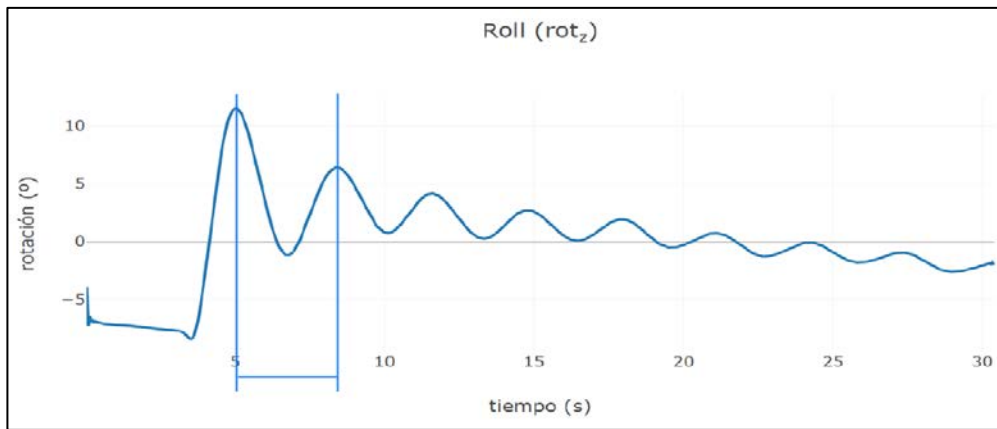


Fig. 10. Ensayo de Decay y obtención del periodo natural para rotación en Roll

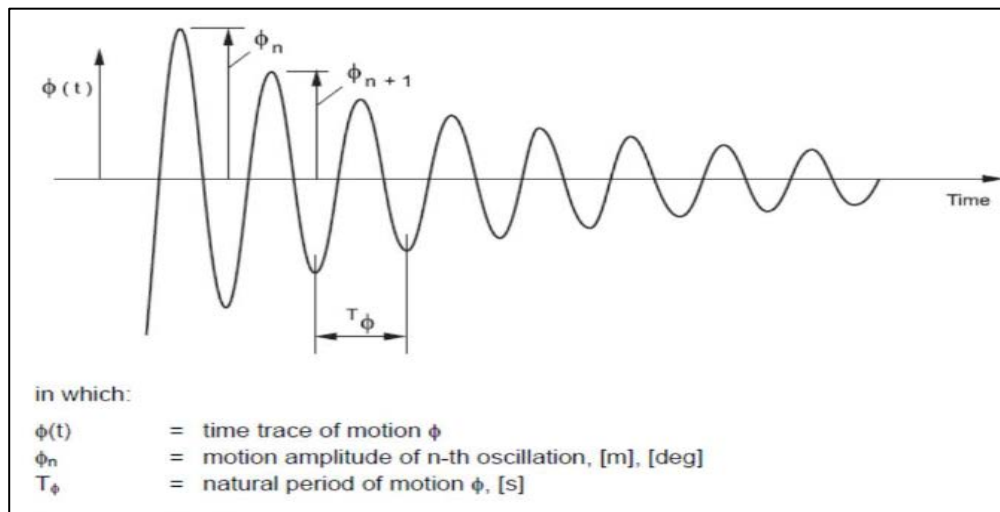


Fig. 11. Metodología para la obtención del coeficiente de damping y del periodo natural de resonancia (Helder, et al.)

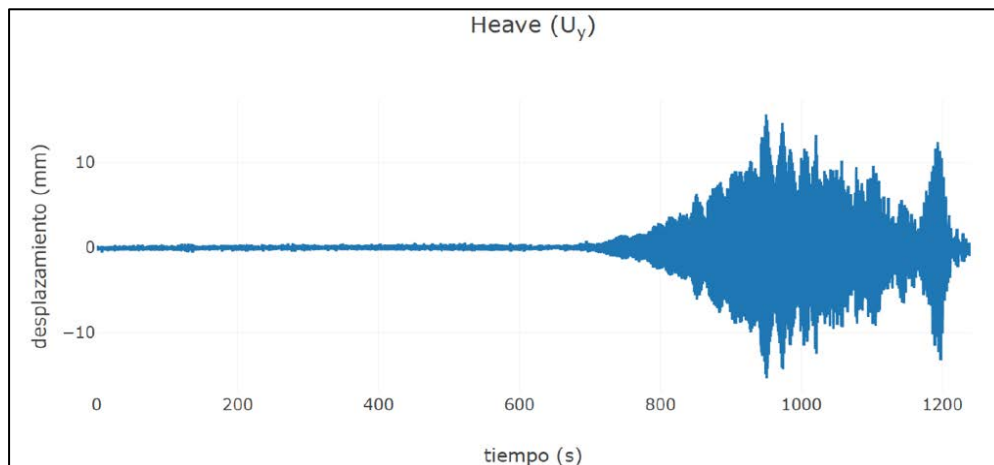


Fig. 12. Desplazamiento en Heave para ensayo con CHIRP

con ensayos de “Decay” (Fig.11) y ensayos con frecuencia modulada o señal “CHIRP” (Fig. 12).

Adicionalmente, y a fin de caracterizar el comportamiento dinámico, no sólo en base teórica sino en condiciones más realistas cuando la infraestructura se encuentre en fase de explotación, se consideró el análisis de la dinámica del flotador para diferentes condiciones met-oceánicas definidas por diferentes espectros de oleaje tipo JONSWAP [16] con

patrón de apuntamiento 3,3 desde condiciones propias de operatividad, hasta condiciones de estado límite último.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que, para las últimas configuraciones de diseño, la infraestructura propuesta excede los márgenes de seguridad establecidos para cada estado, tanto de operatividad como extremales para cada grado de libertad en términos dinámicos [18] [22] [23].

IV. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados de los ensayos (2019 - 2021) se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. El desarrollo de los sistemas flotantes para la energía eólica marina es un reto en profundidad, por encima de los 50 m; acciones a resistir (oleaje y viento) y procesos de construcción, mantenimiento, explotación y desmantelamiento.
2. Las estructuras flotantes mejoran las condiciones de implementación que las GBS o las mono pilotadas.
3. Se pueden encontrar en un TRL en el entorno de 5 - 7, pudiendo estar en enorme desarrollo para 2025.
4. Las plataformas ensayadas se consideran híbridas, dado que aguas someras pueden trabajar por gravedad y en transición como flotantes.
5. En los ensayos se detectan problemas en anclajes. Estos ensayos se han realizado en ELS y ELS, con oleaje irregular y espectro J.
6. Los ensayos han permitido elaborar mediante técnicas de sensorización el seguimiento de los movimientos y giros del flotador.
7. Los ensayos demuestran que los valores de los ángulos de desplazamiento son inferiores de 3° en estado límite de servicio y de 11° en estado límite último [9] [10] [21].

REFERENCIAS

- [1] British Petroleum "Statistical review of World energy". BP p.l.c. 2017: 66. 2019.
- [2] Clauss GF "Wave forces on slender cylinders". Delft University of Technology. Chapter 12. 1992
- [3] De Soneville, B.; Paulsen, BT. and Hofland, B. "Wave Impact Loads on Gravity Based Structures". In: Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE34. May 31 - June 5, 2015, St. John's, NL, Canada. 2015.
- [4] Esteban, MD.; Diez, JJ.; López-Gutiérrez, JS. and Negro, V. "Why offshore wind energy?" Renewable Energy 36 (1): 444-450. 2011.
- [5] EWEA-Wind Europe (European Wind Energy Association). Key trends and statistics H1, for internal use only. EWEA Tech. Rep. 2018.
- [6] Goda, Y. "A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwater". Proceedings of the 14th Intl. Conference on Coastal Engineering, ASCE. Copenhagen, Denmark: 1702-1720. 1974.
- [7] Goda, Y. "Random seas and design of maritime structures". Second ed. World Scientific Publishing. Singapore. 2000.
- [8] International Guidelines, DNV-GL-ST-0126, on Support Structures for Wind Turbines (2016).
- [9] International Guidelines, DNV-GL-ST-0437, on Loads and Site Conditions for Wind Turbines (2016).
- [10] International Guidelines DNV-os-j101, on Design of Offshore Wind Turbine (2013).
- [11] Luengo, J.; Negro, V.; García-Barba, J.; López-Gutiérrez, JS. and Esteban, MD. "New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines". Renewable Energy 131 (2019): 667-677. 2019.
- [12] Luengo, J.; García-Barba, J.; Negro, V.; López-Gutiérrez, JS. and Esteban, MD. "Offshore wind energy. Create a lot of questions. Give some answers". Ocean Engineering (under revision). 2018
- [13] Negro, V.; López-Gutiérrez, JS.; Esteban, MD. and Matutano, C. "Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines". Renewable Energy 63: 125-132. 2014.
- [14] Recommended Practice, DNV-rp-C205, on Environmental Conditions and Environmental Loads (2010).
- [15] ROM 0.2-90. "Actions in the design of Maritime and Harbour Works" (1990) Ministry of Public Works, Spain
- [16] ROM 0.3-91. "Waves" (1991) Ministry of Public Works, Spain.
- [17] ROM 0.0-01. "General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures" (2002) Ports of the State, Spain.
- [18] ROM 1.0-09. "Breakwaters (Part 1): Calculation and project factors. Climate Agents" (2009) Port of State, Spain.
- [19] Sarpkaya, T. and Isaacson, M. "Mechanics of wave forces on offshore structures". Textbook by Van Nostrand Reinhold. New York. 1981.
- [20] Sarpkaya, T. "Wave forces on offshore structures". Cambridge University Press. 2014.
- [21] www.offshorewind.biz (Accessed: 22 november 2021).
- [22] www.puertos.es (Accessed: 22 november 2021)
- [23] www.4coffshore.com (Accessed: 29 november 2021).

Arquitectura Hardware Asequible para Implementar Controles de Pitch en una Turbina Offshore

Martín Fernández de Diego
Computer Sciences Faculty
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, España
martif02@ucm.es

Belén Sánchez Centeno
Computer Sciences Faculty
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, España
belsan05@ucm.es

Segundo Esteban San Román
Faculty of Physics
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, España
sesteban@ucm.es

Matilde Santos
Institute of Knowledge Technology
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, España
msantos@ucm.es

Abstract—This article contains a computationally affordable and feasible proposal to implement pitch control in floating offshore wind turbines. For this, a hardware architecture that allows wind turbines to be monitored and controlled remotely through the figure of the digital twin is designed and implemented. As an example, the development of a practical implementation in a prototype that handles the pitch angle and collects inertial measurement data is detailed. The result is an affordable, flexible and modular hardware architecture for offshore wind turbines.

Keywords—Wind energy, floating wind turbine, control, hardware, pitch.

Resumen—Este artículo recoge una propuesta computacionalmente asequible y viable para implementar control de *pitch* en aerogeneradores *offshore* flotantes. Para ello, se diseña e implementa una arquitectura hardware que permite monitorizar y controlar las turbinas eólicas de manera remota a través de la figura del gemelo digital. A modo de ejemplo, se detalla el desarrollo de una implementación factible en un prototipo que maneja el ángulo de *pitch* y recopila datos de medición inercial. El resultado es una arquitectura hardware asequible, flexible y modular para turbinas eólicas marinas.

Palabras clave—Energía eólica, turbina eólica flotante, control, hardware, pitch.

I. INTRODUCCIÓN

El principal desafío al que se enfrenta la humanidad hoy en día es lograr un planeta verde y sostenible. Las energías renovables juegan un papel fundamental para alcanzar este hito y el esfuerzo en innovación por parte de instituciones y empresas está siendo particularmente alto.

Las turbinas eólicas o aerogeneradores aprovechan la energía cinética del viento para proporcionar fuerza motriz a las palas que hacen girar, a través de un eje de transmisión, un generador eléctrico [1].

Dependiendo de la ubicación de instalación, existen dos categorías: las turbinas eólicas *onshore* y *offshore*. El término *onshore* hace referencia a las turbinas localizadas en tierra o terrestres, generalmente posicionadas lejos de lugares poblados y fuera de espacios protegidos; el término *offshore*, en cambio,

hace referencia a las posicionadas en el agua, generalmente en el mar. Dentro de estas se pueden distinguir las costeras, que están ancladas al lecho marino, y las turbinas flotantes, más recientemente desarrolladas, que se instalan en alta mar y son de gran capacidad de producción.

La energía eólica *offshore* creció casi un 30 por ciento anual durante la última década [2]. Este incremento, apoyado en la reciente inversión de la industria y en los avances de la tecnología, viene motivado por el gran tamaño que pueden tener los aerogeneradores *offshore* y porque la orografía no impone restricciones físicas que bloqueen las corrientes de viento, que son mucho más intensas y constantes. Sin embargo, el sector *offshore* no consiguió ser competitivo respecto a las fuentes de energía convencionales hasta 2017 [3].

Existen claras desventajas que han impedido su desarrollo. La principal es que los costes de distribución y mantenimiento son más elevados a causa de que las condiciones meteorológicas marítimas son mucho más agresivas. El fuerte viento, las olas y las corrientes deterioran más rápido los aerogeneradores.

Como norma general, las turbinas eólicas ancladas al suelo marino se consideran económica y técnicamente viables en áreas con una profundidad de agua inferior a 50 metros [4]. Debido a esta restricción, los obstáculos para aprovechar el viento están más presentes que en mar abierto y, muchas veces, las turbinas siguen localizadas cerca de núcleos urbanos, áreas de mayor actividad pesquera y hábitats naturales protegidos.

Pero sigue habiendo nuevos avances, sobre todo en las turbinas eólicas flotantes. Aunque esta tecnología *offshore* todavía no está muy desarrollada, tiene un potencial excelente, principalmente porque puede instalarse en aguas de entre 50 y 1000 metros de profundidad, desbloqueando sitios de aguas profundas inadecuados para la tecnología de cimentación fija que ha dominado hasta la fecha [4].

Las principales características de estos nuevos aerogeneradores son:

- Sencillez en la fabricación e instalación. Las turbinas y plataformas flotantes se pueden construir y montar en tierra y luego remolcar al sitio de instalación en alta mar.
- Eficiencia energética. Aprovecha los fuertes vientos que soplan en áreas de las aguas más profundas.
- Impacto ambiental potencialmente bajo.

Esta tecnología, enfocada a aguas profundas y entornos difíciles más alejados de la costa, está avanzando de forma constante hacia la viabilidad comercial con diferentes prototipos y proyectos a pequeña escala ya en funcionamiento. De hecho, en los últimos diez años, los programas de I+i de la UE concedieron alrededor de 496 millones de euros a la energía eólica marina, incluyendo la flotante [5].

Queda por determinar cuál de los distintos diseños que se están desarrollando es más eficiente y cómo construir cientos de plataformas de forma rápida y barata.

En este proyecto se propone trabajar con un prototipo a pequeña escala, implementando una arquitectura hardware que monitorice y pruebe algoritmos de control [6] en ambientes controlados.

El artículo queda estructurado como sigue. La arquitectura hardware objeto de este trabajo se resume en la sección II. Los componentes utilizados, la implementación funcional y los resultados obtenidos hasta el momento se describen en la sección III. La sección IV termina el artículo con las conclusiones y los trabajos futuros.

II. ARQUITECTURA HARDWARE

El sistema que se propone desarrollar consta de una arquitectura para monitorizar y controlar una turbina eólica *offshore* flotante con el fin de detectar cambios en su estado y anticiparse a los problemas. Es lo que se denomina detección temprana de averías, lo que disminuye los costes de mantenimiento y mejora la eficiencia del aerogenerador.

El escenario de trabajo se muestra en la Figura 1. Como se puede observar, el objetivo es la monitorización remota de los parámetros y variables que puedan ser críticos en la turbina flotante. Esto plantea importantes retos de comunicación y computacionales.

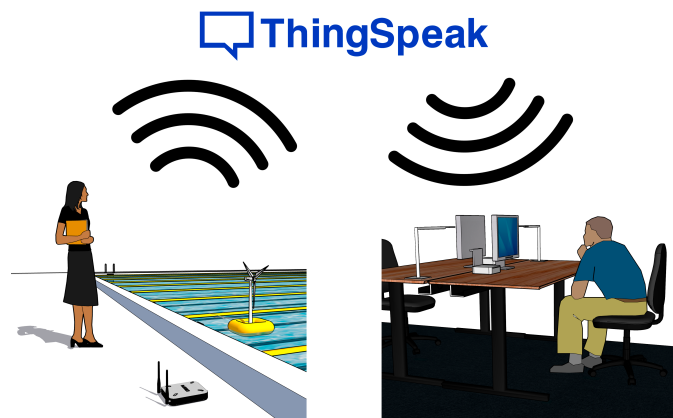


Fig. 1. Escenario de trabajo.

En este marco, por un lado, se aborda el objetivo a bajo nivel sobre el entorno hardware. Mediante sensores de medición inercial, como el acelerómetro y el giroscopio, se obtienen los datos necesarios para conocer el funcionamiento de la turbina y modificar el ángulo de rotación del servomotor que está unido al rotor. Es decir, se envían órdenes para el control del ángulo de pitch de las palas.

Por otro lado, también se incide en aspectos interesantes a alto nivel. Se van a realizar subidas periódicas a ThingSpeak de los datos recolectados para su posterior análisis y presentación. Esta visualización se materializa en un gemelo digital capaz de detectar patrones de comportamiento y de reaccionar de manera autónoma a las distintas eventualidades.

Para ello hará falta conectar el aerogenerador *offshore* a un punto de acceso a Internet cercano, que permita transferir las mediciones al servidor que nutre al gemelo digital y actualizar el modelo, y así mostrar información relevante al usuario.

III. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

El sistema implementado se encarga de monitorizar los sensores de medición inercial y de controlar el *pitch* de las palas del aerogenerador con el fin de aumentar o reducir la resistencia con el viento y así controlar la potencia generada.

Para el montaje del mecanismo hardware se han utilizado componentes estándar, fácilmente reemplazables y muy económicos.

A. Componentes

- Microcontrolador ESP32 [7].
- Sensor de medición inercial (IMU) MPU6050 [8].
- Microservomotor SG92R [9].

1) *Microcontrolador ESP32*: Es un sistema en chip (SoC) que integra, entre otras características, Wi-Fi de 2.4 GHz y dual 32-bit CPU core.

2) *Sensor de medición inercial (IMU) MPU6050*: Es un sistema de 6 ejes de rastreo del movimiento que combina los 3 ejes del acelerómetro, los 3 del giroscopio y un procesador digital de movimiento (DMP) en un mismo componente.

3) *Microservomotor SG92R*: Es un motor que permite un control preciso en términos de posición angular y, por tanto, en términos de aceleración y velocidad. Su pequeño tamaño lo hace especialmente útil para su uso en prototipos.

B. Esquema de conexiones

1) *Microcontrolador ESP32*: Está alimentado vía nano USB con un ordenador o con un transformador de 5V.

2) *Sensor de medición inercial (IMU) MPU6050*: Está alimentado con los 3.3V de la placa ESP32 y conectado a la masa común. Sus pines System Data (SDA) y System Clock (SCL) están enlazados con los respectivos pines de la ESP32.

3) *Microservomotor SG92R*: Está alimentado con los 5V de la placa y conectado a la masa común. Su pin de control debe estar enlazado con un pin compatible con Pulse Width Modulation (PWM).

En la Figura 2 se puede ver el esquema de conexiones implementado.

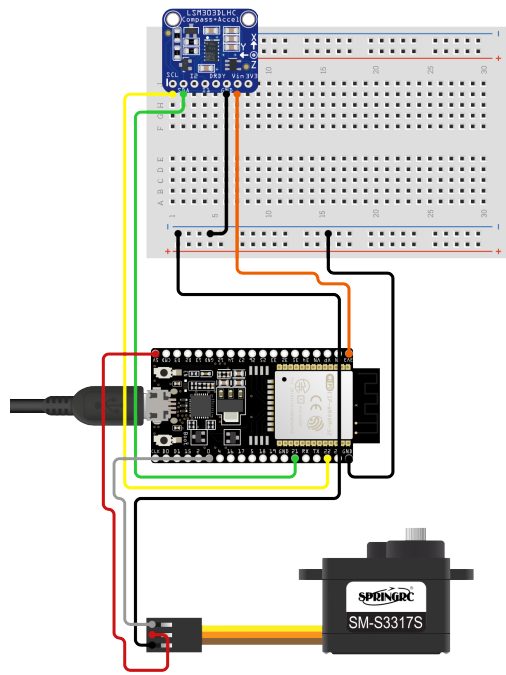


Fig. 2. Esquema de conexiones.

C. Entorno de desarrollo

La implementación se ha realizado en el entorno de desarrollo Arduino IDE, que permite compilar y grabar el código de manera sencilla en el firmware NodeMCU de la ESP32.

D. Desarrollo software

El código está escrito en lenguaje de alto nivel Arduino. En la Figura 3 se presenta un diagrama que muestra el flujo general de la ejecución del programa.

El flujo de instrucciones comienza enlazando el microcontrolador a la red WiFi con las credenciales preestablecidas en las constantes del programa. Una vez conectado, comenzará a realizar las tareas del lazo de control.

En este momento, se crean dos tareas asignadas a diferentes procesadores o cores. La tarea de control asignada al core 0 es la encargada de realizar la lectura de los valores de la unidad de medición inercial (IMU), de mover el microservomotor tras una pequeña transformación de datos y, por último, de enviar los datos previos a la transformación a la tarea encargada de subir la recopilación a ThingSpeak. La tarea de subida a ThingSpeak asignada al core 1 es la encargada de acumular la recepción de datos de la primera tarea y subirlos a ThingSpeak una vez transcurrido el tiempo de espera impuesto por el servidor.

Dividir el flujo en dos tareas o hilos de ejecución evita que al ejecutar el programa de manera secuencial el microservomotor deje de reaccionar a los cambios de la IMU durante unos segundos mientras la ESP32 sube los datos al servidor de ThingSpeak.

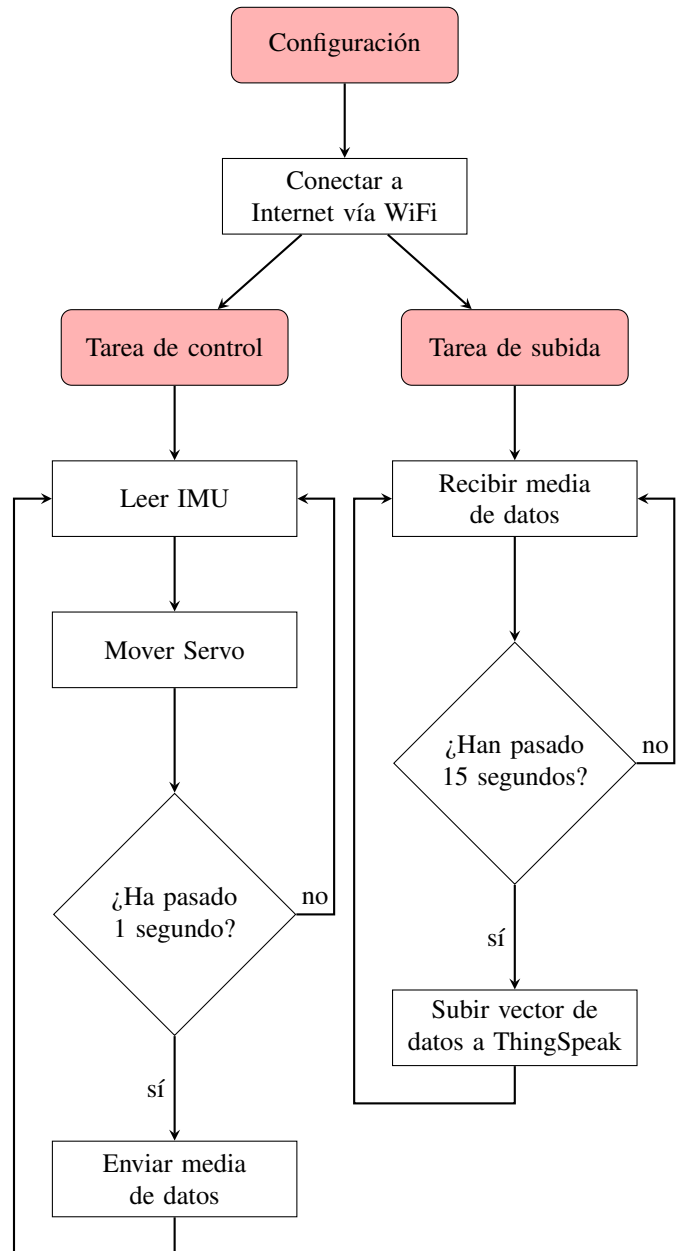


Fig. 3. Diagrama de flujo.

1) *Tarea de control:* Comienza realizando una medida en crudo (RAW) de los valores del acelerómetro y del giroscopio de la IMU MPU6050 a través de los pines I2C de comunicación que nos proporciona el microcontrolador ESP32.

Se realiza una transformación de los valores suministrados por el sensor del eje X/Y a valores comprendidos entre 0 y 180 grados para modificar la posición del microservomotor a través de los pines especializados PWM. De esta forma, se establece una relación entre la inclinación sobre un eje de la IMU con el grado de rotación del servomotor.

Conviene en este punto destacar varias observaciones:

- El eje de referencia se establece en función de la orientación de la IMU sobre el prototipo final.

- El rango de giro del microservomotor puede verse alterado para adecuarse a las limitaciones del mecanismo de la pala del aerogenerador.

Para enviar los datos a la tarea de subida, se realiza la media aritmética de las mediciones que se han tomado durante el último segundo y se empaquetan junto con la hora actual en formato EPOCH. Para conocer la hora EPOCH, el sistema accede al servidor de consultas libre y colaborativo pool.ntp.org.

2) *Tarea de subida*: Comienza leyendo los 15 datos más antiguos de la cola y guardándolos en un vector. Recopila los datos equivalentes a 15 segundos de lectura de la IMU. Si en algún momento la cola estuviera vacía y no le llegaran nuevos datos, esta tarea se quedaría bloqueada a la espera de recepción.

A continuación, estos datos se convierten a formato JSON para que el servidor de almacenamiento sea capaz de cargarlos e interpretarlos.

Por último, los datos son subidos a ThingSpeak vía HTTP POST. Esta fase consume unos segundos y la ejecución secuencial del hilo queda bloqueada hasta que finaliza la carga en el servidor.

3) *Comunicación entre tareas*: La comunicación entre hilos debe realizarse atendiendo a los principios de programación concurrente y paralela para evitar pérdidas o corrupción de datos.

La estructura de comunicación se traduce, en este caso, en una cola *First In First Out* (FIFO) accesible por ambos procesos, como se observa en la Figura 4. El paquete con las mediciones de la tarea de control se introduce en una cola y, más tarde, es recogido por la tarea de subida de datos.

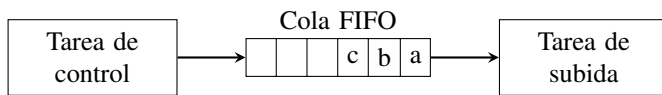


Fig. 4. Esquema de funcionamiento.

Con esta estructura, conseguimos:

- Que la tarea de control no tenga que esperar para enviar los datos y, por tanto, no vea interrumpida su función de mantener la fluidez en la relación IMU-microservomotor.
- Que la tarea de subida no pierda los datos que recibe cuando está realizando otras tareas que no sean de lectura (p.e. subiendo la recopilación anterior a ThingSpeak).

4) *Servidor de ThingSpeak*: El servicio gratuito del servidor de ThingSpeak restringe las subidas de modo que solo se puedan realizar cada 15 segundos.

Para crear un historial de datos suficientemente rico, como la precisión del intérprete está limitada a segundos, la recopilación que se sube cada 15 segundos consta de 15 datos.

Cada paquete subido en formato JSON contiene: una clave API de escritura de un canal de ThingSpeak y una lista de datos, cada uno con un tiempo EPOCH diferente y 6 campos que corresponden con la información de la IMU.

E. Resultados

Los resultados obtenidos proporcionan una arquitectura hardware que implementa un algoritmo de control del *pitch* en función de la inclinación. Incorpora además subida en tiempo real de las medidas inerciales a un servidor de Internet, desde donde son fácilmente accesibles para su análisis.

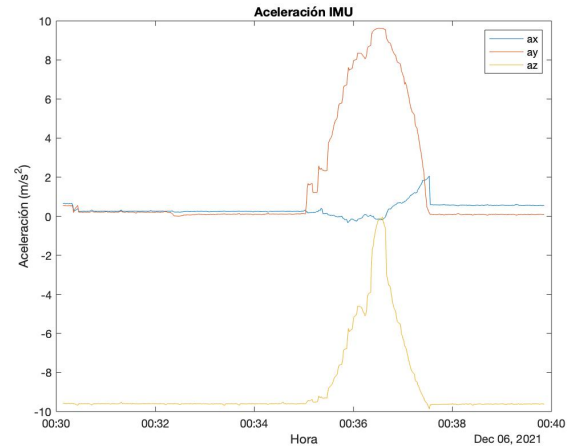


Fig. 5. Gráfica generada con MATLAB.

La Figura 5 es un ejemplo de representación de datos. Consiste en una gráfica que muestra las medidas obtenidas del acelerómetro en los últimos 10 minutos.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha comprobado que es posible diseñar una arquitectura hardware asequible, flexible y modular.

Los próximos pasos del desarrollo atajarán el problema de la cantidad de ruido que genera la IMU de bajo coste aplicando técnicas y filtros como el de Kalman.

El objetivo a continuación es implementar un modelo capaz de mostrar, almacenar e interpretar los datos del servidor. También debería ser capaz de modificar el estado del aerogenerador (desactivar su funcionamiento, modificar *pitch*, etc.) con el objetivo de poder mantener el control ante situaciones adversas.

El modelo se materializaría en un gemelo digital. Esta versión digital del aerogenerador *offshore* simularía lo que sucede con la versión original en tiempo real. Sería capaz de mostrar el histórico de estados en detalle, reconocer patrones o incluso predecir comportamientos recurrentes.

Como última etapa, sería deseable estudiar la implementación desarrollada en un prototipo de turbina eólica situada en una plataforma flotante sobre el agua (p.e. en una piscina). Así se comprobaría su utilidad para tomar mediciones de forma remota del estado del prototipo, para enviarle comandos automáticos y para mantener un registro de su actividad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con financiación parcial del Proyecto MCI AEI/FEDER RTI2018-094902-B-C21, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

REFERENCIAS

- [1] M. Arshad, and B. C. O’Kelly, “Offshore wind-turbine structures: A review,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, vol. 166, p. 139, 2013.
- [2] S. Reed, “A New Weapon Against Climate Change May Float,” *The New York Times*, no. 4, para. 9, June 2020. Accessed on: Dec. 2, 2021. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/2020/06/04/climate/floating-windmills-fight-climate-change.html>
- [3] D. Milborrow, “At the tipping point: 2017 wind cost analysis,” *Windpower Monthly*, para. 1, Feb. 2018. Accessed on: Dec. 2, 2021. [Online]. Available: <https://www.windpowermonthly.com/article/1455361/tipping-point-2017-wind-cost-analysis>
- [4] World Bank, “Going Global: Expanding Offshore Wind To Emerging Markets,” World Bank Group, Washington D.C., Oct. 31, 2019. Accessed on: Dec. 2, 2021. [Online]. Available: <http://documents.worldbank.org/curated/en/716891572457609829/Going-Global-Expanding-Offshore-Wind-To-Emerging-Markets>
- [5] Comisión Europea, “Una Estrategia de la UE para Aprovechar el Potencial de la Energía Renovable Marina para un Futuro Climáticamente Neutro,” Bruselas, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0741&from=EN>
- [6] J. E. Sierra-García, and M. Santos, “Improving Wind Turbine Pitch Control by Effective Wind Neuro-Estimators,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 10413-10425, 2021.
- [7] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32”, 2021. Accessed on: Dec. 4, 2021. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [8] InvenSense Inc., “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4”, PS-MPU-6000A-00 datasheet, Nov. 2010 [Revised Aug. 2013].
- [9] Torq Pro & Tower Pro, “SG92R – Tower Pro”, 2021. Accessed on: Dec. 4, 2021. [Online]. Available: <https://www.towerpro.com.tw/product/sg92r-7/>

Primera aproximación al control multi-objetivo de turbinas eólicas

David José Suárez Gasull
Departamento de Informática y
Automática
UNED, España
dsuarez218@alumno.uned.es

Lía García Pérez
Facultad de Físicas
Universidad Complutense de Madrid
España
liagar05@ucm.es

Matilde Santos
Instituto de Tecnología del
Conocimiento
Universidad Complutense de Madrid
España
msantos@ucm.es

Resumen—El diseño de sistemas de control para turbinas eólicas de gran envergadura resulta cada vez más complejo. Con frecuencia se presentan varios objetivos de control que hay que atender de forma simultánea. Para ello las técnicas de optimización multiobjetivo (MOO) de alto nivel están recibiendo cada vez más atención en aplicaciones reales. En este trabajo se presenta una primera aproximación al control multiobjetivo de turbinas eólicas flotantes de gran tamaño, donde se busca no sólo lograr su eficiencia operativa sino también disminuir en lo posible las vibraciones a las que se ven sometidos estos dispositivos.

Palabras clave—Control, control multiobjetivo, optimización, energías renovables, turbinas eólicas flotantes.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que presentan hoy en día los sistemas de control avanzados es la necesidad de cumplir simultáneamente varios objetivos que pueden ser opuestos, conflictivos o complementarios. La técnica de control multi-objetivo es una buena herramienta para tratar estos sistemas de control.

Con el control multi-objetivo se puede conseguir alcanzar un funcionamiento adecuado con un amplio rango de condiciones, y de esta forma tratar distintos problemas de operación del control [1].

La investigación en el campo de las técnicas de MOO se centra en la obtención de nuevos algoritmos de optimización, encontrando los frentes de Pareto que aporten mejores soluciones o resultados más precisos, utilizando funciones de coste especialmente construidas que contemplan varios criterios [2].

En el caso de las turbinas eólicas, y en concreto para los aerogeneradores flotantes, el objetivo de control es siempre obtener la máxima energía del viento [3]. Pero el recurso eólico es cambiante y varía de forma aleatoria, y es necesario ajustar el ángulo de ataque de las palas del rotor para obtener esta energía máxima, que a partir de cierta velocidad es la potencia nominal. El control de este ángulo, denominado control de pitch, mantiene constante la potencia nominal a pesar de las fluctuaciones del viento. Además, debido al perfil no uniforme del viento la torre sufre vibraciones, que pueden verse amplificadas por el movimiento de las olas en las turbinas flotantes. Estas oscilaciones deben reducirse para ampliar la vida útil del aerogenerador y disminuir los costes de mantenimiento.

Tradicionalmente se han utilizado controladores para las diferentes zonas de operación de la turbina, ya sea para extraer la mayor cantidad de energía posible para velocidades de

viento bajas o para limitar la potencia generada a su valor nominal, y así evitar daños potenciales con vientos fuertes.

El objetivo de este trabajo es aplicar el control multi-objetivo a turbinas eólicas. Para ello se considerarán tanto la eficiencia como la estabilidad de la misma.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 está dedicada a introducir el concepto de optimización multiobjetivo. En la sección 3 se describe las funciones de control. En la sección 4 se hace una evaluación de las funciones objetivo. En la sección 5 se introduce la toma de decisiones y, en la sección 6, se ve la aplicación para un aerogenerador. El artículo termina con las conclusiones y trabajos futuros.

II. FUNDAMENTOS DEL CONTROL MULTIOBJETIVO

La optimización multiobjetivo consiste en encontrar los puntos que optimizan una función con valores vectoriales en espacios de dimensión finita, sobre un conjunto, definido por restricciones de igualdad, desigualdad o conjunto [4]. Estas funciones de coste o funciones criterio corresponden simultáneamente a descripciones matemáticas de especificaciones de diseño, que a menudo sufren conflictos entre sí.

En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo de un proceso de optimización multiobjetivo. Como se puede ver, las fases son:

- Identificación de variables: Conocer las variables que intervienen en el proceso de optimización multiobjetivo. Es decir, identificar el problema que tenemos y las variables que afectan.
- Reducción de variables: El proceso en el que se sustituyen variables que nos interesa en la función objetivo a optimizar, con el fin de facilitar el proceso.
- Simulación: Una vez se tienen las funciones objetivo se procede a la simulación. Para ello, se inicializa las variables, dándole valores iniciales y restricciones.
- ¿Objetivo de optimización alcanzado?: Si se ha conseguido el objetivo deseado, se pasa a la definición de geometría óptima.
- Nueva configuración de variables: En el caso que no se alcance la optimización deseada, se proporciona una nueva configuración de variables.

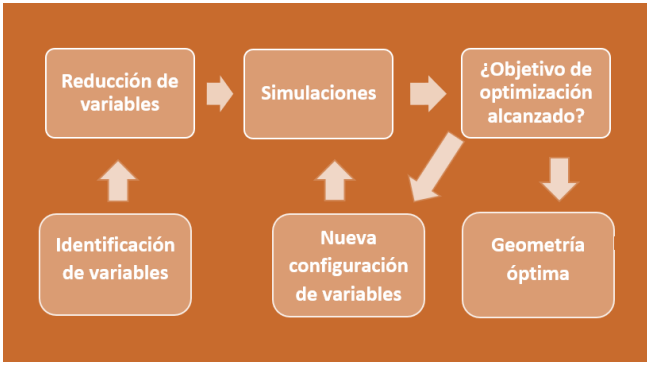


Fig. 1: Diagrama de flujo de la optimización multiobjetivo.

El problema de optimización multiobjetivo se puede definir formalmente como sigue:

$$\text{Encontrar } \alpha = [\alpha_1 \dots \alpha_{np}]^T \text{ o } u = [u_1 \dots u_l]^T$$

$$\text{Optimizar } J(u, \alpha) = [J_1(u, \alpha) \dots J_{n_f}(u, \alpha)]^T \quad (1)$$

Con respecto a α o u .

$$\text{Sujeto a } g_i(u, \alpha) \leq 0 \text{ y } h_j(u, \alpha) = 0$$

Para $i = 1, \dots, n_g$ $j = 1, \dots, n_h$

Donde $J \in \mathfrak{S} \subset \mathbb{R}$ es un vector de funciones objetivo, $u \in U \subset \mathbb{R}$ es un vector de variables de decisión, $\alpha \in A \subset \mathbb{R}$ es un vector de parámetros, n_f es el número de funciones objetivo, n_g es el número de restricciones de desigualdad, n_h es el número de restricciones de igualdad. Por optimización se entiende maximización o minimización, dependiendo del problema a abordar.

En un problema MOO, al contrario que en la optimización de objetivo único donde solo existe una solución óptima global, existen muchas soluciones equivalentes para un problema.

En este marco, hay tres puntos en el espacio objetivo que son muy importantes: el punto de utopía o punto ideal, el punto crítico, y el peor punto. Se representan en la Figura 2 para dos dimensiones [5].

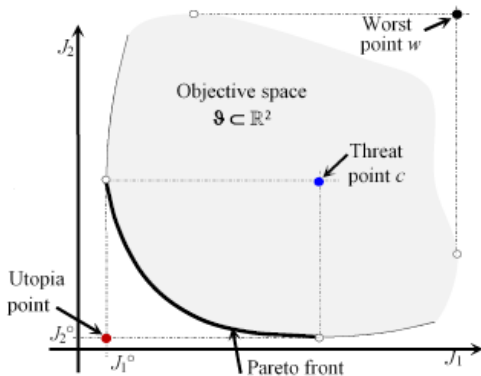


Fig. 2: Definiciones de la frontera de Pareto y puntos clave.

El frente de Pareto se define como el conjunto de soluciones en el espacio de los objetivos que son imágenes del conjunto de Pareto. El conjunto de Pareto es el conjunto de soluciones que existe en un problema de optimización multiobjetivo.

Para obtenerlos se pueden usar métodos basados en programación matemática o basados en programación metaheurística.

III. FUNCIONES OBJETIVO PARA PROBLEMAS DE CONTROL MOO

La elección apropiada de las funciones objetivo es crucial para el diseño de un sistema de control eficaz. Esto es especialmente relevante en el caso de MOO, ya que se deben cumplir varios objetivos al mismo tiempo. Además, las funciones objetivo no sólo deben ser un indicador útil para el funcionamiento del sistema de control, también tienen que cumplir con las propiedades matemáticas correspondientes planteadas por el optimizador.

Por ejemplo, los índices de rendimiento se utilizan como funciones objetivo en problemas clásicos de control. Normalmente se expresan de la siguiente forma [5], en continuo y en discreto respectivamente.

$$J = \int_0^{\infty} f[e(t)]dt \quad \text{y} \quad J = \sum_{k=0}^N f[e(kt)] \quad (2)$$

Donde e es el error de la variable que se quiera controlar.

Otro posible procedimiento es la evaluación de índices de funcionamiento mediante el uso de datos de simulación. En ese caso las series temporales se truncan y, como consecuencia, las integrales deben promediarse en el tiempo.

$$J = \frac{1}{t_{max} - t_{min}} \int_{t_{min}}^{t_{max}} f[e(t)]dt \quad \text{y} \quad J = \frac{1}{(N-K_0)T_s} \sum_{k=K_0}^N f[e(kt)] \quad (3)$$

Donde T_s es el tiempo de muestreo.

Existe un campo de aplicación del cálculo de orden fraccionario, que es la teoría y el control de sistemas, donde han llevado a cabo nuevos desarrollos en las últimas décadas. Debido a su complejidad, en este trabajo se va a ver una breve presentación.

Los índices de desempeño continuo, también se pueden formular en el arco del cálculo fraccionario. El índice de desempeño continuo se expresa en el sentido de la integral fraccionaria por [1]

$$J = \frac{1}{t_{max} - t_{min}} \int_{t_{min}}^{t_{max}} D^{(1-k)}[e(t)]dt \quad (4)$$

donde $D^{(1-k)}$ es la derivada fraccionaria y k el orden fraccionario.

A. Funciones objetivo para aplicaciones específicas.

En el caso del diseño de sistemas de control, se pueden considerar como objetivos las especificaciones de la respuesta del sistema en dominio del tiempo, como son el tiempo de subida, el tiempo de asentamiento, o el sobreimpulso (overshoot). O también las especificaciones en dominio de la frecuencia, por ejemplo el ancho de banda, el margen de ganancia, el margen de fase y el pico resonante. Sin embargo, dado que tales medidas no son convexas, los algoritmos MOO pueden fallar durante el proceso de optimización.

Los sistemas de aerogeneradores se caracterizan por señales periódicas como consecuencia de la rotación permanente de sus palas. Por lo tanto el uso de esas variables en las funciones objetivo es difícil porque las integrales no convergen. Una forma posible de superar esa limitación es evaluar las funciones en un período finito, o construir una señal por partes para que la función objetivo considere sólo algunos períodos de la señal original y sea cero para el resto.

IV. EVALUACIÓN DE FUNCIONES OBJETIVO

El siguiente paso en la optimización es la evaluación de las funciones objetivo, que se lleva a cabo mediante iteraciones. Los valores de las funciones objetivo se pueden calcular de dos formas diferentes: evaluación basada en modelos y basada en datos de simulación.

B. Evaluación de funciones objetivas basadas en modelos dinámicos

Las funciones objetivo están relacionadas normalmente con las variables de salida del sistema, cuyo comportamiento se representa por el modelo dinámico. Si el modelo es lineal y la función objetivo simple, es posible encontrar una fórmula para calcular la función objetivo.

C. Evaluación basada en datos de simulación

Cuando se tiene funciones objetivo complejas o funciones objetivo de orden fraccionario, resulta más difícil realizar una evaluación basada en modelos. Para estos casos existe un método alternativo que consiste en calcular las funciones objetivo numéricamente como parte de la simulación.

El beneficio que posee este procedimiento es que se pueden calcular casi todos los tipos de funciones objetivo.

Las desventajas son la necesidad de un tiempo largo de simulación; esto hace que debido a que la simulación debe terminar en un tiempo definido, los valores que se obtengan serán aproximados.

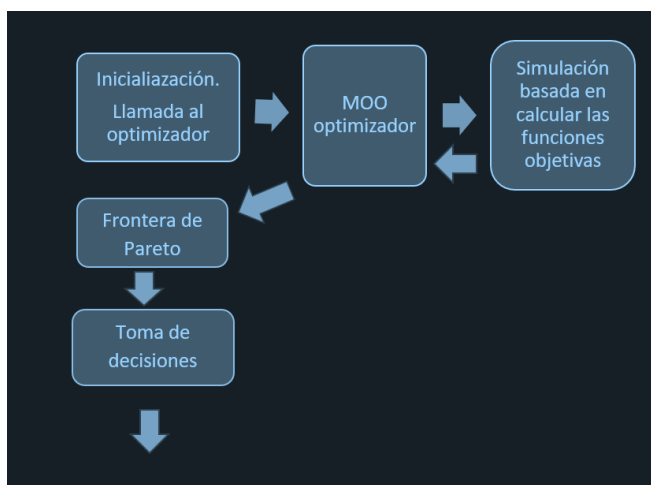


Fig. 3 : Esquema evaluación basada en datos de simulación.

En el esquema anterior, pueden verse las fases de la evaluación basada en datos de simulación. La etapa de mayor importancia, será la de simulación, en la que se irán cambiando valores y datos, hasta cumplir con el objetivo buscado. Las siguientes fases, como la determinación de la frontera de Pareto o la toma de decisiones, son similares a las evaluaciones anteriores.

V. TOMA DE DECISIONES

Una vez realizada la optimización, cuando se ha obtenido el frente de Pareto, todos esos puntos son soluciones válidas. Para seleccionar una solución es necesario llevar a cabo una serie de decisiones siguiendo criterios específicos para cada aplicación o diseño que se pretenda lograr.

Hay dos enfoques más comunes. Por un lado, utilizar criterios de control adicionales. La principal idea es introducir una segunda ronda de optimización con un espacio de búsqueda que es el conjunto de Pareto óptimo ya hallado, y aplicar una especificación particular del sistema de control que se debe satisfacerse como función objetivo. Por ejemplo, ancho de banda máximo, sobreimpulso mínimo, tiempo de establecimiento, etc.

El otro enfoque consiste en usar un compromiso entre criterios. Con este método no se necesita evaluar funciones objetivas suplementarias para seleccionar la solución. Esta técnica se puede implementar mediante negociación cooperativa.

Con este mecanismo se comienza con la distancia más corta entre el punto de utopía y la frontera de Pareto que se conoce como la solución de compromiso (CS). Los juegos de negociación ofrecen varias soluciones posibles. La distancia más corta se calcula como [1]:

$$J_{CS} = \arg \min \left[\sqrt{\sum_{j=1}^N (J_{ji} - J_j)^2} \right] \quad (5)$$

Donde J_1 es el punto ideal, y J_{1i} es el punto perteneciente a la frontera de Pareto, cuya distancia hacia el punto ideal es la más corta.

La solución de Kalai-Smorodinsky se define geoméricamente como el punto de intersección entre la línea recta que conecta el punto de amenaza con el punto de utopía y el frente de Pareto para problemas bidimensionales. Finalmente, la solución equitativa, propuesta por Nash, se define como:

J_{NS} = el punto máximo en J para el cual

$$J_i - J_i^* = J_j - J_j^* \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

El punto J_{NS} se convierte en el punto de intersección entre la frontera de Pareto y un rayo de 45° que pasa por el punto crítico, si el problema incluye sólo dos dimensiones.

En la siguiente figura, se puede observar los puntos J_{CS} y J_{NS} para su mejor comprensión.

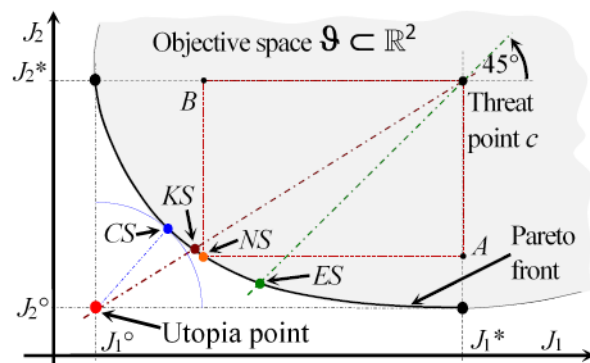


Fig. 4: Definición gráfica de puntos de Pareto

Donde CS y NS, son los puntos que se han definido anteriormente. Los puntos ES y KS, son otras soluciones en las que no se va a entrar en detalle en este trabajo.

VI. APLICACIÓN A TURBINAS EÓLICAS

Los aerogeneradores de tres palas son los más extendidos porque permiten la generación de potencia óptima a diferentes velocidades del viento. Los aerogeneradores pueden funcionar en varias regiones de operación en función de la velocidad del viento: arranque (I), carga parcial (II), transición (III), carga completa (IV) y corte (V). Se muestra la curva de potencia ideal de una turbina eólica en la Figura 5 [6].

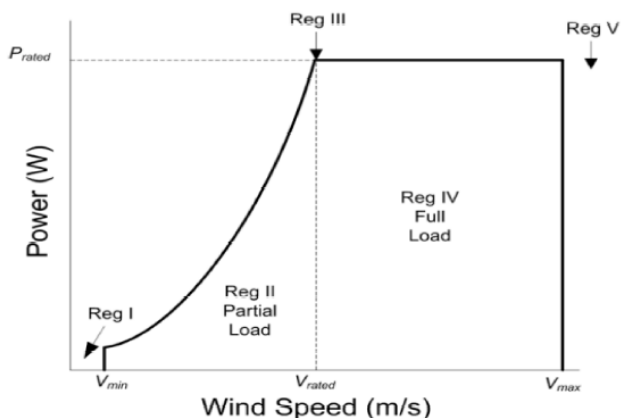


Fig. 5: Potencia del aerogenerador según la velocidad del viento

El control multiobjetivo que se va a aplicar se centra en la región IV (región de plena carga), donde se debe reducir el efecto de la alta velocidad del viento para evitar daños en el sistema. En este caso, es necesario mantener la potencia y la velocidad angular del generador en sus valores nominales. Los controladores actuarán variando el ángulo de inclinación de las palas para modificar la aerodinámica del aerogenerador, limitando la energía extraída del viento.

A. Funciones objetivo para turbinas eólicas.

El objetivo es conseguir maximizar la potencia las turbinas eólicas a plena carga, a la vez que se disminuyen las vibraciones producidas en las palas, por efecto de inercias que puedan surgir.

Con todo esto, las funciones objetivas que se proponen son las siguientes:

$$J_1 = \max(C_p), \quad J_2 = \min \int_{Rhub}^R m_i dr \quad (7)$$

J_1 es la función objetivo para maximizar la potencia, donde C_p es el coeficiente de potencia.

J_2 es la función objetivo para minimizar la masa producida por inercias y vibraciones en las palas de la turbina eólica. Donde m_i es la distribución de la masa radial de la pala de la turbina eólica, $Rhub$ y R , son el radio del cubo y la longitud de la pala respectivamente.

B. Técnica de optimización.

La selección del algoritmo de optimización apropiado, es una tarea crítica en cualquier problema de optimización de ingeniería, que se base en los atributos del espacio de diseño

y naturaleza del problema. Los resultados finales dependen del algoritmo en términos de precisión y local.

Los algoritmos metaheurísticos, son a menudo inspirados en la naturaleza, diseñados para reemplazar o ayudar a los solucionadores convencionales. En las últimas décadas, el progreso de la metaheurística y la optimización de turbinas eólicas ha crecido velozmente.

Los algoritmos genéticos son los más populares que se han aplicado en el diseño de este tipo de aerogeneradores [7; 8]. La razón es simple, en el caso de la optimización de la geometría de la hoja, hay una gran cantidad de variables de diseño, que son continuas (distribuciones de cuerda y torsion, paso de palas, etc) y discretas (familia de aspas, número de palas, etc) al mismo tiempo.

Los algoritmos genéticos son los algoritmos evolutivos más populares debido a su robustez y confiabilidad en los problemas de diseño de turbinas eólicas. Un algoritmo genético es un método de optimización que imita el principio de "supervivencia del más apto" de Darwin sobre una población de soluciones (individuos) que evoluciona de una generación a otra

C. Modelo matemático

El enfoque basado en modelos se utiliza en el estudio para la evaluación de las funciones objetivo. Por tanto, es necesario un modelo dinámico de la turbina eólica. Sin embargo, la turbina eólica es un sistema muy complejo y, por lo tanto, se considera un modelo simplificado que incluye la dinámica de rotación del tren de potencia y la dinámica de proa a popa de la torre.

Para poder elaborar un modelo dinámico, es necesario conocer los parámetros del problema a tratar, en este caso la turbina eólica.

Tabla 1: Parámetros de la turbina eólica

Parámetros	Variables	Valores	Unidades
Potencia nominal	P_0	20×10^6	W
Velocidad nominal rotor	ωr_0	0.7494	rad/s
Momento de inercia	J_r	2919659264	Kg.m ²
Momento inercia generador	J_g	7248.32	kg m ²
Amortiguación eje equivalente	Ddt	4.97×10^7	Nm/rad
Rigidez del eje equivalente	Kdt	6.94×10^9	Nm/(rad/s)
Peso de la torre	mt	1782947.0	kg
Amortiguación de la torre	ζt	5	%
Relación de la caja de cambios	nx	164	--
Eficiencia del generador	η_g	94.4	%

Bajo una aceleración constante, la energía cinética de un objeto con masa m y velocidad v se define como:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (8)$$

Esta definición de energía cinética, es para una masa constante, aunque hay que tener en cuenta que la masa no será constante, ya que el aire está en movimiento. La potencia del viento dada, teniendo en cuenta una masa variable, se define como:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v_w^2 \quad (9)$$

Siendo v_w la velocidad del viento.

El caudal másico $\frac{dm}{dt}$ viene dado por

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v_w \quad (10)$$

Donde A es el área o sección a través del cual pasa el viento con una densidad ρ .

La expresión de la potencia queda como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (11)$$

La potencia mecánica real P_w extraída por las palas del rotor en vatios es la diferencia entre las potencias eólicas aguas arriba y aguas abajo.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w (v_u^2 - v_d^2) \quad (12)$$

Operando la expresión anterior, se llega a:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \quad (13)$$

Donde C_p es $\frac{(1 + \frac{v_d}{v_u})(1 - (\frac{v_d}{v_u})^2)}{2}$

La expresión de C_p en la ecuación (13) es la fracción de energía eólica aguas arriba capturadas por las palas del rotor. C_p a menudo se llama el límite de Betz en honor al físico alemán Albert Betz, quien lo resolvió en 1919 [9].

Donde v_u es la velocidad del viento aguas arriba a la entrada de las palas del rotor en m/s v_d es la velocidad del viento aguas abajo a la salida de las palas del rotor en m/s.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se presenta una primera aproximación al control multiobjetivo aplicado a turbinas eólicas.

Se ha hecho una breve descripción de la optimización multiobjetivo, y se examina su posible aplicación, evaluando la selección de funciones objetivo y el proceso de toma de decisiones. Los algoritmos que se presentan de MOO se estudian desde el punto de vista del control utilizando como ejemplo los sistemas eólicos.

Se ha realizado una presentación sobre la aplicación del método MOO a turbinas eólicas. Para ello, se han presentado

funciones objetivas, se ha realizado un análisis del método a utilizar para optimizar, así como una presentación del modelo matemático.

Como trabajos futuros se propone aplicar la optimización a un modelo de turbina.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con financiación parcial del Proyecto MCI AEI/FEDER RTI2018-094902-B-C21, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

REFERENCIAS

- [1] Peitz, S., & Dellnitz, M. (2018). A survey of recent trends in multiobjective optimal control—surrogate models, feedback control and objective reduction. *Mathematical and Computational Applications*, 23(2), 30.
- [2] Saini, N., & Saha, S. (2021). Multi-objective optimization techniques: A survey of the state-of-the-art and applications. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(10), 2319-2335.
- [3] Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(4), 327-335.
- [4] Emmerich, M. T., & Deutz, A. H. (2018). A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. *Natural computing*, 17(3), 585-609.
- [5] Gambier, A., & Badreddin, E. (2007, October). Multi-objective optimal control: An overview. In 2007 IEEE international conference on control applications (pp. 170-175). IEEE.
- [6] Lara, M., Garrido, J., Ruz, M. L., & Vázquez, F. (2021). Adaptive pitch controller of a large-scale wind turbine using multi-objective optimization. *Applied Sciences*, 11(6), 2844.
- [7] Almenara Ahijón, J., Santos, M., & Tomás-Rodríguez, M. (2019). Optimización heurística con criterios de error de control TMD en turbinas marinas flotantes. In XL Jornadas de Automática (pp. 1-7). Universidade da Coruña.
- [8] Serrano-Barreto, C. L., Santos, M., & Sierra García, J. E. (2021). Controlador de pitch híbrido optimizado con algoritmo genético para aerogeneradores flotantes. In XLII Jornadas de Automática (pp. 197-202). Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- [9] Tomás-Rodríguez, M., & Santos, M. (2019). Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(4), 381-390.

Interfaz Gráfica para Adquisición de Datos y Control para un Modelo a Escala de una Turbina Marina Flotante

1st Carlos Serrano
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid
Madrid, España
carser06@ucm.es

1st Adrian Estevez
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid
Madrid, España
adrestev@ucm.es

Abstract— The analysis of the control variables of offshore wind turbines is essential to make improvements in control, and analyze the dynamics and loads to which these are subjected. Therefore, for this work a graphical interface is designed for the control and data acquisition of a scale model of a floating wind turbine, this interface shows the data read by the physical sensors of the turbine, such as the accelerometer and gyroscope as well as allowing to choose the angle of attack of the blades and to know the wind speed. The design of this interface in conjunction with the use of the scale model allows to determine problems that could be encountered at the time of implementing a real turbine.

Resumen— El análisis de las variables de control de las turbinas eólicas marina es fundamental para poder realizar mejoras en materia de control, y analizar las dinámicas y las cargas a las cuales estas están sometidas. Por ello para este trabajo se diseña una interfaz gráfica para el control y adquisición de datos de un modelo a escala de una turbina eólica flotante, esta interfaz muestra los datos leído por los sensores físicos de la turbina, como el acelerómetro y giroscopio además de permitir escoger el ángulo de ataque de las palas y conocer la velocidad del viento. El diseño de esta esta interfaz en conjunto con la utilización del modelo a escala permiten determinar problemas que se podrían tener al momento de implantar una turbina real.

Keywords—control, GUI, turbine, FOWT, data, measures.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eólica cada vez más adquiere un rol fundamental debido a que es limpia y no deja residuos de carbono, además forma parte del grupo de las energías renovables [1], [2]. La energía eólica se separa en dos vertientes, la primera son los aerogeneradores terrestres, los cuales poseen una serie de limitaciones, como lo son ruido sónico, ruido visual, limitaciones debido a la orografía del terreno, etc [2], [3]. Sin embargo, son una tecnología muy madura y aprovechable. Por otro lado, tenemos a los aerogeneradores marinos conocidos como aerogeneradores offshore, dentro de los cuales encontramos los que están fijos en el fondo marino, también conocidos como botton-fixed. Estos aerogeneradores se pueden instalar hasta una profundidad máxima de 50 metros. Por ultimo tenemos a los aerogeneradores flotantes los cuales presentan una serie de ventajas, como que no poseen restricciones de espacio, afectan significativamente menos a la fauna, además al estar alejados de las poblaciones, no contribuyen con el ruido visual y sonoro.

Los aerogeneradores marinos flotantes emergen como una solución a los problemas que poseen los aerogeneradores

terrestres[4], [5], sin embargo, esta nueva tecnología presenta una serie de nuevos desafíos, estos se encuentran sometidos a condiciones mucho climáticas severas, como fuertes vientos, olas, corrientes marinas, hielo, etc. Además, son sistemas masivos que son altamente no lineales, que sumado a las perturbaciones del ambiente se vuelven muy complicados de controlar. Estas perturbaciones generan oscilaciones estructurales que pueden afectar a la turbina generando cargas sobre esta y afectando su rendimiento [6]–[8].

Con el objetivo de poder estudiar y analizar estos efectos cuales están sometidos estos aerogeneradores, además de poder validar, y desarrollar métodos para el control de los mismos se construye un modelo escala 1/100 llamado LowScaMod, el cual nos permitirá trabajar con un pequeño túnel de viento y generador de olas disponibles en el laboratorio. Es importante aclarar que trabajar en estas escalas no es relista respecto a un modelo comercial, pero permite resolver problemas que pueden aparecer en un a implementación real.

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño la implementación de una interfaz gráfica que permita poder visualizar el comportamiento de las variables estudiadas bajo distintas condiciones.

El artículo tiene la siguiente estructura: La sección 2 describe el enfoque del modelo de turbina FOWT planteado. La sección 3 la interfaz gráfica para monitorizar el modelo. Finalmente, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

II. MODELO ESCALA TURBINA EÓLICA

La potencia ideal generada por la turbina se determina mediante la siguiente ecuación [4]:

$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (1)$$

Donde P es la potencia (W), ρ es la densidad del aire (Kg/m³), A es el área barrida por las palas (m²) y v es la velocidad del viento (m/s).

Pero, la energía máxima que se puede extraer del viento viene determinada por el límite de Betz [9], que es el 59% de la energía eólica total. Para determinar la energía real que puede generar una turbina, es necesario conocer el coeficiente de potencia C_p , que es específico para cada tipo de turbina. El coeficiente C_p modifica la potencia de salida mediante la siguiente relación

$$P = 0.5\rho Av^3 C_p(\theta, \lambda) \quad (2)$$

Es decir, C_p depende del ángulo de la pala θ (rad) y de la relación de velocidad de punta λ , y es específico para cada turbina. Caracterizando la turbina se obtendrá el valor del coeficiente de potencia para este modelo en un futuro.

Por otro lado, se tiene que el problema de control que aquí se aborda es multiobjetivo y se aplica a un sistema complejo, no lineal y multivariable [10]. El objetivo final es atenuar las oscilaciones de la turbina que provocan el deterioro y la fatiga de la estructura. Estas vibraciones son causadas principalmente por las perturbaciones introducidas por el oleaje y el viento. Para ello, es necesario conocer cómo afectan estas perturbaciones a la dinámica traslacional y rotacional de la turbina flotante.

Algunas de las señales que describen la dinámica del sistema pueden medirse mediante sensores físicos, como: acelerómetros, girómetros y magnetómetros. Las señales obtenidas deben ser procesadas, ya que los sensores no son ideales y contienen ruido y sesgo. Además, es necesario estimar otras señales que no son directamente medibles. El controlador, siguiendo las órdenes de un supervisor, debe utilizar estas señales para generar órdenes de control que se envían a los actuadores mecánicos a través de drivers. Los actuadores deben generar fuerzas o pares sobre el FOWT que contrarresten las oscilaciones generadas por las perturbaciones. El siguiente diagrama muestra este flujo de información.

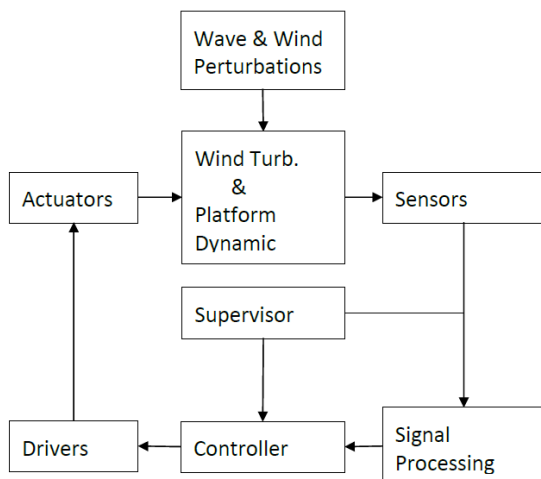


Fig. 1. Flujo de información.

En un sistema simulado, la dinámica se describe mediante las ecuaciones diferenciales que representan los movimientos de traslación y rotación, en los 3 ejes de coordenadas, sometidos a las restricciones del amarre [11]. En nuestro caso, no es necesario utilizar un modelo matemático, con toda su inexactitud e incertidumbre inherentes, porque esta parte será representada físicamente por el prototipo LowScaMod.

En un modelo a escala todo sucede mucho más rápido que en el sistema real [12]. Las oscilaciones en el sistema real son bastante lentas, con una frecuencia natural de oscilación de alrededor de 0,1 Hz. Así, es posible trabajar con un periodo de control y muestreo de 1 segundo. Como los periodos de tiempo se escalan proporcionalmente para el modelo físico, la réplica a escala debe trabajar 10 veces más rápido, con un periodo de control y muestreo de 0,1 s.

$$T_m = \frac{T_r}{\sqrt{\text{scale}}} = \frac{1\text{s}}{\sqrt{100}} = 0.1\text{s} \quad (3)$$

Se trata de una limitación de tiempo bastante exigente para el hardware del sistema de control. Éste debe medir, calcular y actuar con una frecuencia 10 veces superior a la del sistema real.

En el prototipo propuesto en la Figura 2, se utiliza un microcontrolador de 32 bits con memoria flash como sistema informático para almacenar el programa de forma no volátil. Este tipo de hardware es auto-arrancable, con múltiples puertos y estándares de E/S para comunicarse con sensores y actuadores. Este hardware ejecuta un software que es capaz de realizar todos los cálculos necesarios para controlar el sistema. Se comunica con un ordenador personal desde el que se puede supervisar, controlar y comandar todo el sistema LowScaMod.

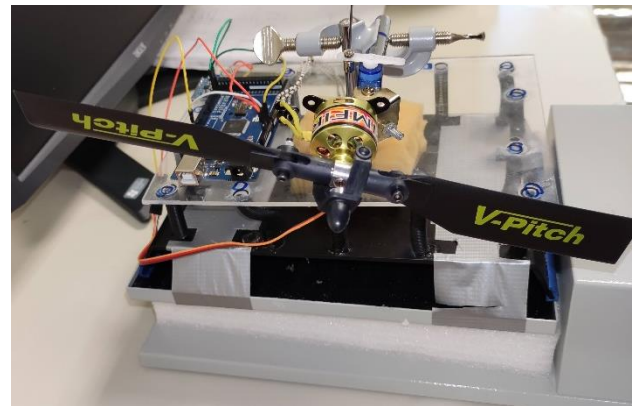


Fig. 2. Modelo a escala de turbina eólica marina flotante LowScaMod.

Este hardware embebido implementa dos lazos de control, un lazo exterior para controlar la velocidad del generador y la potencia generada por la turbina, y un lazo interior para reducir las oscilaciones del LowScaMod.

Para medir las oscilaciones del LowScaMod se utiliza una IMU de estado sólido que se comunica con el microcontrolador por I2C. Este tipo de tecnología es barata, ligera y energéticamente eficiente, pero es mucho menos precisa que la utilizada en los sistemas aeroespaciales. Por ello, es necesario pre procesar las señales y resolver los problemas de ruido, sesgo y errores de medición.

Como actuador en este bucle, se utiliza un servomotor que modifica el paso de las palas. Este servomotor está controlado por un driver PWM disponible en el microcontrolador.

Los convertidores A/D del microcontrolador se utilizan junto con circuitos de acondicionamiento de señales para registrar otras señales de interés, como la potencia generada o la velocidad angular del rotor. Es necesario procesar estas señales registradas para extraer de ellas la información necesaria.

III. INTERFAZ GRÁFICA (GUI)

La interfaz implementada está pensada para poder monitorear las variables medidas con sensores físicos del acelerómetro y giroscopio extraídas de la IMU. Actualmente solo trabaja con datos offline en el formato Excel (.xlsx) pero está pensado para un futuro que extraiga los datos en tiempo real y pueda controlar el funcionamiento de la turbina como un sistema Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA).



Fig. 3. Interfaz gráfica.

En la Figura 3 se observa la interfaz gráfica con la muestra de los datos (1), en estas se pueden ver las gráficas del acelerómetro y del giroscopio en cada uno de los 3 ejes espaciales.

Abajo tenemos los parámetros que configuran el experimento, en las que podrás cambiar qué posición de las palas seleccionar (Theta) y la velocidad del viento a través de un voltaje (2). Además, se dispone de los botones para confirmar los valores e iniciar el monitoreo, para detener la toma de datos y para cerrar la interfaz (3).

El voltaje de la interfaz se corresponde con el voltaje establecido en el variador que controla la velocidad de rotación de los ventiladores del túnel de viento, cada voltaje se corresponde una velocidad de viento (ver Tabla 1). Cuando la interfaz tome los datos en tiempo real esta información será suministrada por el sistema, ya sea midiendo con un anemómetro o detectando la tensión en el variador.

TABLA I. EQUIVALENCIA VOLTAJE VS VELOCIDAD DEL VIENTO

Voltaje (V)	Velocidad de viento (m/s)
130	8.5
140	9.3
150	10.1
160	11
170	11.6
180	12.4
190	13.1
200	13.8

El ángulo de cabeceo de la pala se establece a través del control de un servomotor, actualmente se definieron 6 ángulos fijos, posteriormente se tendrá un modo automático donde el controlador implementado controlará el ángulo de las palas de la turbina.

Los datos son muestreados a una frecuencia de 10 Hz y graficados con la misma frecuencia.

Para la implementación de la interfaz se ha usado el lenguaje de programación Python y el paquete PySimpleGUI para poder crear la ventana y sus componentes. Para la extracción de datos de los excel se ha usado el módulo openpyxl y para dibujar las gráficas se usó matplotlib.pyplot y matplotlib.backends.backend_tkagg.

Para poder realizar la adquisición de datos en tiempo real se procederá a establecer una puerta de comunicación entre Matlab y Python. En el primero se ejecutará todos los algoritmos relacionados con el control y automatización de la turbina, y en el segundo se encontrarán todos los algoritmos para adquisición de datos y su impresión a través de la interfaz.

El análisis de los datos extraídos por la interfaz, permitirá implementar estrategias de control del ángulo de las palas que mitiguen los efectos de las de las vibraciones introducidos por las perturbaciones del viento y las olas, así como incluso las introducidas por el efecto de las mismas acciones de control.

IV. CONCLUSIONES

Los modelos físicos de sistemas complejos permiten realizar pruebas mucho más cercanas al sistema real que con los modelos computacionales (sólo de simulación). Estos modelos incluyen la mayoría de las no linealidades del dispositivo real. Esto permite, por un lado, anticipar y predecir los problemas que pueden surgir y que pueden provenir del procesamiento de las señales, las mediciones de los sensores, etc. Por otro lado, aumenta la confianza y fiabilidad en los algoritmos de control que se diseñan y proponen para el sistema real, ya que se prueban en la réplica. Además, el hecho de trabajar con pequeños prototipos facilita la evaluación de diferentes configuraciones de parques eólicos.

Por ello es de vital importancia el desarrollo de esta interfaz que permita el control y adquisición de datos, para monitorizar de manera eficiente el comportamiento de todas las variables asociadas al funcionamiento de la turbina, y de esta forma poder determinar mejores estrategias de control.

V. REFERENCIAS

- [1] R. M. Aguilar, J. M. Torres, and C. A. Martín, "Aprendizaje automático en la identificación de sistemas. Un caso de estudio en la predicción de la generación eléctrica de un parque eólico," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, no. 1, pp. 114–127, 2019.
- [2] I. L. R. Gomes, R. Melício, V. M. F. Mendes, and H. M. I. Pousinho, "Wind power with energy storage arbitrage in day-ahead market by a stochastic MILP approach," *Log. J. IGPL*, vol. 28, no. 4, pp. 570–582, 2020.
- [3] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system," *Renew. energy*, vol. 57, pp. 587–593, 2013.
- [4] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, 2012, doi: 10.1016/j.riai.2012.05.010.
- [5] P. M. Rubio, J. F. Quijano, P. Z. López, J. J. F. Lozano, A. G. Cerezo, and J. O. Casanova, "Control inteligente para mejorar el rendimiento de una plataforma semisumergible híbrida con aerogeneradores y convertidores de oleaje: sistema de control borroso para la turbina," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 480–491, 2019.
- [6] C. Kim, E. Muljadi, and C. C. Chung, "Coordinated control of wind turbine and energy storage system for reducing wind power fluctuation," *Energies*, vol. 11,

no. 1, p. 52, 2018.

- [7] E. Quiles, E. García, J. Cervera, and J. Vives, “Development of a Test Bench for Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 06, pp. 907–913, 2019.
- [8] J. E. Sierra-García and M. Santos, “Performance Analysis of a Wind Turbine Pitch Neurocontroller with Unsupervised Learning,” *Complexity*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/4681767.
- [9] Z. Civelek, M. Lüy, E. Çam, and H. Mamur, “A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation,” *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 708–717, 2017.
- [10] J. E. Sierra-García and M. Santos, “Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 18, no. 4, p. 327, 2021, doi: 10.4995/riai.2021.16111.
- [11] D. Villoslada, M. Santos, and M. Tomás-Rodríguez, “General methodology for the identification of reduced dynamic models of barge-type floating wind turbines,” *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/en14133902.
- [12] R. López, M. Santos, O. Polo, and S. Esteban, “Experimenting a fuzzy controller on a fast ferry,” in *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, 2002, vol. 2, pp. 1082–1087.

Primera Aproximación al Control Estructural Semiactivo de Turbinas Eólicas Marinas Flotantes

A. Ramírez
Computer Sciences Faculty
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, Spain
aleram06@ucm.es

M. Santos
Institute of Knowledge Technology
University Complutense of Madrid
28040-Madrid, Spain
msantos@ucm.es
0000-0003-1993-8368

M. Tomás-Rodríguez
City, University of London
London EC1V 0HB
United Kingdom
María.Tomas-Rodriguez1@city.ac.uk
0000-0001-9630-9579

Abstract — Floating offshore wind turbines present advantages over fixed wind turbines, but they are also exposed to environmental loads which generates tower vibrations that compromise its serviceability and lifetime. In this paper, a theoretical simplified model of a barge-type floating offshore wind turbine is defined and validated. This model is used to study the effect of a semiactive structural control device. The parameters of this Tuned Mass Damper (TMD) are tuned based on gain control scheduling and applying genetic algorithms. The proposed semiactive structural control improves the dynamic response of the system and presents better results than a passive TMD, mitigating tower vibrations.

Keywords—wind energy, floating offshore wind turbine, structural control, semiactive, tuned mass damper.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la energía eólica ha crecido de manera constante durante las últimas cuatro décadas, alcanzado una capacidad instalada de 709 GW a principios de 2020 y con previsiones de alcanzar los 5,9 TW en 2050, con 1,7 TW producidos por turbinas offshore, de los cuales 264 GW procederán de proyectos eólicos marinos flotantes [1]

Aunque con ventajas frente a las turbinas eólicas marinas fijas, las turbinas eólicas marinas flotantes presentan grandes desafíos. Entre otros, las turbinas flotantes están sujetas a fuertes vibraciones indeseadas causadas por cargas ambientales debidas al viento, las olas y las mareas, y estas vibraciones excesivas deben minimizarse para aumentar la capacidad de servicio y la vida útil del sistema.

En otros trabajos se han encontrado incluso cargas de fatiga inaceptables en la dirección del movimiento de cabeceo de la torre. Existe en la literatura diversas investigaciones utilizando el control estructural, tanto activo como pasivo, para aliviar esta carga [2] [3].

En este trabajo se van a aplicar los dispositivos de control estructural conocidos como Tuned Mass Dampers (TMD), que están formados por una masa, un muelle y una amortiguación. En concreto se propone un control estructural semiactivo, variando las constantes de rigidez y amortiguamiento del dispositivo de control para atenuar la respuesta dinámica del sistema en comparación con la aplicación de un control estructural pasivo.

El artículo está estructurado como sigue. En la Sección II se desarrolla y valida un modelo simplificado de la dinámica de la turbina flotante. En la Sección III se describe el control

estructural y se aplican algoritmos genéticos para sintonizar un TMD pasivo y otro semiactivo y se comparan los resultados. El trabajo termina con las conclusiones y trabajos futuros.

II. MODELO SIMPLIFICADO

A. Turbina eólica

El modelo de aerogenerador utilizado para el análisis tanto en FAST como en Matlab/Simulink es la turbina eólica NREL 5 MW. Se trata de un aerogenerador de tres palas, de eje horizontal, con un diámetro de rotor de 126 m y la altura de la góndola es de 90 m. Este modelo de turbina es ampliamente utilizado por muchos otros investigadores y se considera un benchmark.

La turbina flotante es de tipo plataforma (barge) y se ha tomado como referencia la de ITI. Esta es una plataforma de soporte flotante con forma cuadrada, de dimensiones 40 m x 40 m x 10 m y ocho líneas de anclaje [4].

B. Control estructural

El control estructural de la turbina se suele instalar en la góndola, donde se incorpora un amortiguador de masa sintonizada o TMD por sus siglas en inglés. Este TMD consiste en un sistema compuesto por una masa, con movimiento relativo a la propia góndola, la cual está unida a la estructura mediante un amortiguador y un resorte (Figura 1). Este sistema absorbe energía del movimiento de cabeceo de la torre, reduciendo las vibraciones y el desplazamiento de su extremo superior.

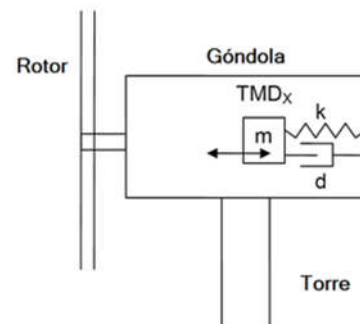


Figura 1 Representación gráfica del TMD

C. Modelo teórico

Para investigar la dinámica del sistema estructural de la turbina eólica se utiliza un modelo simplificado de la turbina que limita los grados de libertad al plano que define el

movimiento de cabeceo de la torre en la dirección frontal (fore-aft). El propósito de este modelo es demostrar la efectividad del control semiactivo del desplazamiento de la torre mediante el ajuste adaptativo de los parámetros del TMD. Por lo tanto, no se considera la acción externa del viento o de las olas. El modelo de grados de libertad limitados consiste en un sistema de masas que representan la plataforma, la torre y el amortiguador de masa sintonizada.

Este modelo no considera ningún otro componente estructural como las palas, porque el objetivo principal de esta investigación es reducir las cargas de fatiga de la torre, y se ha demostrado que la dinámica de las palas y otros componentes tienen poco efecto en fatiga de la torre en comparación con los efectos de los tres grados de libertad utilizados en el modelo simplificado [5] [6].

La plataforma y la torre tienen un único grado de libertad rotatorio, y la masa del TMD tiene un solo grado de libertad, que se corresponde con el movimiento de traslación de la masa en el plano de cabeceo. La plataforma está conectada a un resorte giratorio y un amortiguador que representa la fuerza de restauración hidrostática y la amortiguación del agua. La torre también tiene un resorte giratorio y un amortiguador que representan la rigidez y la amortiguación estructurales.

Para desarrollar el modelo se obtienen las ecuaciones de los tres grados de libertad. Todas las ecuaciones se han linealizado para ángulos pequeños, usando $\sin(\theta) = \theta$, $\tan(\theta) = \theta$ y $\cos(\theta) = 1$. Esta linealización es apropiada porque los ángulos máximos en trabajos anteriores con la plataforma en condiciones normales de operación son menores de 10° , y los ángulos usados para las simulaciones en este documento son menores de 5° .

La ecuación característica de la plataforma es ecuación (1), la ecuación (2) describe la dinámica de la torre y la ecuación (3) el TMD

$$I_b \ddot{\theta}_b = -d_b \dot{\theta}_b - k_b \theta_b - m_b g R_b \theta_b + k_t (\theta_t + \theta_b) + d_t (\dot{\theta}_t + \dot{\theta}_b) \quad (1)$$

$$I_t \ddot{\theta}_t = m_t g R_t \theta_t - k_t (\theta_t - \theta_b) - d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_b) - k_{TMD} R_{TMD} (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) - d_{TMD} R_{TMD} (R_{TMD} \dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}) - m_{TMD} g (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) \quad (2)$$

$$m_{TMD} \ddot{x}_{TMD} = k_{TMD} (R_{TMD} \theta_t - x_{TMD}) + d_{TMD} (R_{TMD} \dot{\theta}_t - \dot{x}_{TMD}) + m_{TMD} g \theta_t \quad (3)$$

En las ecuaciones (1) - (3), los términos I representan la inercia rotacional, los términos k son rigideces rotacionales o lineales, y los términos d son constantes de amortiguamiento rotacional o lineal. Los términos R representan distancias, R_t es la distancia desde el punto pivote de la torre al centro de masa de la torre, R_b es la distancia desde el centro de masa de la plataforma al punto pivote, y R_{TMD} es la distancia desde el centro de masas de la masa del TMD hasta el punto pivote. Los subíndices b, t, y TMD se refieren a la plataforma, la torre y el amortiguador de masa sintonizada, respectivamente.

D. Identificación

A partir de las ecuaciones características del modelo teórico se construye un modelo de espacio de estados. Las constantes de resorte, amortiguación e inercia se pueden identificar comparando las salidas del modelo de espacio de estado con las salidas del modelo de alta fidelidad FAST (software de NREL) utilizando entradas idénticas. Este proceso se realiza mediante algoritmos de identificación. La precisión de los resultados obtenidos puede variar en función del algoritmo seleccionado, las condiciones iniciales y el tiempo de simulación.

En este trabajo se han utilizado los parámetros identificados en [7], que han sido obtenidos mediante el algoritmo Levenberg–Marquardt, con una inclinación inicial de la plataforma de 3° , un tiempo de simulación de 100 segundos y sin TMD (Tabla 1).

Tabla 1 Parámetros del modelo simplificado [7]

Parámetros identificados para el modelo simplificado	
k_t (N/m)	1.4635×10^{10}
k_b (N/m)	2.0016×10^9
d_t (Ns/m)	2.5415×10^7
d_b (Ns/m)	5.6431×10^7
I_t (kgm ²)	3.4523×10^9
I_b (kgm ²)	2.1613×10^9

El resto de los parámetros son conocidos y han sido extraídos de [6]

E. Validación del modelo

Para la validación del modelo teórico, se comparan los resultados obtenidos mediante FAST y el modelo simplificado descrito e identificado anteriormente para una simulación de 100 segundos, partiendo de una inclinación inicial de la plataforma de 5° e incluyendo la acción del TMD, con una masa de 20000kg, coeficiente amortiguamiento 9000 Ns/m y una rigidez del resorte de 5000 N/m. Esta configuración del TMD es la utilizada por Lackner y Rotea en [3].

En la Figura 2 se muestra el resultado de ambas simulaciones. Se puede apreciar como en la primera parte de la simulación el modelo simplificado se ajusta al usado como referencia, aunque con un pequeño error que va aumentando ligeramente.

La media del error absoluto del desplazamiento del extremo de la torre (TTDspFA) es de 0.042, considerándose aceptable.

III. CONTROL ESTRUCTURAL

En el presente estudio se presentan dos tipos de control estructural, ambos basados en un amortiguador de masa sintonizada y su capacidad para absorber energía del movimiento de la torre y reducir los desplazamientos y vibraciones de la turbina.

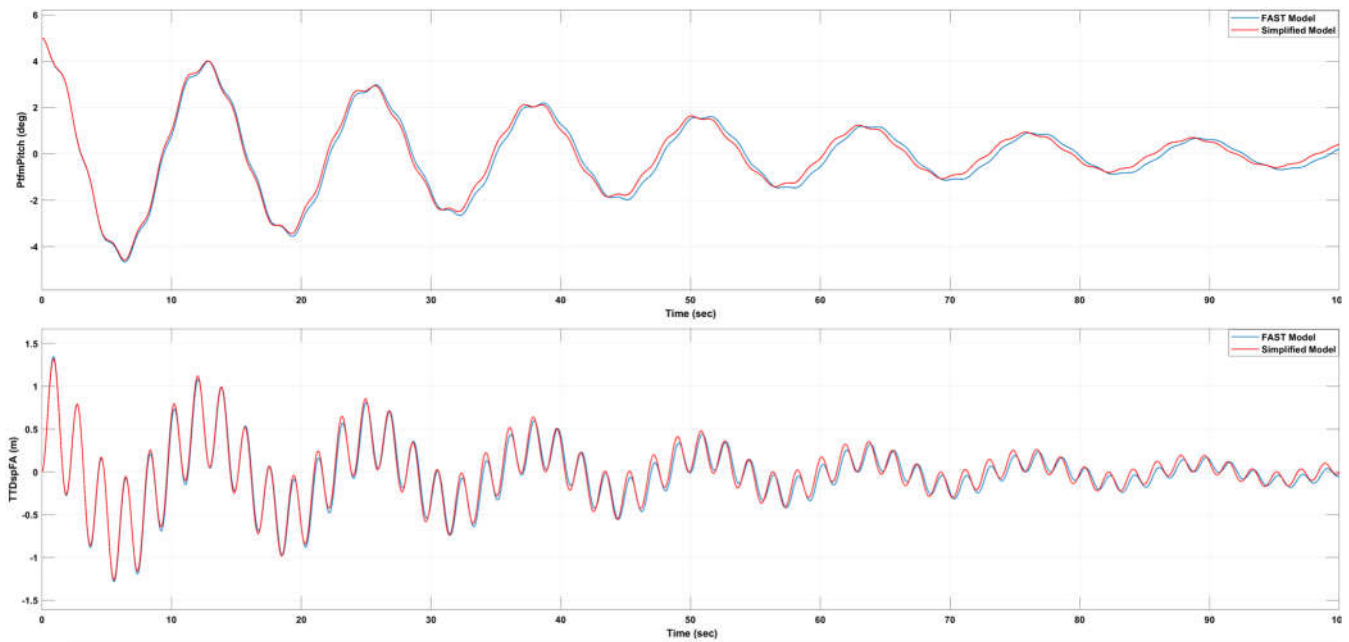


Figura 2 Validación del modelo simplificado

Por un lado, se presenta un control pasivo. En esta estrategia de control los parámetros del TMD son optimizados mediante algoritmos genéticos y permanecen constantes durante la duración de la simulación.

Por otro lado, se estudia un control TMD semiactivo, donde sus parámetros son previamente optimizados en función del desplazamiento del extremo superior de la torre. Durante la simulación, estos parámetros se van adaptando al movimiento de la torre aplicando un sistema de ganancia programada.

A. Control Estructural Pasivo

Se ha realizado un estudio de los parámetros del TMD con el fin de encontrar su configuración óptima.

Con el ánimo de poder comparar los resultados obtenidos con trabajos anteriores, el tamaño de la masa se ha fijado en 20000 kg [3]. Por otro lado, la constante de rigidez y amortiguamiento del TMD se han optimizado mediante la herramienta de algoritmos genéticos del software de cálculo Matlab.

La función de aptitud elegida para determinar la idoneidad de los parámetros es la desviación estándar del desplazamiento del extremo superior de la torre (Fore-Aft Tower Top Displacement), σ_{TTDFA} .

En el proceso de optimización se han ejecutados simulaciones de 100 segundos, partiendo de una inclinación de la plataforma de 5 grados y un desplazamiento nulo, tanto del extremo de la torre como de la masa del TMD.

Una vez definidas las condiciones iniciales y la función de coste, se ha configurado el algoritmo genético usando los parámetros mostrados en la Tabla 2.

Los valores de k_{TMD} y c_{TMD} obtenidos como resultado de la optimización son 4868 (N/m) y 2419 (Ns/m) respectivamente.

Tabla 2 Configuración del algoritmo genético

Configuración del algoritmo genético	
Parámetro	Valor
Población (no. individuos)	75
Rango inicial [min; max]	[3000 1000; 7000 10000]
Selección	Estocástica y uniforme
Reproducción	0,05*Población
Probabilidad de Mutación	0,01
Cruce	Disperso
Condición de parada	Cambio medio del valor de la función de coste inferior a 10^{-6} durante 15 generaciones

En la Figura 3 se muestra una simulación con la configuración utilizada para la optimización, sin TMD y con TMD utilizando los parámetros optimizados.

El valor de la desviación estándar del desplazamiento del extremo superior de la torre (σ_{TTDFA}) se reduce notablemente de 0,487 a 0,317 con los parámetros optimizados, lo que supone una reducción del 35%.

B. Control estructural semiactivo

En este apartado se ha hecho un estudio de la influencia del desplazamiento del extremo superior de la torre en la elección de los parámetros óptimos del TMD. En la Figura 3 podemos apreciar cómo la amplitud del movimiento del extremo superior de la torre varía, con desplazamientos superiores a un metro al inicio e inferiores a 0,2 metros al final de la simulación. En ensayos de prueba se comprobó que los parámetros óptimos del TMD varían en función del tiempo de simulación. Durante los primeros segundos de la simulación tenemos desplazamientos amplios que resultan en

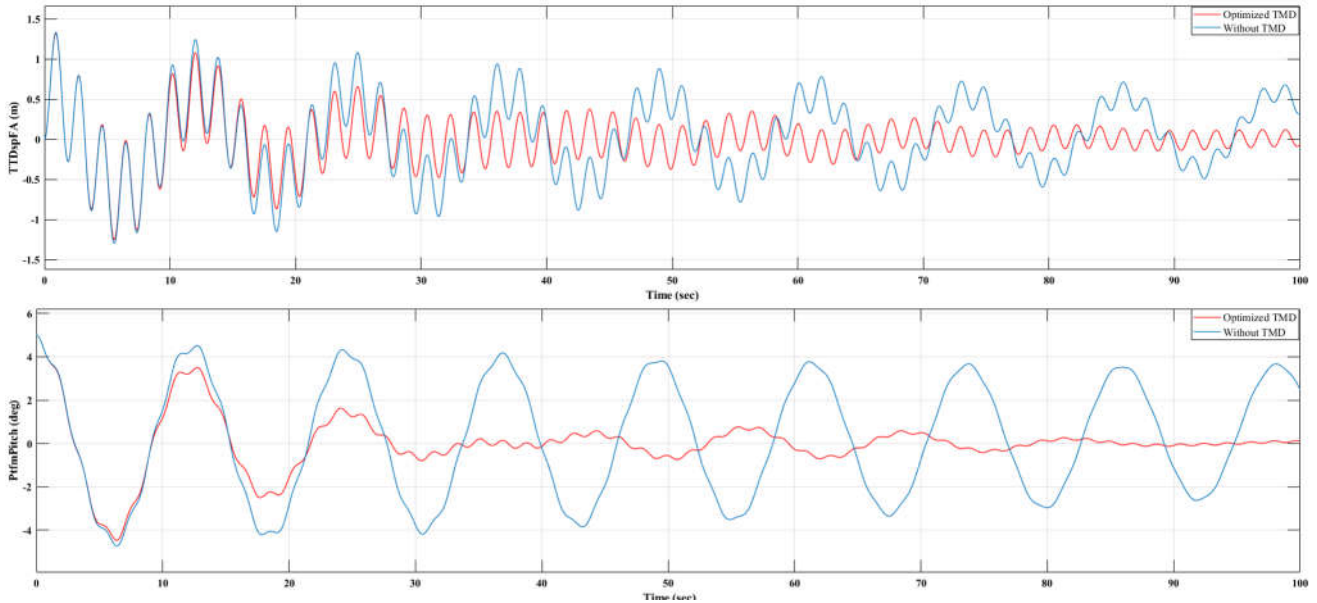


Figura 3 Simulación del movimiento en caída libre de la turbina sin TMD y con TMD pasivo

ciertos parámetros óptimos del TMD que no se corresponden con los valores óptimos para desplazamientos menores.

Tomando lo descrito anteriormente como premisa, se ha dividido la optimización del sistema en tres tramos iguales. De forma que se han encontrado los parámetros óptimos para desplazamientos con desviaciones estándar:

- Tramo 1: $\sigma_{TTDFA} < \frac{1}{3} * \sigma_{TTDFA MAX}$
- Tramo 2: $\frac{1}{3} * \sigma_{TTDFA MAX} \leq \sigma_{TTDFA} < \frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA MAX}$
- Tramo 3: $\frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA MAX} \leq \sigma_{TTDFA}$

Cabe mencionar que la optimización se ha realizado de forma separada para cada tramo, suponiendo que la elección de los parámetros óptimos para un tramo no influye en el proceso de optimización del resto de tramos.

En este estudio se ha tomado el mismo tamaño de masa del TMD y la misma configuración de simulación, caída libre desde 5° de inclinación de la plataforma y 100 segundos. Además, se ha utilizado la misma configuración del algoritmo genética mostrada en la Tabla 3, con excepción del rango de la población inicial que se amplió a [500 500; 20000 20000]. Esta ampliación fue necesaria tras advertir que usando rangos iniciales reducidos se corre el riesgo de convergencia en mínimos locales.

A continuación, se muestran los valores óptimos de k_{TMD} y d_{TMD} obtenidos para cada tramo (Tabla 3).

Tabla 3 Optimización de los parámetros del TMD a tramos

Optimización de los parámetros del TMD a tramos		
Tramo	k_{TMD} (N/m)	d_{TMD} (Ns/m)
1	19517	970
2	19477	503
3	4543	2643

Se puede observar que los resultados obtenidos para amplitudes inferiores (tramo 1 y 2) difieren

considerablemente de los obtenidos para amplitudes grandes (tramo 3). También se comprueba como los parámetros óptimos del tercer tramo se asemejan a los obtenidos en la optimización del TMD sin tramos. Lo que indica, como es de esperar, que el esfuerzo de optimización se concentra en reducir los desplazamientos de mayor amplitud.

Tras estudiar los resultados anteriores se optó por extender la optimización en la misma línea, dividiendo el tercer tramo a su vez en dos tramos iguales:

- Tramo 3-1 $\frac{2}{3} * \sigma_{TTDFA MAX} \leq \sigma_{TTDFA} < \frac{2,5}{3} * \sigma_{TTDFA MAX}$
- Tramo 3-2 $\frac{2,5}{3} * \sigma_{TTDFA MAX} \leq \sigma_{TTDFA}$

Obteniendo los siguientes resultados (Tabla 4).

Tabla 4 Optimización de los parámetros del TMD. Tramos adicionales

Optimización de los parámetros del TMD a tramos		
Tramo	k_{TMD} (N/m)	d_{TMD} (Ns/m)
3-1	4420	568
3-2	2217	5348

En la Figura 4 se muestra los resultados de la simulación donde se puede comparar el desplazamiento del extremo superior de la torre y la inclinación de la plataforma con control pasivo y semiactivo.

Con el control semiactivo se consigue reducir el desplazamiento del extremo superior de la torre (σ_{TTDFA}) un 16% con respecto al control pasivo. Obteniendo una desviación estándar de 0,266 frente a 0,317 obtenida con el control pasivo optimizado en el apartado anterior.

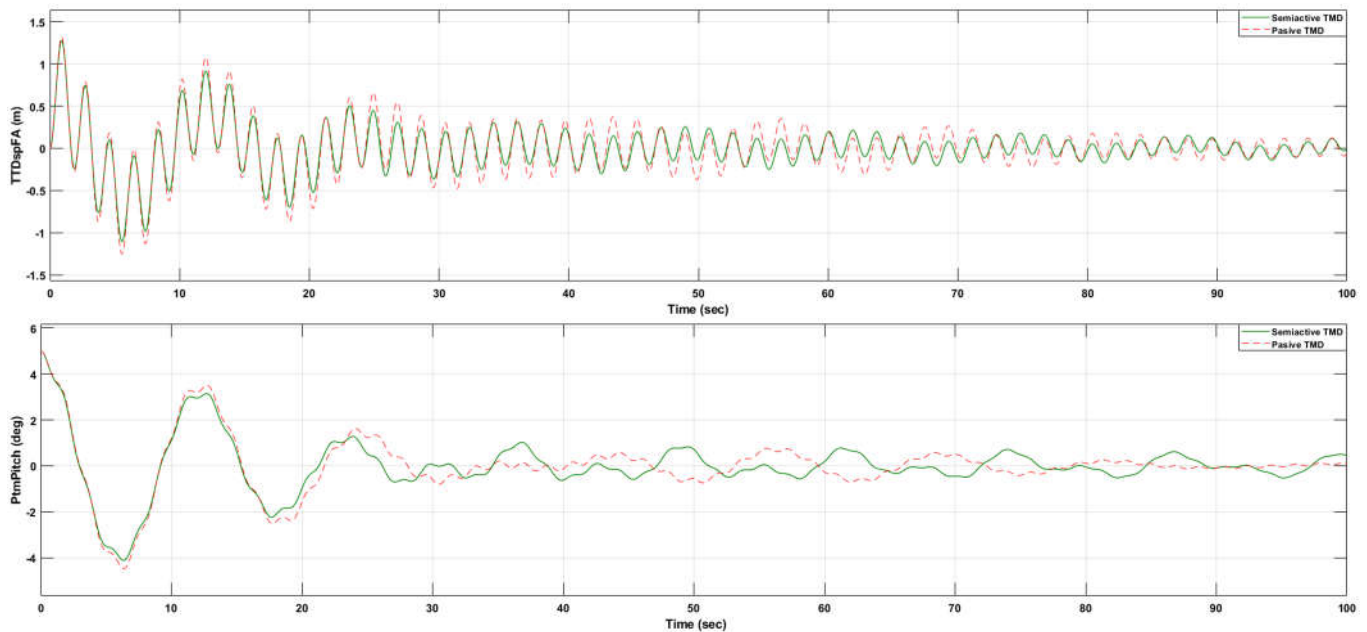


Figura 4 Simulación del movimiento en caída libre de la turbina con TMD pasivo y semiactivo

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La aplicación de un amortiguador de masa sintonizada en la góndola tiene un efecto determinante en la mitigación de las vibraciones de la torre. En este trabajo se demuestra que los parámetros óptimos del TMD varían en función del desplazamiento del extremo superior de la torre. Esto se ha intentado aprovechar para mejorar la respuesta dinámica del sistema, aplicando un control semiactivo, que adapta los parámetros optimizados previamente a la amplitud del movimiento de la torre. Este control presenta mejoras en la atenuación de las vibraciones, mostrando una reducción del desplazamiento del extremo superior de la torre de un 16% frente al control pasivo.

Los resultados obtenidos de la aplicación de un control semiactivo invitan a seguir explorando el potencial de este tipo de control estructural. Como trabajos futuros, se propone continuar desarrollando este trabajo aplicando fuerzas externas, como la acción de las olas, optimizando el TMD en función de la frecuencia del movimiento, en función del desplazamiento de la masa sintonizada, e investigar el efecto de aplicar lógica borrosa al control por ganancia programada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con financiación parcial del Proyecto MCI AEI/FEDER RTI2018-094902-B-C21, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

REFERENCIAS

- [1] DNV, "Energy Transition Outlook," DNV, 2021.
- [2] G. M. Stewart and M. A. Lackner, "The effect of actuator dynamics on active structural control of offshore wind turbines," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 1807-1816, 2011.
- [3] M. A. Lackner and M. A. Rotea, "Passive structural control of offshore wind turbines," *Wind Energy*, vol. 14, pp. 373-388, 2011.
- [4] W. Vijfhuizen, *Design of a Wind and Wave Power Barge*, 2006.
- [5] H. Namik, M. Rotea and M. Lackner, "Active Structural Control with Actuator Dynamics on a Floating Wind Turbine," in *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including*, Texas, 2013.
- [6] J. Jonkman, "Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine," NREL National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [7] D. Villoslada, M. Santos and M. Tomás-Rodríguez, "General Methodology for the Identification of Reduced Dynamic Models of Barge-Type Floating Wind Turbines," *MDPI Energies*, vol. 14, p. 3902, 2021.

Zabalduz

Jardunaldi, kongresu, sinposio, hitzaldi
eta omenaldien argitalpenak

Publicaciones de jornadas, congresos,
simposiums, conferencias y homenajes

INFORMAZIOA ETA ESKARIAK • INFORMACIÓN Y PEDIDOS

UPV/EHUko Argitalpen Zerbitzua • Servicio Editorial de la UPV/EHU
argialetxea@ehu.eus • editorial@ehu.eus
1397 Posta Kutxatila - 48080 Bilbo • Apartado 1397 - 48080 Bilbao
Tfn.: 94 601 2227 • www.ehu.eus/argitalpenak

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea