

EÓLICA MARINA OFFSHORE.
APLICACIÓN DE MODELOS A LOS
DESPLAZAMIENTOS Y GIROS DE UNA
PLATAFORMA FLOTANTE DE EÓLICA MARINA
OFFSHORE WIND FARM. DISPLACEMENT AND TURNING MODELS
APPLICATION OF A FLOATING OFFSHORE WIND PLATFORM



TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2021-2022

AUTOR
CÉSAR SASTRE GIL

DIRECTORES
MATILDE SANTOS PEÑAS
VICENTE NEGRO VALDECANTOS

GRADO EN INGENIERÍA DE SOFTWARE
FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

EÓLICA MARINA OFFSHORE.
APLICACIÓN DE MODELOS A LOS
DESPLAZAMIENTOS Y GIROS DE UNA
PLATAFORMA FLOTANTE DE EÓLICA MARINA

OFFSHORE WIND FARM. DISPLACEMENT AND TURNING MODELS
APPLICATION OF A FLOATING OFFSHORE WIND PLATFORM

TRABAJO DE FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE SOFTWARE
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE COMPUTADORES Y
AUTOMÁTICA

AUTOR
CÉSAR SASTRE GIL

DIRECTORES
MATILDE SANTOS PEÑAS
VICENTE NEGRO VALDECANTOS

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE 2022
CALIFICACIÓN:

GRADO EN INGENIERÍA DE SOFTWARE
FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

SEPTIEMBRE DE 2022

DEDICATORIA

A mi familia, mi pareja y mis amigos.

A Kas.

“Una sucesión de pequeñas voluntades
consigue un gran resultado”.

Charles Baudelaire

AGRADECIMIENTOS

A Vicente, por haber creído en mí, por su amistad, cariño y cuidados durante estos años.

A Matilde, por dirigirme este trabajo y que haya podido llegar a buen puerto, por su comprensión y consejos.

A la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.M. y en especial a los integrantes del Grupo de Investigación ECOREL-UPM: José Santos, Luis, Jaime, Mario, Jorge, Jose Luis, Alex, María Dolores y Pedro, por su amistad y compañerismo.

A los compañeros de la Fundación Agustín de Betancourt: Alberto, Pilar, Gema y Carmen.

A Javier, por haber apostado por mí.

A Isa, por ayudarme a no rendirme y hacerme feliz.

RESUMEN

Eólica Marina Offshore. Aplicación de modelos a los desplazamientos y giros de una plataforma flotante de eólica marina

La apuesta por la energía eólica en el mar en aguas de transición y en gran profundidad es una realidad. También es una oportunidad en un mundo donde la necesidad de las energías limpias debe ser una pauta para salvar la emergencia climática y desarrollar el proceso de transición ecológica. Las palabras mitigación y adaptación son claves en el análisis del cambio climático.

Durante tres años se han ensayado en el tanque de experimentación del Laboratorio de Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid distintas plataformas para el análisis de su funcionamiento frente al clima marítimo y viento, tanto de gravedad (GBS) como flotantes e híbridas. El objetivo era analizar sus desplazamientos y giros.

Este TFG describe en primer lugar el estado del arte sobre las estructuras flotantes eólicas marinas y en una segunda desarrolla modelos matemáticos y numéricos para el conocimiento de los desplazamientos y giros, así como, los límites de estabilidad estructural y funcional de los dispositivos. Para ello se han procesado los datos medidos en los ensayos mediante una serie de técnicas computacionales.

Los resultados permiten concluir que estos modelos son útiles para la evaluación de los desplazamientos y giros de dispositivos flotantes desarrollados en el campo de la energía eólica marina sobre la base de la experimentación en tanque de ensayos con oleaje regular e irregular y sin viento.

Palabras clave

Agenda 2030, ODS 13, ODS 11, ODS 14, energía eólica marina, plataforma offshore, monitorización, flotante, oleaje, modelo físico.

ABSTRACT

Offshore Wind Farm. Displacement and turning models application of a floating offshore wind platform

The commitment to offshore wind energy in transitional waters and at great depth is a reality. It is also an opportunity in a world where the need for clean energy must be a guideline to save the climate emergency and develop the ecological transition process. The words "mitigation" and "adaptation" are key in the analysis of climate change.

For three years, different platforms have been tested in the experimental tank of the Ports Laboratory of the Universidad Politécnica de Madrid to analyze their performance against maritime climate and wind, both gravity based structures (GBS) and floating and hybrid. The objective was to analyze their translations and rotations.

This B.Sc. Report aims to describe firstly the state of the art on offshore wind floating structures; and secondly the mathematical and numerical tools for the understanding of the translations and rotations, as well as the limits of structural and functional stability of the devices. For this, the data measured in the tests have been processed using a series of computational techniques.

The results allow us to conclude that these models are useful for the evaluation of the displacements and rotations of floating devices developed in the field of offshore wind energy based on experimentation in test tanks with regular and irregular waves and without wind.

Keywords

2030 Agenda, SDG 13, SDG 11, SDG 14, offshore wind energy, offshore platform, monitoring, floating structures, wind waves, physical models.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen.....	VII
Abstract	IX
Índice de contenidos	XI
Índice de figuras	XIV
Índice de tablas.....	XIX
Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos y objetivos específicos	4
1.2.1 Objetivos específicos.....	4
1.3 Relación de asignaturas del Grado en Ingeniería del Software relacionadas con este trabajo	5
1.4 Publicaciones (indicios de calidad).....	5
1.5 Estructura de la memoria del TFG	5
Capítulo 2 - Fundamentos teóricos y revisión crítica.....	7
Capítulo 3 - Materiales.....	19
3.1 Laboratorio de Puertos.....	20
3.2 Datos.....	24
Capítulo 4 - Metodología para la realización de ensayos	45
Capítulo 5 - Discusión de los resultados.....	63
5.1 Conjunto de frecuencias de resonancia para cada desplazamiento y rotación.....	63
5.2 Estudio de atenuación y periodos propios según los ensayos de DECAY.....	67

5.3 Estudio de los valores máximos obtenidos en Pitch y Heave para cada régimen	70
Capítulo 6 - Conclusiones y trabajos futuros	75
Chapter - 7. Introduction	77
7.1 Motivation	78
7.2 Objectives	80
7.2.1 Specific objectives	80
7.3 List of subjects of the Degree in Software Engineering related to this work	81
7.4 Publications (Quality indicators)	81
7.5 Structure of the B. Sc. Report	81
Chapter - 8. Conclusions and future work.....	83
Bibliografía.....	85
Apéndices	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Comparación de la evolución de la energía eólica con los períodos históricos [29] [30]	3
Figura 2-1. Tipos de cimentaciones [8]	10
Figura 2-2. Partes de un aerogenerador [7]	11
Figura 2-3. Soportes flotantes: spar, semisumergible, TLP y multi-turbina [11] [12] [13].....	12
Figura 2-4. Dinámica del flotador [23]	16
Figura 2-5. Tipos de desplazamientos y giros.....	16
Figura 3-1. Detalle y funcionamiento del modelo y el mástil en un ensayo	19
Figura 3-2. Tanque de ensayos.....	21
Figura 3-3. Plataforma Triwind [3] [4] [5]. Ejemplo de ensayo [29] [30]	21
Figura 3-4. Vista de las instalaciones del Laboratorio de Puertos y Costas, UPM	22
Figura 3-5. Palas de generación de oleaje	23
Figura 3-6. Canal de oleaje	24
Figura 3-7. Hoja de Ensayos	28
Figura 3-8. Interfaz en VBA asociada.....	29
Figura 3-9. Función de VBA de evaluación de oleaje	30
Figura 3-10. Código de Matlab para análisis de oleaje.....	31
Figura 3-11. Hoja de oleajes	33
Figura 3-12. Código de VBA para generación de oleaje.....	34
Figura 3-13. Parte de código de Matlab de generaSenalClass.....	35
Figura 3-14. Hoja de Calibraciones.....	37
Figura 3-15. Hoja de Configuración.....	38
Figura 3-16. Página HTML generada a partir de MkDocs	43

Figura 4-1. Cámara infrarroja de posicionamiento apuntando a los markers del modelo	46
Figura 4-2. Sistema de Adquisición de la dinámica del flotador trabajando en tiempo real durante un ensayo	47
Figura 4-3. Esquema de equipos y funciones.....	49
Figura 4-4. Parámetro de oleaje [18] [19].....	50
Figura 4-5. Función de transferencia entre voltios y altura de la superficie libre	51
Figura 4-6. Datos de estados de mar inicial.....	51
Figura 4-7. Configuración de ensayo	52
Figura 4-8. Planificación de ensayo.....	52
Figura 4-9. Análisis de desplazamientos y rotaciones.....	54
Figura 4-10. Estructura de carpetas	56
Figura 4-11. Interpretación de datos	58
Figura 4-12. Visualización del concepto de Damping y periodos naturales.....	59
Figura 4-13. Serie temporal de giros en Pitch para el ensayo	59
Figura 4-14. Serie temporal de desplazamientos en Heave para el ensayo	60
Figura 4-15. Serie temporal de giros en Roll para el ensayo	60
Figura 5-1. Valores máximos y mínimos de cada grado de libertad para el ensayo CH-01	63
Figura 5-2. Serie temporal de desplazamientos en Sway para el ensayo CH-01	64
Figura 5-3. Serie temporal de desplazamientos en Heave para el ensayo CH-01	64
Figura 5-4. Serie temporal de desplazamientos en Surge para el ensayo CH-01.....	65
Figura 5-5. Serie temporal de giros en Pitch para el ensayo CH-01	66
Figura 5-6. Serie temporal de giros en Yaw para el ensayo CH-01	66
Figura 5-7. Serie temporal de giros en Roll para el ensayo CH-01.....	67

Figura 5-8. Serie temporal de giros en Pitch	68
Figura 5-9. Serie temporal de desplazamientos en Heave	69
Figura 5-10. Serie temporal de giros en Roll.....	70
Figura 5-11. Valores máximos y mínimos en mm de desplazamiento y giro para cada grado de libertad para el ensayo RO-08.....	71
Figura 5-12. Valores máximos y mínimos de aceleraciones en mm/s ² en el nacelle para cada grado de libertad para el ensayo RO-08	71
Figura 5-13. Valores máximos y mínimos en mm de desplazamiento y giro para cada grado de libertad para el ensayo RE-02.....	72
Figura 5-14. Valores máximos y mínimos de aceleraciones en mm/s ² en el nacelle para cada grado de libertad para el ensayo RE-02	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Datos de soluciones Energía Offshore Eólica [26] [28].....	4
Tabla 2-1. Comparativa según localización [14] [15].....	13
Tabla 2-2. Comparativa según tipología [14] [16].....	13
Tabla 2-3. Comparativa según dominio hidrodinámico [14] [16]	14
Tabla 2-4. Comportamiento de desplazamientos y giros	15
Tabla 2-5. Nombre de proyectos en operación	17
Tabla 2-6. Nombre de proyectos en desarrollo	18
Tabla 4-1. Relación entre máximos y mínimos y tiempos en que se producen	55

Capítulo 1 - Introducción

Este nuevo siglo XXI se ha caracterizado por tres aspectos que, a priori, pueden cambiar todos los conceptos relacionados con la economía del bienestar y con la relación del ser humano con el medio ambiente. La crisis económica de 2008, la pandemia de 2019 y la guerra de Ucrania en 2022, unido a la emergencia climática con episodios extremos de sequías, inundaciones, temporales, nieve, movimientos tectónicos y sísmicos debe hacer reflexionar sobre nuestra relación con el planeta.

¿Qué pasaría si nos quedamos parados? ¿En qué estamos de acuerdo los técnicos y científicos?

Tal vez debería pensarse en las victorias de la ciencia y en las derrotas de la política. Estas dos cuestiones se repitan de manera sistemática en todos los foros, congresos y organismos de divulgación, tanto políticos y propagandísticos, ambientales y negacionistas, económicos y de investigación. Sin embargo, el ser humano trabaja a corto plazo y no está dispuesto a renunciar a su nivel de vida para distribuir mejor la riqueza y pensar en la tierra y en los seres vivos que habitan en ella. La naturaleza no opina del ser humano, calla su reflexión y actúa produciendo sucesos que alarman y aterran a las personas, "la emergencia climática".

Está claro que el calentamiento del océano se está acelerando, la subida del nivel del mar es un hecho evidente, la captación del CO₂ en los mares está acidificando su agua, las masas polares están disminuyendo, se está perdiendo el hielo del permafrost, y se están produciendo grandes cambios en los ecosistemas siendo cada vez más frecuentes los eventos extremos. Basta recordar la tormenta Gloria que en enero de 2020 devastó el Mediterráneo español y el fenómeno de Filomena que a principios de enero de 2021 provocó colapsos por nieve en las ciudades del centro del país. Que decir de este verano de 2022, la pertinaz y prolongada sequía y el futuro próximo repleto de gotas frías, danas (depresión aislada en niveles altos) y, por ello, inundaciones.

Con esta situación no queda más remedio que ser optimista y plantearse este TFG como una esperanza de unas energías limpias que satisfagan las demandas de las poblaciones. El mar es un recurso inagotable. Sus acciones viento, oleaje, marea y

corriente son evidencias. Por todo ello, se debe ser optimista ante el horizonte 2100 siempre que mitigemos los efectos del cambio climático y nos adaptemos poco a poco a las variaciones meteorológicas. [20] [21] [22]

¿Cuál será el horizonte en el 2100? Con las políticas actuales la temperatura aumentará por encima de los 3.5°C, se necesitan compromisos más exigentes para que el aumento de temperatura se sitúe por debajo de los 2°C. Es por ello por lo que la apuesta por la energía eólica y los dispositivos flotantes son un hecho palpable. No se puede olvidar tampoco que el TFG se enmarca en la Agenda 2030 y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs), entre los que destacan el ODS 7: Energía limpia, ODS 11: Ciudades sostenibles, ODS 13: Acción por el clima, ODS 14: Vida bajo el mar y ODS 15: Vida en la tierra. [17] [31]

A eso lo combinamos con las ciencias básicas, las matemáticas y la informática aplicada. Sin estas herramientas el análisis de los comportamientos de los dispositivos sería irrealizable. Las grandes dificultades en concretar los movimientos y giros en un campo dominado por la mecánica de ondas requieren un modelado numérico y un acople de múltiples dispositivos (palas, equipos de medición y vídeo, Optitrack) que generan una infinidad de datos cuyo proceso, contraste y diagnóstico solo es posible con la aplicación de las ciencias básicas.

Todo ello, requiere reflexión, trabajo y estudio que es lo que se pretende realizar en este trabajo fin de grado.

1.1 Motivación

Como decía León Felipe, "Voy con las riendas tensas y refrenando el vuelo porque no es lo que importa llegar solo ni pronto, sino llegar con todos y a tiempo." Que mayor motivación que después de estos años y el esfuerzo realizado, ver el final de la etapa de formación académica de la vida con la terminación de los estudios. Es un esfuerzo que, a fecha de hoy, se intenta disfrutar tanto del camino como del desenlace.

Dado que el planeta se encuentra en emergencia climática donde los sucesos extremos son cada vez más frecuentes, y esto provoca una disminución del período de retorno de sus eventos, se hace necesaria una transición ecológica al campo de las energías limpias siguiendo los criterios de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo

Sostenible. Por esta razón, es necesario aprovechar la energía del mar en todos sus recursos, destacando el viento, oleaje, la marea y la corriente.

En función de las afecciones a la costa, la sostenibilidad y la protección del medio marino, resulta importante el uso de la energía eólica en aguas de transición. En estas profundidades los impactos son menores y, por ello, el futuro es flotante.

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 (Figura 1-1).

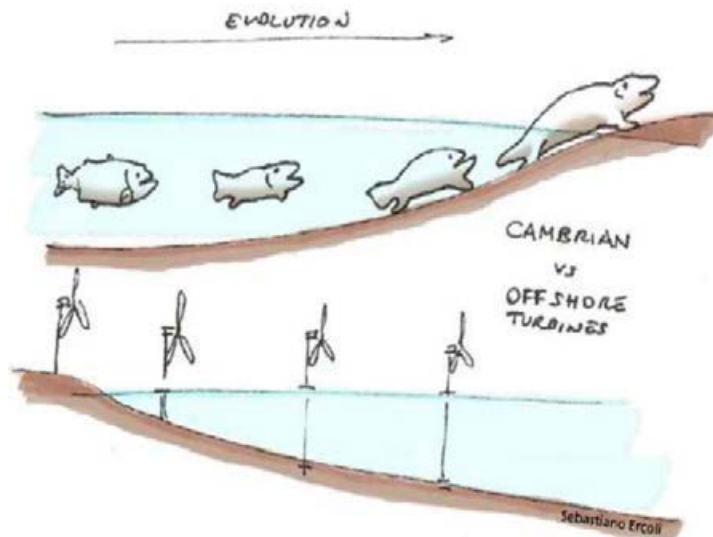


Figura 1-1. Comparación de la evolución de la energía eólica con los períodos históricos [29] [30]

En el mundo la apuesta por el océano es evidente con plataformas cada vez más profundas y turbinas de gran capacidad. Esta tabla (ver Tabla 1-1) 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.

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

Tabla 1-1. Datos de soluciones Energía Offshore Eólica [26] [28]

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.

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.

1.2 Objetivos y objetivos específicos

El objetivo de este TFG se centra en la optimización del dispositivo Triwind sobre la base de ensayos en modelos físicos realizados en el tanque de experimentación del Laboratorio de Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, y modelizar los desplazamientos y giros del flotador que presenta seis grados de libertad mediante algoritmos numéricos que permitan contrastar el funcionamiento del dispositivo en situaciones medias y de temporal. [3] [4] [5]

1.2.1 Objetivos específicos

- Calibración de cámaras de Optitrack.
- Calibración de oleaje.
- Adquisición de datos de posicionamiento gracias a las cámaras y sondas de oleaje.
- Procesamiento de datos de oleaje.

- Publicación web de los resultados.

1.3 Relación de asignaturas del Grado en Ingeniería del Software relacionadas con este trabajo

En este trabajo los conocimientos adquiridos en las siguientes asignaturas facilitaron su desarrollo:

- Cálculo
- Fundamentos de la Programación I y II
- Estadística
- Bases de Datos
- Aplicaciones Web
- Gestión de la Información Web

Además, también se utilizó MatLab como sistema de cómputo numérico y programación.

1.4 Publicaciones (indicios de calidad)

Este TFG ha dado lugar a dos contribuciones científicas:

1. **En la jornada online titulada *“III Jornada de Energía Eólica (y) Marina”*, del 16 de diciembre de 2021, con un artículo titulado *“Software de Desarrollo para el Análisis de los Desplazamientos de una Plataforma Flotante Sobre Ensayos en Modelo Físico.”***
2. **En las *“XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos”*, de Vigo del 11 y 12 de mayo de 2022, con un artículo titulado *“Desarrollo de software para medir desplazamientos de elementos flotantes en modelo físico.”***

1.5 Estructura de la memoria del TFG

Con el fin de exponer el Trabajo Fin de Grado de la forma más clara posible, el documento se ha estructurado de la siguiente manera.

El capítulo 1 responde a la introducción, la motivación, los objetivos y el plan de trabajo realizado para cumplimentar con éxito la finalización del estudio.

El capítulo 2 responde al estado del arte de los equipos flotantes existentes en el mercado en función de su grado de tecnología, tanto a nivel de experimentación en laboratorio, donde TRL es inferior a 5, como con ensayos en la naturaleza TRL hasta 7 o dispositivos ya produciendo energía con TRL 9, dentro de su grado de madurez.

El capítulo 3 se describe el laboratorio y la base de datos necesaria como sigue a continuación:

En la sección 3.1 aparece el Laboratorio de ensayos. 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.

En la sección 3.2 aparece la descripción del conjunto de datos necesarios.

En el capítulo 4 está la metodología de los ensayos con la descripción de los ordenadores y sus funciones y también las etapas de desarrollo.

En el capítulo 5 se realiza una pequeña discusión de los resultados obtenidos sobre la base de sus errores y comportamiento de la plataforma.

En el capítulo 6 se elaboran las conclusiones y nuevas líneas de trabajo.

Se completa el documento con las referencias bibliográficas y un apéndice.

- Apéndice A. Fichas de los ensayos de laboratorio de 3 tipos (TLP, barge y spar) de dispositivos existentes en función del TRL.

Capítulo 2 - Fundamentos teóricos y revisión crítica

A finales del siglo XIX, en aguas someras y en zonas de playa, en surtidores naturales de California empezó a perforarse con éxito y demasiada ambición numerosos yacimientos de gas y petróleo. Inicialmente se construyeron pequeños diques de material granular, espigones con pozos de perforación sobre ellos, en profundidades reducidas, ganando con el tiempo lámina de agua y, sobre todo, rendimiento y producción. Los hitos evolutivos pueden considerarse los siguientes. Tras el paso de la economía de guerra a la de mercado, los pozos en el mar se situaban en profundidades de 6,00 m. A finales de los 50, estaban en 60 metros; en la década de los setenta, llegaban a 300 metros y en el año 2000, se superaron los 500 m de profundidad con la plataforma Petronius. En estos momentos, la plataforma Perdido de Shell se sitúa en 2500 m. Esta tecnología es previa a la energía del viento.

Por este motivo, la primera de las variables que se debe analizar en la evolución de las estructuras marítimas para energía eólica debe ser la profundidad. El crecimiento de ésta conduce a las dificultades de elementos tipo GBS o gravitatorios en calados superiores a los cuarenta metros y en el caso de los pilotes, la evolución de éstos, donde difícilmente se superen los 100 metros de longitud y los 8 metros de diámetro puede hacer inviable superar calados de 100 m y turbinas de más de 12 MW. En estos momentos los ensayos con turbinas de 15 MW son ya una realidad. [1] [6]

A ello, debe añadirse que la industria del petróleo y gas es exclusiva. Cada campo, cada pozo es único, por lo que la estructura planteada (independiente de la inversión), debe considerarse como propia. Sin embargo, la energía eólica es múltiple, ya que un campo está configurado por numerosas estructuras muy semejantes con ligeras variaciones por factores de batimetría, acciones incidentes, puntualmente distinta geología o geotecnia (existencia de paleo cauces o zonas meteorizadas), técnicos y económicos. [22]

Los pozos, en la actualidad, se encuentran en zonas de grandes profundidades. Sin embargo, las estructuras GBS arrancaron prácticamente en aguas muy someras y no han superado los treinta metros de lámina de agua, por lo que existe claramente

limitación de los oleajes actuantes, tanto por refracción y asomeramiento, como por rotura o descomposición de las ondas. En medidas semejantes o ligeramente superiores, se encuentran las estructuras pilotadas. Este hecho hace reflexionar sobre los dominios hidrodinámicos en teoría de ondas, Morison, Froude – Krilov o difracción (D/L) [24] [25]. Por tanto, en esta investigación, el aspecto evolutivo hacia la flotación de los elementos de la energía eólica marina, puede ser una apuesta por ellos.

Es un hecho que el planeta está en "*emergencia climática*". No se recuerdan años como el 2020 con la tormenta Gloria en el levante español y oleajes en Valencia por encima de los ocho metros de altura de ola significativa; o la Filomena a primeros de enero de 2021 que colapsó Madrid durante días; o las recientes olas de calor que empezaron en mayo de 2022 y se reproducen mensualmente alcanzando a un país abrasado con máximos en todo el territorio superiores a los 45°. 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 tras las conferencias de Madrid (2019) y Glasgow (2021), con sus correspondientes COP 25 y 26 de dudoso éxito tras los cambios producidos por la pandemia.

Está claro que el calentamiento del océano se está incrementando, la subida del nivel del mar se está acelerando, la captación del CO₂ en los mares está acidificando su agua, las masas polares están disminuyendo, se está acelerando el deshielo del permafrost, se están produciendo grandes cambios en los ecosistemas y cada vez son más frecuentes los eventos extremos.

¿Cuál va a ser el horizonte en el 2100? Con las políticas actuales la temperatura aumentará por encima de los 3.5°C, se necesitan compromisos más exigentes para que el aumento de temperatura se sitúe por debajo de los 2°C. Es por ello por lo que las estrategias de adaptación y mitigación son las prioridades en estos momentos.

Además, ahora el mapa mundial ha cambiado, el gas procedente de Rusia puede condicionar la energía y las nuevas declaraciones de energías no contaminantes como la nuclear y el propio gas puede conllevar una variación paradigmática.

Los eventos extremos son cada vez más frecuentes, las inundaciones, sequías, temporales, maremotos y terremotos, nevadas, olas de calor, incluso volcanes 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 Radiactivo (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.

La tecnología relativa a la energía eólica ha evolucionado desarrollando variaciones en las cimentaciones, desde pilotadas a gravedad, pasando por soluciones tipo trípode, plataforma offshore y flotantes. Un ejemplo se suele aplicar en la **Figura 2-1**.

Las partes de un aerogenerador son las mostradas en la **Figura 2-2**:

- Rotor: Convierte la energía del viento en energía mecánica. Si se aumenta el diámetro de las palas se aumenta la superficie de captación del viento y la potencia proporcionada por la máquina.
- Multiplicador: engranajes que transforman la baja velocidad del rotor a una más elevada, que se comunica al eje que hace girar el generador

- **Generador:** transforma la energía mecánica del rotor en eléctrica.
- **Torre:** se encarga de sustentar el rotor y la góndola. Cuanto más alta mayor cantidad de energía ya que la velocidad del viento aumenta con la altura.
- **Góndola:** es el conjunto de la carcasa del aerogenerador y el bastidor. En este se acoplan los elementos mecánicos, como el rotor, y está protegido por una carcasa que puede ser de fibra de vidrio y poliéster reforzada con perfiles de acero.
- **Cimentación:** es una plataforma de alta resistencia sobre la que descansa el conjunto del aerogenerador.

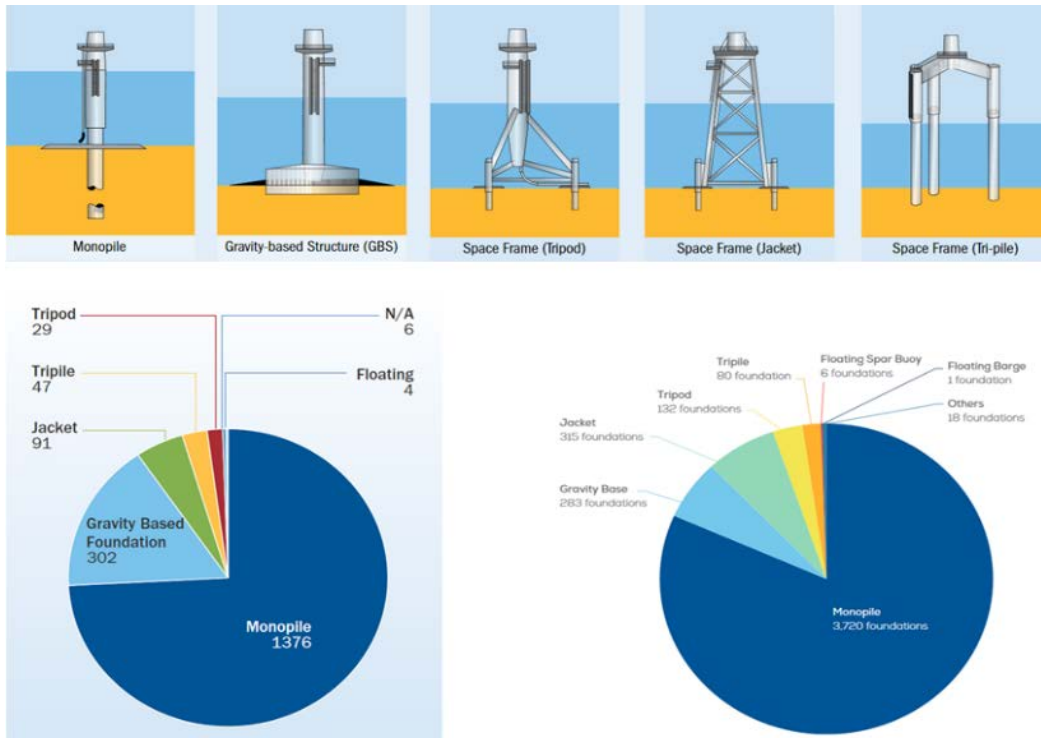


Figura 2-1. Tipos de cimentaciones [8]

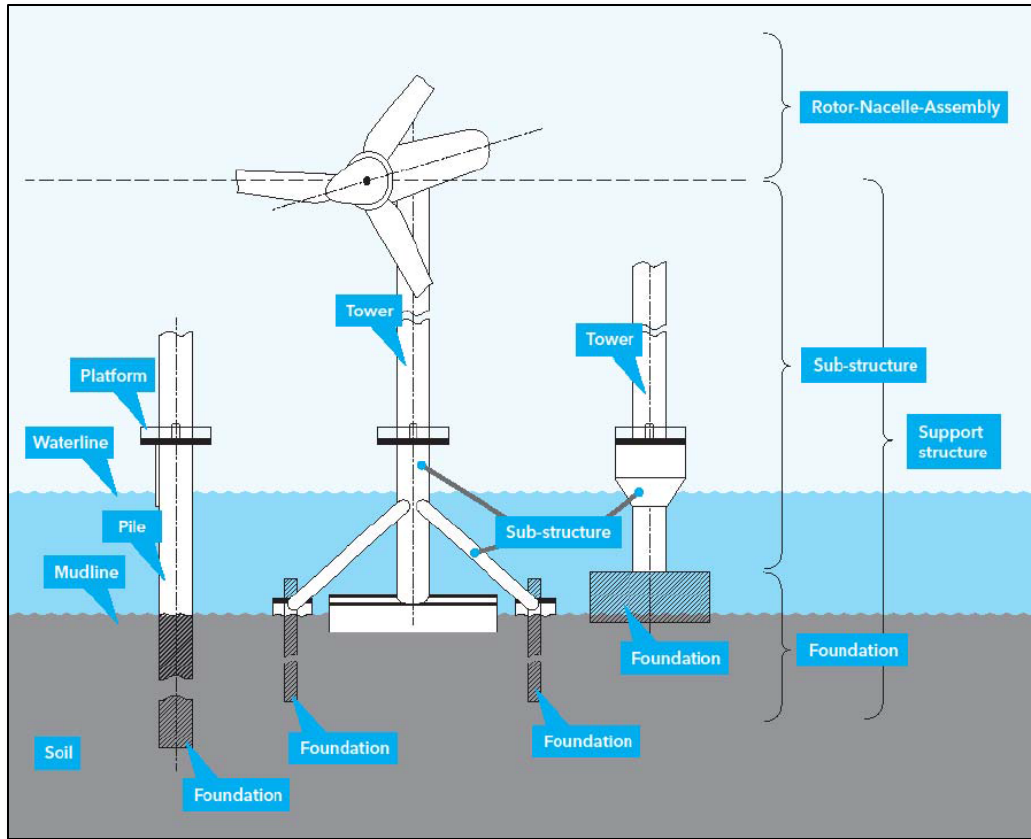


Figura 2-2. Partes de un aerogenerador [7]

El hormigón se asocia a peso, cimentación, estabilidad por gravedad. El acero se hermana a conceptos de ligereza y flotación. El nuevo material, cable sintético e híbrido, se relaciona con las tecnologías flotantes. El material unido a la profundidad decanta el flotar en lugar de cimentar. Hay que buscar el "Arquímedes del siglo XXI". Para ello, se distingue la tipología Spar con sus tres casos, tradicional, truss o cell. La clásica Spar es un cilindro de diámetro muy grande que actúa como boya aportando la flotación necesaria al sistema. Basta fijarse en la naturaleza y observar los grandes bloques de hielo con escalas 1/9 en relación con la parte visible con respecto a la sumergida. Esto hace que disminuya el centro de gravedad de la estructura haciéndola más estable a vientos, olas y mareas. Si se rellena parte de este cilindro con un líquido más denso que el agua se obtiene un centro de gravedad más bajo que el metacentro, con un brazo de estabilidad que dota a la estructura de estabilidad naval. De la misma manera, la parte superior está hueca permitiendo su uso en el proceso constructivo de la maquinaria de perforación, otro aspecto básico en las reflexiones del paso del oil &

gas a la eólica marina en gran profundidad. Es un flotador con boyancia neutra, que se mantiene estable gracias a su peso y al empuje que ejerce el agua sobre él. [2]

La estructura cilíndrica se acompaña por un exterior en espiral que elimina turbulencia y gana estabilidad, disminuyendo los remolinos entre los pasos de la hélice, eliminando la vorticidad y controlando las vibraciones de la estructura conjunta. Cuando la SPAR presenta una celosía se denomina "truss", mientras que si está integrada por dispositivos tubulares de acero anidado se denomina "cell". (ver Figura 2-3)



Figura 2-3. Soportes flotantes: spar, semisumergible, TLP y multi-turbina [11] [12] [13]

El contraste entre la boyancia neutra es la positiva, donde aparecerían equipos que saldrían disparados hacia la superficie, si no estuviesen anclados verticalmente mediante "patas tensionadas". Se trata de estructuras TLP, iniciales de "Tension Leg Platforms", con enorme resistencia a los esfuerzos axiales y escasa flexibilidad. Es claramente la evolución del conocimiento de una plataforma tipo "jack up" empleada

en perforación, cambiando su uso. Esta técnica ya fue empleada en ingeniería de puertos hace más de treinta años con pontonas con spuds y equipos flotantes con patas tensionadas. La posibilidad de alcanzar profundidades entre 300 y 1500 metros hace de esta solución una alternativa de mucho presente y extraordinario futuro tal como demuestra la tecnología del oil & gas.

Previo a la descripción del estado del arte de los distintos dispositivos, una pequeña reflexión debe hacerse con relación a las variables determinantes en el diseño. La primera de ellas, la comparación de los mares con las distancias a la costa, potencia instalada y la profundidad (Tabla 2-1).

Localización	Número de aerogeneradores	Potencia instalada	Profundidad (m)	Distancia a la costa (m)
Mar del Norte	61 unidades	12933 Mw	23.40 m	30 km
Mar de Irlanda	15 unidades	2938 Mw	13.10 m	10.10 km
Mar Báltico	20 unidades	2186 Mw	12.40 m	10.90 km
China	29 unidades	3939 Mw	< 7.50 m	< 16.70 km

Tabla 2-1. Comparativa según localización [14] [15]

La segunda responde a nivel de tipología de cimentación (Tabla 2-2).

Profundidad	Ashuri et al (2007)	DNV (2016)	Luengo et al (2019)
GBS	0 – 10 m	0 – 25 m	0 – 20 m
Monopilote	0 – 30 m	0 – 25 m	20 – 50 m
Tripode	> 20 m	20 a 50 m	> 30 m
Jacket	> 20 m	20 a 50 m	> > 50 m
Flotantes	> 50 m	> 50 m	> 50 m

Tabla 2-2. Comparativa según tipología [14] [16]

Una tercera reflexión debe hacerse con relación a la mecánica ondulatoria que servirá de referencia para el cálculo de los esfuerzos del oleaje sobre las estructuras en

función de sus dominios hidrodinámicos, D/L , donde "D" es el diámetro del soporte y "L" es la longitud de onda a la profundidad donde se encuentra el mismo (Tabla 2-3).

Teoría	Mecánica de ondas	Oil & Gas	Energía eólica
Aguas someras	$h/L < 1/25$	90 – 300 m	20 – 25 m
Aguas intermedias	$1/25 < h/L < 1/2$	300 a 1000 m	25 – 40 m
Aguas profundas	$h/L > 1/2$	> 1000 m	> 50 m

Tabla 2-3. Comparativa según dominio hidrodinámico [14] [16]

En este estado del arte del arte se repasará en primer lugar las tecnologías existentes con sus ventajas e inconvenientes, más concretamente, "spar", semisumergible, barge, multiturbina, híbrida y TLP o plataforma de tensión entre sus cables. Posteriormente, se analizarán las existentes en proyectos en operación y, finalmente, en proyectos en desarrollo, todo ello en tecnología flotante.

La tecnología "spar" se basa en una estabilidad por lastre, pudiendo ser en hormigón o acero, siendo preferente este último, con una forma cilíndrica alargada y cimentada mediante catenaria. Su diseño es sencillo y tiene notable estabilidad, teniendo como máximo inconveniente la profundidad y el medio de construcción dado los requerimientos sofisticados de los buques de instalación y montaje.

La TLP se caracteriza por tener la estabilidad definida por las líneas de amarre sobre una columna central. Siendo preferentemente de acero. El diseño es sencillo, tiene poca masa, pero requiere suelos adecuados para los anclajes y la instalación y el sistema de amarre no es sencillo.

La semi sumergible tiene una gran estabilidad por boyancia, si bien sus dimensiones son enormes. Es una estructura muy costosa. Puede ensamblarse en puerto y fondearse en los lugares adecuados con climas con ventanas temporales acordes con los procesos de instalación. Puede realizarse en hormigón y acero, siendo una estructura muy costosa, sujeta siempre mediante catenaria.

Como la plataforma anterior, el dispositivo denominado " barge" responde a los mismos criterios especificados en la semi sumergible.

Otro de los aspectos importantes en la clasificación es el efecto sobre el comportamiento en desplazamientos y giros que tienen cada uno de los dispositivos sobre la base de los seis grados de análisis de estos (Tabla 2-4).

Type	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
Deep draught floaters (DDF) ¹⁾	C ⁶⁾	C	C	C	C	C
Spar	C	C	C	C	C	C
Column-stabilized	C	C	C	C	C	C
Semi-submersibles ⁵⁾	C	C	C	C	C	C
Barges	C	C	C	C	C	C
Tension leg platforms (TLP)	C	C	R	R	R	C
Heave-restrained TLP (HRTLP) ²⁾	C	C	R	C	C	C
Heave-restrained DDF (HRDDF) ³⁾	C	C	R	C	C	C
Ship-shaped	C	C	C	C	C	C
Articulated tower ⁴⁾	C	C	R	C	C	C
Compliant tower ⁴⁾	C	C	R	R	R	R

1) Classic, truss & cell spar, deep draught semi, buoys.
2) Special type TLP which has not been built, but proposed and developed to a certain level.
3) Special type DDF.
4) These structures are fixed to the seabed as fixed structures, but use buoyancy as a vital part of the loadbearing system.
5) Semi-submersibles are usually column-stabilized units.
6) C denotes compliant and R denotes restrained.

Tabla 2-4. Comportamiento de desplazamientos y giros

La letra "C" indica que los movimientos están permitidos, mientras que la letra "R" informa que están restringidos. Para conocer perfectamente esta situación se precisa el asimilar el flotador a un barco siguiendo la figura adjunta (Figura 2-4).

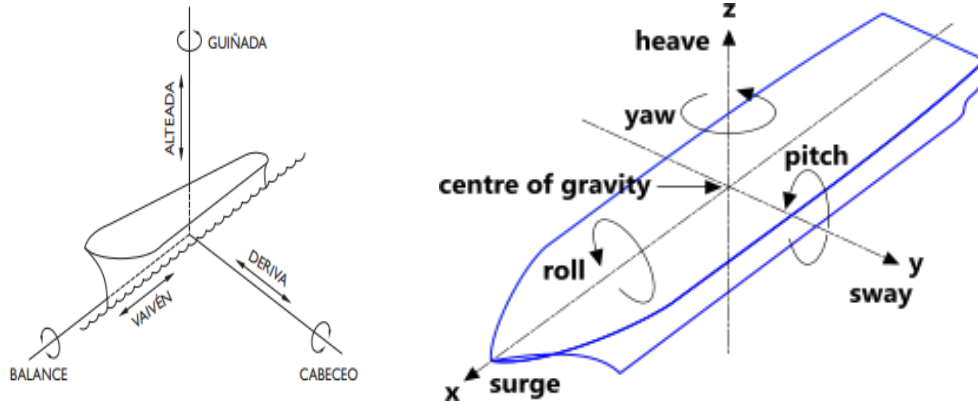


Figura 2-4. Dinámica del flotador [23]

El flotador presenta tres desplazamientos y tres giros en su movimiento frente a las oscilaciones del clima marítimo, tal como se observa en la **Figura 2-5**.

El problema del giro sobre el eje "z" o "yaw" y del desplazamiento sobre el mismo, es decir, alteada 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.

Figura 2-5. Tipos de desplazamientos y giros

Visto este repaso a las tecnologías existentes a continuación se detalla un inventario de aerogeneradores flotantes offshore que están en operación y en fase de desarrollo tecnológico (Tabla 2-5 y Tabla 2-6).

Proyectos en operación
Unitech Zefyros (2009)
WindLens – phase 1 (2012)
Fukushima Floating Offshore Wind Farm – Phase 1 (2013)
SeaTwirl S1 (2015)
Sakiyama 2MW
Fukushima Floating Offshore Wind Farm – Phase 2 (2017)
Hywind Scotland (2017)
Floatgen (2018)
WindFloat Atlantic (WFA) (2020)
Ulsan 750kW floating demonstrator (2020)
Kincardine Offshore Wind Farm
Hywind Tampen

Tabla 2-5. Nombre de proyectos en operación

Proyectos en desarrollo
TwinWay
ERM Doplhyn
TetraSpar – TetraTLP – TetraSub
The Glosten PelaStar
GICON-SOF
DualSub
WindSub

OO-Star
SBM Wind Floater
Saipem
Deepwind
Tetrafloat
STAR
X1 Wind
GustoMSC Tri-Floater
SATH
SWAY
Eolink
DeepCWind
MIT-NREL TLP
GOTO
NAUTILUS
Triwind floater
Nezy2

Tabla 2-6. Nombre de proyectos en desarrollo

En el apéndice A se puede consultar las fichas con los datos de los ensayos de algunos dispositivos.

Capítulo 3 - Materiales

Se requiere una planificación muy clara y precisa de cada uno de los ensayos para asegurarse que, tras cada uno de ellos, estamos guardando todos los archivos asociados a un mismo ensayo con los nombres adecuados que permitan el posterior postproceso de forma eficiente y sin errores.

De forma resumida las características del prototipo son las siguientes (en la **Figura 3-1** se puede ver el modelo físico [3] [4] [5]):

- Velocidad del rotor: 5 – 7,56 rpm
- Altura del buje: 150m
- Pesos del rotor y nacelle: 1017t
- Altura de la torre: 159m
- Peso de la torre: 1087t
- Peso de la estructura: 29.980t

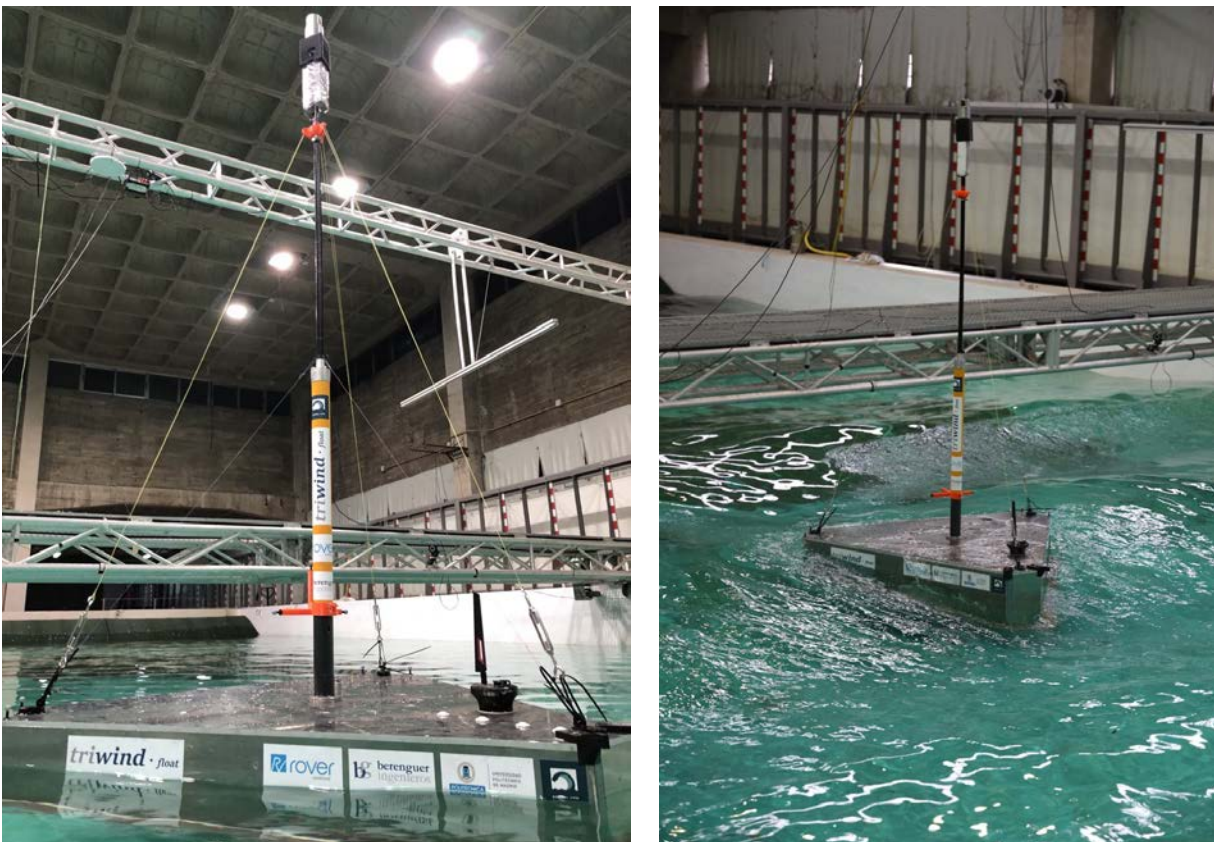


Figura 3-1. Detalle y funcionamiento del modelo y el mástil en un ensayo

En este capítulo se describen los materiales necesarios al inicio de cada ensayo y los que se generan al final del mismo, junto con explicación de código necesario:

- Laboratorio de ensayos
- Datos:
 - Base de datos en Excel.
 - Hoja de ensayos.
 - Hoja de oleajes.
 - Hoja de calibraciones.
 - Hoja de configuración.
 - Salida en MkDocs.

3.1 Laboratorio de Puertos

El laboratorio 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.

La **Figura 3-2** 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.



Figura 3-2. Tanque de ensayos

Se planteó el ensayo en estado límite de servicio y último de una plataforma flotante cuyo ejemplo se dispone a continuación en la **Figura 3-3**.

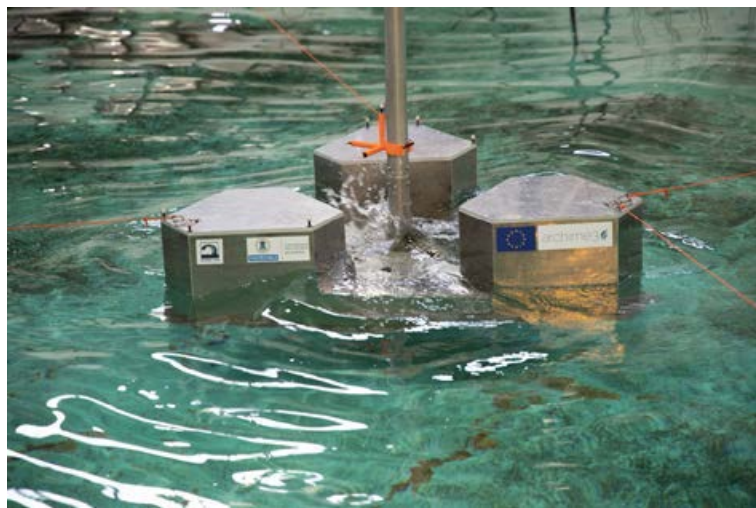


Figura 3-3. Plataforma Triwind [3] [4] [5]. Ejemplo de ensayo [29] [30]

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 metros de frente y 1.30 metros de altura, con las prestaciones siguientes: $H = 0.25$ m en una lámina de agua de 0.60 m (Figura 3-4).

También consta de un canal de longitud 52 metros, con sección transversal de 1.00 metro de ancho por 1.50 metros de altura y tiene una capacidad de generación de oleaje regular e irregular de hasta 0.45 m en una profundidad de 1.00 metro. Presenta control de absorción del oleaje reflejado y controla la disipación mediante espuma de poliuretano. 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 metros, una anchura de 11 metros y una longitud de 33 m.

La informatización del proceso de generación y calibración del oleaje se compone de una estación de trabajo, una tarjeta de comunicaciones, una unidad convertora y una interfaz con tarjeta de conexión para un mínimo de 8 canales analógicos de entrada en forma diferencial o 16 canales forma común y 2 canales también analógicos de salida. Las instalaciones se complementan con equipos de medida de oleaje, programación y calibrado, adquisición y análisis de datos y un pequeño centro de cálculo con modelos matemáticos y numéricos de contraste.

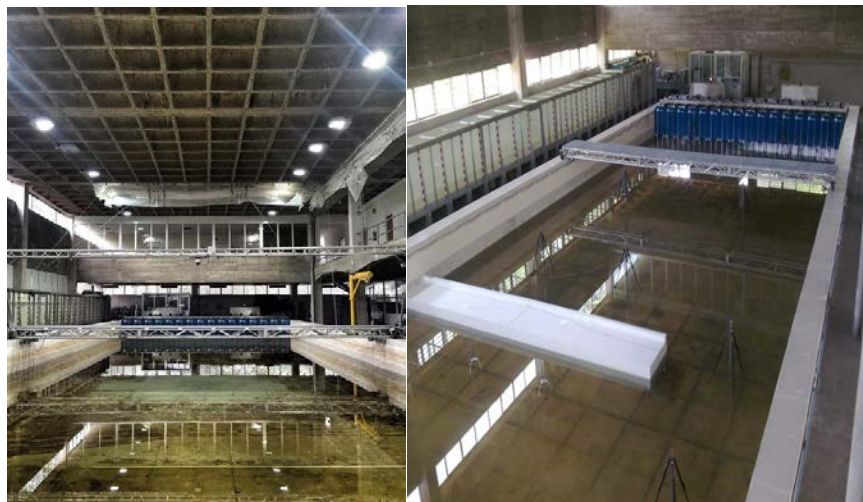


Figura 3-4. Vista de las instalaciones del Laboratorio de Puertos y Costas, UPM

Como el oleaje es un movimiento ondulatorio entre $1 \text{ s} < T < 30 \text{ s}$, cuya fuerza generadora es el viento y la fuerza restauradora es la gravedad, los modelos a desarrollar en el canal tendrán una escala entre 1/35 a 1/50 y semejanza de Froude. En

este caso la relación de alturas de ola entre el modelo y la realidad será la escala, mientras que en el período ondulatorio se tratará de la raíz de esta pudiendo configurar los escalones de altura de ola irregular (H_{m0}) y período medio (T_{02}). Con relación al tanque, las escalas serán bastante mayores 1/100 – 1/150, dominando igualmente el efecto Froude y despreciando las componentes viscosas de Reynolds y las fuerzas elásticas tipo Cauchy Mach.

La generación de oleaje multidireccional es llevada a cabo mediante 16 palas tipo pistón con absorción activa de oleaje reflejado fabricadas por HR Wallingford. El sistema es capaz de generar hasta 0.30m de altura de ola con 4s de periodo (Figura 3-5).

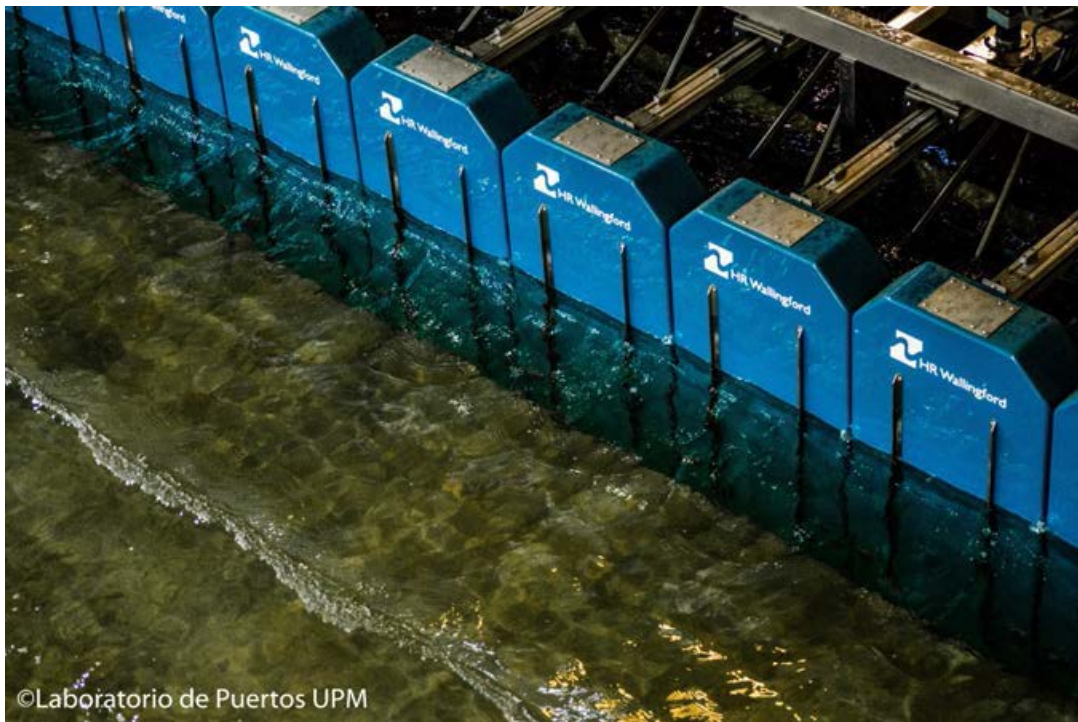


Figura 3-5. Palas de generación de oleaje

El laboratorio también cuenta con instalaciones de servicio que son necesarias para la realización de trabajos que requieran tanto instrumental específico como medidas de seguridad concretas. Por un lado, hay un taller equipado con maquinaria y herramientas para la construcción y arreglos de todos aquellos que cohabitan en la instalación, ya sean de madera, aluminio, PVC, acero, polímeros u otros materiales. Además, cuenta con 3 impresoras 3D y una cortadora láser para prototipado y

fabricación de piezas. Por otro, la sala CNC está equipada con una fresadora de gran precisión y tamaño por control numérico ALARSIS. Por último, la sala limpia está dotada con un sistema de presión positiva y herramientas dedicadas al diseño y la fabricación de electrónica y sensórica.

La instalación se completa con un canal de oleaje con una pala de pistón fabricada ad-hoc por HR Wallingford con un sistema de control y absorción de onda reflejada para realizar ensayos de secciones de diques de abrigo en todas sus tipologías y formas, perfiles de playa y estructuras de protección costera (Figura 3-6). [9] [10] [21]



Figura 3-6. Canal de oleaje

3.2 Datos

En esta descripción de los diferentes materiales utilizados se dan detalles de algunas de las funciones utilizadas en VBA para realizar las llamadas a Matlab. En la documentación adicional que se facilita a la entrega de este TFG se pueden consultar las funciones más detalladamente que tiene el programa, donde puede verse como se definen las variables globales definidas en distintas celdas de las hojas de cálculo, algunas funciones de comprobación de la existencia de ficheros, celdas en blanco, etc.

y las funciones para generar a partir de los datos contenidos en las distintas hojas de cálculo los ficheros de entrada que se generan en Matlab. También en la función

`ejecutaMatlab(ficheroMatlab)`

se puede ver la llamada al sistema que permite la ejecución de Matlab desde el propio VBA pasando como argumento el nombre del fichero .m generado.

Excel:

El control de ensayos se hace desde una base de datos en Excel y se evita la repetición de datos. Se explica partiendo de los datos que se asocian a cada uno de los ensayos y que son necesarios para la elaboración de los informes.

Hoja de Ensayos:

En la **Figura 3-7** puede verse la hoja correspondiente a "Ensayos". La información que facilita es extensa, lo que la puede hacer confusa, pero no es así. Debe tenerse en cuenta que por cada ensayo únicamente hay que definir las columnas en cuya cabecera aparece la palabra "datos", es decir columnas A, H, I, K, N. El resto de las columnas están bloqueadas y se obtienen a partir de esta u otras hojas del mismo libro mediante fórmulas en Excel.

- Columna A. Se define el número de ensayo como un entero de hasta 3 cifras.
- Columna H. Se elige el oleaje que se ha generado para este ensayo y que va a ser lanzado en pala por el ordenador 2 (en el siguiente capítulo se explica el esquema de configuración de los ordenadores). Este oleaje tiene una asociado los parámetros que van de la columna "O" a la "AB" pero que se traen de la BD de datos correspondiente a la hoja "Oleajes" que veremos más adelante. Téngase en cuenta que podemos tener dos o más ensayos con un mismo oleaje y no se quieren repetir datos de entrada.
- Columna I. Calibración del oleaje. La calibración del oleaje es un ensayo especial que debe realizarse antes de lanzar una batería de ensayos, por ejemplo, los ensayos de una mañana o una tarde, ya que se requiere calibrar las sondas de medida de la superficie libre regularmente debidos a los cambios de temperatura y/o salinidad

del agua. Debe tenerse en cuenta que la lectura del equipo de adquisición se realiza en voltios y hay que hacer una conversión a unidades métricas de longitud. Esta depende de las condiciones de ensayo y por eso hay que hacer una calibración que permita obtener esta función de transferencia de voltios a metros. El ensayo de calibración se explica cuando se describe la hoja "*Calibraciones*".

- Columna N. Descripción del tipo de ensayo que se va a realizar. Los posibles tipos de ensayo se facilitan en la Hoja "*BBDD*" y en Excel se muestra un desplegable al tocar sobre esa celda únicamente con las opciones disponibles.

El resto de las columnas son:

- Columna B. Denominada Step, se refiere a que un ensayo completo puede tener una duración muy elevada que hace que en el tanque de ensayos se generen oleajes no deseados debidos a las reflexiones en las distintas paredes, para ello lo que se hace es dividir la longitud del ensayo en distintos steps, se realiza el ensayo correspondiente a ese step, se espera a que el tanque se calme, y se pasa al siguiente hasta que se completa el tiempo total requerido para el ensayo. Cada uno de estos steps o subensayo se puede tratar como un ensayo completo a la hora de analizarlo.

- Columnas C. Clave única que define este ensayo con su subensayo. Esta clave aparece en el desplegable de la celda "I1" que permite elegir el subensayo sobre el que se ejecutarían las instrucciones asociadas a los dos botones que pueden verse en la hoja "*Adquirir ensayo*" y "*Analiza sondas*". Cada uno de estos botones ejecuta un script VBA que se describe más adelante en esta sección.

- Columna D. Descripción del subensayo.

- Columnas F y G. Son la fecha y la hora a la que se ha realizado el ensayo. Se rellenan automáticamente al pulsar el botón de adquirir ensayo justo antes de lanzar la adquisición. Al finalizar la misma se rellena la columna AC. De esta forma queda verificada la ejecución completa del ensayo.

- Columna AC. Nombre de los ficheros asociados a este ensayo.

Los botones "*Adquirir ensayo*" y "*Analiza sondas*" realizan un proceso similar consistente en:

- Escribir un fichero de entrada a Matlab con los datos obtenido en el libro Excel.
- Ejecutar una clase de Matlab con ese fichero de entrada mediante una llamada al sistema desde VBA.

La diferencia es lo que se ejecuta en cada una de las clases de Matlab.

La **Figura 3-8** muestra el código del botón de llamada junto con la interfaz de VBA asociada a este proyecto.

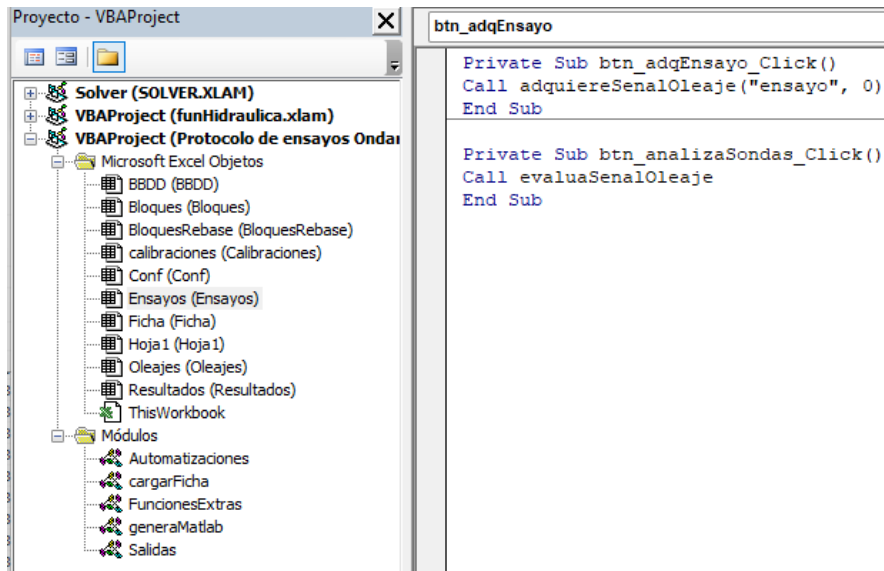


Figura 3-8. Interfaz en VBA asociada

También se muestra en la **Figura 3-9** alguna de las clases que se llaman desde VBA para realizar cálculos muy complejos que sería difícil implementar en VBA ya que se trabaja mucho con espectros de oleaje, transformadas de Fourier, análisis de serie temporales, etc. Estas herramientas están ya muy bien implementadas en Matlab y en Excel requerirían de un desarrollo importante. Además, para la adquisición de datos se requiere Matlab por ser este programa el que tiene los drivers necesarios para comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos de oleaje utilizada durante los ensayos.

```

-----
Sub evaluaSenalOleaje()

Const AUX_MATLABFILE = "auxMatlabFile2.m"

For nSensor = 1 To 4

    fichero = ficheroEnsayo & "_S" & Format(nSensor, "00")
    destino = matlabEnsayoPath & "/" & fichero

    Print #1, "% Sensor " & Format(nSensor, "00")
    Print #1, ""
    Print #1, "options.nSensor = " & nSensor & ";"
    Print #1, "options.ensayoId = " & fichero & ";"
    Print #1, ""
    Print #1, "ola = evaluaOleajeClass(options);"
    Print #1, ""
    Print #1, "% Sacar resultados"
    Print #1, "escala = 60;"
    Print #1, "ola.plotOleaje('emf', escala);"
    Print #1, "ola.plotH T('emf', escala);"
    Print #1, "ola.writeCSV analisis(" & fichero & "');"
    Print #1, ""
    Print #1, "% Mover ficheros"
    Print #1, "movefile " & fichero & "_S01.csv " & destino &
    "_S01.csv";"
    Print #1, "movefile " & fichero & "_Wave.emf " & destino &
    "_Wave.emf";"
    Print #1, "movefile " & fichero & "_H T.emf " & destino &
    "_H T.emf";"
    Print #1, "movefile " & fichero & "_ Analisis.xlsx " & destino &
    "_ Analisis.xlsx";"
    Print #1, ""
    Print #1, ""
Next nSensor

Print #1, "movefile " & AUX_MATLABFILE & " " & destino & ".m";"
Print #1, ""

Close (1)

' Ejecutar Matlab
hecho = ejecutaMatlab(AUX_MATLABFILE)
End If

End Sub

```

Figura 3-9. Función de VBA de evaluación de oleaje

En la **Figura 3-10** se muestra una de las clases programadas en Matlab correspondiente al análisis del oleaje a partir de los resultados obtenidos en la adquisición. El programa completo es mucho más extenso, pero sirve esta clase a modo de ejemplo.

```

classdef evaluaOleajeClass < handle
-----
% Declaración de propiedades visibles accesibles desde fuera de la clase
-----
properties
    analysisId           % Identificación de este análisis de sonda
    options = []         % Opciones de entrada del oleaje a evaluar
    ensayoId             % Identificación del ensayo
    nCalibration         % Número de la calibracion actual
    nTest                % Número de test
    sensorFileName      % Nombre del fichero csv de lectura de sonda
    calibrationFileName % Nombre del fichero mat del objeto de calibracion
    objCalibration      % Objeto con la calibracion que afcta este análisis
    nSensor              % Número del sensor a analizar (nº de serie)
    objName              % Nombre del bjecto con el análisis de sonda
    data                % Vector de datos de altura de ola
    fs = 400;           % Frecuencia de muestreo
    plotea = 1;         % Indica si se plotea (1) o no (0)
    saved = 0           % Indica si el objeto se ha salvado
end

function obj = evaluaOleajeClass(varargin)
% Método principal de la clase.

%% Parámetro olas.
function olas = get_olas(obj)
% Vector con cada una de las olas
% Cada fila es una ola, y las columnas con;
% 1: Índice en data donde empieza la ola
% 2: Índice en data donde acaba la ola
% 3: Periodo de la ola
% 4: Amplitud positiva de la ola
% 5: Amplitud negativa de la ola
% 6: Altura de la ola

% Starting and ending index of wave in the data serie
olaI = [obj.crossings(1: end-1) obj.crossings(2: end)];
Tola = (olaI(:,2) - olaI(:, 1)) / obj.fs; % Wave period

% Predimension for efficiency
aux = zeros(obj.nWaves, 6);
for ola = 1: obj.nWaves % For each wave
    alts = obj.data(olaI(ola, 1): olaI(ola, 2)); % Heights of this
wave
    Amax = max(alts); % Maximum positive
height
    Amin = min(alts); % Maximum negative
height
    H = Amax - Amin; % Maximum wave height
    aux(ola, :) = [olaI(ola, :) Tola(ola) Amax Amin H];
end
olas = aux;
end

```

Figura 3-10. Código de Matlab para análisis de oleaje

Hoja de Oleajes:

La **Figura 3-11** muestra una forma similar a la hoja "*Ensayos*" por lo que no se va a explicar con detalle. Simplemente se destaca que varios ensayos pueden realizarse con un mismo oleaje por lo que este último se identifica con una clave única definida en la columna C que se asocia en la hoja "*Ensayos*" en la columna H.

En la hoja "*Oleajes*" únicamente se definen las columnas con la palabra "*datos*" correspondientes a los parámetros de entrada necesarios para obtener las series temporales de oleaje a través de la definición espectral del mismo.

La llamada a la función en VBA que genera el oleaje se puede ver en **la Figura 3-12**. Se crea un fichero de Matlab, se toma como entrada los datos de la hoja de oleajes y en la variable ola se recogen todos los datos en objSenal provenientes de la subllamada a la función de Matlab generaSenalClass que se ve en la fig2. Este objeto es el que guarda los datos necesarios que luego serán llevados al ordenador 2 para mover las palas.

```

Sub generaOleaje()

Const AUX_MATLABFILE = "auxMatlabFile.m"

' Escribir fichero
Print #1, "% Generar muchos oleajes y guardar la señal jonswap optima"
Print #1, "close all; clear all; clear classes; clc"
Print #1, ""
Print #1, "cd(' & RUTA_MATLAB & ');"
Print #1, ""
Print #1, "% Generar el objeto señal"
Print #1, "options.tipo = " & espectro & ";"
Print #1, "options.ensayoId = " & fichero & ";"
Print #1, "options.depth = " & d & ";"
Print #1, "options.Hs = " & Hs & ";"
Print #1, "options.Tp = " & Tp & ";"
Print #1, "options.gamma = " & gama & ";"
Print #1, "options.duration = " & duracion & ";"
Print #1, "options.waveLng = " & waveLng & ";"
Print #1, "options.nOleajes = " & NOLEAJES & ";"
Print #1, ""
Print #1, "objSenal = generaSenalClass(options);"
Print #1, ""
Print #1, "% Generar el objeto de fichero de pala"
Print #1, "fileName = " & fichero & ";"
Print #1, "objPala = escribeFichPala(objSenal, fileName);"
Print #1, ""
Print #1, "% Obtener resultados"
Print #1, "objPala.objSenal.objSpectrum.plotSpectrum('emf', " & escala &
")"
Print #1, "objPala.objSenal.plotWaves(1,'emf', " & escala & ")"
Print #1, "objPala.objSenal.analisis.writeCSVanalisis(' & fichero & '",
1)"

Print #1, "% Mover ficheros"
Print #1, "movefile " & fichero & ".mat " & destino & ".mat";"
Print #1, "movefile " & fichero & ".txt " & destino & ".txt";"
Print #1, "movefile " & fichero & "_Generacion.mat " & destino &
"_Generacion.mat";"
Print #1, "movefile " & fichero & "_SV1.csv " & destino & "_SV1.csv";"
Print #1, "movefile " & fichero & "_S01.csv " & destino & "_S01.csv";"

```

Figura 3-12. Código de VBA para generación de oleaje

En la **Figura 3-13** se puede ver el código en Matlab de la función generaSenalClass

```

%% Signal wave generation
%-----
% CALL waveGenerated = generaSenalClass(tipo, options)
%
%
% tipo = 'regular' -> Regular senoidal wave
%       = 'chirp'  -> Chirp signal between 2 given frequencies
%       = 'jonswap' -> Wave signal from Jonswap spectrum
%
% Example:
%       waveGenerated = generaSenalClass('regular', options)
classdef generaSenalClass < handle
%-----
% Declaración de propiedades visibles accesibles desde fuera de la clase
%-----
properties
    %tipo = 'regular'      % Tipo de oleaje a generar
    options                % Opciones del oleaje de entrada
    objSpectrum            % Wave spectrum object
    phi                    % Random angle of spectral ith frequency
    gain = 1;              % Ganancia del espectro
    signal                 % Características de la señal generada
    saved = 0
end

%% Constructor.
function obj = generaSenalClass(varargin)

% Generar espectros en los oleajes que lo tienen y generar la señal

switch lower(obj.options.tipo)
case 'regular'
    obj.objSpectrum = [];
    obj.signal = this_generaRegular(obj);
case 'chirp'
    obj.objSpectrum = [];
    obj.signal = this_generaChirp(obj);
case 'jonswap'
    obj.objSpectrum = generaEspectro(obj.options.tipo, obj.options);
    obj.phi = []; % Genera la semilla aleatoria
    obj.signal = this_generaJonswap(obj);
case 'wnoise'
    obj.objSpectrum = generaEspectro(obj.options.tipo, obj.options);
    obj.phi = []; % Genera la semilla aleatoria
    obj.signal = this_generaWnoise(obj);
case 'solitary'
    obj.objSpectrum = [];
    obj.signal = this_generaSolitary(obj);
otherwise
end

```

Figura 3-13. Parte de código de Matlab de generaSenalClass

La ventaja de utilizar una hoja de cálculo radica en que, aunque el oleaje se define en prototipo (modelo real en la naturaleza) los datos pueden visualizarse también a escala de modelo (modelo de laboratorio) lo que es muy útil para los ensayos.

Hoja de Calibraciones:

En la **Figura 3-14** se muestra la hoja "Calibraciones". Cada tanda de ensayos realizados en una misma sesión (toda una mañana o una tarde) requieren una calibración previa de las sondas de oleaje para conocer la función de transferencia entre el voltaje leído en el sensor y la altura de la superficie libre. Esta función de transferencia es lineal y se obtiene mediante tres ensayos que luego se ajustan por mínimos cuadrados para obtener la recta de ajuste que se aplicará a todos los ensayos realizados en esta tanda.

El ensayo de calibración consiste en una toma de datos con el nivel del tanque constante y sin oleaje y con la sonda sumergida a distintos niveles también conocidos. Es decir, se hace un ensayo con la sonda sumergida hasta la mitad, que es como medirá durante el ensayo, y el valor medio de la medida en voltios se asocia al cero de la superficie libre. Posteriormente se desplaza la sonda una longitud conocida hacia arriba (por ejemplo 8 cm) y se obtiene una nueva medida en voltaje que se asociará a una altura de oleaje de -8 cm. Por último, se hace lo mismo sumergiendo la sonda 8 cm más que la situación de reposo y se obtiene el valor de voltaje para el oleaje de 8 cm.

Con estos tres ensayos se realiza el ajuste de mínimos cuadrados que permite obtener la pendiente y el corte por cero de la recta de calibración.

Ensayos Triwind						Elegir:	031	C031					
Protocolo de ensayos						Punto 1		Datos	Punto2		Datos	Punto 3	Calibración
Datos		Datos		Punto 1 (nivel de ensayo)				Punto 2 (subir sonda)		Punto 3 (bajar sonda)		Calibración	
Número	Nombre	Canales	Fecha	Hora	Altura (m)	Archivo	Altura (m)	Archivo	Altura (m)	Archivo	Archivo		
001	C001	[2,5,6,7]	20/10/2021	13:28:30	0.00	C001_P01	-0.06	C001_P02	0.06	C001_P03	C001		
002	C002	[2,5,6,7]	20/10/2021	16:22:28	0.00	C002_P01	-0.06	C002_P02	0.06	C002_P03	C002		
003	C003	[2,5,6,7]	21/10/2021	15:16:18	0.00	C003_P01	-0.06	C003_P02	0.06	C003_P03	C003		
004	C004	[2,5,6,7]	22/10/2021	13:34:30	0.00	C004_P01	-0.06	C004_P02	0.06	C004_P03	C004		
005	C005	[2,5,6,7]	22/10/2021	18:16:32	0.00	C005_P01	-0.06	C005_P02	0.06	C005_P03	C005		
006	C006	[2,5,6,7]	25/10/2021	17:34:04	0.00	C006_P01	-0.06	C006_P02	0.06	C006_P03	C006		
007	C007	[2,5,6,7]	26/10/2021	13:34:08	0.00	C007_P01	-0.06	C007_P02	0.06	C007_P03	C007		
008	C008	[2,5,6,7]	28/10/2021	9:01:39	0.00	C008_P01	-0.06	C008_P02	0.06	C008_P03	C008		
009	C009	[2,5,6,7]	28/10/2021	18:05:57	0.00	C009_P01	-0.06	C009_P02	0.06	C009_P03	C009		
010	C010	[2,5,6,7]	29/10/2021	18:18:59	0.00	C010_P01	-0.06	C010_P02	0.06	C010_P03	C010		
011	C011	[2,5,6,7]	29/10/2021	18:30:53	0.00	C011_P01	-0.06	C011_P02	0.06	C011_P03	C011		
012	C012	[2,5,6,7]	29/10/2021	18:50:53	0.00	C012_P01	-0.06	C012_P02	0.06	C012_P03	C012		
013	C013	[2,5,6,7]	02/11/2021	14:46:43	0.00	C013_P01	-0.06	C013_P02	0.06	C013_P03	C013		
014	C014	[2,5,6,7]	03/11/2021	10:06:14	0.00	C014_P01	-0.06	C014_P02	0.06	C014_P03	C014		
015	C015	[2,5,6,7]	03/11/2021	17:26:40	0.00	C015_P01	-0.06	C015_P02	0.06	C015_P03	C015		
016	C016	[2,5,6,7]	04/11/2021	16:05:09	0.00	C016_P01	-0.06	C016_P02	0.06	C016_P03	C016		
017	C017	[2,5,6,7]	05/11/2021	10:22:34	0.00	C017_P01	-0.06	C017_P02	0.06	C017_P03	C017		
018	C018	[2,5,6,7]	08/11/2021	12:46:54	0.00	C018_P01	-0.06	C018_P02	0.06	C018_P03	C018		
019	C019	[2,5,6,7]	09/11/2021	10:56:18	0.00	C019_P01	-0.06	C019_P02	0.06	C019_P03	C019		
020	C020	[2,5,6,7]	21/12/2021	17:19:31	0.00	C020_P01	-0.06	C020_P02	0.06	C020_P03	C020		

Figura 3-14. Hoja de Calibraciones

Cada uno de los ensayos asociados a la recta de calibración se realizan tras colocar las sondas en el tanque y pulsar el botón con la palabra "Punto #". Una vez realizado los tres la calibración se realiza pulsando en "Calibración". En todos los casos la adquisición y cálculo de los parámetros de calibración se hacen mediante la generación en VBA del fichero de entrada de Matlab y la llamada a la clase correspondiente.

Hoja de Configuración:

La Figura 3-15 muestra la hoja de configuración del proyecto donde se definen el título que aparece en todas las hojas, la ruta al proyecto, así como a todos los subdirectorios donde se encuentran la totalidad de los ficheros que se generan en el proceso, así como la escala del prototipo respecto del modelo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Definición del proyecto									
2										
3	Ordenador	JAIMEASUSCASA		Adquiere:	False					
4	Ruta programa Matlab	C:/MisNubes/OneDrive - Universidad Politécnica de Madrid/laboratorioPuertos/EquipoMedida/Mat								
5	Versión programa Matlab	1.0								
6										
7	Nombre del proyecto:	Ensayos Triwind								
8	Nickname para ficheros	TRIWIND								
9	Escala:	60								
10										
11	Ruta del Proyecto:	C:/Triwind								
12	Subdirectorios	Salidas:	/salidas							
13		Oleajes:	/salidas/oleajes							
14		Calibraciones:	/salidas/calibraciones							
15		Puntos calibraciones:	/salidas/calibraciones/puntos							
16		Ensayos:	/salidas/ensayos							
17		Optitrack:	/salidas/optitrack							
18		Ensayos + optitrack:	/salidas/juntos							
19		Fotos:	/salidas/fotos							
20		PDFs:	/salidas/pdfs							
21		Bloques:	/salidas/bloques							
22		BloquesRebase:	/salidas/bloquesRebase							

Figura 3-15. Hoja de Configuración

Salida en MkDocs:

La generación de los documentos con las explicaciones teóricas de los procesos de ensayo y los resultados de estos se generan de forma automatizada desde la aplicación. Más concretamente, los procesos teóricos y las plantillas que sirven para mostrar los datos se han escrito previamente mediante el lenguaje de hipermarcado MkDocs donde las variables que cambian con cada ensayo se han definido mediante un nombre de variable. Posteriormente desde cada una de las clases de Matlab se exportan los documentos de cabecera en formato MkDocs que asocian estos nombres de variable con los resultados de cada uno de los ensayos.

En las clases de Matlab puede verse como existen métodos para generar código en Mkdocs que sirve para exportar los datos en formato HTML en una web para que se puedan consultar los resultados de todos y cada uno de los ensayos cómodamente. El método es:

```
function str = writeMkdocsFile(obj, ensayo, misSondas)
```

y en él se llaman a otras funciones para escribir el código JavaScript necesario para que puedan generarse los gráficos con Plotly en Mkdocs. Cuando el número de datos es muy elevado antes de escribirlos se realiza un decimado de la serie en Matlab.

A continuación, se muestra una página de ejemplo generada con lenguaje de hipermarcado aplicando el software MkDocs. El fichero de hipermarcado se genera en dos fases, la primera el documento principal que se guarda como una plantilla y donde todos los valores que dependen de cada ensayo se llaman con un nombre de variable y la segunda que constituiría la cabecera del documento común, es donde se define los valores de cada una de las variables del documento de plantilla.

La segunda parte es la que genera Matlab con los datos de un ensayo. También Matlab añade la primera parte con la plantilla para formar un único documento para finalmente hacer una llamada al sistema para generar el código HTML a partir del lenguaje de hipermarcado.

En el código puede verse el archivo yml que se utiliza como cabecera del lenguaje de hipermarcado y donde se definen las distintas páginas que pueden visualizarse, el tema elegido, los plugins requeridos para poder visualizar toda la información, etc.

También se muestra el código MkDocs generado por Matlab antes de ser procesado para su conversión a HTML.

- Fichero yml (se muestra un extracto del mismo):

```
site_name: Archime3 - 15MW - CA
```

```
nav:
```

- Home: index.md
- Fundamentos teóricos:
 - Parámetros del oleaje: parametros.md
 - Oleaje regular: regular.md
 - Oleaje Chirp: chirp.md
 - Oleaje Jonswap: jonswap.md
- Calibraciones:
 - C02: C02.md
 - C03: C03.md
 - C04: C04.md
 - C05: C05.md
- Ensayos:
 - E1: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_CH01_C03_T01_S01.md
 - E2: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_CH02_C05_T01_S01.md

```

- E3: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_SM_CH03_C05_T01_S01.md
- E4: etc...
- Optitrack:
- O1: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T01_008.csv_OPTITRACK.md
- O2: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T02_009.csv_OPTITRACK.md
- O3: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T03_010.csv_OPTITRACK.md
- O4: etc...
- Acels:
- A1: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T01_008.csv_Acels.md
- A2: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T02_009.csv_Acels.md
- A3: ensayos/e/TW_A3_15MW_RAW_TEST_CA_DECAYS_HEAVE_T03_010.csv_Acels.md
- A4: etc...

theme:
  name: 'material'
  favicon: 'img/ecorelFavicon.png'
  logo: 'img/ecorelIcono.png'

extra_javascript:
- https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/mathjax/2.7.0/MathJax.js?config=TeX-AMS-
MML_HTMLorMML

markdown_extensions:
- mdx_math
- tables
- pymdownx.details
- admonition
- markdown_include.include:
  base_path: docs

plugins:
- search
- macros

```

- Fichero MkDocs (se muestra un extracto) con página de ejemplo:

```

Title: Ensayo TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_R002_C02_T01. Sonda 01
Summary: Resultados del ensayo TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_R002_C02_T01, sonda 01
Date: 18/06/2021
Authors:
  Cesar Sastre
  Jaime García Palacios
  José Luis Orts
email:
  cesar.sastre@upm.es
  jaime.garcia.palacios@upm.es
  joseluis.orts.egio@gmail.com

<script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.4.1/jquery.min.js"></script>
<script src="https://cdn.plot.ly/plotly-latest.min.js"></script>

<script>var THSlayout = {
  title: 'Historia temporal de oleaje',

```

```

xaxis: {
  title: 'tiempo (s)',
  autorange: true,
  rangeslider: {range: [0, 1500]}
},
yaxis: {title: 'Altura (m)'}
};</script>

```

```

<script>var T_Hlayout = {
  title: 'Altura de ola - Periodo',
  xaxis: {title: 'Altura (m)'},
  yaxis: {title: 'Periodo (s)'}
};</script>

```

//...resto de variables que se muestran en el informe

```

{% set Fecha = '18/06/2021' %}
{% set Ensayo = 'TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_RO02_C02_T01' %}
{% set Sonda = 01 %}
{% set miFichero =
'/ensayos/TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_RO02_C02_T01/TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_RO02_C02_T01_S01.csv'
%}
{% set fs = 400 %}
{% set duracion = 1099.997500 %}
{% set nData = 440000 %}
{% set nWaves = 1104 %}
{% set Hs = 0.027878 %}
{% set H10 = 0.044479 %}
{% set H100 = 0.034921 %}
{% set Hmax = 0.052017 %}
{% set Hrms = 0.017049 %}
{% set Tz = 0.995213 %}
{% set Ts = 1.169255 %}
{% set Tp = 1.195652 %}
{% set fm = 0.920212 %}
//...más variables (momentos de oleaje, energía espectral de oleaje con su máximo, etc)

```

Ensayo {{Ensayo}}. Sonda {{Sonda}}

A continuación se muestra la serie temporal correspondiente al análisis de la sonda {{Sonda}} del ensayo {{Ensayo}}. Para la adquisición se ha utilizado una frecuencia de muestreo de {{fs}} Hz, con una duración total de {{duracion}} s, lo que resulta en {{nData}} datos adquiridos.

```
<div id="THSplot" style="width:98%;height:400px;"></div>
```

La serie analizada tiene un total de {{nWaves}} olas, y se han obtenido los siguientes parámetros de altura de ola en metros:

H_s	H₁₀	H₁₀₀	H_{max}	H_{rms}
-----	-----	-----	-----	-----
{{Hs}}	{{H10}}	{{H100}}	{{Hmax}}	{{Hrms}}

Los periodos, en segundos, extraídos de la serie se corresponden con:

```
| T<sub>z</sub> | T<sub>s</sub> | T<sub>p</sub> |
| ----- | ----- | ----- |
| {{Tz}} | {{Ts}} | {{Tp}} |
```

La definición de los parámetros pueden consultarse en la hoja `**[Parámetros del oleaje](../../parametros.md#Introducción)**`

La figura siguiente muestra la relación de altura de ola periodo que se obtiene de dibujar cada una de las olas por separado. Situando el cursor sobre el punto puede consultarse las coordenadas del mismo.

```
<div id="T_Hplot" style="width:74%;height:500px;"></div>
```

```
//...más código para representar momentos de oleaje, etc.
```

El resultado en HTML de una página puede verse en la [Figura 3-16](#).

Archime3 - 15MW - CA

Home

Fundamentos teóricos >

Calibraciones >

Ensayos

E1

E2

E3

E4

E5

E6

E7

E8

E9

E10

E11

E12

E13

E13

E14

E15

E16

E17

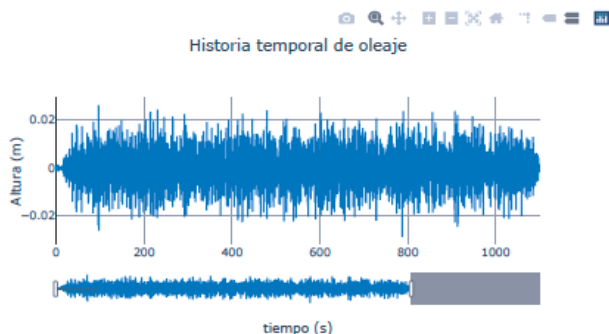
Optitrack >

Acels >

Ensayo

TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_R002_C02_T01. Sonda 1

A continuación se muestra la serie temporal correspondiente al análisis de la sonda 1 del ensayo TW_A3_15MW_RAW_Test_CA_SM_R002_C02_T01. Para la adquisición se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 400 Hz, con una duración total de 1099.9975 s, lo que resulta en 440000 datos adquiridos.



La serie analizada tiene un total de 1104 olas, y se han obtenido los siguientes parámetros de altura de ola en metros:

H_s	H_{10}	H_{100}	H_{max}	H_{rms}
0.027878	0.044479	0.034921	0.052017	0.017049

Los periodos, en segundos, extraídos de la serie se corresponden con:

T_z	T_s	T_p
0.995213	1.169255	1.195652

La definición de los parámetros pueden consultarse en la hoja [Parámetros del oleaje](#)

La figura siguiente muestra la relación de altura de ola período que se obtiene de dibujar cada una de las olas por separado. Situando el cursor sobre el punto puede consultarse las coordenadas del mismo.

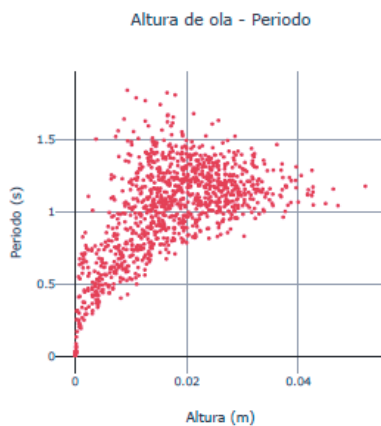


Figura 3-16. Página HTML generada a partir de MkDocs

Capítulo 4 - Metodología para la realización de ensayos

Los ensayos de laboratorio a escala sobre la plataforma Triwind [3] [4] [5] están destinados a conocer sus movimientos y aceleraciones en el nacelle para las condiciones marítimas de servicio y extremas [19] [27] con objeto de establecer la compatibilidad con los requerimientos de funcionamiento de los aerogeneradores en ambas situaciones.

Además, dada la semejanza de Froude elegida como semejanza de escala y que, debida a esta cualquier medida en modelo, se ve ampliada en prototipo, se requería de una sensorica 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

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 (Figura 4-1) con las cuales se puede 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.

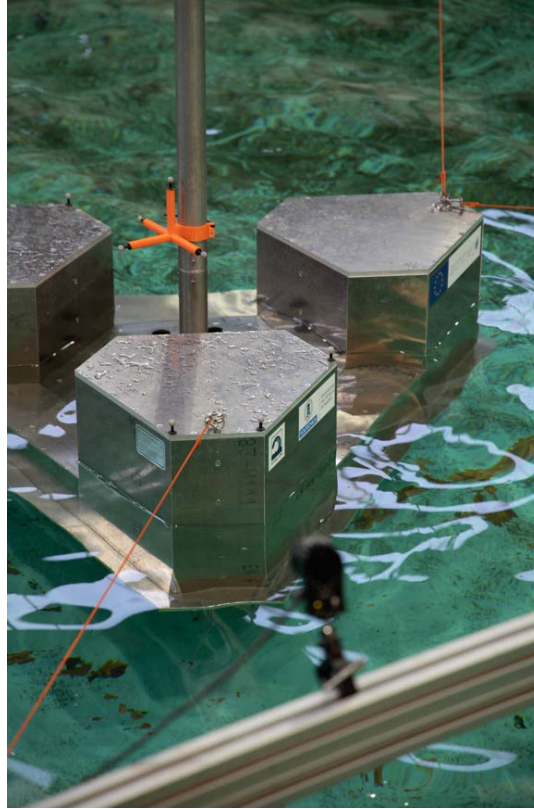


Figura 4-1. Cámara infrarroja de posicionamiento apuntando a los markers del modelo

Una de las cuestiones (y a su vez problemáticas) más importantes a resolver en los ensayos fue la de evaluar la respuesta dinámica del flotador ante la acción incidente del oleaje (Figura 4-2).

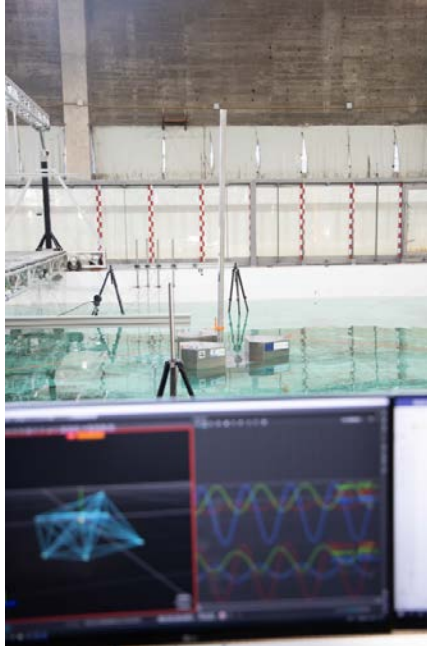


Figura 4-2. Sistema de Adquisición de la dinámica del flotador trabajando en tiempo real durante un ensayo

Esto ha llevado a realizar una primera serie de ensayos con las condiciones de oleaje de servicio y extremal esperables y otros más centrado en conocer la resonancia del sistema formado por el flotador (con todos los elementos que soporta) y el oleaje.

La realización de estos ensayos requiere tres equipos independientes formados por:

- Generación del oleaje físico en el ordenador de control de las palas del laboratorio con los drivers y sistemas de control necesarios para el correcto funcionamiento de este equipamiento.
- El ordenador de adquisición del equipo de Optitrack necesario para conocer los giros y desplazamientos de la estructura bajo control. Este equipo tiene licencia propia y los resultados únicamente se pueden exportar una vez finalizado el ensayo de laboratorio.
- El equipo de adquisición de datos de oleaje conectado a la tarjeta de adquisición de datos MGplus que incorpora la conversión analógica digital de las sondas resistivas utilizadas para la medición de altura de la superficie libre en el tanque. Estas sondas requieren de calibración antes del comienzo de cada ensayo.

Si bien el equipo de control de las palas puede utilizarse para la adquisición de las sondas de oleaje, esto se ha descartado por varios motivos:

- El comportamiento con este equipo de adquisición es de caja negra, no pudiendo saberse si las señales adquiridas sufren algún tipo de filtrado antes de su archivado (lo que parece ser que ocurre al comparar con la adquisición en otro ordenador).
- Las frecuencias de muestreo son fijas y algo bajas para el ensayo que se quiere realizar. La tarjeta de adquisición tiene unas posibilidades más amplias que utilizando este equipo se están limitando en opciones.
- Es necesario hacer un proceso de exportación de archivos bastante tedioso tras cada uno de los ensayos para poder utilizar los datos. Este debe hacerse desde el propio equipo teniendo que elegir los archivos de entrada con ratón, y establecer el nombre del fichero de salida, así como las opciones de exportación. Este proceso no se puede hacer mediante una llamada de comando que hubiera facilitado el proceso y evitado la introducción de errores.

Con todo lo anteriormente descrito, el sistema que se ha montado se resume en la **Figura 4-3**. En ella puede verse que en un mismo ordenador se ha juntado la base de datos y se controlan los procesos de control de ensayos en una base de datos en Excel y a partir de ella, utilizando VBA se crean los ficheros de entrada a las clases de Matlab que permiten:

- La generación del fichero de oleaje que es necesario importar en el ordenador 2 de control de las palas de laboratorio.
- La adquisición de los datos del ensayo utilizando la tarjeta de adquisición conectada a este ordenador por USB (MGPlus) que dispone de drivers en Matlab. En este proceso se adquieren los datos a fichero y se visualizan en tiempo real pero no se analizan al no ser necesario en este estadio, priorizando los recursos del ordenador en la adquisición.
- El análisis automatizado de los resultados una vez ha finalizado el ensayo, generándose los gráficos y ficheros de resultados que se entregan al cliente.

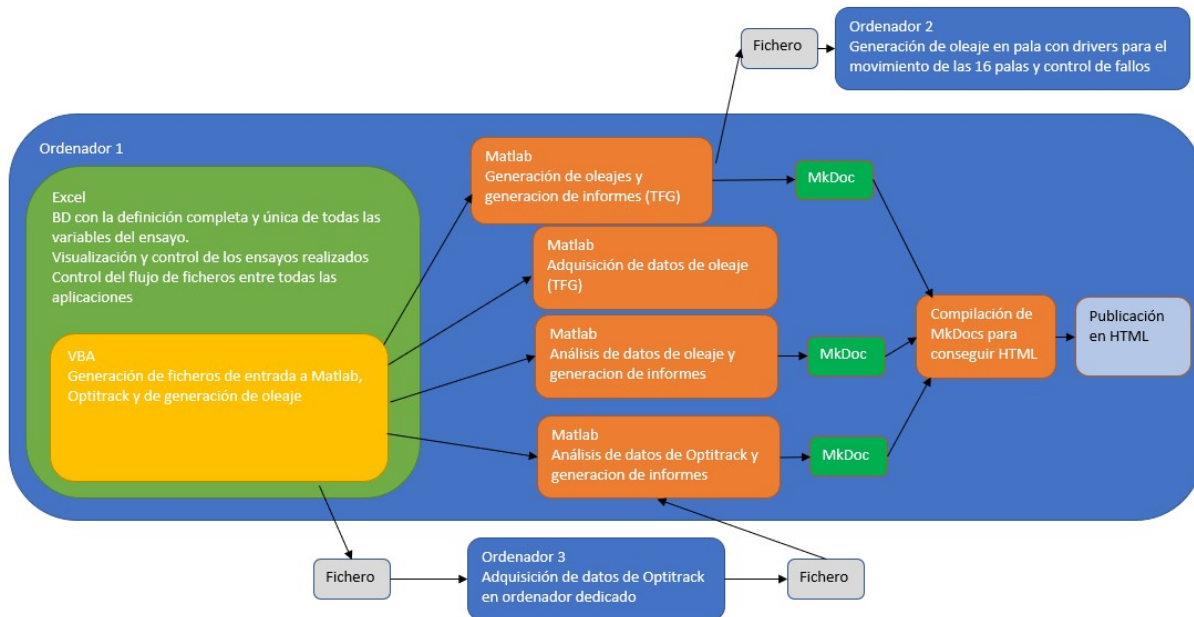


Figura 4-3. Esquema de equipos y funciones

También desde la base de datos se facilita el nombre de fichero que habrá que imponer al fichero de salida que se genera en el ordenador 3 encargado exclusivamente de la adquisición mediante el software Optitrack. Este fichero se recupera posteriormente en el ordenador 1 para analizarse mediante una nueva clase de Matlab que chequea, completa y analiza los resultados, así como los exporta para su entrega al cliente.

En las clases de Matlab se dispone un método de exportación de resultados a JavaScript para poder mostrar los resultados mediante HTML que se genera a través de la compilación de documentos escrito en el lenguaje de hipertexto de MkDocs utilizando unas plantillas previamente creadas para importar estas salidas de Matlab y con generación de gráficos en Plotly.

Para la realización de los ensayos y el procesado de estos se ha seguido la siguiente metodología:

1. Definir los parámetros del oleaje.

Estos son: altura de ola, período, longitud de onda y su generación tanto el caso monocromático o regular (velocidad angular, desfase y frecuencia) como el caso irregular – espectral (tipo de espectro, parámetro de apuntamiento, duración del oleaje. (Figura 4-4).

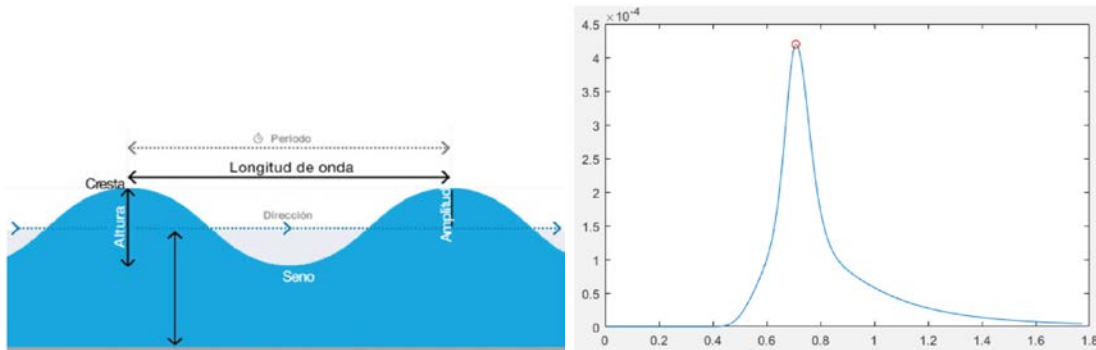


Figura 4-4. Parámetro de oleaje [18] [19]

2. Calibración.

El proceso de calibración consiste en la adquisición de series cortas, para distintos niveles conocidos del tanque, de las que se obtiene la media y la desviación de la muestra. La media representa la lectura en voltios del sensor, y la desviación una medida de la precisión que puede obtenerse. La desviación depende del ruido de la medida más las perturbaciones que pueda haber en el tanque debido al movimiento de las sondas para ajustarse a los distintos niveles de calibración. Con los datos en voltaje de cada una de las sondas y sus correspondientes niveles conocidos, se obtiene la función de transferencia entre voltios y altura de la superficie libre. El tipo de sonda utilizado tiene una relación lineal entre ambos, por lo que esta función de transferencia se ajustará mediante una recta. Para cada una de las sondas se obtiene una recta de calibración ajustada por mínimos cuadrados en función de los 3 puntos de medida. Tanto los puntos de ajuste como la recta se representan en un gráfico y una ecuación. Esto

se repite para cada uno de los sensores que intervienen en el contraste del modelo físico (Figura 4-5).

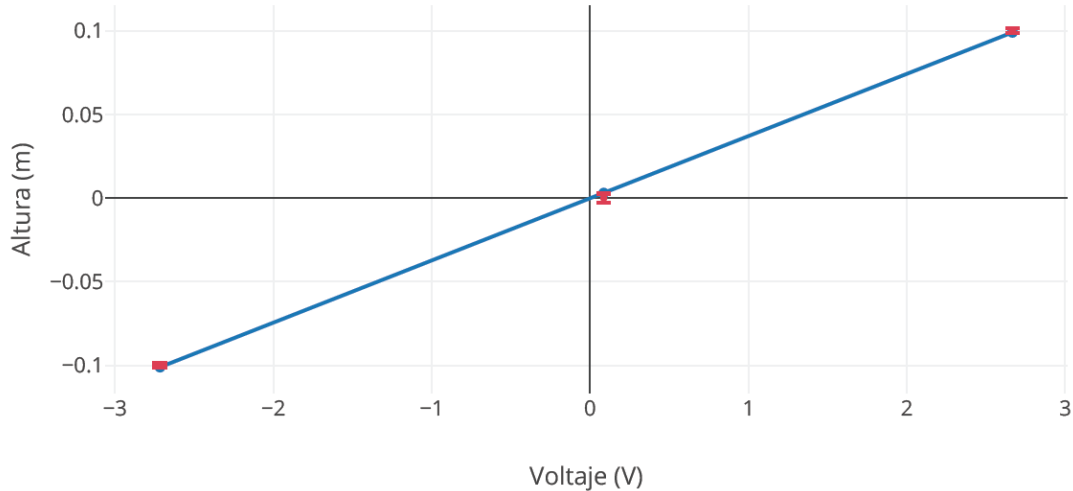


Figura 4-5. Función de transferencia entre voltios y altura de la superficie libre

3. Definición de estados del mar iniciales.

Sobre la base del clima marítimo del emplazamiento, por ejemplo, Mar del Norte y los factores de escala en semejanza Froude dado que el oleaje es una onda de gravedad, se definen los estados de mar previos a la experimentación (Figura 4-6).

		Escala	50	Calado	0.8	Espectro	JONSWAP			
		Prototipo				Modelo				
		Nombre	Hs (m)	Tp (s)	Tm (s)	Duración (s)	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Duración (s)
Ensayos en Régimen Operativo	RO-01		2	6	5,00	5000,00	0,04	0,85	3,3	707,11
	RO-02		2	10	8,33	8333,33	0,04	1,41	3,3	1178,51
	RO-03		2	14	11,67	11666,67	0,04	1,98	3,3	1649,92
	RO-04		4	6	5,00	5000,00	0,08	0,85	3,3	707,11
	RO-05		4,5	9	7,50	7500,00	0,09	1,27	3,3	1060,66
	RO-06		4	14	11,67	11666,67	0,08	1,98	3,3	1649,92
	RO-07		6	10	8,33	8333,33	0,12	1,41	3,3	1178,51
	RO-08		6	14	11,67	11666,67	0,12	1,98	3,3	1649,92
Ensayos en Régimen Extremo	RE-01		6	12	10,00	10000,00	0,12	1,70	3,3	1414,21
	RE-02		6	18	15,00	15000,00	0,12	2,55	3,3	2121,32
	RE-03		8	18	15,00	15000,00	0,16	2,55	3,3	2121,32

Figura 4-6. Datos de estados de mar inicial

4. Ensayos iniciales

El interés es la medición de aceleraciones y desplazamientos en los seis grados de libertad, así como, el correcto funcionamiento del sistema de amarres y la comprobación de diferentes sistemas de ayuda a la estabilidad a escala 1/50. Para ello, se procede a la configuración de los ensayos en régimen operativo y en estado límite último, realizando la generación de oleaje, la configuración de las amarras, el cálculo de las catenarias y comprobando que los resultados son homogéneos con los teóricos y los comparados con otros dispositivos semejantes tipo barge (Figura 4-7).

		Escala 50				Calado 0.8		Espectro Jonswap			
	Nombre	Prototipo				Modelo					
		Hs (m)	Tp (s)	Tm (s)	Duración (s)	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Duración (s)		
Ensayo Marketing	EM-01	4	10	8,33	8333,33	0,08	1,41	3,3	1178,51		
Ensayos en Régimen Operativo	RO-01	2	6	5,00	5000,00	0,04	0,85	3,3	707,11		
	RO-02	2	10	8,33	8333,33	0,04	1,41	3,3	1178,51		
	RO-03	2	14	11,67	11666,67	0,04	1,98	3,3	1649,92		
	RO-04	4	6	5,00	5000,00	0,08	0,85	3,3	707,11		
	RO-05	4,5	9	7,50	7500,00	0,09	1,27	3,3	1060,66		
	RO-06	4	14	11,67	11666,67	0,08	1,98	3,3	1649,92		
	RO-07	6	10	8,33	8333,33	0,12	1,41	3,3	1178,51		
	RO-08	6	14	11,67	11666,67	0,12	1,98	3,3	1649,92		
Ensayos en Régimen Extremo	RE-01	6	12	10,00	10000,00	0,12	1,70	3,3	1414,21		
	RE-02	6	18	15,00	15000,00	0,12	2,55	3,3	2121,32		
	RE-03	8	18	15,00	15000,00	0,16	2,55	3,3	2121,32		
	RE-04	10	18	15,00	15000,00	0,2	2,55	3,3	2121,32		

Figura 4-7. Configuración de ensayo

5. Calendario de ensayos.

Realizada la generación de los oleajes, la calibración, los estados iniciales de clima y el contraste con ensayos previos, se efectúa el calendario de pruebas a realizar (Figura 4-8).

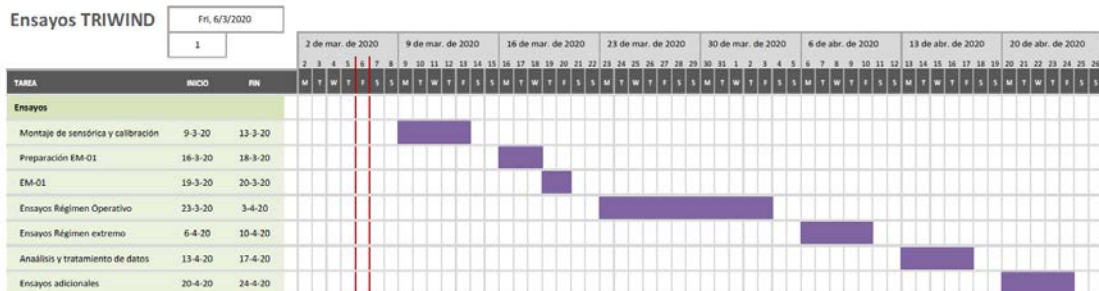


Figura 4-8. Planificación de ensayo

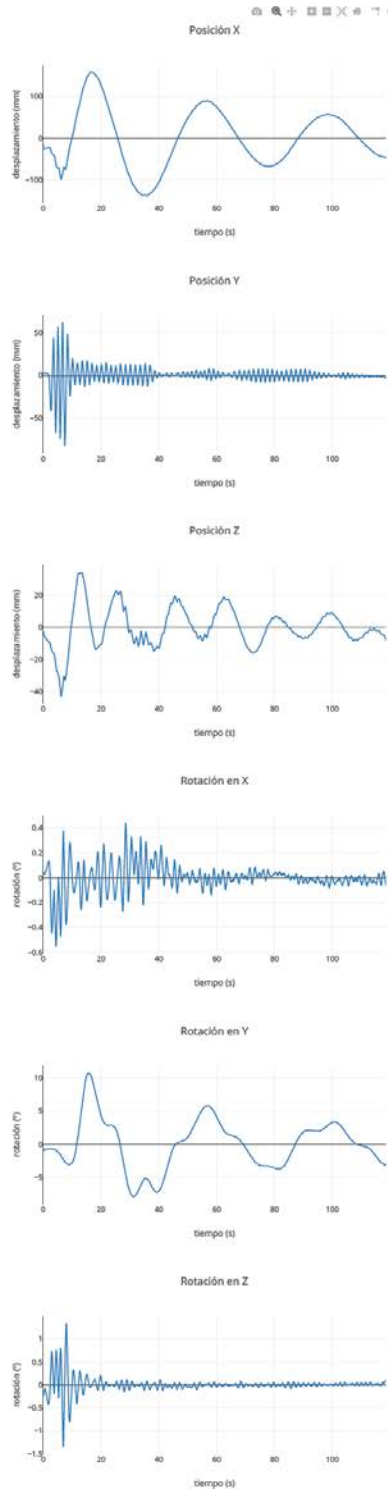
6. Desarrollo de los ensayos.

Para ello y siguiendo la planificación se emplea el Optitrack para conocer los desplazamientos y giros del dispositivo en ELU o ELS (Figura 4-9).

Ensayo Decay_Heave_BIS1. Optitrack

Este fichero muestra las series temporales y máximos correspondientes al análisis de los movimientos (desplazamientos y rotaciones) obtenidos con el Optitrack del ensayo Decay_Heave_BIS1.

Para la adquisición se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 120 Hz, con una duración total de 118.49 s, lo que resulta en 14220 datos adquiridos. La representación gráfica está decimada para obtener una frecuencia cercana a los 20 Hz. Para el decimado se ha utilizado un filtro de señal que mantiene las características de la señal original.



Ensayo Decay_Pitch_BIS2. Optitrack

Este fichero muestra las series temporales y máximos correspondientes al análisis de los movimientos (desplazamientos y rotaciones) obtenidos con el Optitrack del ensayo Decay_Pitch_BIS2.

Para la adquisición se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 120 Hz, con una duración total de 46.25 s, lo que resulta en 5551 datos adquiridos. La representación gráfica está decimada para obtener una frecuencia cercana a los 20 Hz. Para el decimado se ha utilizado un filtro de señal que mantiene las características de la señal original.

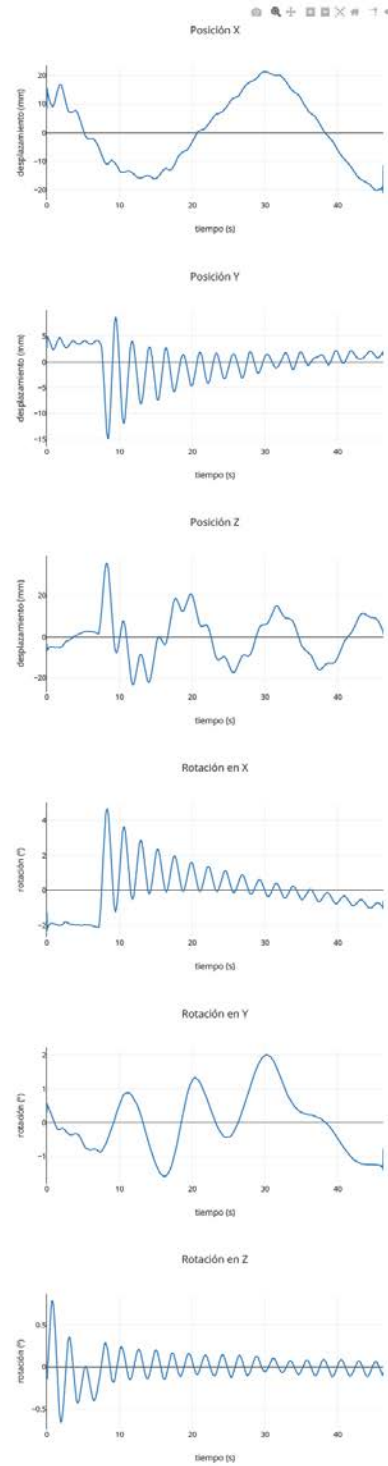


Figura 4-9. Análisis de desplazamientos y rotaciones

Se muestra un ejemplo para "heave" y para "pitch" respectivamente. Con todos los datos se elaboran unas tablas con relación a los máximos y mínimos alcanzados y los tiempos en que se producen (Tabla 4-1).

	Pos _x	Pos _y	Pos _z	Rot _x	Rot _y	Rot _z
t_{max}	16.8083	6.6667	13.2583	28.4833	15.6167	7.9667
Max	158.7243	62.5354	34.3956	0.4422	10.7469	1.3418
t_{min}	35.8	7.4583	6.1667	4.3667	31.1583	6.925
Min	-138.2805	-83.092	-43.0573	-0.5578	-7.9496	-1.3546

Tabla 4-1. Relación entre máximos y mínimos y tiempos en que se producen

7. Lectura e interpretación de datos.

Siguiendo el mapeo, la distribución de ensayos y la estructura de carpetas se realizan las pruebas y se analizan y procesan los resultados (Figura 4-10 y Figura 4-11).



Figura 4-10. Estructura de carpetas

DECAY TESTS

	Name	Observations
Decay test 1	D1_Pitch	No holes. No mooring. Added weight.
	D1_Roll	No holes. No mooring. Added weight.
	D1_Yaw	No holes. No mooring. Added weight.
	D1_Heave	No holes. No mooring. Added weight.
Decay test 2	D2_Pitch	With holes. Without mooring
	D2_Roll	With holes. Without mooring
	D2_Yaw	With holes. Without mooring
	D2_Heave	With holes. Without mooring
Decay test 3	D3_Pitch	With holes. With mooring
	D3_Roll	With holes. With mooring
	D3_Yaw	With holes. With mooring
	D3_Surge	With holes. With mooring
	D3_Sway	With holes. With mooring
	D3_Heave	With holes. With mooring

RAOS CALIBRATION

	Name	T	H	Duration (min)	Observations
Regular Waves	RC01	4	x	5	H to be set
	RC02	8	x	5	H to be set
	RC03	12	x	5	H to be set
	RC04	16	x	5	H to be set

WHITE NOISE

	Name	Tini	Tfinal	Duration (min)	Observations
White noise	WN1	4	20	20	Tini could be lower
	WN2	4	8	10	Tini could be lower
	WN3	8	14	10	
	WN4	14	20	10	
	WN5	20	30	10	If Possible

WIND CALIB

	Name	Uw (m/s)
Wind only	WC 1	11
	WC 2	25
	WC 3	5

CURRENT CALIB

	Name	C (m/s)
Current only	C 1	1,5

WAVE + WIND + CURRENT

		Prot.									
		Name	Hs (m)	Tp (s)	Tm (s)	Gamma	Uw (m/s)	C (m/s)	Duration (s)	Orientation	Spectrum
Operative State R0	WWCR0_OS_01	2	6	5,00	3,3	7,8	X	5000,00	0	PM	
	WWCR0_OS_02	2	10	8,33	3,3	7,8	X	8333,33	0	PM	
	WWCR0_OS_03	4	6	5,00	3,3	10,1	X	5000,00	0	PM	
	WWCR0_OS_04	4,5	9	7,50	3,3	10,1	0,40	7500,00	0	PM	
	WWCR0_OS_05	6	10	8,33	3,3	12,2	X	8333,33	0	PM	
	WWCR0_OS_06	6	14	11,67	3,3	12,2	X	11666,67	0	J	
Limit State R0	WWCR0_LS_01	6	12	10,00	3,3	X	X	10000,00	0	J	
	R0_LS_02	8	18	15,00	3,3	X	X	15000,00	0	J	
	R0_LS_03	10	18	15,00	3,3	X	X	15000,00	0	J	
	R0_LS_04	8,5	10,5	8,75	3,3	46	1,20	8750,00	0	PM	
		Prot.									
		Name	Hs (m)	Tp (s)	Tm (s)	Gamma	Uw (m/s)	C (m/s)	Duración (s)	Orientation	Spectrum
Operative State R30	WWCR30_OS_01	2	6	5,00	3,3	7,8	X	5000,00	30	PM	
	WWCR30_OS_02	2	10	8,33	3,3	7,8	X	8333,33	30	PM	
	WWCR30_OS_03	4	6	5,00	3,3	10,1	X	5000,00	30	PM	
	WWCR30_OS_04	4,5	9	7,50	3,3	10,1	0,40	7500,00	30	PM	
	WWCR30_OS_05	6	10	8,33	3,3	12,2	X	8333,33	30	PM	
	WWCR30_OS_06	6	14	11,67	3,3	12,2	X	11666,67	30	J	
Limit State R30	WWCR30_LS_01	6	12	10,00	3,3	X	X	10000,00	30	J	
	WWCR30_LS_02	8	18	15,00	3,3	X	X	15000,00	30	J	
	WWCR30_LS_03	10	18	15,00	3,3	X	X	15000,00	30	J	
	WWCR30_LS_04	8,5	10,5	8,75	3,3	46	1,20	8750,00	30	PM	

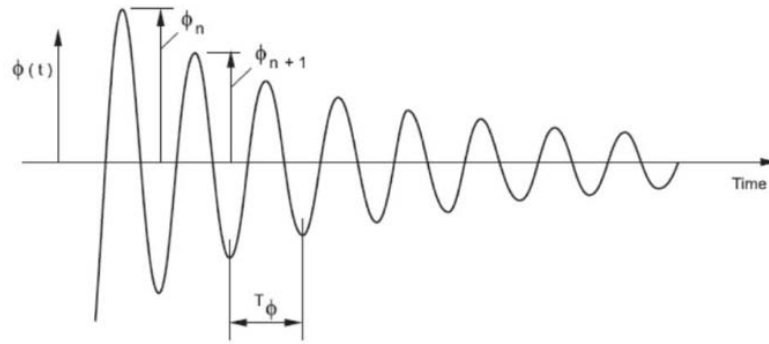
Figura 4-11. Interpretación de datos

8. Análisis de resultados (se pone un ejemplo).

Estudio de la atenuación y periodo propios en un ensayo de DECAY. Para el estudio de atenuación y periodos propios según los ensayos de DECAY la metodología se centra en el estudio pormenorizado de los resultados para cada DECAY test analizando la atenuación y el periodo propio por cada grado de libertad.

En la presente campaña de ensayos la obtención del coeficiente de damping (Figura 4-12) ha sido descartada debido al gran amortiguamiento del sistema y lo que esto implica ya que se hace muy complicado definir la curva de atenuación con pocas crestas que identificar para el ajuste de dicha curva. Cabe destacar también la influencia del fondo sobre todo teniendo en cuenta la amplia planta del modelo y la relación de este con las dimensiones del tanque. Por ello, los DECAY Tests se han podido ver afectados por todos estos factores anteriormente mencionados, relativizando por tanto la validez de los datos que ahora se pasan a exponer.

Para estos ensayos se han decidido estudiar únicamente aquellos grados de libertad dependientes al menos en gran medida del flotador y no únicamente del sistema de mooring, siendo estos: Pitch, Heave y Roll.



in which:

- $\phi(t)$ = time trace of motion ϕ
- ϕ_n = motion amplitude of n-th oscillation, [m], [deg]
- T_ϕ = natural period of motion ϕ , [s]

Figura 4-12. Visualización del concepto de Damping y periodos naturales

El periodo natural obtenido para Pitch es de 2,3373 segundos en modelo, lo que son 16,52 segundos en prototipo (Figura 4-13).

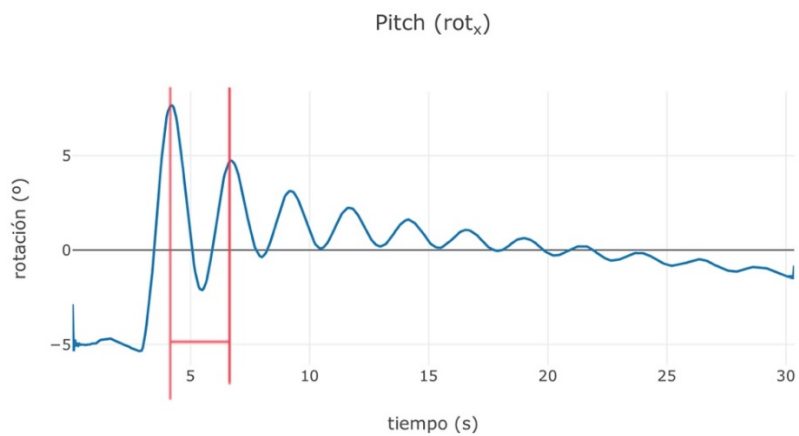


Figura 4-13. Serie temporal de giros en Pitch para el ensayo

El periodo natural obtenido para Heave es de 1,65 segundos en modelo, lo que son 11,67 segundos en prototipo (Figura 4-14).

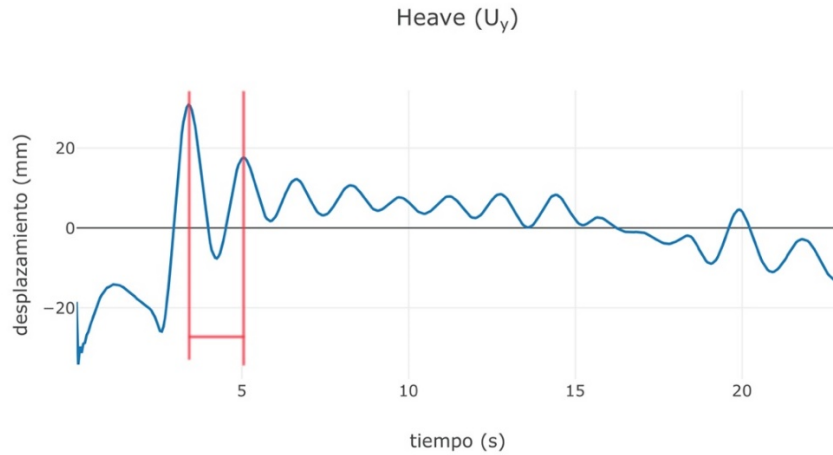


Figura 4-14. Serie temporal de desplazamientos en Heave para el ensayo

El periodo natural obtenido para Roll es de 2,532 segundos en modelo, lo que son 17,9 segundos en prototipo (Figura 4-15).

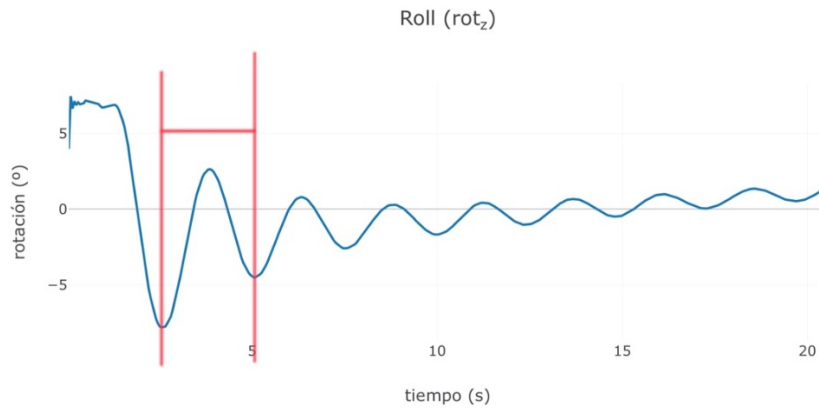


Figura 4-15. Serie temporal de giros en Roll para el ensayo

9. Interpretación y validación del dispositivo.

Si en régimen medio se presentan giros inferiores a $3-4^\circ$ y en régimen de extremos en el entorno de 11° puede considerarse que el mecanismo puede ser susceptible de un ensayo a escala $\frac{1}{2}$, fase en la que se encuentra el modelo TRIWIND en estos momentos. [3] [4] [5]

Las tareas involucradas en el post proceso del proyecto Triwind [3] [4] [5] se realizaron en un equipo multidisciplinar del Grupo de Investigación ECOREL, en el cual

se dividieron las tareas a realizar. Sólo a nivel descriptivo se incluyen los siguientes procesos:

- Leer los archivos de generación de oleaje en pala. Este oleaje es teórico y debe comprobarse con los resultados de las mediciones.
- Recuperar los archivos de calibración del oleaje de la sesión de ensayos realizados en esa mañana o tarde.
- Leer, para cada ensayo:
 - o Los archivos de sonda y pasarlos por los datos de calibración para conseguir alturas de la superficie libre en unidades del sistema internacional.
 - Procesar estos datos para obtener, series históricas, periodos, alturas de oleaje, estadísticas del oleaje, momentos, etc. Es decir, todos los parámetros necesarios para poder comparar este oleaje con el teóricamente generado en pala.
 - Exportar estos datos en forma de informe para entregar al cliente de forma automatizada.
 - o Los archivos de Optitrack. Estos archivos han tenido que ser exportados del ordenador destinado a la lectura de forma manual en un proceso en que las opciones pueden fijarse por defecto para todos los archivos, lo que facilita el proceso, pero obliga a fijar el nombre de archivo, lo que hay que hacer con cuidado. Con esto datos hay que realizar los siguientes procesos:
 - Obtener las series históricas de movimientos, giros y aceleraciones.
 - Detectar y eliminar los tiempos de lectura donde el sistema no ha podido rellenar los datos.
 - Realizar un proceso de interpolación en estos huecos (son pequeños).
 - Analizar desplazamientos y giros, así como aceleraciones lineales y angulares en cada uno de los 6 ejes de libertad del modelo. Estos datos se dan referido el centro de gravedad (CDG) del modelo.

- Calcular las aceleraciones correspondientes al nacelle y analizar cuando se sobrepasan las condiciones de funcionamiento y/o riesgo.

Una vez analizada la complejidad del problema, y teniendo siempre en mente la rigurosidad inherente a un proceso de ensayos, se decide establecer un protocolo en el que deberán cumplirse una serie de requisitos.

Cada uno de los procesos deberá ir validado en una hoja de control de ensayos. Esta será única para todos ellos y podrá ser consultado por todos los miembros del equipo. En esta hoja no podrá definirse un mismo dato en dos lugares diferentes para evitar errores. Estos requisitos se adecuan muy bien a la existencia de una base de datos. Por otra parte, si esta base de datos se plantea en un libro Excel con varias hojas de cálculo se obtienen varias ventajas:

- Se facilita la visualización de los datos de entrada y el control de ensayos.
- Se permite añadir nuevas columnas con cálculos que facilitan el control de los ensayos, por ejemplo, con los datos en escala de modelo y prototipo donde solo es necesario imponer una de las dos, pero pueden visualizarse los datos en ambas escalas.
- Se puede utilizar el lenguaje Visual Basic for Applications (VBA) para generar distintos procesos de forma automatizada evitando errores como son:
 - o Generación de ficheros de entrada a Matlab para el análisis de serie de oleaje y del Optitrack.
 - o Llamada a ejecución de scripts de Matlab desde dentro del propio Excel.
 - o Recuperación de datos procesados de Matlab para importar los resultados a los gráficos que se generan en la propia hoja de control de ensayos.
 - o Impresión a pdf de los resultados.

Capítulo 5 - Discusión de los resultados

Dados los datos obtenidos en la campaña de ensayos, y siendo el análisis dinámico el factor clave para la valoración funcional del sistema, la evaluación de resultados se centra en:

1. Conjunto de frecuencias de resonancia para cada desplazamiento y rotación.
2. Estudio de la atenuación y periodos propios según los ensayos de DECAY.
3. Estudio de los valores máximos de desplazamiento y aceleración obtenidos para cada régimen.

5.1 Conjunto de frecuencias de resonancia para cada desplazamiento y rotación

A continuación, se presentan los datos obtenidos para el barrido con señal CHIRP (señal de amplitud constante y de periodo variable, este caso creciente) en el ensayo CH-01 ya que este barre en frecuencias la totalidad del espectro de oleaje empezando desde $T_i = 3,535$ s hasta los $T_f = 21,21$ s.

	Sway	Heave	Surge	Pitch	Yaw	Roll
Max	6.482	15.6986	35.5063	3.447	0.7036	0.5224
t_{\max}	1171.7083	949.9417	1175.325	1191.0833	1126.375	1172.9667
Min	-7.4615	-15.3839	-31.516	-3.4719	-0.9534	-0.5268
t_{\min}	1125.2917	950.6333	1176.6333	1192.4667	1129.75	1122.0083

Figura 5-1. Valores máximos y mínimos de cada grado de libertad para el ensayo CH-01

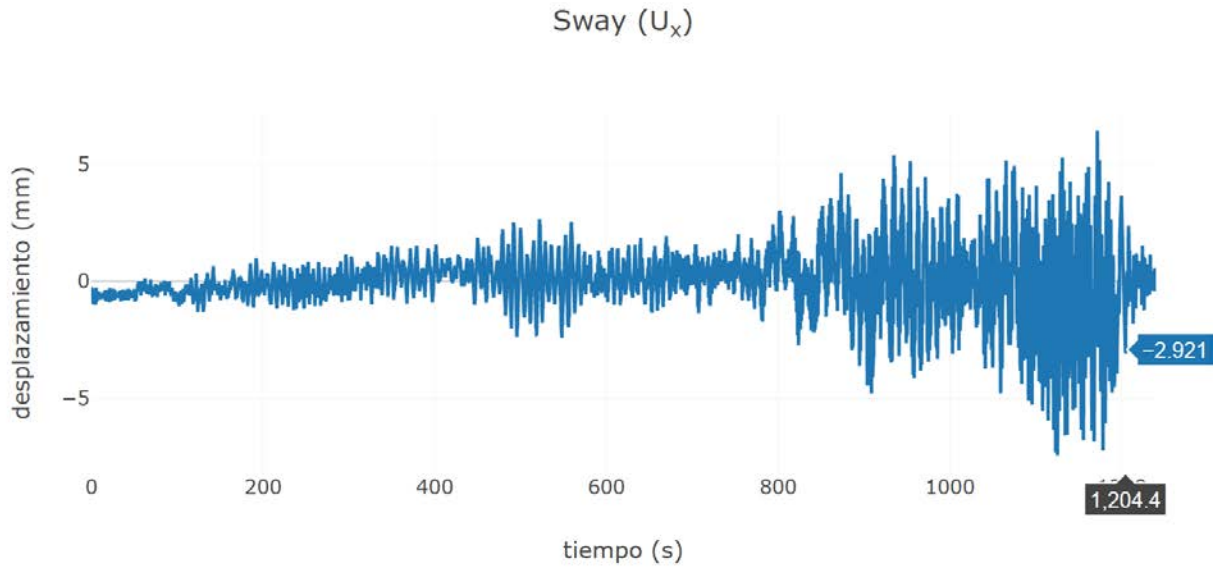


Figura 5-2. Serie temporal de desplazamientos en Sway para el ensayo CH-01

Tal y como se aprecia en la **Figura 5-2** el desplazamiento en Sway presenta su mayor amplitud para periodos comprendidos entre los 20 y 21 segundos con desplazamientos máximos entre -7,46mm y 6,48mm. Aunque es apreciable el aumento de desplazamiento en estos periodos, la variación en estos no es tan drástica como en otros movimientos, sobre todo, dada la direccionalidad del oleaje.

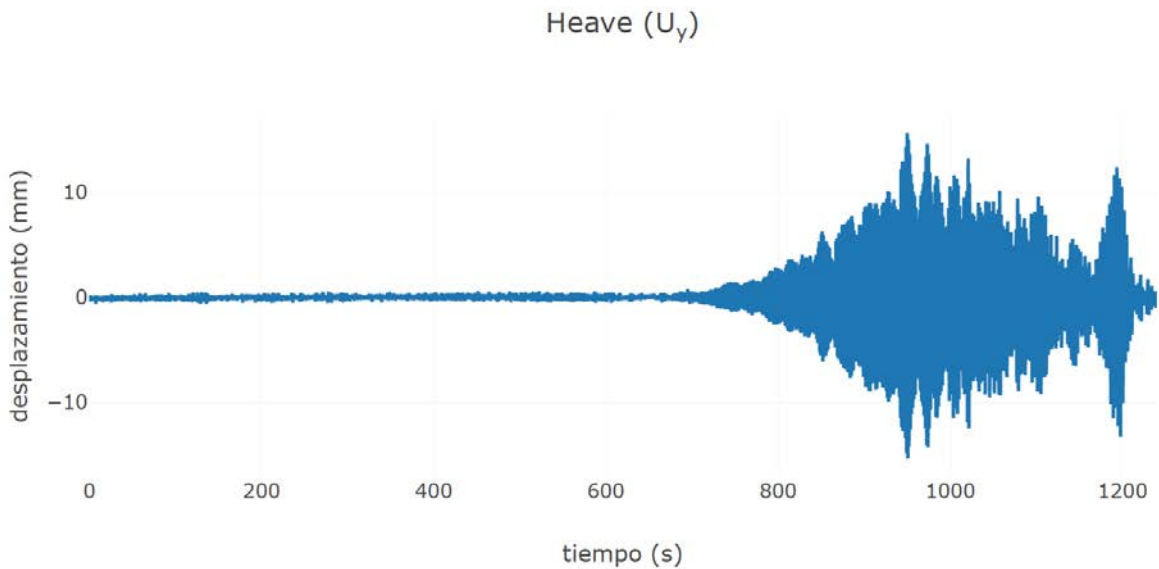


Figura 5-3. Serie temporal de desplazamientos en Heave para el ensayo CH-01

El periodo de mayor amplitud para el fenómeno de Heave según la **Figura 5-3** se encuentra entre los periodos cercanos a 16/17 s con valores máximos de amplitud entre los 15,69mm y los -15,38mm. Esta vez y a diferencia de la serie temporal anterior es apreciable la zona en la que el sistema entra en resonancia ya que esta está muy concentrada en la parte alta de los periodos, además es apreciable una segunda zona de resonancia en la parte más alta del espectro.

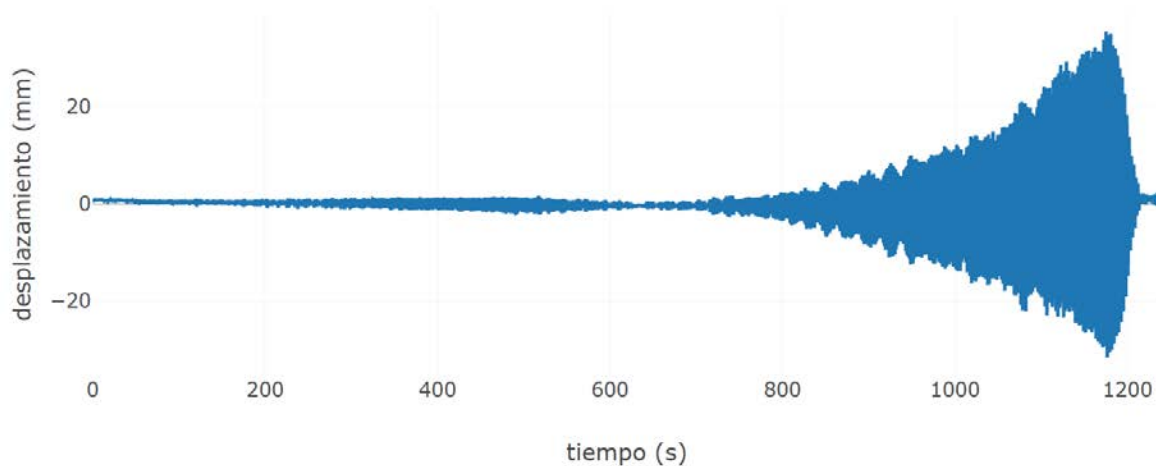


Figura 5-4. Serie temporal de desplazamientos en Surge para el ensayo CH-01

El periodo de mayor amplitud para el fenómeno de Surge según la **Figura 5-4** se encuentra en los periodos cercanos a 21s con valores máximos de amplitud entre los 35mm y los - 31,51mm. En este desplazamiento se hace palpable como la incidencia del oleaje y las mayores longitudes de onda afectan considerablemente al desplazamiento en Surge.

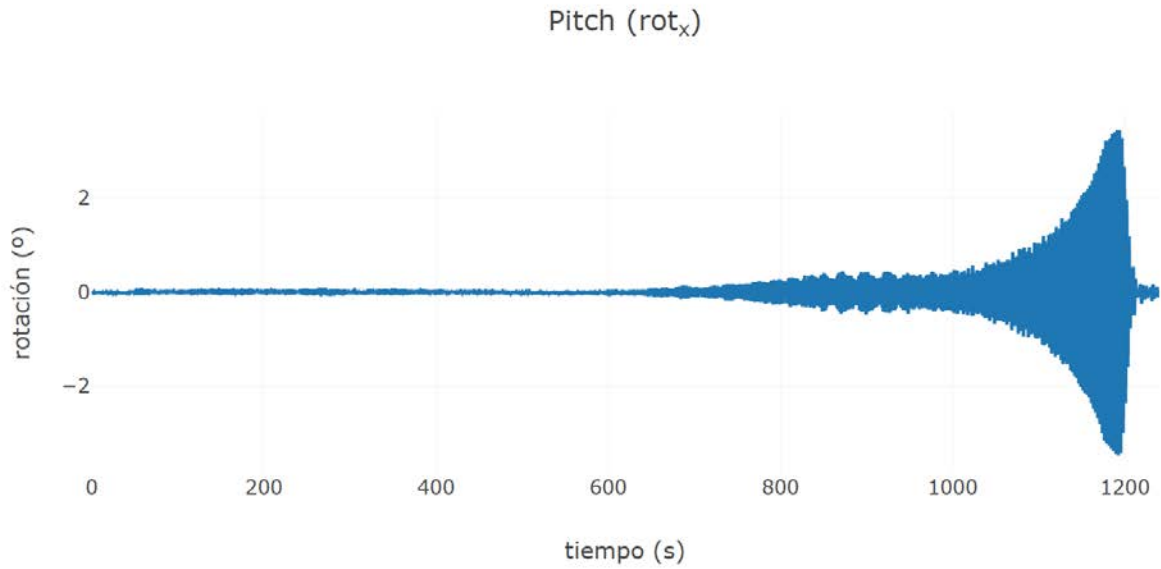


Figura 5-5. Serie temporal de giros en Pitch para el ensayo CH-01

El periodo de mayor amplitud para el giro en Pitch según la **Figura 5-5** se encuentra entre los periodos cercanos a los 21s con valores máximos de giro entre los $3,447^\circ$ y los $-3,472^\circ$. En el caso del pitch cabe destacar la concentración de este en la parte alta del espectro lo que denota un muy buen comportamiento de la plataforma ante la acción del oleaje en franjas de periodos más comunes así como el marcado acento de los giros máximos en un corto espacio de frecuencias.

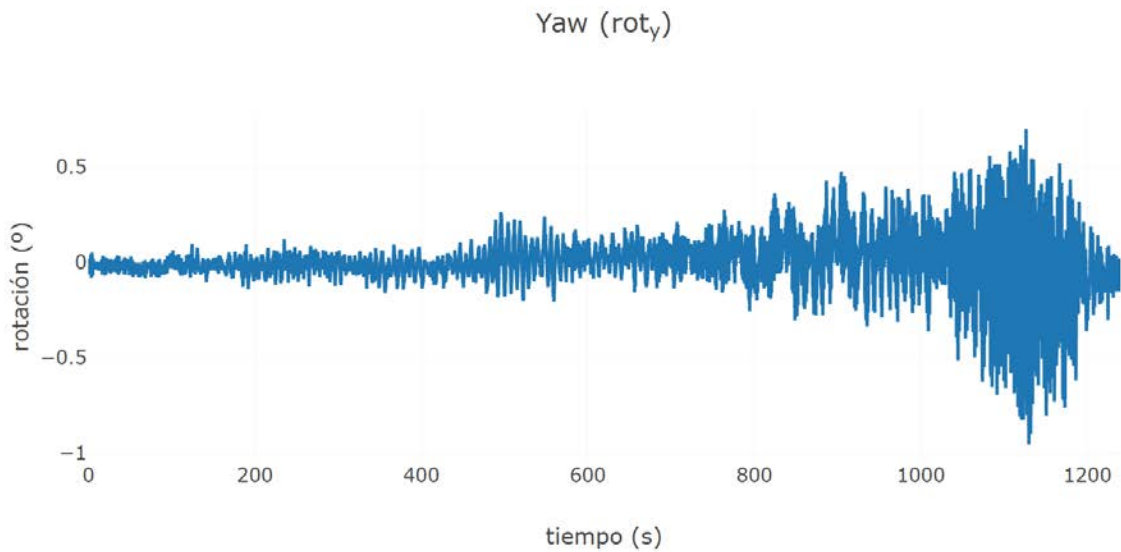


Figura 5-6. Serie temporal de giros en Yaw para el ensayo CH-01

El periodo de mayor amplitud para el giro en Yaw según la **Figura 5-6** se encuentra entre los periodos 19,8s y 21,21s con valores máximos de giro entre los $0,95^\circ$ y los $-0,70^\circ$. Este giro en Yaw es de poca relevancia a la hora de determinar el funcionamiento dinámico del flotador ya que la incidencia perfectamente perpendicular del oleaje durante los ensayos y la acción del soft mooring, hacen de este giro algo relativo más al comportamiento de la capacidad de aproamiento del sistema antes que una particularidad propia del flotador.

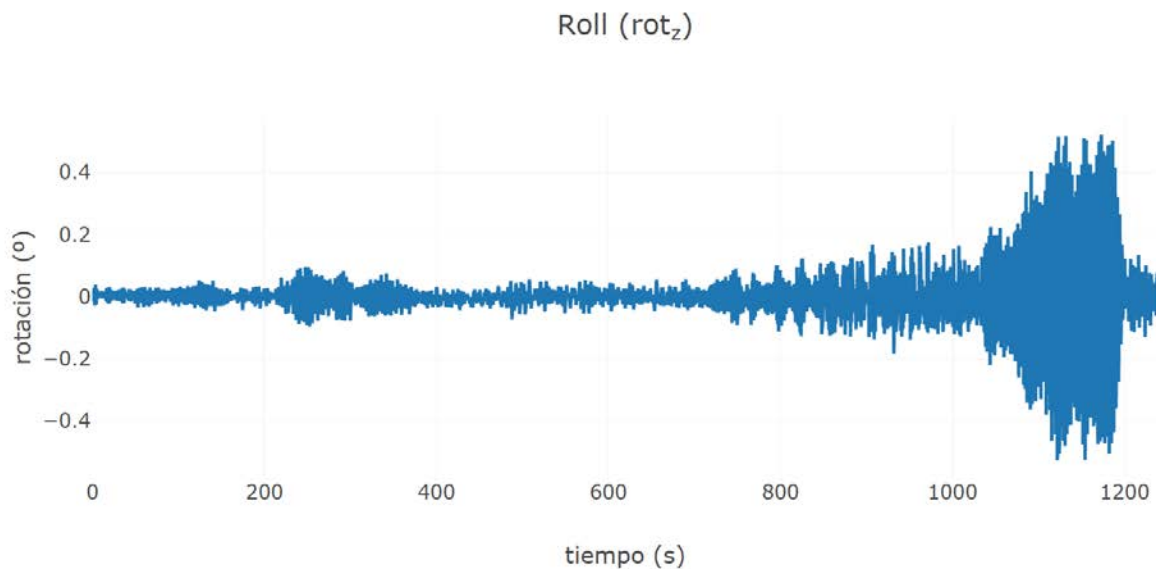


Figura 5-7. Serie temporal de giros en Roll para el ensayo CH-01

El periodo de mayor amplitud para el giro en Roll según la **Figura 5-7** se encuentra en periodos menores de 19,44s y 21,21s con valores máximos de giro entre los $0,52^\circ$ y los $-0,52^\circ$. Este giro en Roll es insignificante a la hora de caracterizar la dinámica del flotador, ya que este apenas ocurre durante la serie temporal.

5.2 Estudio de atenuación y periodos propios según los ensayos de DECAY

Para el estudio de atenuación y periodos propios según los ensayos de DECAY la metodología se centra en el estudio pormenorizado de los resultados para cada DECAY test analizando la atenuación y el periodo propio por cada grado de libertad.

La obtención del coeficiente de damping ha sido descartada debido al gran amortiguamiento del sistema y lo que esto implica, ya que se hace muy complicado definir la curva de atenuación con pocas crestas para identificar el ajuste de dicha

curva. Cabe destacar también la influencia del fondo del tanque de experimentación sobre todo teniendo en cuenta la amplia planta del modelo y la relación de este con las dimensiones del tanque. Por ello, los DECA Y Tests se han podido ver afectados por todos estos factores anteriormente mencionados, relativizando por tanto la validez de los datos que ahora se pasan a exponer.

Para estos ensayos se han decidido estudiar únicamente aquellos grados de libertad dependientes al menos en gran medida del flotador y no únicamente del sistema de mooring, siendo estos: Pitch, Heave y Roll.

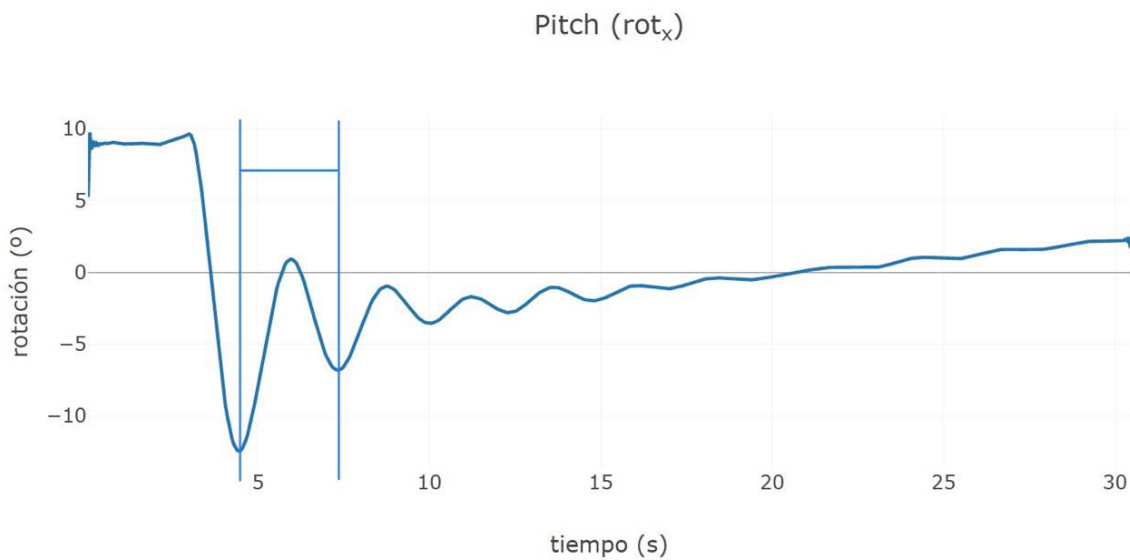


Figura 5-8. Serie temporal de giros en Pitch

El periodo natural obtenido para Pitch es de 2,84 segundos en modelo, lo que son 15 segundos en prototipo (Figura 5-8).

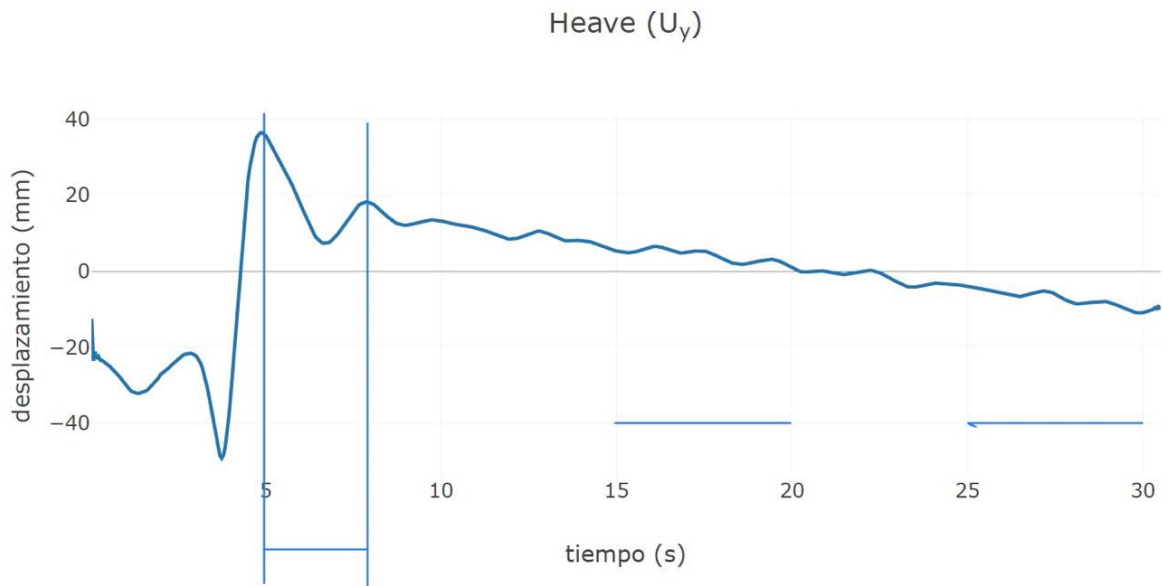


Figura 5-9. Serie temporal de desplazamientos en Heave

El periodo natural obtenido para Heave es de 2,94 segundos en modelo, lo que equivale a 22,8 segundos en prototipo. Es importante destacar que este dato ha de tomarse con cierta cautela debido a los factores anteriormente mencionados además de la clara influencia del gran funcionamiento amortiguador de las celdas, visible en la irregularidad de la onda (Figura 5-9).

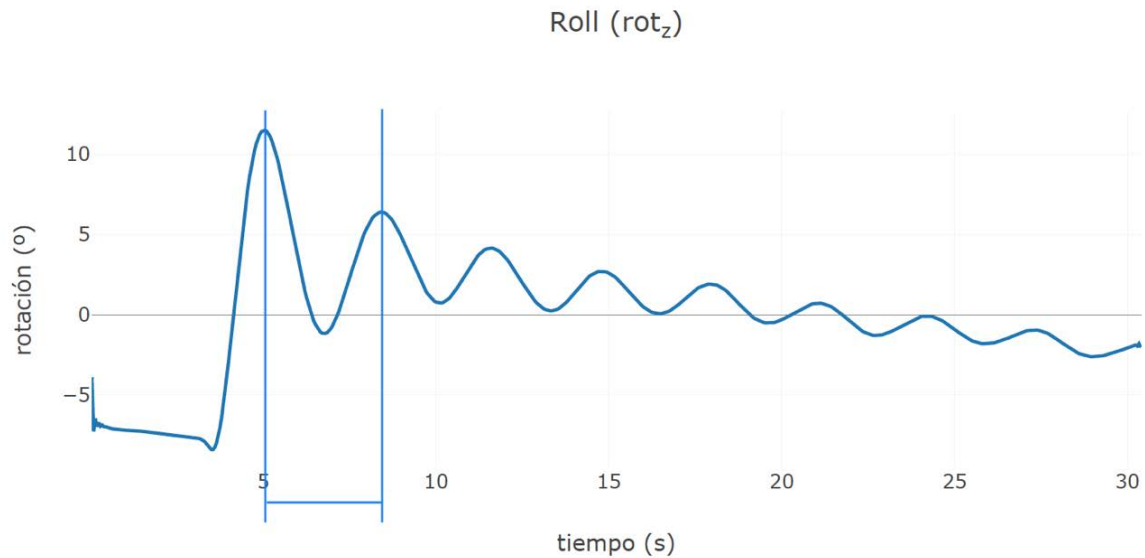


Figura 5-10. Serie temporal de giros en Roll

El periodo natural obtenido para Roll es de 3,29 segundos en modelo, lo que son 21 segundos en prototipo (Figura 5-10).

5.3 Estudio de los valores máximos obtenidos en Pitch y Heave para cada régimen

Uno de los objetivos a tratar en esta campaña es el de valorar los desplazamientos, giros y aceleraciones máximas dentro del régimen funcional operativo y extremal. Para dar estos valores se han utilizado el ensayo RO-08 para el régimen operativo y el RE-02 para el extremal ya que son estos los que contemplan las condiciones de oleaje más exigentes dentro de cada rango operativo.

- Régimen operativo

	Sway	Heave	Surge	Pitch	Yaw	Roll
Max	19.3566	46.7242	72.4702	2.6995	1.1663	0.8554
t _{max}	245.15	735.4583	155.125	806.1917	757.1083	368.1
Min	-15.0951	-56.135	-89.99	-3.1079	-1.5506	-0.6214
t _{min}	368.275	736.3083	735.7	1035.1667	217.0667	1036.1167

Figura 5-11. Valores máximos y mínimos en mm de desplazamiento y giro para cada grado de libertad para el ensayo RO-08

	Sway	Heave	Surge	Pitch	Yaw	Roll
Max	9.69e-01	1.82e+00	1.29e+00	2.63e+01	1.81e+01	4.52e+01
t _{max}	387.04	320.32	395.78	329.52	198.88	386.86
Min	-1.05e+00	-1.87e+00	-1.28e+00	-2.61e+01	-1.79e+01	-4.30e+01
t _{min}	387.07	386.86	201.78	254.88	329.52	279.48
Mean	2.39e-05	5.13e-05	-1.28e-04	-6.69e-05	1.46e-05	-2.41e-05
Rms	1.82e-01	3.01e-01	2.94e-01	3.82e+00	3.02e+00	5.79e+00
a _{max} / a _{rms}	5.7668	6.2251	4.3863	6.8896	5.9978	7.7997

Figura 5-12. Valores máximos y mínimos de aceleraciones en mm/s² en el nacelle para cada grado de libertad para el ensayo RO-08

Dadas las condiciones de oleajes definidas por el ensayo más exigente del conjunto de ensayos en régimen funcional operativo, el RO-08 y siendo estas $H_s = 6$ m y $T_p = 14$ s y considerando que estos valores son característicos más de unas condiciones extremas que operativas, se obtienen, tal y como se pueden ver en la **Figura 5-12**, unas inclinaciones máximas en Pitch de 3,1 grados, y una amplitud máxima total en heave de 6,12 m. En Yaw, la plataforma vira sobre si misma apenas 1,5°, mientras que en Roll se han obtenido valores contenidos de 0,85°.

En cuanto al comportamiento del flotador en el plano horizontal se observa que los valores en Surge y por ser esta la dirección coincidente con la de la incidencia del oleaje son altos, llegando a una amplitud máxima total de 9,66 m. En cuanto al Sway, y

precisamente por esta perpendicularidad al oleaje y al contrario de lo que ocurre con el Surge, este es apenas de 2,04 metros.

- Régimen extremal

	Sway	Heave	Surge	Pitch	Yaw	Roll
Max	15.396	50.0691	107.3511	6.7826	1.1924	0.6659
t_{\max}	595.6083	104.9083	546.5	1546.15	1283.4917	1518.775
Min	-16.1522	-57.5511	-111.2585	-6.6435	-1.2448	-0.7619
t_{\min}	1184.275	171.8083	1547.8	544.75	181.475	1237.4583

Figura 5-13. Valores máximos y mínimos en mm de desplazamiento y giro para cada grado de libertad para el ensayo RE-02

	Sway	Heave	Surge	Pitch	Yaw	Roll
Max	5.81e-01	6.85e-01	1.02e+00	3.49e+00	1.59e+00	2.00e+00
t_{\max}	188.0	1171.79	595.42	1910.86	1375.25	1385.61
Min	-8.10e-01	-6.92e-01	-9.54e-01	-5.24e+00	-1.52e+00	-1.42e+00
t_{\min}	1428.03	170.96	1104.3	1385.61	634.98	1526.83
Mean	-2.09e-06	-2.00e-06	-1.06e-06	-5.80e-06	1.42e-06	-2.50e-06
Rms	1.03e-01	1.65e-01	2.55e-01	7.03e-01	2.46e-01	2.23e-01
$a_{\max} / a_{\text{rms}}$	7.8709	4.1815	3.9886	7.4543	6.472	8.9785

Figura 5-14. Valores máximos y mínimos de aceleraciones en mm/s² en el nacelle para cada grado de libertad para el ensayo RE-02

Dadas las condiciones de oleajes definidas por el ensayo más representativo del conjunto de ensayos en régimen extremal, el RE-02 y siendo estas $H_s = 6$ m y $T_p = 18$ s, se obtienen, tal y como se pueden ver en la **Figura 5-13**, unas inclinaciones máximas en Pitch de 6,78 grados, y una amplitud máxima total en heave de 6,42 m. En Yaw, la plataforma vira sobre si misma un máximo de 1,24° mientras que en Roll se han obtenido

valores contenidos de $0,76^\circ$, que apenas difieren de los obtenidos con el régimen operativo.

En cuanto al comportamiento del flotador en el plano horizontal se observa que los valores en Surge y por ser esta la dirección coincidente con la de la incidencia del oleaje son altos, llegando a una amplitud máxima total de 13,08 m que al igual que en el operativo, cuando se compara con los 60 metros de cajero, se relativizan considerablemente. En cuanto al Sway, y precisamente por esta perpendicularidad al oleaje y al contrario de lo que ocurre con el Surge, este es apenas de 1,86 metros.

Capítulo 6 - Conclusiones y trabajos futuros

A la vista de los resultados de los ensayos 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. Con las tecnologías actuales, los dispositivos flotantes pueden construirse tanto en hormigón como en acero. No se descartan los nuevos materiales para un futuro próximo.

3. Las estructuras flotantes mejoran las condiciones de implementación que tienen las estructuras de gravedad o GBS o las pilotadas. Las primeras tienen limitaciones claramente en 30 metros de lámina de agua, mientras que las pilotadas quedan constreñidas por la geometría de los pilotes, que difícilmente puedan superar los 100 metros de longitud y ocho metros de diámetro.

4. Los procesos constructivos, así como, los equipos y maquinaria relacionados con los procesos de instalación, mantenimiento, reparación y desmantelamiento aconsejan los dispositivos flotantes descartando los tradicionales de las obras marítimas convencionales.

5. Se pueden encontrar en un grado de madurez o TRL en el entorno de 5 - 7, pudiendo estar en enorme desarrollo para 2025, habiendo alcanzado por ello el nivel TRL 9.

6. Las plataformas ensayadas hasta el momento se consideran híbridas, dado que en aguas someras pueden trabajar por gravedad y en transición como flotantes.

7. En los ensayos se detectan problemas en anclajes. Estos ensayos se han realizado en ELS (Estado límite de servicio) y ELU (Estado límite último), con oleaje irregular y espectro JONSWAP.

8. Los ensayos han permitido elaborar mediante técnicas de sensorización el seguimiento de los movimientos y giros del flotador creando códigos propios y bases de datos relacionados con los sistemas de generación espectrales.

9. El seguimiento de las experimentaciones solamente puede realizarse con los modelos desarrollados para la investigación.

10. Los ensayos de las plataformas tipo TRIWIND y ARCHIME 3 [3] [4] [5] 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, lo que ratifica el correcto comportamiento en este nivel de magnitud tecnológica.

Como consecuencia de las conclusiones del presente trabajo, se proponen las siguientes líneas futuras de trabajo que se empezarán a comprobar en las nuevas pruebas de la plataforma tipo ELISA de Esteyco en 2022. Estas son:

1. Análisis del comportamiento estructural e hidráulico en otras condiciones de mar, donde domina el oleaje de viento en lugar del mar de fondo y el parámetro espectral de apuntamiento está por encima de 4.

2. Mejora en los sistemas de anclaje de las plataformas flotantes.

3. Ajuste y mejora de las bases de datos derivado del incremento de cámaras que se emplearán en los nuevos ensayos.

4. Ajuste y mejora en la transferencia de datos de oleaje mediante Excel y VBA en diferentes puntos del modelo.

Con todo ello, se pretende definir nuevas técnicas de ejecución de ensayos tanto en estado límite de servicio como en estado límite último.

Chapter - 7. Introduction

This new 21st century has been characterized by three aspects that, a priori, may change all concepts related to the welfare economy and the relationship of human beings with the environment. The economic crisis of 2008, the pandemic of 2019 and the war in Ukraine in 2022, together with the climatic emergency with extreme episodes of droughts, floods, storms, snowfalls, tectonic and seismic movements should make us reflect on our relationship with the planet Earth.

What would happen if we stand still (i.e. "*do nothing*")? What do engineers and scientists agree on?

Perhaps we should think about the victories of science and the defeats of politics. These two questions are systematically repeated in all forums, congresses, media, whether political and propagandistic, environmental and negationist, economic and research. However, the human being works in the short term and is not willing to give up his/her standard of living to better distribute wealth and think about the Earth and the living beings that inhabit it. Nature has no opinion about human beings, it keeps silent and acts by producing events that alarm and terrify people, "*the climatic emergency*".

The warming of the ocean is accelerating, the rise of the sea level is an evident fact, the capture of CO₂ in the seas is acidifying its water, the polar masses are diminishing, the permafrost ice is being lost, and great changes are taking place in the ecosystems being more and more frequent the extreme events. It is enough to remember the Gloria storm that in January 2020 devastated the Spanish Mediterranean Coast and the Filomena phenomenon that in early January 2021 caused snow collapses in the cities of the center of the country. What to say about this summer of 2022, the persistent and prolonged drought and the near future full of sparkle rains, isolated low-level depressions and, therefore, floods.

With this situation, there is no choice but to be optimistic and to consider this B. Sc. Report as a hope for clean energy to meet the demands of the population. The sea is an inexhaustible resource. Its actions: winds, waves, tides and currents, are evident. For all

these reasons, we should be optimistic about the 2100 horizon as long as we mitigate the effects of climate change and gradually adapt to weather variations. [20] [21] [22]

What will the horizon be in 2100? With current policies, the temperature will rise by more than 3.5°C; more demanding commitments are needed to bring the temperature increase to below 2°C. This is why the commitment to wind energy and floating devices is a palpable fact. It should not be forgotten that the B. Sc. Report is framed within the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs), including SDG 7: Clean Energy, SDG 11: Sustainable Cities, SDG 13: Climate Action, SDG 14: Life under the Sea and SDG 15: Life on Land. [17] [31]

We combine this with Basic Sciences, Mathematics and Applied Computer Science. Without these tools, the analysis of device behavior would be unfeasible. The great difficulties in specifying the movements and rotations in a field dominated by wave mechanics require numerical modeling and coupling of multiple devices (blades, measurement and video equipment, Optitrack) that generate an infinite amount of data whose processing, contrast and diagnosis is only possible with the application of Basic Sciences.

All this requires reflection, work and study, which is what we intend to do in this B. Sc. Report.

7.1 Motivation

As León Felipe, Spanish poet, used to say, "*I go with the reins taut and restraining the flight because it is not what matters to arrive alone or soon, but to arrive with everyone and on time*". What greater motivation than after these years and the effort made, to see the end of the academic training stage of life with the completion of studies.

It is an effort that, to date, we try to enjoy both the path and the outcome.

Given that the planet Earth is in a climatic emergency where extreme events are becoming more frequent and this causes a decrease in the return period of the events, it becomes necessary an ecological transition to the field of clean energy following the criteria of the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals. For this reason, it is

necessary to take advantage of the energy of the sea in all its resources, highlighting the wind, waves, tide and current sources.

Depending on the impact on the coast, sustainability and protection of the marine environment, the use of wind energy in transitional waters is important. At these depths the impacts are lower and, therefore, "the future floats".

In this sense, offshore wind energy has been an evolution since the first field worked in shallow waters in 1991 in Denmark. Its development has been so vertiginous that it seems the evolutionary process of the species in a very short time (Figure 7-1).

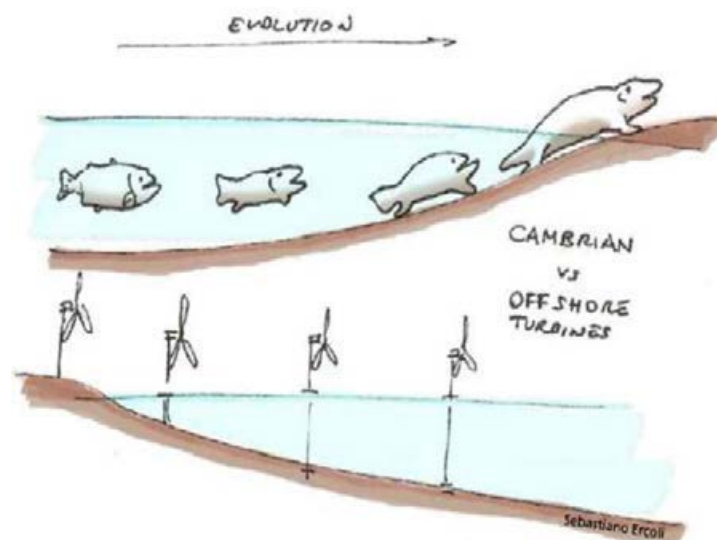


Figure 7-1. Comparison of the evolution of offshore wind energy with historical periods [29] [30]

Around the world, the commitment to ocean energy sources is clear with ever deeper platforms and high capacity turbines. Table 1 shows the locations and characteristics of offshore wind farms worldwide. In Spain, limitations on locations occur due to restrictions on gravity based foundations (only valid up to 30 m depth) because of climatic actions, and because of the geotechnical properties of the seabed that makes it difficult the use of pile foundations in many areas. Needless to mention the importance of public perception of the landscape and the importance of tourism in Spain, with almost 8,000 km of coastline including more than 2,000 km of beaches.

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

Table 1. Solution Data Offshore Wind Power [26] [28]

For all these reasons, floating elements are being the new technology to develop. As of today, the end of 2022, more than 20 devices can be found in different degrees of technology development, from the classic “spar” with its different solutions; semi submersible platforms; the barge type, the TLP, the hybrids, among others.

These platforms are highly sensitive to translations and rotations in the serviceability limit state and in the ultimate limit state, which can validate their behavior, development and use.

7.2 Objectives

This B. Sc. Report focuses on the optimization of the Triwind device based on physical models tests carried out in the experimentation tank of the Laboratory of Ports of the Universidad Politécnica de Madrid, and modeling the translations and rotations of the float (that presents six degrees of freedom) through numerical algorithms that allow contrasting the operation of the device under average and extreme conditions. [3] [4] [5]

7.2.1 Specific objectives

- Calibration of Optitrack cameras.
- Wave calibration.
- Acquisition of positioning data by means of the cameras and wave probes.
- Data wave processing.

- Web publication of the results.

7.3 List of subjects of the Degree in Software Engineering related to this work

In this work, the knowledge acquired in the following subjects has facilitated its development:

- Calculus
- Fundamentals of Programming I and II
- Statistics
- Databases
- Web applications
- Web Information Management

MatLab has been also used as a numerical computation and programming system.

7.4 Publications (Quality indicators)

This B. Sc. Report has given rise to two scientific contributions:

1. In the online conference entitled "*III Conference on Wind (and) Marine Energy*", on December 16, 2021, with an article entitled "*Development Software for the Analysis of the Displacements of a Floating Platform on Physical Model Tests.*"
2. In the conference entitled "*XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*", on May 11-12, 2022, with an article entitled "*Development of Software for the Measurement of Displacements of a Floating Body in Physical Models.*"

7.5 Structure of the B. Sc. Report

In order to present this B. Sc. Report as clearly as possible, the document has been structured as follows.

Chapter 1 deals with the introduction, motivation, objectives and work plan for the successful completion of the study.

Chapter 2 responds to the state of the art of existing floating equipment on the market according to their degree of technology, both at the level of laboratory experimentation, where TRL is less than 5, and with tests in nature TRL up to 7 or devices already producing energy with TRL 9, within their degree of maturity.

Chapter 3 describes the laboratory and the necessary database as follows:

In section 3.1 the Laboratory is presented. In the Ports Laboratory of the ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos of the Universidad Politécnica de Madrid, different types of floating platforms have been analyzed for three years, developing their own software that analyzes the movements of the float.

In section 3.2 the description of the necessary data set is included.

Chapter 4 describes the tests methodology with the description of computers and their functions and also the stages of development.

Chapter 5 includes a brief discussion of the results obtained on the basis of their errors and the behavior of the platform.

In Chapter 6, the conclusions and new lines of work are elaborated.

The document is completed with bibliographical references and one appendix.

- Appendix A. Laboratory test sheets of existing devices, according to the TRL.

Chapter - 8. Conclusions and future work

In accordance with the results of the tests performed the following conclusions can be established:

1. The development of floating systems for offshore wind energy is a challenge in depths in excess of 50 m in terms of the actions to resist (waves and wind) and the construction, maintenance, operation and decommissioning processes.

2. With current technologies, floating devices can be built in both concrete and steel. New materials are not ruled out for the near future.

3. Floating structures improve the implementation conditions of gravity based structures (GBS) or monopiled structures. The former are clearly limited to 30 meters of water depth, whereas the latter are constrained by the geometry of the piles, which can hardly exceed 100 meters in length and 8 meters in diameter.

4. The construction processes, as well as the equipment and machinery related to the installation, maintenance, repair and dismantling processes make floating devices advisable, discarding the traditional machinery and construction processes in maritime works.

5. The floating structures can be found in a degree of maturity or Technology Readiness Levels (TRL) in the range of 5 - 7, expecting to reach TRL 9 in 2025.

6. The platforms tested so far are considered "*hybrid*", since in shallow waters they can work by gravity and in transitional waters they can work as floating structures.

7. In the tests, problems were detected in anchorages. These tests have been carried out in Serviceability Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS), with irregular waves fitted to a JONSWAP spectrum.

8. The tests have allowed to monitor, by means of sensorization techniques, the translations and rotations of the floating structures by developing codes and databases related to the spectral generation systems.

9. The follow-up of the experiments can only be carried out with the models developed for the investigation.

10. The tests of the TRIWIND and ARCHIME 3 [3] [4] [5] type platforms show that the values of the rotation angles are lower than 3° in the Serviceability Limit State and lower than 11° in the Ultimate Limit State, which ratifies the correct behavior at this level of technological development.

As conclusions of the current work, the following future lines of work are proposed, which will start to be tested in the new tests of the Esteyco ELISA-type platform in 2022:

1. Analysis of the structural and hydraulic behavior in other sea conditions, where wind waves dominates instead of swell waves, and the spectral peakedness parameter is above 4.

2. Improvement in the anchoring systems of the floating platforms.

3. Adjustment and improvement of the databases derived from the increase in the number of cameras to be used in the new tests.

4. Adjustment and improvement in the transfer of wave data by means of Excel and VBA in different points of the physical model.

With all this, it is intended to define new techniques for the execution of tests both in Serviceability Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS).

BIBLIOGRAFÍA

[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]	Convenio de investigación para el ensayo en modelo físico tridimensional 3D de un aerogenerador híbrido gravedad - flotación Trwind - Float. Fundación Agustín de Betancourt y Rover Maritime, S. L. 2019.
[4]	Convenio de investigación para la optimización de una estructura flotante tipo Triwind Arquímedes. Fundación Agustín de Betancourt y Beridi, S. L. 2020.
[5]	Convenio de investigación para la campaña de ensayos de un dispositivo offshore tipo GBS con tecnología ELISA para el aprovechamiento energético del viento. Fundación Agustín de Betancourt y Esteyco, S. A. 2022.
[6]	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.
[7]	Esteban, MD.; Diez, JJ.; López-Gutiérrez, JS. and Negro, V. "Why offshore wind energy?" Renewable Energy 36 (1): 444-450. 2011.
[8]	EWEA-Wind Europe (European Wind Energy Association). Key trends and statistics H1, for internal use only. EWEA Tech. Rep. 2018.
[9]	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.

[10]	Goda, Y. "Random seas and design of maritime structures". Second ed. World Scientific Publishing. Singapore. 2000.
[11]	International Guidelines, DNV-GL-ST-0126, on Support Structures for Wind Turbines (2016).
[12]	International Guidelines, DNV-GL-ST-0437, on Loads and Site Conditions for Wind Turbines (2016).
[13]	International Guidelines DNV-os-j101, on Design of Offshore Wind Turbine (2013).
[14]	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.
[15]	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
[16]	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.
[17]	Recommended Practice, DNV-rp-C205, on Environmental Conditions and Environmental Loads (2010).
[18]	ROM 0.2-90. "Actions in the design of Maritime and Harbour Works" (1990) Ministry of Public Works, Spain
[19]	ROM 0.3-91. "Waves" (1991) Ministry of Public Works, Spain.

[20]	ROM 0.0-01. "General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures" (2002) Ports of the State, Spain.
[21]	ROM 1.0-09. "Breakwaters (Part 1): Calculation and project factors. Climate Agents" (2009) Port of State, Spain.
[22]	ROM 0.5-05. "Geotechnical recommendations for the design of maritime and harbour works". (2005). Ports of State, Spain.
[23]	ROM 3.1-99. "Design of the maritime configuration of ports, approach channels and harbour basins". (1999). Ports of State, Spain.
[24]	Sarpkaya, T. and Isaacson, M. "Mechanics of wave forces on offshore structures". Textbook by Van Nostrand Reinhold. New York. 1981.
[25]	Sarpkaya, T. "Wave forces on offshore structures". Cambridge University Press. 2014.
[26]	www.offshorewind.biz (Accessed: 22 august 2022).
[27]	www.puertos.es (Accessed: 25 august 2022)
[28]	www.4coffshore.com (Accessed: 23 august 2022).
[29]	"III Jornada de Energía Eólica (y) Marina", del 16 de diciembre de 2021, "Software de Desarrollo para el Análisis de los Desplazamientos de una Plataforma Flotante Sobre Ensayos en Modelo Físico."
[30]	"XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos", de Vigo del 11 y 12 de mayo de 2022, "Desarrollo de software para medir desplazamientos de elementos flotantes en modelo físico."

[31]	https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm
------	---

APÉNDICES

Apéndice A - Fichas con resultados de ensayos.

TLPWIND



DESCRIPCIÓN

PROPIEDADES DE TORRE

La torre está diseñada para la instalación de turbinas de 5 MW y 100 metros de diámetro.

PROPIEDADES FLOTADOR

Plataforma TLP (Tension Leg Platform) de calado variable. La columna principal se une a la torre y de ésta salen cuatro brazos en forma de cruz. La plataforma está diseñada específicamente para soportar condiciones de funcionamiento muy agresivas en un rango de 80 a 100 metros de profundidad.

PROPIEDADES DEL AMARRE

La plataforma se amarra mediante cables tensos de acero al lecho marino, restringiendo casi en la totalidad el movimiento de la plataforma.

GRADO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

Los ensayos realizados en ambos lugares de experimentación fueron a escala 1:35 y 1:40 con viento y oleaje simultáneamente. Por tanto, el TRL se considera de 4.

ENSAYOS

LUGAR DE REALIZACIÓN

CEHIPAR: Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo.

Se han realizado ensayos en dos tanques distintos:

- Canal de aguas tranquilas: longitud de 320 m, anchura de 12,5 m, profundidad de 6,5 m y velocidad máxima de 10 m/s.
- Laboratorio de dinámica del buque: tanque de 150x30 m con 5m de profundidad. Generador de olas irregulares con 60 paletas independientes y velocidad máxima de 3,50 m/s.

Kelvin Hydrodynamics Laboratory con unas dimensiones de 76 m de longitud, 4,6 m de anchura y 2,5 m de profundidad, de la

Universidad de Strathclyde, con capacidad para reducir oleaje regular e irregular y ensayos de viento.

CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

- Ensayos de oscilación libre: ensayos de oscilación sin y con viento medio a una velocidad de 11,4 m/s, para obtener los coeficientes de amortiguamiento de la estructura.
- Ensayos de oleaje: ensayos de oleaje regular e irregular con y sin velocidad media de viento de 11,4 m/s.
- Oleaje regular: ensayos con $H_s=1,0$ m y velocidad de viento de 11,4 m/s, con períodos de oleaje de 1 a 4 segundos, que corresponden a períodos a escala real en el rango de entre 6 y 30 segundos.
- Oleaje irregular: test de oleaje irregular en ensayos con distintas alturas de oleaje, períodos pico y velocidad de viento.

Se va a estudiar los casos de libre oscilación, de oleaje regular con y sin viento y oleaje irregulares, que se representan por separado a continuación en las tablas de resultados.

Ensayos de oscilación libre realizados.

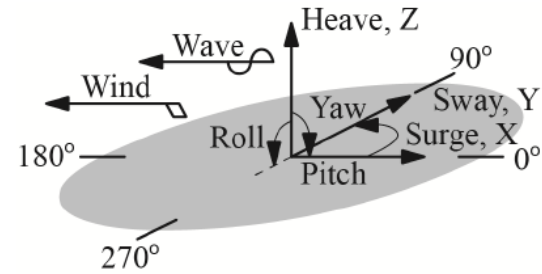
Test ID	Contents
D1001	Surge (no wind)
D1002	Surge (PT $w_s=11.4\text{m/s}$)
D1003	Surge (SIL $w_s=11.4\text{m/s}$)
D1004	Yaw (no wind)
D1005	Heave (no wind)
D1006	Pitch (no wind)

Condiciones de los ensayos irregulares realizados.

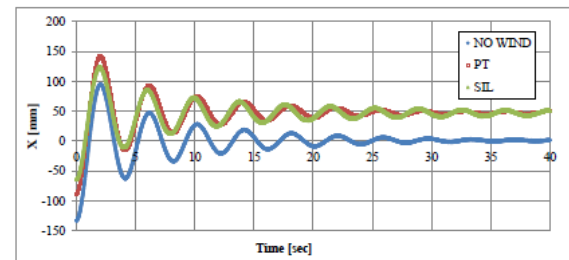
Sea State	Hs (m)	Tp (s)	Wind Speed(m/s)
N1	4.55	9.00	11.40
N2	1.50	6.61	11.40
N3	8.46	10.13	38.76
N4	0.75	5.44	6.05
N5	1.25	6.36	9.18
N6	1.75	6.86	12.80
N7	2.75	7.80	16.80
N8	6.00	10.28	25.00

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

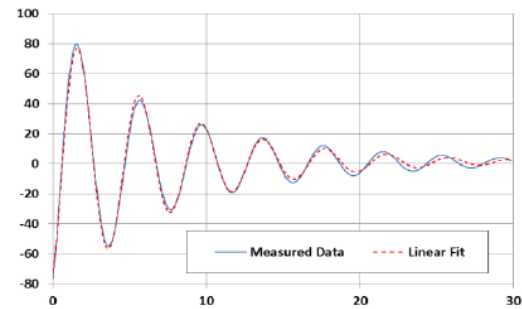
Se estudiaron los siguientes grados de libertad:



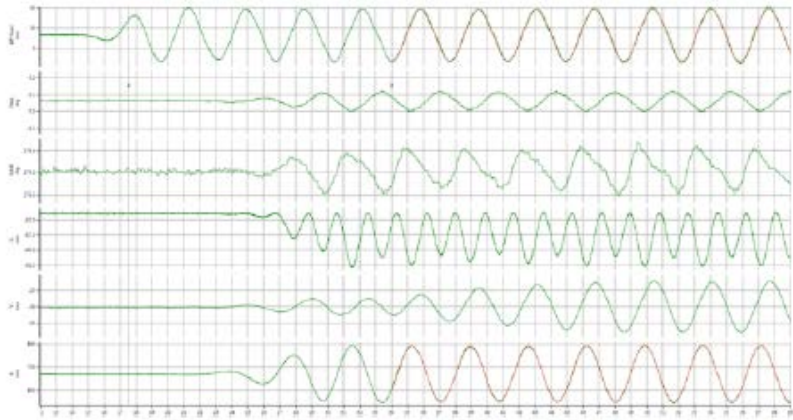
Ensayos de oscilación libre en avance (Surge).



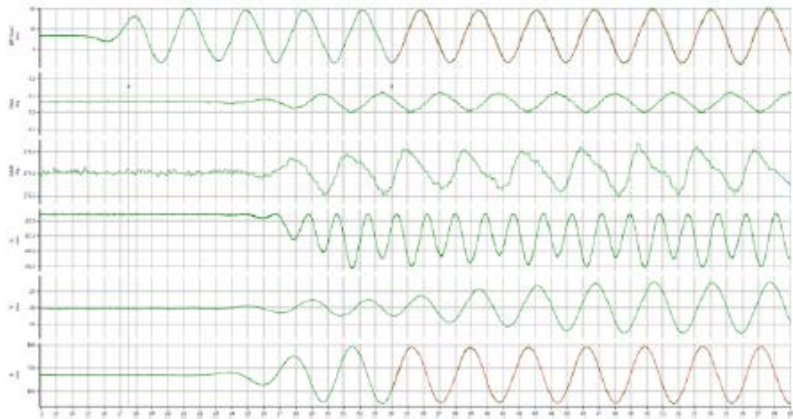
Ajuste típico para surge en ensayos de oscilación libres en avance (Surge) sin viento.



Ajuste típico para surge en ensayos de oscilación libres en avance (Surge) sin viento.



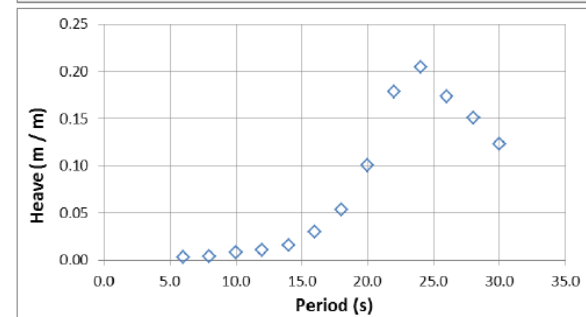
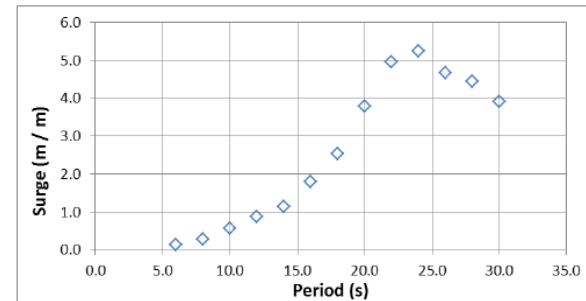
Datos de oleaje regular y movimiento típicos (Sin viento). Oleaje / Cabeceo (Pitch) / Guiñada (Yaw) / Z / Y / X



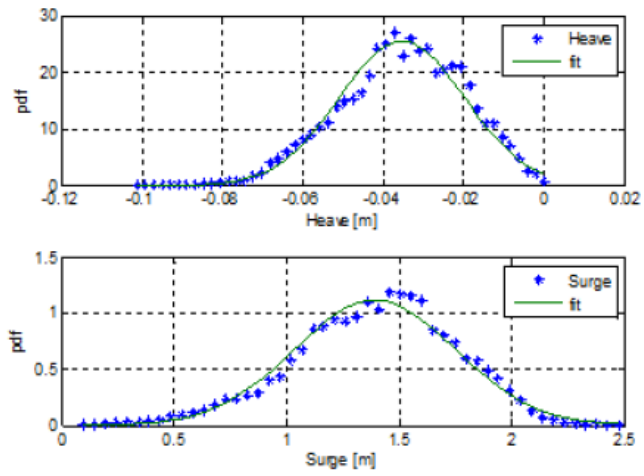
Datos de oleaje regular y movimiento típicos (Con viento). Oleaje / Cabeceo (Pitch) / Guiñada (Yaw) / Z / Y / X



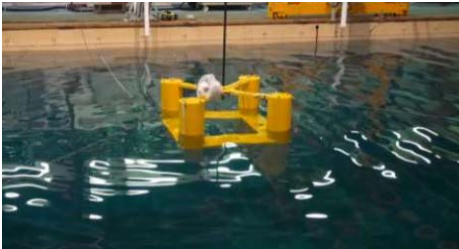
Movimientos para oleaje regular sin viento



Funciones de probabilidad de densidad para Arfada (Heave) y Avance (Surge)



NAUTILUS



DESCRIPCIÓN

PROPIEDADES DE TORRE

La torre es ligeramente troncocónica y tiene una altura de 119 m, sobre la que se coloca un rotor de 178,3 m de diámetro y tres álabes, que produce 10 MW.

PROPIEDADES FLOTADOR

Plataforma semisumergible, diseñada por NAUTILUS Floating Solutions S. L., con una distancia entre columnas de 54,75 m y 18,34 m de calado (Puede ser ajustado), fabricada en acero y con un peso total, incluyendo lastre, de 7780 t. Cada una de las columnas se une al mástil, que se encuentra en el centro de la pontona cuadrada que forman en planta.

PROPIEDADES DEL AMARRE

El flotador se amarra con cuatro catenarias de acero dispuestas de forma simétrica en las esquinas de la plataforma (Cada enganche estará por tanto a 90° del anterior) y el anclaje se realiza mediante arrastre.

GRADO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

Los ensayos realizados en IFREMER, y previamente en Cork y en el IHC, fueron a escala 1:36, 1:60 y 1:35 respectivamente, con oleaje y viento simultáneamente. Por tanto, el TRL se

considera de 5. Posteriormente se realizaron ensayos de oleaje y viento en el SINTEF y de viento en el Politécnico de Milán a escala 1:36.

ENSAYOS

LUGAR DE REALIZACIÓN

Se realizó en el IFREMER (L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), en el tanque de oleaje de aguas profundas.

Esta piscina es de dimensiones 50 x 12,5 m y calado de 20 m en 12,5 m de la longitud y de 10 m en 37,5 m.

El tanque permite ensayos de oleaje regular e irregular monodireccional, de amplitud máxima de 0,5 m, y cuenta con un generador para formar flujos de viento de hasta 9 m/s.

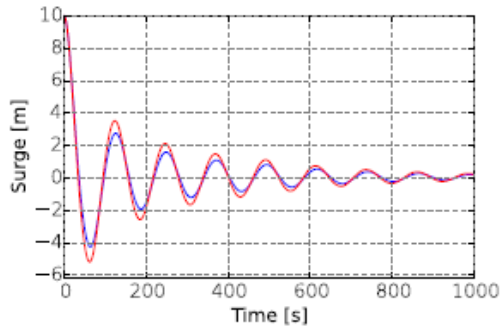
CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

- Ensayos de decay: Se han ensayado los casos de funcionamiento con y sin viento.
- Ensayos de oleaje: Se estudiarán distintos casos de oleaje regular e irregular combinados sin viento y viento a velocidad nominal, además de otras combinaciones operacionales.

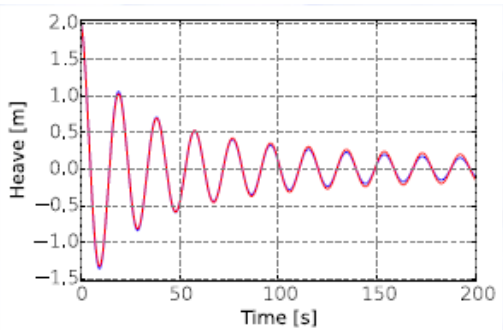
Se va a estudiar casos de decay y viento y oleaje combinados.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

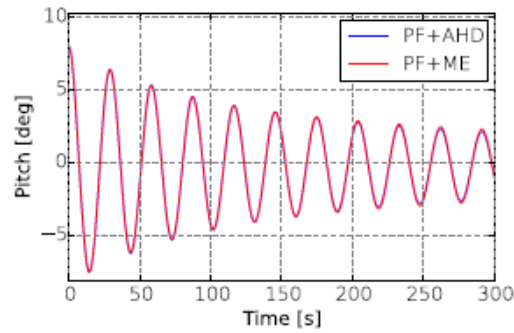
Resultados de test de decay en plataforma para Avance (Surge).



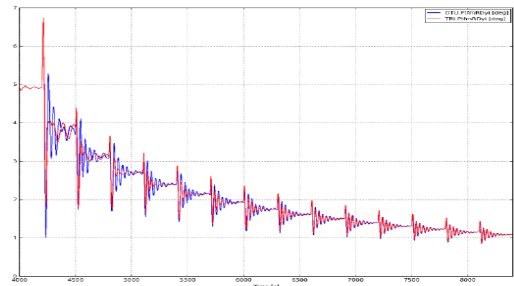
Resultados de test de decay en plataforma para Arfada (Heave).



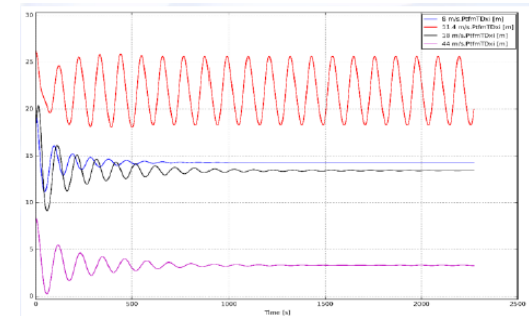
Resultados de test de decay en plataforma para Cabeceo (Pitch).



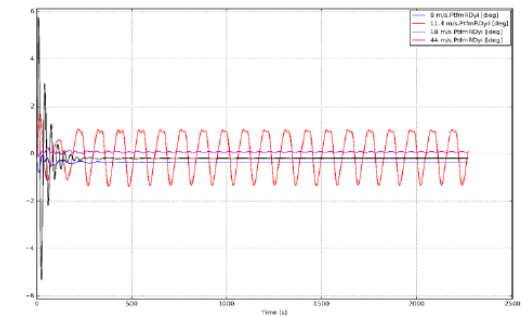
Resultados de test de decay con viento escalonado en plataforma para Cabeceo (Pitch).



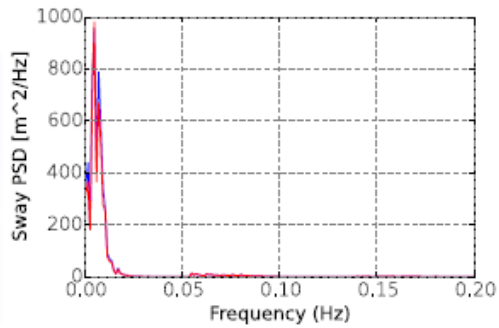
Resultados de test de decay con viento sostenido en plataforma para Avance (Surge).



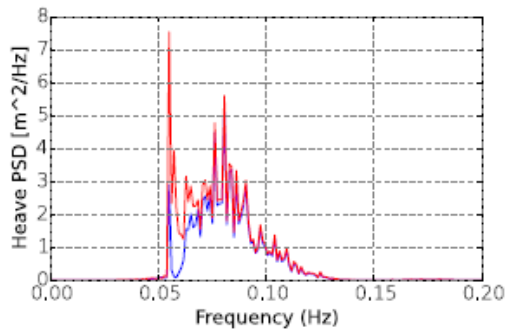
Resultados de test de decay con viento sostenido en plataforma para Cabeceo (Pitch).



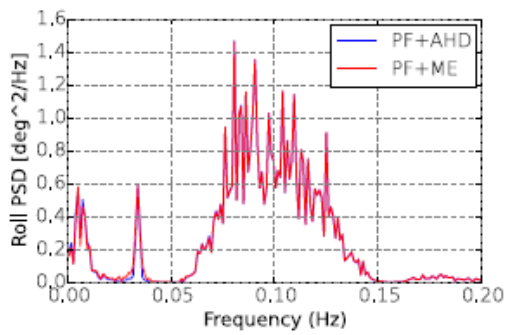
Respuesta de la plataforma en el dominio de la frecuencia en 90° para Deriva (Sway).



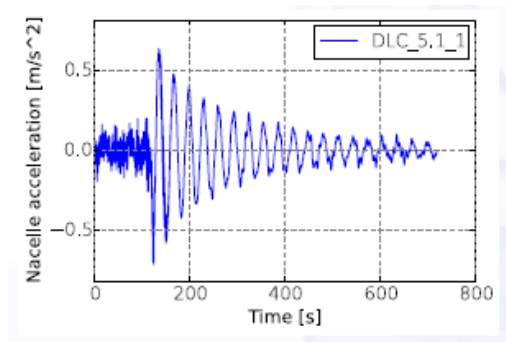
Respuesta de la plataforma en el dominio de la frecuencia en 90° para Arfada (Heave).



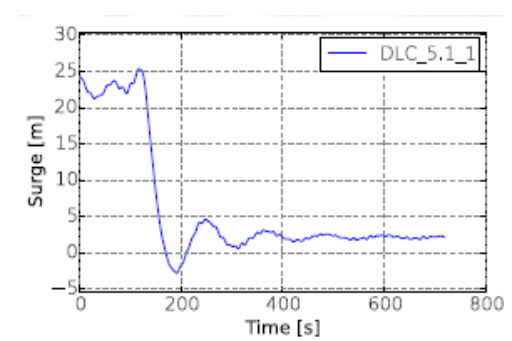
Respuesta de la plataforma en el dominio de la frecuencia en 90° para Balance (Roll).



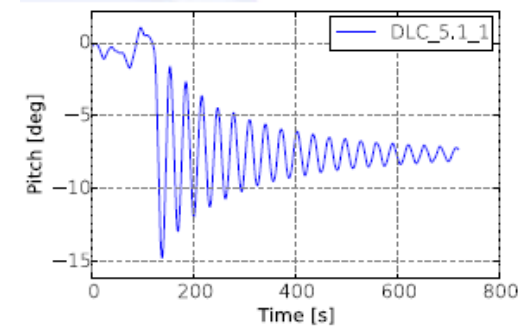
Aceleraciones de la góndola para el Caso 5.1.1.



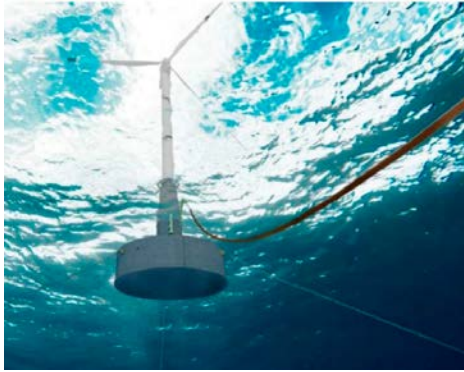
Desplazamientos de la plataforma para el Caso 5.1.1. en Avance (Surge).



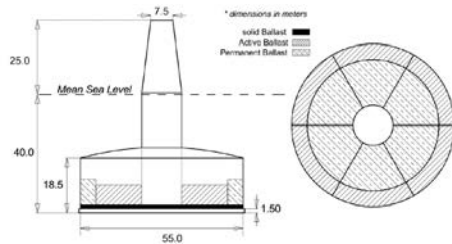
Giros de la plataforma para el Caso 5.1.1. en Cabeceo (Pitch).



REDUCED DRAFT SPAR (RDS)



Sección tipo y perspectiva

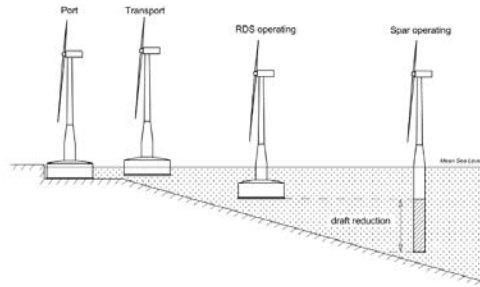


DESCRIPCIÓN

El RDS es un flotador escalable a cualquier tamaño de aerogenerador, constituido de hormigón armado reforzado.

Mantiene el comportamiento dinámico de un mástil clásico de turbina eólica, pero reduciendo el calado operativo pudiendo así operar en 60 metros de profundidad en adelante.

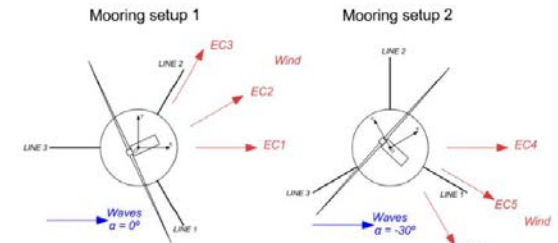
Calado RDS vs Clásico



El RDS tiene una geometría robusta hecha de hormigón construida con el mismo procedimiento que los cajones flotantes en dique o cajonero. Se construyen con un ratio de una unidad por semana siendo así prefabricados.

Una vez acoplada la turbina, se puede remolcar con un barco de remolque típico sin necesitar el uso de una grúa pesada auxiliar o una cabria a diferencia del mástil clásico

Por último, está amarrado con un sistema de catenarias de tres líneas espaciadas 120° con las dos posibles configuraciones:



GRADO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

500 test a escala 1:50 en laboratorio para remolque, instalación, desgaste y operación.

Por tanto, el grado de madurez de la tecnología es 4.

ENSAYOS

LUGAR DE REALIZACIÓN

CEHIPAR: Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo.

Se han realizado ensayos en dos tanques distintos:

- Canal de aguas tranquilas: longitud de 320 m, anchura de 12,5 m, profundidad de 6,5 m y velocidad máxima de 10 m/s.

- Laboratorio de dinámica del buque: tanque de 150 x30m con 5m de profundidad.

Generador de olas irregulares con 60 paletas independientes y velocidad máxima de 3,50 m/s.

CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

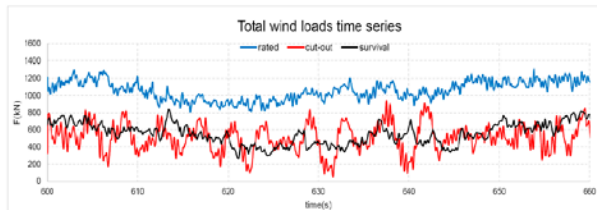
– Ensayos de oleaje: oleaje regular e irregular en estados de transporte, instalación y operación. Se han ensayado swell y wind seas con un rango de Hs entre 1,50 a 9,50 m con todo tipo de periodos.

Los estados de mar irregulares son:

Sea State	Hs(m)	Tp(s)	γ	Operation Rated Wind	Operation Cut-out wind	Standby Survival
IR-01	1.5	7.4	1.00	X		
IR-02	2.5	8.4	1.00	X		
IR-03	3.5	9.1	1.20	X		
IR-04	4.5	9.9	1.50	X		
IR-05	5.5	10.6	1.70	X		
IR-06	6.5	11.5	1.80	X		
IR-07	6.5	9.2	5.00	X		
IR-08	6.5	12.7	1.00	X		
IR-09	9.5	11.1	5.00	X	X	
IR-10	9.5	15.4	1.00	X	X	
SU-1	6.00	7.4	5.00			X
SU-2	9.00	11.1	4.46			X
SU-3	10.5	14.2	2.03			X
SU-4	8.00	16.0	1.00			X
SU-5	4.00	18.2	1.00			X

– Ensayos de viento: las cargas aerodinámicas se han realizado con combinaciones de carga sobre el RDS+ Turbina eólica. Test desacoplados de los relativos al oleaje. RAO = Response Amplitude Operator. Chirp es una señal donde se incrementa o disminuye la frecuencia con el tiempo.

Cargas aerodinámicas consideradas



Se ha utilizado la DNVGL para cargas limite.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Movimientos y giros de un flotador

