



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Incertidumbres en la cimentación y coronación en parques eólicos offshore.
Criterios de predimensionamiento

Jorge Luengo Frades



Tesis **Doctorales**

UNIVERSIDAD de ALICANTE

Unitat de Digitalització UA

Unidad de Digitalización UA



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

**INCERTIDUMBRES
EN LA CIMENTACIÓN Y CORONACIÓN
EN PARQUES EÓLICOS OFFSHORE.
CRITERIOS DE PREDIMENSIONAMIENTO**

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Jorge Luengo Frades

Tesis doctoral
Alicante, diciembre 2019



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INCERTIDUMBRES EN LA CIMENTACIÓN Y CORONACIÓN EN PARQUES EÓLICOS OFFSHORE. CRITERIOS DE PREDIMENSIONAMIENTO

JORGE LUENGO FRADES

Tesis presentada para aspirar al grado de

DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE

DOCTORADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES, ESTRUCTURAS Y TERRENO:

CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

Dirigida por:

D. JAVIER GARCÍA BARBA

D. VICENTE NEGRO VALDECANTOS

TESIS FINANCIADA POR LA FUNDACIÓN BANCARIA LA CAIXA

Código de Beca: LCF/BQ/ES16/11570020



A mis padres
A mi hermano
A Patricia

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

AGRADECIMIENTOS

Una vez finalizada esta Tesis Doctoral, no resulta difícil mirar hacia atrás y ver la cantidad de gente que ha colaborado en el proceso de mi formación académica y personal, no sólo durante el doctorado, sino durante toda mi vida. Les dedico estas palabras en agradecimiento por la labor realizada durante todos estos años.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis dos directores de Tesis. A D. Javier García Barba, por haber depositado su confianza en mí y por haberse embarcado en este proyecto cuando aún ni me conocía. A D. Vicente Negro Valdecantos, con quien he dado cientos de paseos, charlando sobre la Tesis y la vida, le agradezco su afán por ayudarme a ser una mejor persona. Mis directores han depositado en esta Tesis Doctoral más esperanza que yo mismo. Les muestro aquí mi más sincero afecto y agradecimiento.

En segundo lugar, me gustaría mostrar mi agradecimiento a la Fundación Bancaria La Caixa, sin cuyo respaldo económico esta investigación no se habría llevado a cabo.

También me gustaría dar las gracias al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante, por contribuir a mi formación durante el doctorado, y por hacerme las cosas más sencillas. En especial, a D. Miguel Ángel Climent y D. Jorge Soriano.

Me gustaría también dedicar unas palabras a los miembros del Laboratorio de Puertos de la ETSICCP de la Universidad Politécnica de Madrid. A D. Mario Martín, D. César Sastre, D. Luis Moreno, D. José Santos López, D^a. María Dolores Esteban, D. José Luis Orts, D. José María del Campo, D. Pedro Fernández. Gracias de todo corazón por haberme acogido en vuestro grupo y por haberme ayudado a hacer realidad este objetivo. He pasado muchos y muy buenos momentos con vosotros.

Asimismo, me gustaría agradecer a los profesores que me han formado, pues sin ellos, nunca habría llegado a escribir estas líneas. Al cuerpo docente del Sagrado Corazón de Jesús de Cáceres, que sentó una firme base en mi formación académica y personal. A los profesores de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, quienes me han transmitido de la mejor manera tantos y tan complejos conocimientos técnicos. En especial a D. Gonzalo Barañano, D. Felipe Gabaldón y D^a. María José Suárez.

No podría no acordarme de personas que han colaborado tanto en esta década de formación en Madrid. Son personas que han hecho mi vida mucho más fácil. Gracias a D. Julián Rodríguez, a D. Juan Carlos Jaén y a D. Jonatan Peña. A D. Carlos Rodríguez. Gracias a D^a. Gema Fernández. A la Fundación Agustín de Betancourt, en especial a D. Alberto Bornstein, D^a. Gema Lucas y D^a. Pilar Lucas.

Dar las gracias también a mis amigos de Cáceres y de Madrid, siempre habéis sabido sacar lo mejor de mí.

A mis compañeros de carrera, con quienes tuve que superar las más inverosímiles e inexpugnables asignaturas para poder convertirnos en Ingenieros de Caminos. Gracias por tantas horas de estudio, dedicación y esfuerzo. Me habéis hecho crecer y ser mejor persona.

A mis colegas de ARAL Consultoría, con quienes empecé en esta andadura de la Ingeniería, muchas gracias por haber aportado vuestro granito de arena a mi formación.

A mis compañeros de promoción de Doctorado de La Caixa. Ha sido impresionante compartir momentos con personas con un currículum tan grande, y con un corazón más grande aún.

Me gustaría agradecer a mi familia por su cariño, en especial a mis abuelos, de los que tanto he podido aprender, y a los que tan presentes tengo a la hora de tomar decisiones importantes.

Me gustaría dar las gracias de todo corazón a mis padres, espero que vuestro esfuerzo personal se haya visto recompensado con esta Tesis Doctoral. A mi padre, por inculcarme el amor por esta profesión y el esfuerzo para conseguir mis metas. A mi madre, por ser mi ejemplo a seguir, y por inculcarme los valores de la generosidad y la ilusión por el trabajo. A mi hermano Francisco, porque a pesar de ser el pequeño de la familia, siempre tengo yo mucho más que aprender de él, que él de mí.

Por último, me gustaría dar las gracias a Patricia, por su apoyo incondicional durante todos estos años y su incansable sonrisa, y por ser el sitio de mi recreo.

Alicante, diciembre de 2019



*Ama, ama, y ama.
Y ensancha el alma*

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÍNDICE

ÍNDICE	1
LISTA DE FIGURAS Y DE TABLAS	2
ESTRUCTURA Y DESARROLLO DEL DOCUMENTO	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA	5
1.1. Resumen.....	5
1.2. Abstract	6
1.3. Introducción y bases de partida	8
1.4. Objetivos de la Tesis Doctoral	16
1.5. Metodología de la investigación	23
1.6. Discusión	35
CAPÍTULO 2. TRABAJOS PUBLICADOS. COMPENDIO DE ARTÍCULOS	47
2.1. Primer artículo.....	47
2.2. Segundo artículo	63
2.3. Tercer artículo	85
CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	95
3.1. Conclusiones	95
3.2. Futuras líneas de investigación	100
CAPÍTULO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN	111

LISTA DE FIGURAS Y DE TABLAS

FIGURA	CONTENIDO	PÁGINA
1	Desarrollo sostenible	8
2	Parque eólico de Vindeby	10
3	Evolución en tamaños y potencias desde 1991 hasta la actualidad	13
4	Estándares y normativas	15
5	Ejemplos de estructuras marinas	15
6	Zonificación de las profundidades oceánicas en función de la hidrodinámica marina	17
7	Importancia relativa de las fuerzas de inercia, arrastre y difracción	19
8	Ejemplo de socavación local y global en cimentación multitubular, y mecanismo simplificado de acciones en cimentación monopilotada	20
9	Modelo numérico de análisis de run-up y wave slamming, y efecto real en cimentación multitubular	21
10	Principales tipologías de cimentaciones directas e indirectas en eólica offshore	24
11	Períodos de retorno a tener en cuenta para las distintas combinaciones de cargas	24
12	Combinaciones de cargas propuestas para las fases de transporte, instalación, mantenimiento y reparación	25
13	Cuota de las distintas tipologías de cimentaciones directas en ingeniería eólica offshore. Comparativa 2012-2018	27
14	Parque eólico de Robin Rigg	30
15	Ratio entre altura de ola máxima y altura de ola significativa en aguas profundas	34
16	Implantación de la eólica marina y la eólica terrestre en los últimos años	37
17	Ábaco de Lé Méhauté	38
18	Ábacos de Dean-Dalrymple y de Horikawa	39

TABLA	CONTENIDO	PÁGINA
1	Cuadro resumen de conceptos y criterios de diseño de la normativa vigente	27
2	Recomendaciones de diseño para run-up, socavación y life extension	31
3	Cota de ascenso del run-up tras el impacto del oleaje	33
4	Características principales del primer artículo del compendio de publicaciones	47
5	Características principales del segundo artículo del compendio de publicaciones	63
6	Características principales del tercer artículo del compendio de publicaciones	85

ESTRUCTURA Y DESARROLLO DEL DOCUMENTO

La presente Tesis Doctoral ha sido estructurada y desarrollada conforme con la normativa y los requisitos de la Universidad de Alicante para la presentación de la misma por compendio de publicaciones. Estos requisitos están regulados en el Reglamento de régimen interno de la Escuela de Doctorado (Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante de 17 de diciembre de 2013, modificado por Consejo de Gobierno de 26 de abril de 2018, BOUA del 26 de abril de 2018, y Consejo de Gobierno de la Universidad de Alicante de 30 de julio de 2019, BOUA de 30 de julio de 2019).

De acuerdo con lo anterior, se ha dividido el documento en cuatro Capítulos y un Apéndice, cada uno de los cuales contiene a su vez diferentes epígrafes:

- **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA**

El primer Capítulo es el más extenso de los tres que componen esta Tesis Doctoral, pues es en el que se sientan las bases y el punto de partida de la misma y, por tanto, es el que más epígrafes incluye.

En primer lugar, se incluye un resumen en castellano y en inglés, que sintetiza brevemente el contenido del documento y de la investigación llevada a cabo en la Tesis Doctoral.

Posteriormente, se incluye una Introducción, que describe las partes de la investigación, haciendo una ligera revisión del estado del arte y de la evolución de los parques eólicos offshore.

A continuación, se desarrollan los objetivos y se explica la motivación del trabajo llevado a cabo.

Posteriormente, se describe la metodología de la investigación. En este epígrafe se desarrolla el hilo argumental, y se justifican las publicaciones en forma de artículos que constituyen la Tesis. En esta búsqueda, se revisa el estado del arte normativo, de clima marítimo y de interacción fluido-estructura, previos a la obtención de resultados.

El siguiente epígrafe es la discusión, en la que se incluye una descripción detallada de los resultados de la investigación, así como el análisis crítico de los mismos. Se trata de un apartado

fundamental, pues en él se analizan, a partir de los datos disponibles de los numerosos parques actualmente en funcionamiento, los conceptos de teoría de ondas, linealidad y no linealidad, comportamiento del número de Keulegan y Carpenter en la socavación, la naturaleza y efectos de dicha socavación, así como los requerimientos de protección de la cimentación de distintos parques.

- **CAPÍTULO 2. TRABAJOS PUBLICADOS. COMPENDIO DE ARTÍCULOS**

En este segundo Capítulo se incluye la colección de publicaciones indexadas que han surgido fruto de la presente investigación, y que han dado lugar a esta Tesis Doctoral. Para facilitar su análisis, se incluye una tabla y un breve texto justificativo para cada uno de los artículos, incluyendo los autores, revista, indicios de calidad, etc, de cada uno de ellos. También se incluye la versión íntegra publicada de los mismos.

- **CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

En el tercer Capítulo se exponen los principales argumentos, reflexiones, inquietudes, metas e hitos obtenidos a lo largo de la investigación, destacando las conclusiones arrojadas por la misma. Pero esta vasta labor de investigación en los elementos offshore no debería quedar aquí, por lo que se hace una propuesta de continuación de los trabajos. Tras los caminos explorados, se podrán alcanzar nuevos retos en el desarrollo científico y tecnológico dentro del marco de las energías limpias e inagotables derivadas del mar, en particular la eólica offshore.

- **CAPÍTULO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

En el cuarto Capítulo recogen las múltiples referencias bibliográficas empleadas en la formación del doctorando y en la redacción de las distintas contribuciones científicas que constituyen esta Tesis Doctoral.

- **APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Por último, se incluye un Apéndice, en el que se recogen otros trabajos llevados a cabo durante la investigación, y directamente relacionados con la Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA MEMORIA

1.1. Resumen

Desde hace varias décadas, la sociedad y la economía están apostando fuerte por las energías renovables en general, y por las marinas en particular. Esto es un hecho relevante puesto de manifiesto en la Agenda 2030, así como en los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), especialmente el ODS 7, que apuesta por garantizar el acceso a una energía sostenible y moderna. También en el ODS 13 (combatir el cambio climático y sus efectos) y el 14 (utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos). Dentro de las energías renovables marinas, la que más avances tecnológicos y más implantación ha tenido ha sido la eólica marina. Por ello, la mayor parte de investigaciones científicas llevadas a cabo en estos últimos años en cuestión de energías marinas se han centrado en revisar, discutir y cuestionar los diseños de los elementos estructurales y las cimentaciones de los parques eólicos offshore. Las distintas incertidumbres surgidas en este campo de la ingeniería se deben principalmente a la limitada experiencia del sector (que sólo tiene unas pocas décadas de implantación) y por las continuas modificaciones y discrepancias en la normativa existente.

Partiendo de la base anterior, en la presente investigación se han analizado las distintas variables que entran en juego en los parques eólicos marinos, como la vida útil, el período de retorno del temporal de cálculo (y su probabilidad de presentación), los modelos ondulatorios a emplear (Airy, Stokes de diversos órdenes, Cnoidal, Stream Function, etc), los dominios hidrodinámicos, la repercusión de monomios adimensionales como KC, y sus efectos en el terreno (principalmente en la socavación).

Utilizando la experiencia acumulada en el sector, se ha discutido la sensibilidad del comportamiento hidrodinámico y estructural frente a los términos no lineales en teoría de ondas, la variación del campo de velocidades y repercusión en el parámetro de Keulegan y Carpenter, así como otros efectos, como los de orden cero, uno y dos en el comportamiento de la socavación.

También y como consecuencia de los diferentes fallos ocurridos en parques en servicio y explotación (principalmente debidos a las cotas de instalación de cubiertas y plataformas), se han

planteado formulaciones para el cálculo del remonte (run-up), así como el alcance de la vena líquida tras el impacto sobre la estructura.

Las distintas expresiones obtenidas en esta investigación han permitido la propuesta de recomendaciones de diseño para la obtención de una cota de coronación fiable, eficiente y económica en las estructuras pilotadas, así como la necesidad de proteger o no las cimentaciones frente a la socavación, comprobando la aplicabilidad de los cálculos en parques eólicos reales, como Arklow Bank o Egmond Aan Zee, entre otros.

Finalmente, los valores propuestos se han contrastado con el modelo físico llevado a cabo en Deltares (Holanda) para la plataforma noruega de Aibel (parte oriental del mar del Norte), lo cual ha facilitado la calibración de las fórmulas planteadas.

Todos los efectos anteriores sobre las estructuras de los parques eólicos offshore, tanto los que suceden en la superficie del mar, como aquéllos que se manifiestan en la cimentación, se verán considerablemente magnificados con la subida del nivel del mar. Numerosos estudios científicos cifran este fenómeno en 1 a 2 mm/año durante el pasado siglo XX, valor que se ve aumentado a 3 mm/año en la primera mitad del siglo XXI.

1.2. Abstract

Since some decades ago, society and global economy have been betting on the renewable energies, particularly on the marine renewable ones. This is a relevant issue, and it has been taken into account in the 2030 Agenda, as well as in the SDG (Sustainable Development Goals), particularly in SDG 7 (ensure access to sustainable and modern energy), SDG 13 (combat climate change and its impacts), and SDG 14 (sustainable use the oceans, seas and marine resources). Considering the marine renewable energies, the one which has achieved the most technological advances as well as more implantation has been the offshore wind technology. This has led to several investigations in this field during the latest years, focused on revising, discussing and questioning different issues regarding the design of the support structures and the foundations of the offshore windfarms. The different uncertainties found in this field of the civil engineering can be justified by the limited experience of this sector (which only has few decades of implementation) and by the continuous modifications and discrepancies among the existing normative.

Taking the aforementioned as the starting point, several important issues have been analyzed in this research. For instance, the different variables which take part in the offshore windfarms, such as the useful life, the return period for the design storm and the probability of its occurrence, the different undulatory models that can be chosen (Airy, Stokes of different orders, Cnoidal, Stream Function, etc), the different hydrodynamic domains and the importance of the dimensionless monomials, such as KC and its effects on the seabed (mainly related to the scouring effect).

Using the experience obtained in this sector, the sensitivity of the hydrodynamic and structural behavior has been discussed here, regarding the nonlinear effects on the undulatory theory, the variation of the celerity field, the variation of the Keulegan and Carpenter parameter, and also other effects, such as those of zero, first and second order in the scouring behavior.

Furthermore, and as a consequence of the multiple failures happened in windfarms during their operation (mainly due to the level in which decks and platforms are installed), some new formulations have been proposed in this document for the calculations of the run-up and overtopping, and also for the ascent of the water after the wave impact against the structure.

As aforementioned, the different expressions obtained in this research have allowed the proposal of different design recommendations for the obtaining of a reliable, efficient and economical crown level in the monopile structures, and also the discussion of the need (or not) to protect the foundations against the scouring effects, checking the actual application of the calculations made in real windfarms, like Arklow Bank or Egmond Aan Zee, among others.

Finally, the proposed values have been compared with those thrown by the physical model tests carried out in Deltares (Netherlands) for the Norwegian platform of Aibel (Eastern part of the North Sea), which has led to a good calibration of the proposed formulations.

All the cited effects occurring against the offshore wind structures (both those which happen in the free surface of the sea, and those which happen in the seabed) will be considerably magnified by the sea level rise. Many studies in the field throw figures of 1 to 2 mm/year during the 20th century, fact which will be increased to 3 mm/year during the first half of the 21st century.

1.3. Introducción y bases de partida

Desde tiempos inmemoriales, humanistas, filósofos, poetas, científicos, ingenieros, filántropos y un largo etcétera de estudiosos, no han conseguido ponerse de acuerdo en el concepto del tiempo, si cualquiera pasado fue mejor, o si acaso es cierto que estamos viviendo una de las etapas más fascinantes de la existencia humana. Sin embargo, transcurridas ya casi dos décadas del siglo XXI, el hecho cierto es que el crecimiento perpetuo se antoja imposible y que los recursos naturales se agotan.

Hoy más que nunca somos conscientes de esta realidad. Por ello, la evolución de la calidad de vida de las personas debe plantearse como una alianza entre el crecimiento económico y el progreso científico, un fiel compromiso entre la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales y las de las futuras. Desde siempre, la mejora de la calidad de vida ha conllevado un deterioro y consumo de los recursos y un impacto hacia el planeta. El reto aquí presente consiste en mantener o incluso mejorar la calidad de vida actual sin que ello suponga asumir efectos colaterales tan perniciosos como los mencionados.



Fig. 1. El desarrollo sostenible es aquél que permite satisfacer las necesidades de la generación actual sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Fuente: Informe Brundtland (ONU).

Es por este hecho que la presente Tesis Doctoral centra su objetivo en los parques eólicos y en el mar, en la energía limpia y en la economía azul. Cuando se comenzó esta investigación se abordaron múltiples cuestiones, desde si la economía podría crecer de manera indefinida (mismo planteamiento con la población mundial), si el ser humano podría asumir un ritmo lento del progreso para así con un crecimiento ralentizado poder asumir la protección del planeta, etcétera. Tal vez la ruina ecológica actual amenace la propia existencia humana, y no sea necesario si quiera plantearse estas cuestiones.

Todo lo anterior motiva que esta Tesis Doctoral se preocupe de las energías renovables, limpias, como recurso casi inagotable que proporciona la naturaleza. Tienen carácter local o zonal, pudiéndose convertir en global, y contribuyen a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, diversifican el abastecimiento, favorecen la tecnología y la investigación, y crean empleo.

Una vez hecha esta reflexión, que justifica y da sentido al objeto de la presente investigación, en las siguientes páginas de esta Introducción se van a desarrollar las bases de partida en el ámbito de la eólica offshore, de las cuales se tomó el relevo para llevar a cabo esta labor de investigación.

La instalación del primer aerogenerador en el mar se llevó a cabo en Suecia en el año 1990. Se trataba de una instalación de marcado carácter experimental, construida a 350 metros de distancia de la costa, en un emplazamiento con una lámina de agua de 6 metros de calado. Estructuralmente, se trataba de un trípode apoyado y anclado al lecho marino arenoso. Contaba con una potencia eléctrica unitaria de 220 kW. No obstante, la fama de pionero se la llevó el parque Vindeby (Dinamarca), construido en 1991. No en vano, se trataba de la primera vez que se instalaba una colección de aerogeneradores marinos dispuestos en una malla ordenada, para dar lugar a lo que hoy en día conocemos como un parque eólico marino propiamente dicho (ver fig. 2).

La concesión inicialmente propuesta para Vindeby fue de 25 años. Tras haber suministrado energía a un total de 3.000 familias, en 2017 el parque fue desmantelado, al considerar su propietario (DONG ENERGY, actualmente Ørsted) que era deficitario y antieconómico dada su antigüedad, decidiendo así apostar por nuevos y mejores parques.



Fig. 2. Parque eólico de Vindeby. Con sus 11 aerogeneradores, está considerado el primer parque eólico marino del mundo. Fuente: Ørsted.

Vindeby estaba integrado por 11 turbinas de 450 kW de potencia unitaria, emplazadas en profundidades reducidas, a una distancia de unos 2 kilómetros de la costa, y cimentadas sobre elementos estructurales monopilotados.

Después de este primer parque que dio el pistoletazo de salida a esta tecnología, vinieron muchos más. No han pasado treinta años aún, y Europa ya había alcanzado a finales de 2018 los 16.000 MW instalados. Esto, unido al gran avance que ha supuesto la irrupción de países como China, Vietnam, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos o Taiwan en la industria (los cuales suman casi 19.000 MW), ha hecho que el sector avance a pasos agigantados, a la vez que la balanza geográfica va basculando poco a poco hacia el continente asiático.

Y es que los más de 35.000 MW existentes en la actualidad a nivel mundial justifican claramente las cualidades tradicionalmente atribuidas a estas instalaciones: son fiables, eficientes, limpias y respetuosas con el medio ambiente. Y generan riqueza para las empresas constructoras y explotadoras, por lo que su atractivo es exponencial comparado con otras formas de generación eléctrica.

No obstante, el camino tecnológico seguido no ha sido nada fácil. Los principales retos a los que ha tenido que enfrentarse el sector han sido, entre otros, los siguientes:

- La obtención de emplazamientos óptimos en cuanto a aprovechamiento del recurso se refiere, pero que a la vez cumplieren los requisitos o restricciones de carácter medioambiental, social, territorial y geopolítico.
- La interacción de la estructura con el terreno natural y la geotecnia del fondo marino. Efectos como la socavación o el descalce de las estructuras han sido en numerosas ocasiones el talón de Aquiles de estas instalaciones.
- La tipología de las cimentaciones, en particular el fuerte empuje que están ejerciendo en los últimos años los elementos flotantes, sin perder de vista el claro predominio de los elementos monopilotados.
- La lucha contra las acciones medioambientales extremas, que han dificultado, no sólo la normal explotación de los parques, sino la mera accesibilidad a los mismos para ejercer labores de mantenimiento y reparación.
- Los procesos constructivos y las ventanas temporales de los equipos de construcción.
- El tamaño de los parques para ser económicamente viables. Así como conceptos como prolongar la vida útil de las instalaciones (“life extension”) para optimizar al máximo la rentabilidad de las mismas.
- La heterogeneidad existente entre los distintos fabricantes de aerogeneradores, equipos industriales y eléctricos. También la disparidad de criterios entre las distintas normativas y recomendaciones existentes.
- El problema añadido del cambio climático, que conlleva una inexorable subida del nivel medio del mar, lo que acrecienta las incertidumbres normativas, la magnitud de las acciones actuantes, y el posible comportamiento anómalo de las estructuras.

Entre 1990 y 2019, ha habido dos grandes fases de experimentación e investigación. La primera de ellas, entre los años 1991 y 1998, se caracteriza por ser la década en la que se probó el comportamiento de los distintos tipos de cimentaciones, fundamentalmente de gravedad (GBS), pilotes y trípodes. Todas ellas estaban emplazadas en profundidades reducidas (<6 m), con fondos de pendiente suave o casi planos, alcanzando distancias a la costa de hasta 4.000 metros. Estas primeras pruebas con potencias unitarias entre 450 y 600 kW dieron muy buenos resultados, permitiendo así que la industria diese un paso adelante, debido a su fiabilidad, eficiencia y, por supuesto, rentabilidad.

El nuevo siglo trajo consigo la segunda fase, caracterizada por el empleo de dispositivos “multi-megawatio”, siendo Utgrunden (Suecia) el primero construido, a principios del año 2000. El reto que supone su emplazamiento en un mar adverso y gélido como es el Báltico hace que haya sido considerado todo un éxito, además de un referente en la materia. No en vano, tenía como abrigo

natural la isla de Öland, lo cual facilitó, en cierta medida, tanto el proceso constructivo, como su ulterior explotación y mantenimiento.

Utgrunden sirvió de ejemplo y punta de lanza para el resto de parques planificados con fines comerciales, que poco a poco se iban abriendo hueco en el panorama eléctrico internacional. Merece la pena destacar Blytg o Yttre Stengrund, entre otros.

Dinamarca, que ya había adquirido una notable tradición desde Vindeby, y que contaba con compañías tan importantes como DONG ENERGY, apostó por la adaptación de la tecnología eólica al medio marino, y lo puso en práctica con las instalaciones de Horns Rev y Nysted. El primer gran paso estaba dado.

Desde entonces todo ha sido crecimiento, y a un ritmo inimaginable hace sólo una década. A fecha de hoy, en Europa cinco países acaparan el 98% del total de aerogeneradores conectados a la red eléctrica. Reino Unido lidera el ranking con una cuota del 43%, seguido de Alemania con un 34%, y por detrás se sitúan Dinamarca (8%), Holanda (7%) y Bélgica (6%). Todos ellos lideran un mercado que presenta una expansión vertiginosa. Los emplazamientos europeos actuales se caracterizan principalmente por:

- Las excelentes condiciones del recurso eólico. Éste se caracteriza por estar muy bien definido en cuanto a vientos reinantes y dominantes.
- La idoneidad que presenta la plataforma litoral para recibir las cimentaciones de los aerogeneradores. Se encuentran pendientes suaves y uniformes desde la línea de costa hasta las profundidades de emplazamiento de los parques.
- La naturaleza de la cimentación (terrenos cuaternarios procedentes de aportes fluviales), que facilita la instalación de las estructuras soporte mediante cimentaciones directas o elementos indirectos.
- Clima marcadamente estacional, con uso reducido de las playas a nivel turístico durante el invierno, y facilidad de mantenimiento de las instalaciones durante la época de calma (período estival).
- Baja intrusión visual, debido a la distancia de separación de los parques de la costa (gracias a la suave pendiente de la plataforma litoral).
- Sostenibilidad energética frente a impacto ambiental sobre el medio marino.

Como se ha comentado, actualmente los más de 16.000 MW instalados en Europa compiten con los 19.000 MW de los nuevos países emergentes, entre los que sobresale China.



Fig. 3. Evolución en tamaños y potencias desde 1991 hasta la actualidad. Las alturas se han multiplicado por 3, los diámetros de las palas por 5, y las potencias unitarias por 18. Fuente: DONG ENERGY.

Todas las dificultades existentes en los parques eólicos offshore derivadas de su emplazamiento en el océano se verán incrementadas considerablemente con el cambio climático, y la consiguiente subida del nivel del mar. Numerosos estudios científicos han constatado que este fenómeno se lleva produciendo desde hace siglos. En particular, durante el siglo pasado XX, el nivel medio ascendió a un ritmo medio de 1 a 2 mm/año. Este ritmo ha aumentado hasta los 3 mm/año en las dos últimas décadas, por lo que es previsible que siga creciendo a esta velocidad durante la primera mitad del siglo XXI, e incluso se acelere la subida a partir de 2050. En el caso particular de España, esta tasa se prevé que alcance valores de 3 a 5 mm/año durante la primera mitad del siglo XXI.

Las predicciones más recientes predicen una subida promedio para el año 2050 de 3 cm en el Mar Cantábrico y de 15 a 20 cm en el Mediterráneo. En España este efecto puede ser devastador, pues gran parte del territorio está bañado por el mar. Además, como se ha comentado en el párrafo anterior, la tasa de subida es mayor en nuestro país que la tasa media considerada a nivel internacional.

La subida del nivel medio del mar tiene como consecuencia directa el retroceso de la línea de costa, factor especialmente crítico en las zonas de playa, donde se pueden alcanzar valores de retroceso de 10 a 15 m en la fachada Cantábrica, y de 8 a 10 m en el Mediterráneo. Estos valores

son fácilmente obtenibles mediante la aplicación directa de la Regla de Bruun o mediante el uso de avanzados modelos numéricos que derivan en visores gráficos, como el C3E propuesto por el IH Cantabria.

Pero la consecuencia de la subida del nivel del mar que principalmente afecta a lo descrito en esta Tesis Doctoral es la modificación de las acciones climáticas y las cargas que actúan sobre las estructuras eólicas offshore, tanto a nivel de superficie, como en el lecho marino, como se verá más adelante.

Esta investigación nace básicamente por tratarse de un tema sensible y actual. Las energías renovables marinas son una oportunidad que transforma la vida, la economía y el planeta, pero conllevan la existencia de lagunas a nivel de clima marítimo e interacciones de oleaje sobre las estructuras, así como los elementos soporte con su terreno de cimentación. Estas lagunas han dado y siguen dando problemas, con reclamaciones multimillonarias por las averías y notables dificultades en las reparaciones. Esto es debido a que el mar se trata de un medio agreste, que necesita amplia planificación, ventanas temporales de clima marítimo y equipamiento carísimo para reparar cualquier desperfecto que el mar pudiera ocasionar durante la vida útil de las instalaciones (20 años), sometidas a acciones climáticas de recurrencias medias (50 años) pero con muy elevada probabilidad de presentación durante la vida útil (33%), tal como se verá más adelante.

Para detectar, analizar y evaluar estas incertidumbres basadas probablemente en la reducida experiencia del sector, se han revisado todas las recomendaciones, normas y reglas existentes hasta la fecha, destacando las siguientes:

- Det Norske Veritas. DNV Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine. Technical Standard: June 2013.
- Det Norske Veritas. DNV Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine. Technical Standard: May 2014.
- DNV-GL. Loads and site conditions for wind turbines. Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd. DNVGL-ST-0437. Technical Standard: November 2016.
- DNV-GL. Support structures for wind turbines. Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd. DNVGL-ST-0126. Technical Standard: April 2016.
- DNV-GL. Certification of lifetime extension of wind turbines. Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd. DNV-GL-SE-0263. Service Specification: March 2016.

- International Electrotechnical Commission, IEC 61400-1. Wind turbines-part 1: design requirements. Technical Standard: 2005.
- International Electrotechnical Commission, IEC 61400-3. Wind turbines-part 1: design requirements for offshore wind turbines. Technical Standard: 2009.
- Germanischer Lloyd. Guideline for the Certification of offshore wind turbine. Technical Standard: 2005.



Fig. 4. Estándares de la Germanischer Lloyd (actual DNV-GL), DNV y Programa ROM. Fuente: DNV-GL y Puertos del Estado.

La estrategia seguida ha consistido en estudiar en profundidad las acciones climáticas de oleaje, marea y corriente sobre estructuras offshore instaladas en mares de relativamente baja adversidad energética (considerando que esta queda caracterizada por la relación H_S-T_p). Para ello, se han empleado todos los conocimientos de la ingeniería marítima española (tal vez, pionera y puntera en el mundo) y de nuestros mares, donde las combinaciones de cargas extremas y las características de nuestros temporales, tanto por intensidad como por duración, nos han conducido a un sobresaliente estado del conocimiento del medio físico.



Fig. 5. Las construcciones marinas son probablemente las estructuras que se encuentran sometidas a mayores solicitaciones variables. Fuente: Luengo et al.

Esta Tesis Doctoral consiste en una memoria en forma de compendio de publicaciones. Las mismas muestran una única unidad temática. Además, este formato otorga elevado rigor científico, pues los artículos indexados han sido evaluados, previamente a su publicación, por expertos internacionales solventes, lo cual hace que el presente documento reúna los requisitos de cantidad, calidad y autoría necesarios.

1.4. Objetivos de la Tesis Doctoral

Tal como se expuso en la Introducción del presente documento, el objetivo fundamental de esta Tesis Doctoral es detectar las incertidumbres derivadas del clima marítimo en el diseño de las estructuras soporte y en las cimentaciones de los aerogeneradores instalados en el mar, tanto en profundidades reducidas como en aguas de transición (si bien no se entra en profundidades indefinidas, por ser a día de hoy campo de aplicación de los elementos flotantes, sí debería plantearse en futuras etapas de la investigación, al ir poco a poco aumentando la profundidad de instalación de las cimentaciones directas). Una vez analizadas dichas incertidumbres, se han propuesto recomendaciones de diseño en función de la profundidad a la que esté emplazado el parque (generalmente aguas de transición):

$$\text{Reducidas: } \frac{h}{L} < \frac{1}{25} \quad \text{ó} \quad \frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad \text{ó} \quad kh < \frac{\pi}{10}$$

$$\text{Transición: } \frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad \text{ó} \quad \frac{\pi}{10} < kh < \pi$$

$$\text{Indefinidas: } \frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad \text{ó} \quad kh > \pi$$

Esta zonificación de las profundidades marinas se puede observar en la fig. 6.

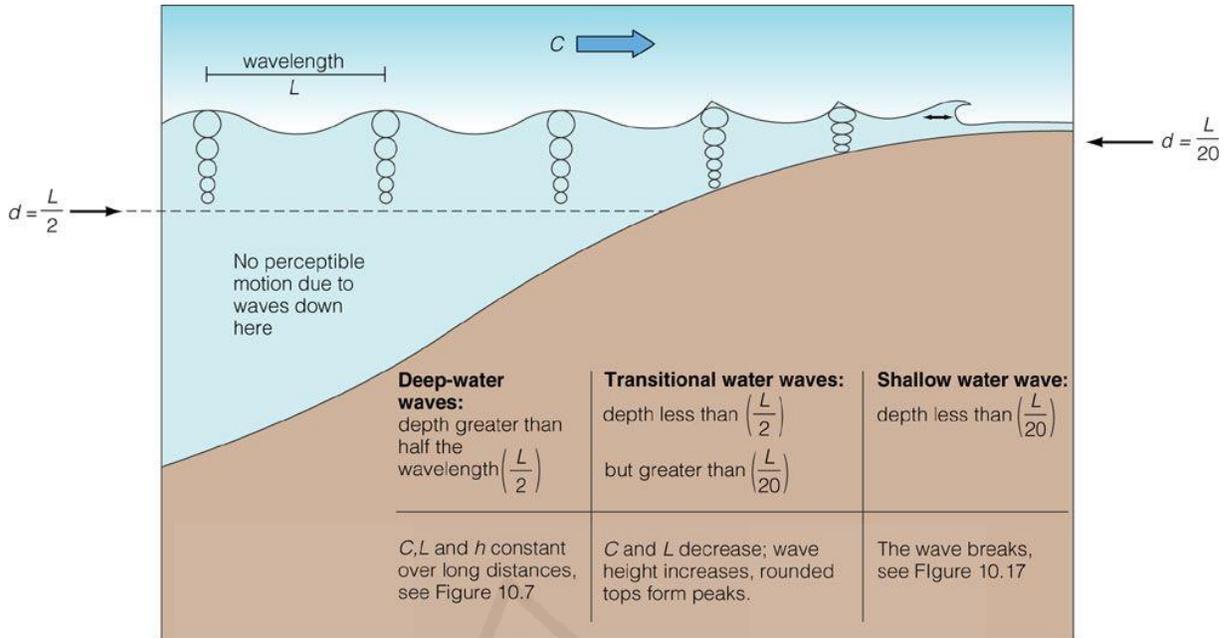


Fig. 6. Zonificación de las profundidades oceánicas en función del comportamiento hidrodinámico marino. Fuente: Brooks et al.

Por eso se han planteado distintas revisiones críticas de las normativas vigentes desde 2005 a 2018, inicialmente la DNV (*Det Norske Veritas*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) y GL (*Germanischer Lloyd*), para, posteriormente, considerar las revisiones propuestas por los propios organismos anteriores tras la fusión de las sociedades clasificadoras DNV-GL. En particular, se ha hecho hincapié en los Capítulos correspondiente a “Acciones” y “Combinaciones de cargas sobre las estructuras soporte”

Las principales incertidumbres detectadas durante la revisión de la normativa anteriormente citada son las siguientes:

- La vida útil mínima a considerar en los parques (20 años) y el período de retorno del temporal de cálculo (50 años), generan cierta inseguridad desde el punto de vista de la Ingeniería, pues la combinación de ambos valores implica una probabilidad de presentación de la acción de diseño durante la fase de operación del parque del 33%, valor demasiado elevado teniendo en cuenta el coste y la magnitud de estas instalaciones:

$$T_r = \frac{-n}{\ln(1 - P_f)} \rightarrow P_r = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n\right) = 0,33 = 33\%$$

- Los dominios hidrodinámicos a considerar en ocasiones no quedan suficientemente definidos en la normativa. Dichos dominios se establecen en función de la tipología estructural de la cimentación (caracterizada por su esbeltez, es decir, por su diámetro aparente) y del comportamiento de la acción de diseño (caracterizado por la longitud de onda del oleaje). En aguas de transición, donde se ubican la mayor parte de los parques, y empleando teoría lineal, esto es:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} th\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

Por simplicidad conceptual, sólo se consideran dos dominios hidrodinámicos, el de Morison y el de difracción, cuestión que por otra parte suele ser lo habitual en la práctica (sin acudir al intermedio de Froude-Krylov):

$$\text{Morison: } \frac{D}{L} < 0,05$$

$$\text{Froude - Krylov: } 0,05 < \frac{D}{L} < 0,20$$

$$\text{Difracción: } \frac{D}{L} > 0,20$$

- Los modelos de onda a emplear en el cálculo de las velocidades y aceleraciones tampoco quedan bien definidos en la normativa vigente, y resultan fundamentales para obtener las fuerzas de inercia (F_M) y arrastre (F_D) actuantes sobre las estructuras, así como la importancia relativa de cada una de ellas (ver fig. 7):

$$dF = dF_M + dF_D = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{x} dz + C_D \rho \frac{D}{2} |\dot{x}| \dot{x} dz$$

o, lo que es lo mismo:

$$F = F_M + F_D = \int_{-d}^{\eta(t)} C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{x} dz + \int_{-d}^{\eta(t)} C_D \rho \frac{D}{2} |\dot{x}| \dot{x} dz$$

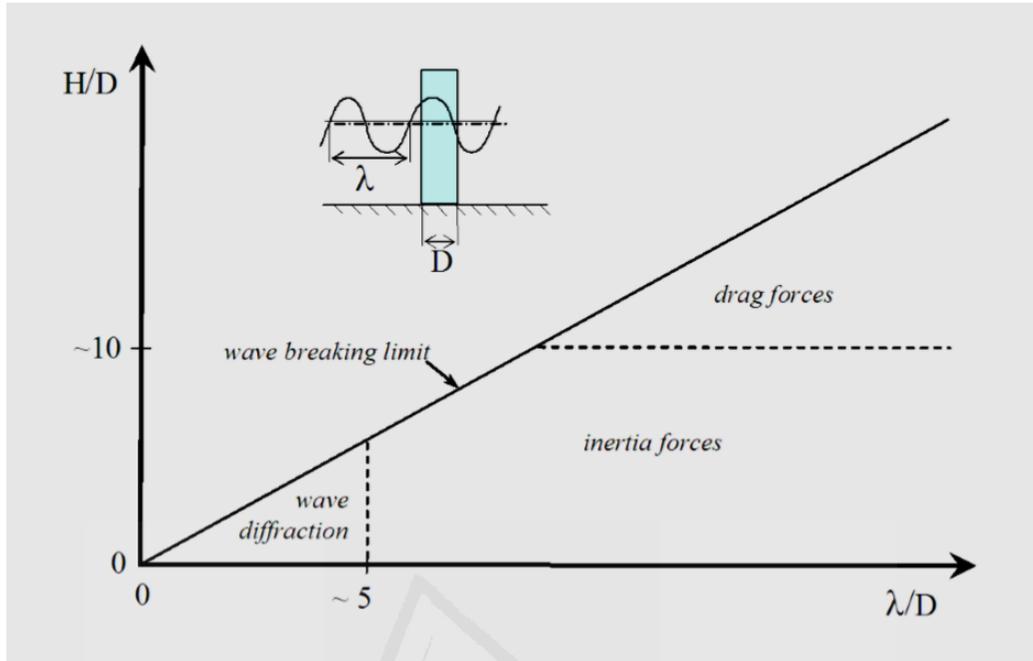


Fig. 7. Importancia relativa de las fuerzas de inercia, arrastre y difracción en el comportamiento ondulatorio del oleaje y su acción sobre las estructuras. Fuente: DNV-GL.

- La afeción de la no linealidad al número de Keulegan y Carpenter no se tiene en cuenta. Este debería ser un aspecto primordial, pues KC es uno de los parámetros más utilizados en ingeniería marítima, ya que gobierna el comportamiento de las cimentaciones en cuanto a socavación se refiere:

$$KC = \frac{u_{m\acute{a}x} \cdot T}{D} = \frac{2\pi u_{m\acute{a}x}^2}{D a_{m\acute{a}x}}$$

- Otros efectos derivados, tales como los distintos factores que dan lugar a la socavación (orden cero, y primer y segundo orden), los asentos del terreno y el consiguiente descalce o desestabilización de las estructuras, o la licuefacción de las arenas del lecho marino.

La socavación tradicionalmente considerada, debido a la corriente existente en el fondo, es lo que en esta Tesis se ha denominado como socavación de primer orden. A esta habría que sumarle un término más, denominado aquí socavación de segundo orden, que es la debida a las cargas transmitidas desde el pilote a la interacción lecho-estructura debido a los efectos de superficie (oleaje, hielo, viento...). Este segundo orden acrecienta el efecto de debilitamiento y licuefacción de las arenas del fondo ya inducido por el

primer orden (ver fig. 8). Y a todo ello habría que sumarle una tercera componente, la socavación de orden cero, que es aquella que se produce durante la hinca de los pilotes, la cual debilita el lecho y desplaza el material. Evidentemente, este orden cero se puede obviar en cimentaciones ejecutadas por otros métodos constructivos distintos de la hinca.

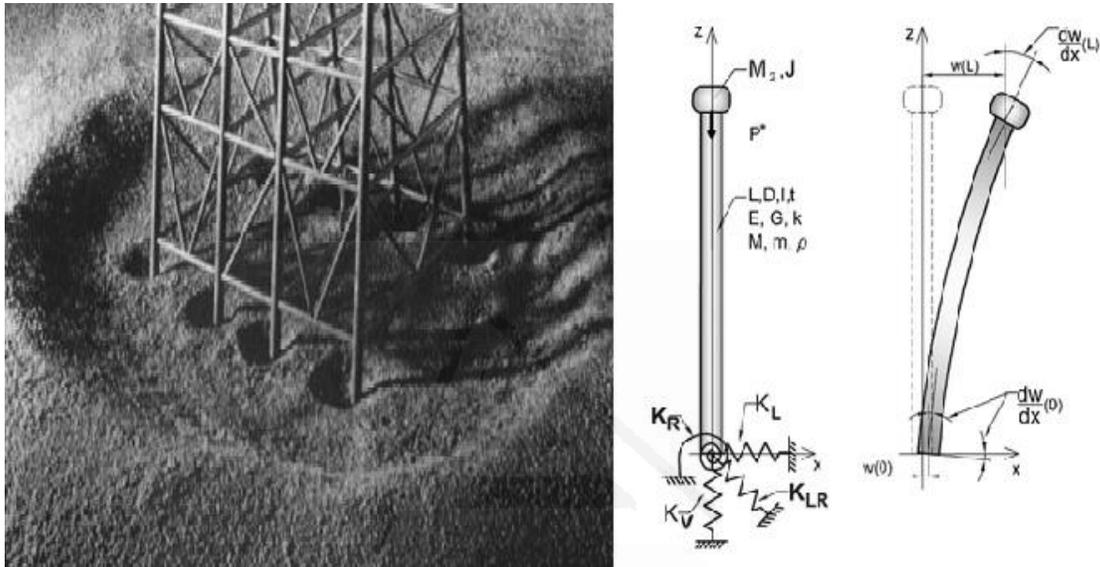


Fig. 8. Ejemplo de socavación local y global en el lecho de una cimentación multitubular, y mecanismo simplificado de acciones y comportamiento dinámico de una cimentación monopilotada. Fuente: Negro et al, y Institution of Engineering and Technology.

Una vez detectadas y estudiadas las incertidumbres anteriores, se procedió a realizar una segunda etapa de detección de posibles incertidumbres y lagunas en la normativa vigente. Estas fueron:

- La repercusión de la linealidad y la no linealidad en los cálculos, como podría ser en la elección del modelo de onda a aplicar para la obtención de velocidades, aceleraciones, fuerzas y presiones.
- La sensibilidad del número KC en función dicha no linealidad y sus efectos en la socavación de aerogeneradores pilotados.
- El distinto origen de la socavación de orden cero con respecto a la de primer y segundo orden.

- Los criterios de selección de las variables de clima marítimo, suponiendo la analogía onda-ola (H_{m0} , H_s , T_m , $T_{0,2}$, $T_{-1,0}$).
- El criterio estadístico de la DNV de emplear variables extremas asociadas a períodos de retorno muy bajos (en ocasiones de 1 año de recurrencia), en lugar de efectuar un análisis de las mismas desde el punto de vista de la estadística de régimen medio:

$$H_D = \psi \cdot H_{S_1 \text{ año}}; \psi = \frac{H_{S_5 \text{ años}}}{H_{S_{50 \text{ años}}}}$$

- La comparación de dichos criterios estadísticos con el coeficiente de rotura Υ_b , y la consideración del mismo para efectuar los cálculos.

Una vez estudiadas las incertidumbres anteriormente comentadas, entre otras, se plantearon recomendaciones de diseño para el cálculo del remonte y rebase sobre los aerogeneradores pilotados para intentar resolver el denominado “run-up”. Run-up es el efecto que produce el frente de onda al impactar durante su propagación hacia la costa contra un elemento esbelto (generalmente cilíndrico). Al producirse dicho impacto, la vena líquida asciende por la estructura considerablemente más de lo que tradicionalmente se predijo, y además causa una sobrepresión contra la misma en forma de percusión (“wave slamming”) también considerablemente superior de lo que los métodos de cálculo tradicionales (para estructuras portuarias, varios órdenes de magnitud menos esbeltas que los pilotes) predijeron. El run-up ha ocasionado problemas con la cota de coronación, como se verá más adelante.

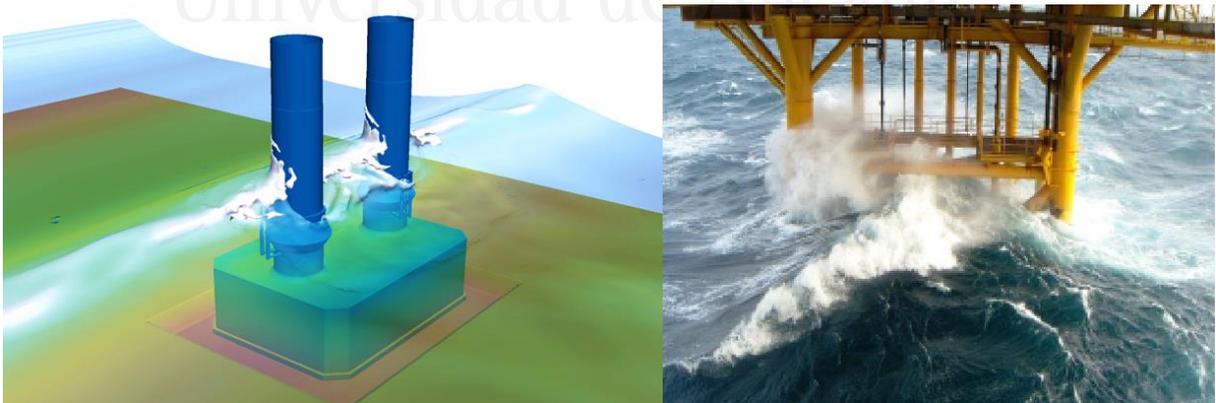


Fig. 9. Modelo numérico de análisis de run-up y wave slamming, y efecto real en cimentación multitubular en operación. Fuente: Jan De Nul, Technische Universität Braunschweig.

Los resultados obtenidos con temporales de reducida intensidad en el parque de Horns Rev (Mar del Norte) se tomaron como referencia para efectuar los cálculos. Para llevarlos a cabo, se emplearon los siguientes modelos teóricos, que dieron una buena correlación con el modelo físico utilizado como punto de partida:

- Modelo de Hiroi (1919), aplicable en estructuras monolíticas verticales que se comporten dentro del dominio de difracción.
- Modelo de Sainflou (1928), aplicable para la misma tipología estructural que el de Hiroi.
- Modelo de Goda (1974), aplicable en diques verticales.
- Modelo de los Ábacos de Goda (2000), calcula la cota de coronación en función de la tasa de caudal de rebase “q” que se permita o se prevea en la estructura.
- Modelo de Suh *et al* (2007), el cual se basa en el número de onda (k) y en los monomios $kh-R_u/H$.

Para verificar la bondad del ajuste y validar los resultados, las formulaciones anteriores y la recomendación teórica propuesta en la investigación también fueron aplicados en otros parques, como Barrow o North Hoyle.

Las principales variables climáticas a considerar para poder aplicar las formulaciones teóricas anteriores para el cálculo del run-up fueron la altura de ola y el período ondulatorio. Estos datos se obtuvieron de los ensayos en modelo físico desarrollados en Deltares para la plataforma de Aibel, lo cual permitió evaluar la bondad del ajuste de dichas formulaciones y calibrar la propuesta definitiva de las mismas, como se ha comentado.

Además de lo anterior, también se ha discutido la necesidad de proteger o no la cimentación frente a la socavación. En algunos casos puede resultar rentable técnica y económicamente dejar que la erosión de la cimentación se produzca y proceder posteriormente a la reparación (en caso de que así fuese necesario) durante la vida útil de la instalación. Éste sería el caso del parque N7 frente a Arklow Bank, por ejemplo.

Los efectos climatológicos considerados anteriormente se ven incrementados aún más al introducir la variable del cambio climático. Dentro del gran abanico de consecuencias que conlleva el cambio climático, la que tiene mayor repercusión sobre los parques eólicos offshore es la subida del nivel medio del mar. Como se ha comentado en epígrafes anteriores, si bien es cierto que esta subida puede tener sus efectos en parques ubicados en profundidades reducidas

(tanto por conceptos de territorio (“land reclamation”), como por la problemática relacionada con las cimentaciones), aquí se estudian aquellas consecuencias que ocurrirán en los parques eólicos offshore, a profundidades mucho mayores. Entre otras consecuencias, la subida del nivel medio del mar implicará en las instalaciones de eólica marina:

- Cambios en la dirección del oleaje incidente, que pueden acrecentar el fenómeno de la socavación y aumentar la cota de remonte tras el run-up, por reducirse el efecto sombra que ejercen las estructuras más expuestas sobre las que quedan a su sotamar.
- Cambios en la forma de las olas, en la longitud de onda, en el período ondulatorio, aumento de la altura de ola, aumento de la duración de los temporales.
- Aumento de la cota de run-up, aparición de overtopping e incremento de la tasa de rebase (una vez que éste se produzca).
- Cambio de ubicación de la zona de rompientes, y modificación de la dinámica litoral (afectando a parques emplazados en profundidades nearshore).

Además del coste medioambiental, de lo anterior se puede extraer que la subida del nivel del mar puede acarrear graves consecuencias económicas en la eólica marina. Por tanto, a los objetivos mencionados anteriormente, habrá que sumarle el efecto que suponga en los mismos la citada subida del nivel del mar.

Estas reflexiones, discusiones y propuestas están expuestas con todo detalle en los distintos artículos científicos que forman esta Tesis Doctoral.

1.5. Metodología de la investigación

Las normativas, recomendaciones y manuales analizados presentan estructuras semejantes. Todas ellas comienzan con una descripción de las distintas tipologías estructurales existentes, sus profundidades de instalación idóneas, y su funcionamiento. Algunos ejemplos de estas cimentaciones pueden observarse en la fig. 10.

Una vez analizadas las tipologías estructurales, las normativas se centran en los principios de diseño, considerando tanto los estados límites últimos (ELU), como los de servicio (ELS) y los de operación (ELO), definiendo los coeficientes de seguridad, las combinaciones de cargas y la probabilidad de ocurrencia conjunta de las diferentes acciones de diseño.

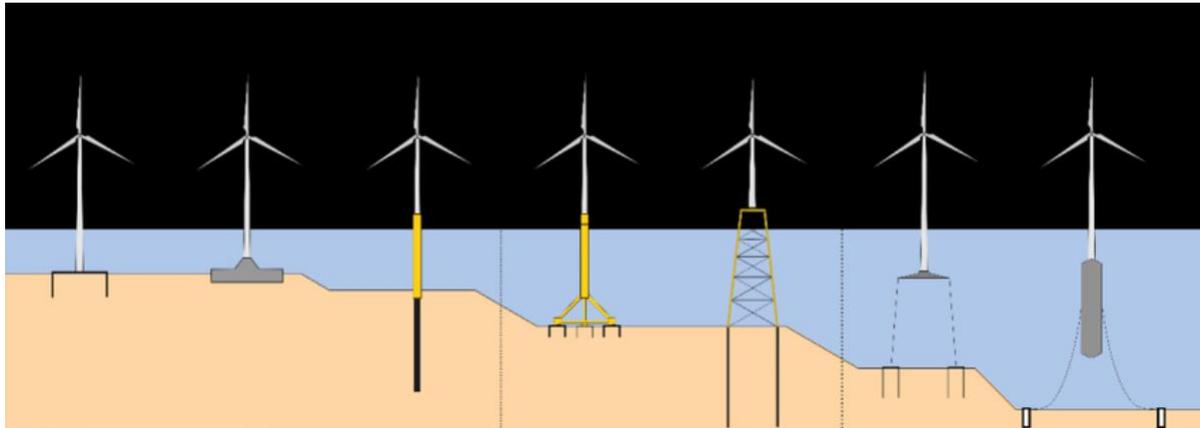


Fig. 10. Principales tipologías de cimentaciones directas e indirectas (o flotantes) empleadas en eólica offshore. Fuente: Bhattacharya, S.

Para considerar los estados límites mencionados, se tienen en cuenta tres rangos de diseño a la hora de obtener el período de retorno de las variables de cálculo:

- Rango límite. Todas las variables extremales se calculan con el período de retorno máximo.
- Rango extremal. La variable principal se calcula con el período de retorno máximo, mientras que las variables auxiliares se calculan con la décima parte de éste. Este rango es al que recomienda acudir, por ejemplo, la Det Norske Veritas, como puede observarse en la Tabla 4.9 de la DNV-OS-J101 (ver fig. 11).
- Rango operativo. Las variables de cálculo siguen distribuciones medias diferentes ó se calculan según leyes de período de retorno de 1 año.

		<i>Environmental load type and return period to define characteristic value of corresponding load effect</i>				
<i>Limit state</i>	<i>Load combination</i>	<i>Wind</i>	<i>Waves</i>	<i>Current</i>	<i>Ice</i>	<i>Water level</i>
ULS	1	50 years	5 years	5 years		50 years
	2	5 years	50 years	5 years		50 years
	3	5 years	5 years	50 years		50 years
	4	5 years		5 years	50 years	Mean water level
	5	50 years		5 years	50 years	Mean water level

Fig. 11. Períodos de retorno a tener en cuenta en los cálculos estructurales para las distintas combinaciones de cargas actuantes. Fuente: Det Norske Veritas.

Los criterios de dimensionamiento se encuentran tabulados en función de las consideraciones de ELU, ELS y ELO y períodos de retorno de diseño mencionadas anteriormente. Un ejemplo de los mismos puede observarse en la fig. 12.

Table 4-5 Proposed load cases combining various environmental conditions										
Design situation	Load case	Wind condition: Wind climate ($U_{10,hub}$) or wind speed (U_{hub})	Wave condition: Sea state (H_s) or individual wave height (H) to combine with	Wind and wave directionality	Current	Water level	Other conditions	Limit state		
Transport, assembly, maintenance and repair	8.2a	EWM Steady wind $U_{hub} = 1.4 \cdot U_{10,1-yr}$	RWH $H = \psi \cdot H_{1-yr} (2)$	Codirectional in one direction	1-year current	1-year water level		ULS Abnormal		
	8.2b	RWM Steady wind $U_{hub} = 0.88 \cdot U_{10,50-yr}$	EWH $H = H_{1-yr}$	Codirectional in one direction	1-year current	1-year water level		ULS Abnormal		
	8.3	NTM $U_{10,hub} < 0.7U_{10,50-yr}$	NSS H_s according to joint probability distribution of H_s , T_p and $U_{10,hub}$	Codirectional in multiple direction (See [4.6.9])	(5)	Range between upper and lower 1-year water level		FLS		
2) It is practice for offshore structures to apply $\psi = H_{s-yr} / H_{s0-yr}$ where H_{s-yr} and H_{s0-yr} denote the individual wave heights with 5- and 50-year return period, respectively. The shallower the water depth, the larger is usually the value of ψ .										
8) Transport, installation, maintenance and repair	8.1	NTM $V_{hub} = V_T$ to be stated by the manufacturer	NSS $H_s = H_{sT}$ to be stated by the manufacturer	COD, MUL	No currents	NWLR	Design conditions shall be stated by the manufacturer	U	U	N
	8.2	EWIM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	COD, MUL	No currents	NWLR	Transport, installation, maintenance and repair	U	U	A
	8.3	EWIM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	COD, UNI	ECM $U = U_1$	NWLR	Vortex-induced vibrations due to wind, waves or currents	F/U	F/U	F/N
	8.4	NTM $V_{hub} < 0,7V_{ref}$	NSS Joint prob. distribution of H_s , T_p , V_{hub}	COD, MUL	No currents	NWLR or \geq MSL	No grid during installation period	-	F/U	F/N
	8.5	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	COD, MUL	ECM $U = U_1$	NWLR	Service vessel impact and helicopter loads - normal event	-	U	N
	8.6	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	COD, MUL	ECM $U = U_1$	NWLR	Supply vessel impact - abnormal event	-	U	A

Fig. 12. Comparativa entre las distintas combinaciones de carga propuestas para las fases de transporte, instalación, mantenimiento y reparación de los elementos estructurales para parques eólicos offshore. Fuente: DNV-OS-J101 y DNV-GL-ST0126.

La normativa vigente también incluye recomendaciones en cuanto a las condiciones de diseño de carácter ambiental (gobernadas principalmente por el oleaje incidente sobre las estructuras). Este tema se ha analizado en profundidad y se incluye en los artículos fruto de la presente investigación. También se analiza en profundidad el viento (que no es fruto de la presente Tesis Doctoral), lo cual resulta lógico desde el punto de vista del recurso, dado que estas reglamentaciones están dedicadas a la energía eólica marina. Ambos fenómenos físicos, oleaje incidente y recurso eólico, se analizan desde el enfoque estadístico de los regímenes medios y extremales, la cantidad y calidad de los datos meteorológicos existentes, las series temporales disponibles, el modelado y análisis de las mismas, el efecto ráfaga (para el viento), etc.

No obstante, como se ha comentado, en esta investigación el enfoque climatológico se hace analizando el oleaje, no el viento. Esto es así debido a que se tienen en cuenta las acciones climáticas, no desde el punto de vista del recurso, sino desde el punto de vista de las cargas y acciones actuantes sobre la estructura objeto de diseño. Y es que la Tesis Doctoral se centra en la parte de la cimentación de las estructuras, y en la funcionalidad y comportamiento de los elementos de soporte, no así en la superestructura o en los equipos de generación de electricidad.

Para estudiar el oleaje, se han considerado los parámetros ondulatorios previos a la analogía onda-ola. Cabe destacar las distintas definiciones de alturas de ola (H_s , $H_{1/10}$, $H_{m\acute{a}x...}$) y de períodos ondulatorios (T_m , T_z y T_p), así como las relaciones entre ellos. También merece la pena mencionar el modelado del fenómeno físico en función de los espectros energéticos (JONSWAP, Pierson-Moskowitz y TMA, fundamentalmente), las distribuciones estadísticas continuas (Weibull biparamétrica con β y Υ , y triparamétrica con umbral de excedencia y parámetros α , β y Υ), la función de probabilidad y su relación con el período de retorno, la relación $H_{m\acute{a}x}/H_s$, así como otros conceptos, como son la cinemática de las ondas considerando teorías puramente lineales o regulares (Airy) y no lineales (Stokes de diferentes órdenes, Cnoidal, función de corriente ("*Stream function*"), etc).

Además de las variables principales, también existen otras variables auxiliares que, si bien es cierto que no han sido tenidas en cuenta en la presente Tesis Doctoral, sí lo serán en futuras etapas de la investigación postdoctoral. Este es el caso de los niveles del mar (cuya subida debido al cambio climático es ya en sí otra investigación de gran envergadura), la presencia de hielo y su impacto contra las estructuras, la interacción de la estructura con el lecho marino (en otros aspectos además de la socavación), el comportamiento geotécnico, la sismicidad, salinidad, temperatura, el crecimiento de los ecosistemas marinos en las estructuras ("*marine growth*"), la maniobrabilidad de los buques de construcción y mantenimiento (lo cual puede condicionar en gran medida el *lay-out* en planta del parque, y desde luego la accesibilidad y operatividad del mismo), etc. Estos conceptos auxiliares son tratados por la normativa vigente de manera bastante somera.

El punto de partida de la presente investigación comenzó al repasar concienzudamente todos los aspectos anteriormente considerados. Se encontraron lagunas, dificultades e incertidumbres en su aplicación. También se observó la consideración casi exclusiva de las estructuras monopilotadas aisladas, prestando quizás poca atención a otras tipologías estructurales, como los elementos de gravedad (GBS), los elementos flotantes (SPAR-buoy, Barge), los trípodos, los jackets o las plataformas de patas tensionadas (TLP). No obstante, esta focalización de la

normativa en las cimentaciones monopilotadas cobra sentido al observar que en la actualidad son la tipología estructural preponderante, tal como puede observarse en la fig. 13.

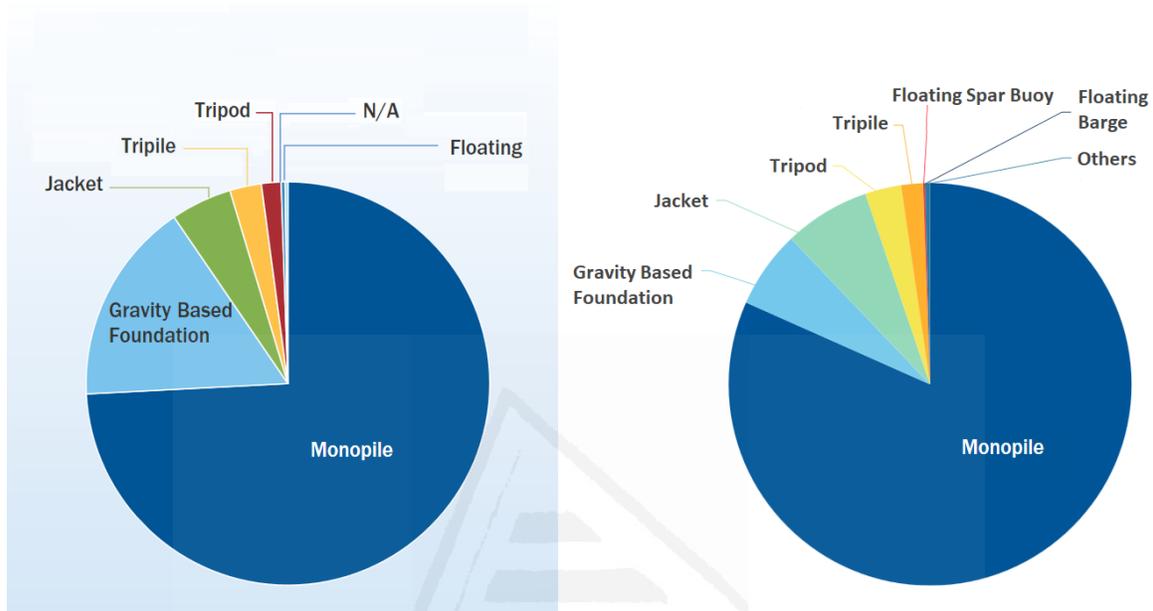


Fig. 13. Tipos de cimentaciones directas en ingeniería eólica offshore. Comparativa entre 2012 y 2018. Predominio total de los elementos monopilotados, seguidos de las GBS, ambos objeto de esta Tesis Doctoral. Fuente: EWEA-Wind Europe.

Como se ha comentado, una vez revisadas las normativas, se ha procedido al análisis de las incertidumbres presentes en estas, y al planteamiento de recomendaciones de diseño, lo cual es el objetivo de esta Tesis Doctoral.

En la Tabla 1 se puede observar un cuadro resumen del compendio de normativas vigentes en el momento de redacción del presente documento, recogiendo sintetizadamente los principales conceptos de cada una de ellas.

NORMATIVA	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	APLICACIÓN	OBSERVACIONES
	Vida útil n=20 años	Probabilidad de fallo $P_f=10^{-4}$	Habitual en el diseño de estructuras

IEC 61400-1 IEC 61400-3 DNV-OS-J101, 2013 DNV-OS-J101, 2014	Período de retorno $T_r=50$ años	Valor mínimo recomendado, que es además el habitualmente tenido en cuenta	La probabilidad de presentación del temporal de cálculo durante la vida útil: $P_r = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n\right) = 33\%$
	Vida útil $n=20$ años y comportamiento estructural rígido	Probabilidad de fallo 0,10	$T_r = \frac{-n}{\ln(1 - P_f)} = 189,8$ años (muy diferente al señalado en las normas)
	Dominios hidrodinámicos	Morison: $\frac{D}{L} < 0,05$ Froude-Krylov: $0,05 < \frac{D}{L} < 0,20$ Difracción: $\frac{D}{L} > 0,20$	Las normas prácticamente trabajan en dominio de Morison para $D/L < 0,2$: $dF = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{x} dz$ $+ C_D \rho \frac{D}{2} \dot{x} \dot{x} dz$
	Modelos ondulatorios	Ábaco de Lé Méhauté. Efectos lineales y no lineales	Teoría lineal o de Airy, cuando la mayoría de los parques está en el rango de Stokes.
	Socavación	Número de Keulegan y Carpenter: $KC = \frac{u_{m\acute{a}x} \cdot T}{D}$	Al depender de la velocidad máxima, se relaciona con el modelo de onda.
	Alturas de ola. H_s , H_{max}	$H_{S 50 \text{ años}}$ H_{max} como función de H_s	Existen múltiples referencias a la norma relacionando $H_{S 1 \text{ año}}$ y $H_{S 5 \text{ años}}$ con $H_{S 50 \text{ años}}$
	Función de probabilidad	$H_{T_r} = F_{H_{m\acute{a}x 1 \text{ año}}}^{-1} \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)$	$H_{m\acute{a}x 1 \text{ año}} \rightarrow \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)$ \rightarrow Definición $H_{S_{12}}$
	Cuartiles	$H_{50 \text{ años}} = F^{-1}(0,98)$ $H_{100 \text{ años}} = F^{-1}(0,99)$	$H_{1 \text{ año}} = F^{-1}(1 \text{ año})$

<p>IEC 61400-1 IEC 61400-3 DNV-OS-J101, 2013 DNV-OS-J101, 2014</p>	<p>Evolución estructural</p>	<p>Aumento en diámetros y longitudes de los pilotes $D > 6$ m, $L_p > 80$ m. Crecimiento de la profundidad</p>	<p>Zonificación ondulatoria: $\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$ $\frac{\pi}{10} < kh < \pi$ Dominio ondulatorio: $\frac{D}{L}$ Monomios adimensionales: $\frac{H}{gT^2}; \frac{h}{gT^2}$</p>
	<p>Efecto celeridad</p>	<p>$c = \sqrt{gh}$ $c = \left(1 - \frac{H}{2h}\right) \sqrt{gh}$ Integrales elípticas</p>	<p>No linealidad en el cálculo</p>
	<p>Órdenes de la socavación</p>	<p>KC $A, B = f(U_{c,w})$ Corriente oleaje</p>	<p>Orden cero, uno y dos $u_{cw} = \frac{u_c}{u_c + u_m}$</p>
	<p>Esfuerzos sobre las estructuras</p>	<p>$F_M, F_D(u, a)$ Presiones</p>	<p>Relación con los dominios hidrodinámicos</p>
	<p>Combinaciones de cargas (I)</p>	<p>Variables principales y auxiliares</p>	<p>$\psi = \frac{H_5 \text{ años}}{H_{50 \text{ años}}}$ $Y_b =$ coeficiente de rotura Probabilidades condicionadas</p>
	<p>Combinaciones de cargas (II)</p>	<p>Acciones medioambientales: Viento, oleaje, corriente, hielo y nivel del mar.</p>	<p>Tabla 4-9 DNV-GL. Viento 50^a. Oleaje 50^a. Corriente 50^a. Nivel del mar 50^a.</p>

Tabla 1. Cuadro-resumen de los conceptos y criterios de diseño existentes en la normativa vigente. Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinadas las incertidumbres respecto de las acciones medioambientales y las combinaciones de cargas expuestas en la tabla anterior, se conseguía cumplimentar uno de los grandes objetivos de esta investigación, determinando las principales lagunas del estado del arte presentes en los documentos comúnmente empleados por las sociedades que trabajan en el campo de la eólica marina.

Otro de estos objetivos se centró en los posibles errores de dimensionamiento (o la no optimización en el dimensionamiento) ocurridos aun haciendo aplicación de la normativa. Para comprobar la bondad de las recomendaciones emitidas por dicha normativa, se consideraron aquellos errores de dimensionamiento que tuvieron como consecuencia la generación de daños o averías durante la operación de los parques dentro de la vida útil de 20 años inicialmente considerada (no se tuvieron en cuenta los fallos ocurridos tras la ampliación de la vida útil, “*life extension*”). Por ejemplo, podría mencionarse el caso de Robin Rigg, primer parque eólico de Escocia. En 2015, se dictó sentencia en favor de la empresa propietaria y explotadora del parque (E.On), pues los fallos ocurridos en el mismo, por valor de 26 millones de Euros, no eran imputables a la misma, sino a la aplicación directa de la normativa. Dichos fallos afectaban principalmente a las inyecciones aplicadas entre las piezas de transición y las monopilas. El contratista danés MT Højgaard, encargado de la construcción del parque, se verá obligado a asumir el coste de las reparaciones.



Fig. 14. Parque eólico de Robin Rigg, con la subestación eléctrica de E-ON en primer plano.
Fuente: 4C Offshore.

Dentro de esta temática, se estudiaron las averías ocurridas en la coronación y la plataforma del parque de Horns Rev (Mar del Norte). También se analizó el comportamiento de las instalaciones del parque N7, formado por estructuras monopilotadas sin protección frente a la socavación, o el parque de Arklow Bank, cuyos elementos de soporte presentan una berma o tapiz de pie que actúa como fusible para evitar que se forme el cuenco de socavación en la cimentación.

Las recomendaciones de diseño y la aplicación de la formulación existente se han presentado de forma esquemática en la Tabla 2. Esta formulación analítica, de marcado carácter teórico y generalista, en realidad tiene un gran valor, pues permite poder realizar un diseño preliminar aplicando métodos sencillos y rápidos, cuyos resultados guardan una correlación muy buena con los resultados arrojados por otros métodos más complejos y, a priori, más exactos, como podrían ser los modelos numéricos.

PROBLEMÁTICA	EJEMPLO	FORMULACIÓN	OBSERVACIONES
Run-up	Horns Rev Cota +10 m	<p>Hiroi: $\eta = 1,25 \cdot H_{m\acute{a}x}$ $(H_{m\acute{a}x} = H \frac{1}{250} = 1,80 \cdot H \frac{1}{3})$ </p> <p>Goda: $\eta = 0,75 \cdot (1 + \cos\theta) \cdot H_D$ $H_D = \min\left(H \frac{1}{250}, H_b\right)$ </p> <p>Sainflou: $\eta = H + h_0$ $h_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi H}{L}$ </p> <p>Suh et al: $R_u = H = H_{m\acute{a}x}$ </p>	<p>La cota de coronación estaba muy por debajo del rebase del oleaje tras el impacto del mismo sobre la estructura. Cotas obtenidas entre +9,45 m y +15,81 m.</p>
Scouring	N7 sin tapiz Arklow Bank con protección	<p>Shen et al: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 3,40 \left(\frac{u_c}{\sqrt{gD}}\right)^{0,66}$ </p> <p>Sumer & Fredsoe: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1,3$ </p> <p>$\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1,3(1 - e^{-0,03(KC-6)})$ </p>	<p>Variable con una media entre 1,50 y 7,00 m. La expresión de Breusers et al está fuera de escala.</p>

		<p>Melville & Sutherland: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 2,4$</p> <p>Qadar & Ansari: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 3,6 \cdot D^{-0,6}$ $(D > 2,2 \text{ m})$</p> <p>Qadar: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1,33 \cdot D^{-0,36}$</p> <p>Breusers et al: $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1 \sim 2,7$ $\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1,5D \cdot \tanh\left(\frac{h}{D}\right)$</p>	
Dimensiones de la socavación	Arklow Bank	$T_i = \frac{13D}{64C}$ $c = \frac{gT}{2\pi} th \frac{2\pi h}{L}$	Discutir sobre si merece la pena proteger contra la socavación o permitir que esta se produzca controladamente.
Vida residual y Life Extension	Parques que han cumplido 20 años ó más y siguen en servicio	$P_r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{n+n_r}$	<p>DNV GL-SE-0262. March 2016. Lifetime extension of wind turbine.</p> <p>DNV GL-SE-0263. March 2016. Certification of lifetime extension of wind turbine.</p>

Tabla 2. Recomendaciones de diseño para el run-up, la socavación y la extensión de la vida útil de los parques. Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar este epígrafe de Metodología, donde una vez descrito brevemente el estado del arte y habiendo planteado los objetivos (primero el de localizar y acotar las incertidumbres existentes, y seguidamente el de emitir recomendaciones de diseño mediante tablas explicativas), se han podido elaborar las propuestas realizadas a partir de formulaciones teóricas. Para ello, se han tomado los ensayos a macro escala de Deltares (antiguamente Delf Hydraulics)

anteriormente mencionados, efectuados para comprobar el funcionamiento de la plataforma Ring Pontoon de la empresa noruega Aibel (situada en aguas de transición en el Mar del Norte). Dichos ensayos fueron llevados a cabo empleando la semejanza Froude. Se han aplicado a la citada plataforma las distintas formulaciones existentes para el cálculo del run-up, y se han analizado los resultados arrojados por estos cálculos teóricos. Estos resultados pueden observarse en la Tabla 3.

TEORÍA DATOS	HIROI	GODA	SAINFLOU	SUH ET AL	ÁBACOS DE GODA	MODELO FÍSICO
h=25 m H_s=8,80 m T_p=11,5 s	15,84 m a 19,44 m	15,84 m a 19,44 m	22,43 m	15,84 m	17,60 m	Cota +20,50 m <20 m
h=43,80 m H_s=10,80 m T_p=12 s	19,80 m a 24,30 m	23,76 m a 29,16 m	26,22 m	19,44 m	21,60 m	Pequeño run-up >20 m

Tabla 3. Cota de ascenso de la vena líquida tras impactar el oleaje contra la estructura objeto de estudio, según distintas formulaciones teóricas. Fuente: Elaboración propia.

La calidad y la difusión de los resultados de los citados ensayos en modelo físico han facilitado el que se pueda emitir una recomendación de dimensionamiento de la cota de coronación de las plataformas de acceso en los parques eólicos offshore:

$$z_{top} = \left(MSWL + \alpha \cdot H_{\frac{1}{250}} \right)_{50 \text{ years}}$$

Además, se ha corroborado la propuesta de las normativas estudiadas, al comprobar que el valor que más se ajusta a la relación $H_{m\acute{a}x}/H_s$ es 2, siempre y cuando se considere un número de olas activas del temporal de cálculo superior a 5.000, lo cual resulta lógico sabiendo que el daño estructural se estabiliza una vez transcurridos entre 7.000 y 7.500 impactos. Este razonamiento es sencillo de seguir considerando la fórmula de Longuet-Higgins:

$$H_{m\acute{a}x,N} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\ln N} + \frac{0,2886}{\sqrt{\ln N}} \right)$$

Los resultados considerados por la normativa se pueden observar en la fig. 15:

No. of waves N	Ratio H_{\max}/H_s	
	mode $\sqrt{\frac{1}{2} \ln N}$	mean $\sqrt{\frac{1}{2} \ln N} + \frac{0.2886}{\sqrt{2 \ln N}}$
500	1.763	1.845
1000	1.858	1.936
1500	1.912	1.988
2000	1.949	2.023
2500	1.978	2.051
5000	2.064	2.134

Fig. 15. Ratio entre altura de ola máxima y altura de ola significativa para emplazamientos en aguas profundas. Fuente: Det Norske Veritas.

Además, como se ha comentado anteriormente, en los cálculos hay que contemplar inexorablemente la subida del nivel medio del mar. La tasa de ascenso ha alcanzado valores de 1 a 2 mm/año durante el siglo XX, incrementándose hasta los 3 mm/año en las dos últimas décadas, y es probable que, antes de alcanzar el año 2050, estas cifras aumenten hasta los 4 ó 5 mm/año. En España, este suceso es aún más grave, pues en los últimos años se han alcanzado ya tasas de 3 a 5 mm/año.

Para valorar las consecuencias de la subida del nivel del mar en la franja litoral, quizás lo más recurrente haya sido siempre emplear la Regla de Bruun (1962), que permite obtener el retroceso de la línea costera (concretamente, del perfil de equilibrio de la playa objeto de estudio):

$$\frac{R}{L} = \frac{S}{B + h}$$

Y que posteriormente fue modificada por Dean y Maurmeyer:

$$\frac{R}{L} = \frac{W}{P(B + h)} \cdot S + \frac{\delta Q_s}{B + h}$$

También pueden emplearse modernos modelos informáticos, si bien es cierto que todos ellos toman como punto de partida la regla de Bruun. Este es el caso del citado modelo E3C del IHC, por ejemplo.

Para valorar las consecuencias de la subida del nivel del mar en mayores profundidades, basta con incrementar el calado de la lámina de agua en el emplazamiento objeto de estudio. Este incremento de calado debe contemplarse a nivel zonal (como mínimo todo el Fetch), no sólo puntual, pues afecta también a la dirección y características de la propagación del oleaje. A día de hoy, este incremento de calado (es decir, el valor de la subida del nivel del mar), se basa en mediciones y extrapolación de datos pretéritos hacia el futuro, no habiendo modelos fiables de predicción más allá que distintas hipótesis y escenarios probables basados en criterios probabilísticos.

Con la presente Metodología, junto con los epígrafes anteriores de la Introducción y los Objetivos de la investigación, se cumplimenta la parte inicial de la presente Tesis Doctoral. El objetivo de estos tres epígrafes ha sido mostrar una idea inicial de la investigación llevada a cabo. A continuación, se procederá a exponer la Discusión del trabajo desarrollado, en la cual se justifican los resultados obtenidos y las características particulares y detalles de aplicación de los mismos.

1.6. Discusión

La energía mueve el mundo. La barrera de los 25.000 TWh de electricidad producida fue superada en 2018, lo cual es un factor indicativo de su elevada y creciente demanda. El uso de los combustibles fósiles se encuentra en clara decadencia y, dentro de la producción de energía eléctrica, el sector que más está creciendo y más va a crecer en las próximas décadas son las energías renovables. Dentro de las energías renovables marinas, la eólica offshore, que ya ha superado los 35.000 MW instalados, es actualmente una realidad consolidada.

Sin embargo, este crecimiento ha hecho preponderar los aspectos técnicos de carácter industrial y eléctrico frente a los comportamientos estructurales. Toma protagonismo la superestructura de los aerogeneradores su infraestructura y elementos de cimentación. Por esto, se dejan de lado ciertos aspectos de gran relevancia, como la interacción de dicha cimentación con el lecho marino, las acciones climáticas (oleaje, viento, mareas, corrientes o hielo) sobre las estructuras soporte, y la durabilidad de los elementos estructurales (mucho mayor que la de los elementos eléctricos pero, por otra parte, descuidada en gran medida). Y es que este enfoque eléctrico y de rendimiento puramente económico de los parques, ha dejado de lado numerosos aspectos de ingeniería civil. El considerar como objetivo prioritario la productividad y el beneficio económico (como no debería ser de otro modo) dejando de lados otros aspectos, ha ocasionado, paradójicamente, disminuciones considerables de dicho rendimiento de los parques, así como de su vida útil, y también costosas reparaciones para subsanar incertidumbres que no se

contemplaron durante el dimensionamiento de los mismos. Esto indica que, efectivamente, han de tenerse en cuenta los aspectos estructurales, climáticos y de ingeniería del terreno en todas las fases del diseño de los parques.

Esta triada económica de explotación, rentabilidad y durabilidad, es la que justifica la vida útil comúnmente considerada (20 años), el período de retorno de las acciones de cálculo (50 años), y las distintas combinaciones de cargas a tener en cuenta (para la variable principal, generalmente el oleaje incidente, un período de retorno de 50 años, como se ha comentado, mientras que para las variables secundarias, se suele considerar la décima parte del principal, esto es, 5 años (ver fig. 11)). Habría que considerar, como se ha comentado en epígrafes anteriores, qué ocurriría en el caso de aumentar la vida útil de las instalaciones (como se ha hecho con asiduidad), labor que queda para futuras investigaciones.

Esta combinación de vida útil y período de retorno no oculta la alarmante probabilidad de presentación de las tormentas de diseño durante el período de explotación de la instalación. Dicha probabilidad asciende a un 33%. Parece coherente proponer que las cimentaciones y los elementos soporte se diseñen en el futuro para resistir (y poder operar) con acciones climáticas superiores a las asociadas a 100 ó 200 años de período de recurrencia o, lo que es lo mismo, siguiendo la ROM 0.0, con un IRE (Índice de Repercusión Económica) r_2 ($n=25^a$), y una probabilidad de fallo derivada del ISA (Índice de Impacto Social y Ambiental) s_1 (0,20) ó s_2 (0,10). Con ello se obtendría un período de retorno de cálculo de, respectivamente, 112 y 237 años, como se ha comentado, muy superior al actualmente tenido en cuenta.

Esta gran discusión, que parece muy sencilla de abordar, no se presenta en otro tipo de estructuras con las que los Ingenieros de Caminos se ven más familiarizados, como pueden ser las presas, los puentes o los túneles, elementos todos ellos que se sobredimensionan generosamente. Este dimensionamiento tan estricto que se observa en las estructuras eólicas offshore se justifica, básicamente, por el carácter “joven” de la tecnología, la penetración de concesiones en el mercado a grandes empresas eléctricas y el vertiginoso crecimiento que han sufrido los aerogeneradores (que ha hecho pasar de máquinas de 220 kW de potencia unitaria a otras de más de 6 MW en pocos años, habiendo crecido los parques desde los 80 MW de potencia nominal del año 2007 a los 500 MW que se pueden encontrar en 2019).

En Europa, el Mar del Norte es el claro líder del sector, con un 71% de la cuota total. Le siguen el Mar de Irlanda, con un 16%, y el Báltico, con un 12%, dejando en un exiguo 1,2% al Atlántico Norte. Este hecho justifica con claridad la cuota que asumen las distintas tipologías de cimentaciones (ver fig. 13), dado que el terreno aplacerado, incoherente, de escasa capacidad

portante, sedimentario, casi obliga al uso de monopilotes, en lugar de estructuras que resisten por gravedad, o las grandes plataformas tipo jacket. Los pilotes encabezan la clasificación con un 81,7% del total de cimentaciones existentes. Y es que la eólica marina ya no se concibe como una extensión o una particularidad de la energía eólica en general, sino que tiene ya, después de varias décadas de implantación, su propio nicho en el mercado. Esto se debe a que en los últimos años la eólica offshore ha crecido aún más que la eólica onshore, como puede observarse en la fig. 16.

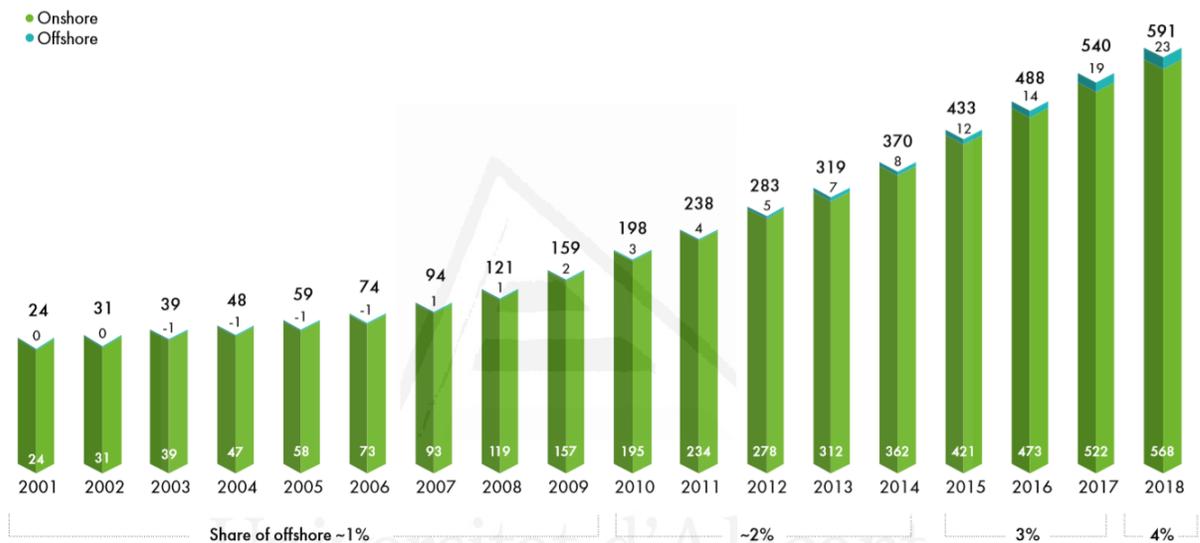


Fig. 16. Implantación de la eólica marina y la eólica terrestre en los últimos años. Número de instalaciones comerciales de gran tamaño. Fuente: Global Wind Energy Council.

Todo lo anterior define los dominios hidrodinámicos de referencia (Morison y difracción), tal como se comentó antes), así como las fuerzas de inercia (F_M) y las de arrastre (F_D). Por tanto, resulta prioritaria una buena elección del modelo de mecánica de ondas a considerar para los cálculos de las acciones climáticas (oleaje), que ulteriormente se convertirán en cargas estructurales. El constante crecimiento de los generadores en los últimos años en cuanto a profundidad (>50 m), diámetro (>5 m) y potencia (>8 MW) obliga a ejercer una reflexión sobre los efectos de superficie, presión o difracción en relación con los de masa y arrastre.

Sin entrar en la discusión de las acciones climáticas por el momento, el crecimiento en profundidad (“h” ó “d”) afecta, como se comentó, al modelo ondulatorio. Este hecho se puede

observar en las abscisas de las gráficas de Lé Méhauté (h/gT^2), Dean-Dalrymple (h/T^2) ó Horikawa (h/L_0). Así se ve alterada la sensibilidad en la linealidad o no linealidad de los efectos sobre la estructura (sobre todo, cuando el comportamiento hidrodinámico se encuentra en la frontera entre la teoría de Airy y las de Stokes de orden superior, como ocurre, por ejemplo en el parque de Egmond Aan Zee), principalmente el campo de velocidades y aceleraciones en los diferentes sumandos de la expresión de Morison.

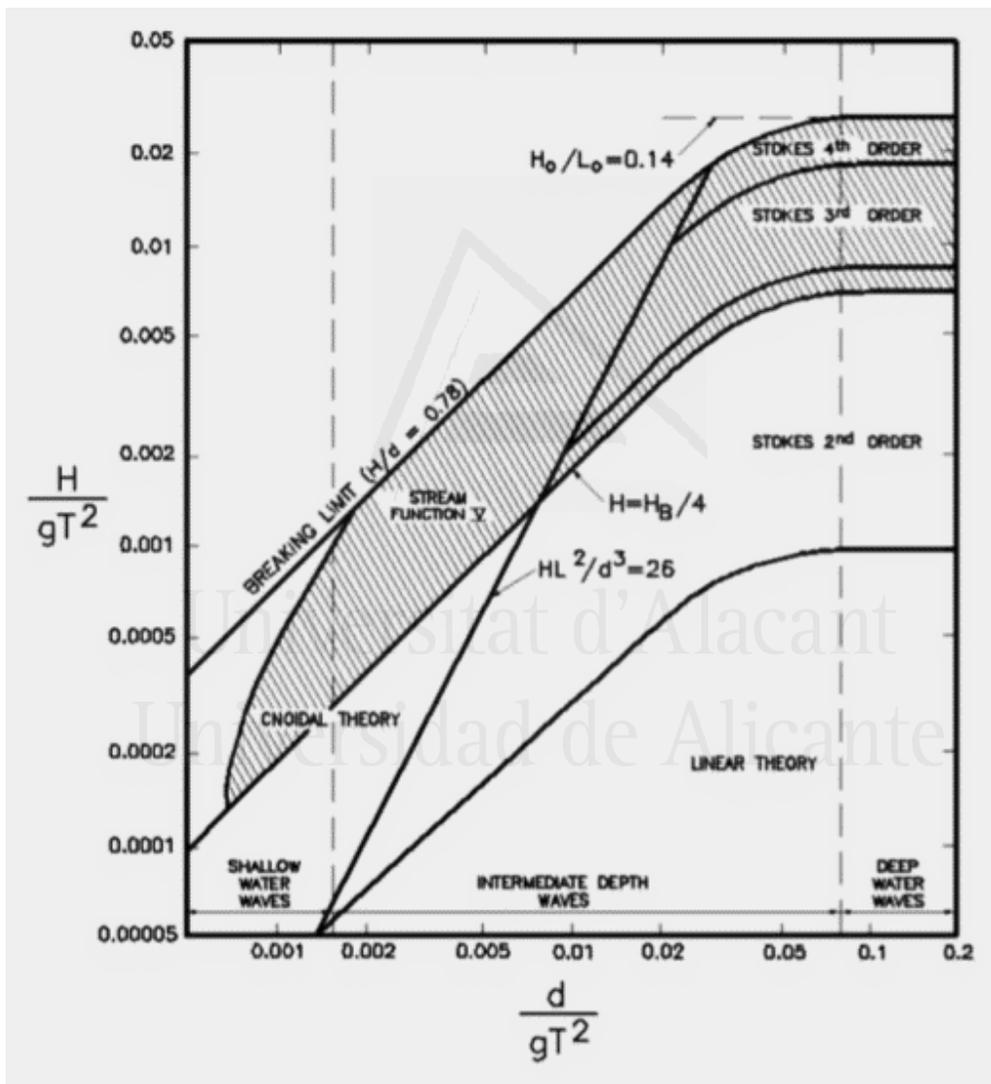


Fig. 17. Ábaco de Lé Méhauté. Fuente: Lé Méhauté, B.

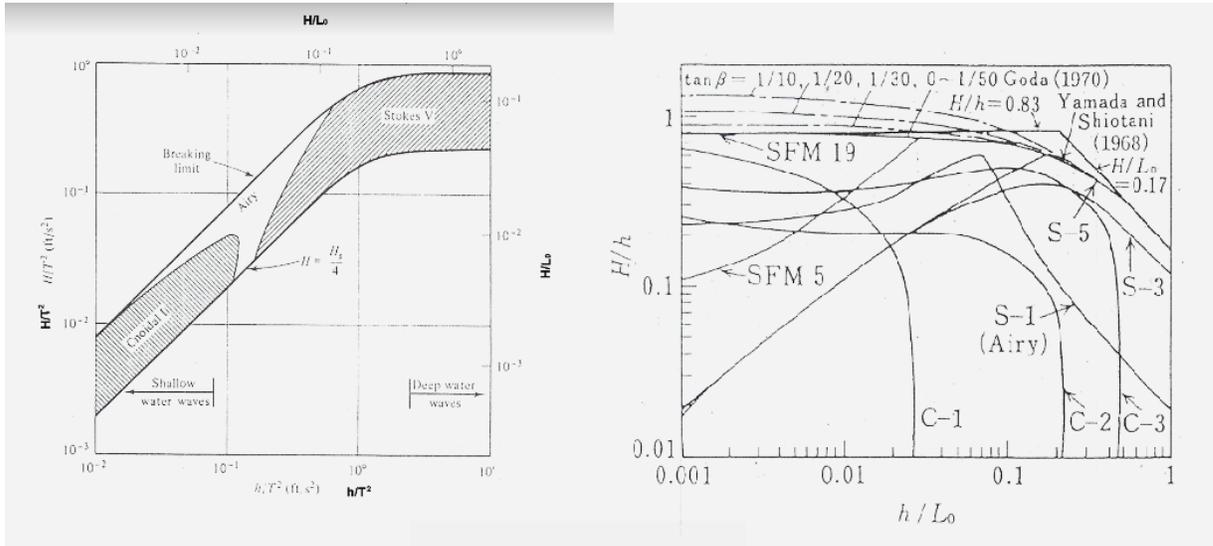


Fig. 18. Ábacos de Dean-Dalrymple (izquierda) y de Horikawa (derecha), de aplicación similar al Ábaco de Lé Méhauté. Fuente: Dean et al, y Horikawa, K.

Dado que la celeridad “c” y la aceleración “a” dependen de la altura de ola “H” y la profundidad “h”, y dado que, a su vez, la longitud de onda “L” es función de la segunda potencia del período, el siguiente paso de la discusión se centra en el paso de onda (concepto matemático) a ola (concepto físico y climatológico), con sus diferentes apellidos y matices.

El empleo de la altura de ola significativa es totalmente correcto, siendo el patrón del diseño y el concepto asumido por la comunidad científica internacional desde hace décadas. Tal vez, el período de retorno al que hay que asociar la altura de ola de diseño sí sea un concepto discutible (en la actualidad, en eólica offshore, se emplean principalmente H_{s50} años y H_{s1} año). La utilización del período de retorno de 50 años es cuestionable por la elevada probabilidad de fallo que lleva asociada durante la vida útil de la estructura ($P_f=33\%$, tal como se comentó antes) y, dado que no procede disminuir la vida útil del parque, no queda más remedio que aumentar el período de retorno de cálculo para disminuir la probabilidad de fallo. Por su parte, el período de retorno de 1 año no cobra sentido en teoría de estadística extremal, según la definición intrínseca:

$$F^{-1}(H_{s1 \text{ año}})\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)$$

Es decir, la altura de ola significativa asociada a períodos de retorno bajos (<5 años) debería ser analizada según teoría de régimen medio, no según el enfoque del régimen extremal. Este

concepto de período de retorno muy bajo es, sin embargo, profusamente considerado en la normativa internacional.

En lo que concierne a la relación $H_{m\acute{a}x}/H_s$, el estimar su valor en 2 se considera absolutamente acertado, y es que habitualmente toma valores entre 1,80 y 2,20. Además, para el número de olas activas a considerar en las tormentas que suelen desarrollarse en las ubicaciones de estos parques eólicos, la relación suele ajustarse al valor de 2.

El predominio de los aspectos eléctricos de durabilidad y mantenimiento de cables y subestaciones frente a la estabilidad de las estructuras soporte minimiza estos aspectos de la discusión en el ejercicio práctico del diseño de las estructuras soportes, pero desde el punto de vista de la ingeniería estructural y de cimentaciones, no deben pasarse por alto los conceptos comentados.

También hay que mencionar y deberían ser tenidos en cuenta otros matices, como la sensibilidad de la fatiga estructural frente al período ondulatorio, la socavación en sus diferentes órdenes, la licuefacción, etc. Todos ellos, son fenómenos derivados de efectos dinámicos cíclicos. Estos aspectos quedan bien reflejados en el número de Keulegan y Carpenter:

$$KC = \frac{u_{m\acute{a}x} \cdot T}{D}$$

Con

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{sh \frac{2\pi h}{L}} \text{ para } \frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$$

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{\pi H}{T} \text{ para } \frac{h}{L} > \frac{1}{2}$$

El número de Keulegan y Carpenter aglutina en su definición varios aspectos importantes, como son el período ondulatorio (T), la geometría de la cimentación (D) y el dominio hidrodinámico en el que se comporta la estructura soporte (D/L).

Además de lo anterior, merece la pena destacar la relación del período con el número de olas activas ($N=3600t/T_m$) y con ellos, la duración de las tormentas, lo cual hace reflexionar sobre la

concreción del período ondulatorio a utilizar. En las normativas, existe predisposición al empleo de T_p ó T_z , los cuales guardan la siguiente relación:

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{11 + \gamma}}$$

siendo,

$$\gamma = 5 \text{ para } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6$$

$$\gamma = e^{5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}} \text{ para } 3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5$$

$$\gamma = 1 \text{ para } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 5$$

No obstante, parece más recomendable acudir a períodos medios (T_m) o períodos de carácter espectral ($T_{0,2}$, o incluso el más aceptado en la actualidad por la comunidad internacional, $T_{-1,0}$):

$$\frac{T_p}{T_m} = 1,20 \sim 1,30; \quad T_s = 0,95 \cdot T_p$$

$$T_{0,2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \approx T_m$$

$$T_{-1,0} \approx T_E$$

Y es que,

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) \cdot d\omega$$

El período ondulatorio $T_{0,2}$ equivale al período medio (T_m), por lo que es indiferente en este caso resolver la mecánica de ondas desde un enfoque espectral o desde un enfoque estadístico. Como

se ha comentado, en el campo de la eólica offshore existe en los últimos años predilección por el período $T_{-1,0}$, denominado también período energético. Siguiendo con el enfoque espectral, también se emplean, aunque con menos frecuencia, los períodos $T_{0,1}$ y $T_{2,4}$.

Repasados y discutidos estos aspectos del diseño, los numerosos años de explotación y servicio han permitido ampliar la serie histórica de ciclos de estados del mar y, con ello, el clima en sus aspectos de H_s , T_p , N , así como determinar el comportamiento de las cimentaciones y las estructuras a lo largo de su vida útil.

Las averías y daños aparecidos tanto en coronación (véase Horns Rev) como en cimentación (por ejemplo, en Egmond Aan Zee) han acarreado demandas por parte de las empresas consultoras a las sociedades de clasificación. Este ha sido otro de los puntos de partida de la investigación, así como objetivo primordial de la misma y, por ende, de la presente discusión. Al detectarse fallos en las piezas de transición de las estructuras monopilotadas, se realizaron cálculos teóricos siguiendo distintos criterios de ingeniería marítima (Hiroi, Sainflou, Goda, Suh et al, así como los Ábacos de Goda), comprobando errores notables en la elección de las cotas de coronación de los distintos elementos de apoyo, proponiendo recomendaciones de diseño, como se mencionó anteriormente.

La discusión se centra fundamentalmente en la necesidad de resolver las cotas emergidas donde se disponen las plataformas para reducir la problemática del run-up, recomendando valores por encima de $1,25 \cdot H_{1/250}$ (para $T_r = 50$ años), con referencia al máximo nivel de la superficie libre durante el temporal.

Asimismo, tal como se comentó anteriormente, se debe considerar el efecto de la no linealidad en el cálculo del campo de velocidades en el lecho, afectando al número de Keulegan y Carpenter, y, por ello, a la socavación regulada por la expresión "KC-6", cuando los parques se sitúan en dominios de Stokes de órdenes superiores.

De la misma manera, la optimización económica de las instalaciones en todas sus fases (proyecto, servicio, explotación, mantenimiento y desmantelamiento), puede llegar a la conclusión de que resulte conveniente permitir que se produzca socavación en las cimentaciones si ésta es de poca entidad y se desarrolla de forma controlada, pudiendo ahorrarse así vertidos de material en volúmenes considerables y grandes distancias de transporte.

Todas estas reflexiones se han podido comprobar gracias a la existencia de ensayos en modelo reducido realizados en la macro instalación de Deltares (Delft Hydraulics, Holanda), con escala 1:60 y semejanza Froude. Se llevaron a cabo para ensayar el comportamiento de la plataforma cimentada por gravedad de Aibel, compañía noruega, que plantea la construcción del mencionado dispositivo en la franja oriental del Mar del Norte. El emplazamiento presenta condiciones de clima marítimo que superan los 8 metros de altura de ola significativa y los 11 segundos de período ondulatorio de pico en aguas de transición, todo ello asociado a un período de retorno de cálculo de 50 años.

Si bien los mares que bañan la Península Ibérica son muy distintos del mencionado, tanto a nivel energético como morfológico, los ensayos anteriores podrían servir de base de partida para estudiar los posibles emplazamientos españoles. De hecho, resulta conservador recomendar ratios de $H_{m\acute{a}x}/H_s=2$ (como se comentó con anterioridad). También resulta conservador el considerar que la estabilización de daños se produce con valores de N entre 5.000 y 7.000. Y, además, resulta muy útil el empleo de los modelos de Hiroi y Sainflou para situaciones de ola rota, o el de Goda con $H_{1/250}$ si se trata de su expresión analítica, ó H_s en el caso de sus Ábacos, para el cálculo del run-up debido a fenómenos de run-up.

Por supuesto, todas las acciones discutidas en este epígrafe se pueden ver claramente incrementadas por efecto de la subida del nivel medio del mar. Tal como se comentó en epígrafes anteriores, en zonas nearshore, este efecto se puede definir por el retroceso de la línea de costa y las posibles consecuencias que éste puede tener en aerogeneradores instalados en esta zona. Pero a mayores profundidades, es el incremento de calado el que juega un papel fundamental. Y es que una tasa de subida 3 a 5 mm/año, como se prevé que ocurra durante la primera mitad del siglo XXI, puede suponer un valor considerable teniendo en cuenta toda la vida útil de los parques.

Por ejemplo, si se considerase una tasa de 5 ó 6 mm/año (lo cual puede resultar conservador en 2019, pero quizás hasta quedar del lado de la inseguridad de aquí a pocas décadas), esto implicaría una subida del nivel del mar de alrededor de 0,50 m para finales de siglo con respecto al nivel actual. Este valor podría alcanzar valores incluso superiores en determinadas regiones marítimas.

Un dato aparentemente despreciable, como sería un incremento de 0,50 m de calado, puede modificar el comportamiento de la mecánica de ondas (altura, longitud de onda, período, dirección de propagación...). La altura de ola se vería aumentada en 0,39 m (más no, pues

quedaría afectada por efecto del fondo (según McCowan, $Y_b \approx 0,78$), por lo que el efecto del run-up se vería incrementado:

$$\text{Según Hiroi: } \Delta\eta = 1,25 \cdot \Delta H_{m\acute{a}x} = 1,25 \cdot 1,80 \cdot \Delta H_s = 1,25 \cdot 1,80 \cdot 0,39 = 0,88 \text{ m}$$

$$\text{Según Goda: } \Delta\eta = 0,75 \cdot (1 + \cos\theta) \cdot \Delta H_D = 0,75 \cdot (1 + 1) \cdot 1,80 \cdot \Delta H_s = 1,05 \text{ m}$$

Y, aplicando la recomendación de Luengo *et al*:

$$2,50 < \frac{\Delta R_u}{\Delta H_{S_i}} < 3,00$$

Se tiene que la cota de coronación de las plataformas debería verse incrementada entre 0,98 y 1,17 metros con respecto a la nueva superficie libre del mar. Si a estos valores, se les suma el incremento de calado de 0,50 metros, se tiene que las plataformas deberían elevarse entre 1,48 y 1,67 metros con respecto a la cota de coronación actual para mantener el mismo resguardo frente al oleaje incidente, valor que es enorme, teniendo en cuenta que se debe única y exclusivamente al cambio climático.

Podría darse el caso de que algunos parques en los que se haya dimensionado la cota anterior de forma poco conservadora (como ya ha ocurrido, y de hecho es la razón que ha motivado el revisar el cálculo de dicha cota en la investigación objeto de la presente Tesis Doctoral), puedan verse afectados por run-up y wave slamming al final de su vida útil, mientras que al principio de la misma no lo sufrían.

Además de los efectos en superficie, la subida del nivel del mar puede traer consecuencias en la interacción lecho-estructura, en particular en la socavación. Acudiendo a la fórmula simplificada de Sumer-Fredsoe:

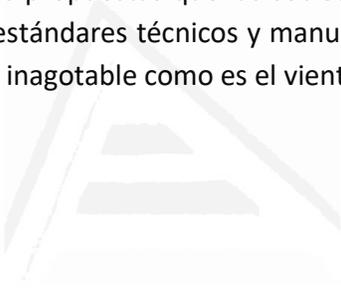
$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{D} = 1,3 \cdot (1 - e^{-0,03(KC-6)})$$

Como es sabido, el número de Keulegan-Carpenter es directamente proporcional a la velocidad. Teniendo en cuenta que la velocidad aumenta con el incremento de la lámina de agua y también con la altura de ola (a su vez, dicha altura de ola también aumenta con el incremento de la lámina de agua), el propio número de Keulegan-Carpenter se verá incrementado con la subida

del nivel del mar, por lo que la socavación máxima también aumentará. Para poder, no obstante, cuantificar dicho incremento de la socavación, deben tenerse datos exactos para poder aplicar las citadas formulaciones.

Estas dos consecuencias de la subida del nivel del mar, run-up en superficie y socavación en profundidad, deben ser tenidos en cuenta a la hora de calcular y diseñar los nuevos parques eólicos del futuro.

Por todo lo anterior, el gran número de parques que hay en estos momentos en operación, unido a la abundancia de datos de clima marítimo y casuística de tipologías estructurales y comportamientos hidrodinámicos, así como a los posibles daños, y los múltiples ensayos en modelo reducido, permiten que la comunidad tecnológica y científica tenga cada vez mayores posibilidades de validar todas las propuestas que las sociedades de clasificación incluyen en sus recomendaciones, normativas, estándares técnicos y manuales. Esto sin duda hará que cada vez se apueste más por esta energía inagotable como es el viento en el mar.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO 2. TRABAJOS PUBLICADOS. COMPENDIO DE ARTÍCULOS

Tal como se expone en la normativa de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante, para presentar una Tesis Doctoral por compendio de publicaciones, la segunda sección o capítulo de la misma debe contener los artículos bajo el título de “Trabajos publicados”. Por tanto, y en cumplimiento de la citada normativa, se presenta a continuación la versión íntegra aceptada y publicada de los artículos que recogen los resultados de la investigación llevada a cabo en la presente Tesis Doctoral.

La unidad temática de dichos artículos es la energía eólica marina. En ella, se contemplan distintos aspectos, como las acciones y efectos del clima marítimo sobre las estructuras soporte, las recomendaciones de diseño, o el contraste entre los modelos analíticos propuestos y los ensayos en modelo físico.

2.1. Primer artículo

En la Tabla 4 se recogen los principales datos del artículo:

TÍTULO	New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines
AUTORES	Jorge Luengo Frades, Vicente Negro Valdecantos, Javier García Barba, José Santos López Gutiérrez, y María Dolores Esteban Pérez
REVISTA	Renewable Energy
EDITORIAL	Elsevier
ISSN	0960-1481
DOI	10.1016/j.renene.2018.07.103
AÑO	2019

NÚMERO DE PÁGINAS	11 (667-677)
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q1 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	5,439
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	5,257

Tabla 4. *Características principales del primer artículo del compendio de publicaciones.*

Razón de ser del artículo: A raíz de las sucesivas modificaciones en las normativas y reglamentos del sector, además del vertiginoso desarrollo de parques tanto en el norte de Europa como en Estados Unidos y en países emergentes asiáticos, se ha hecho una profunda reflexión acerca de los criterios de diseño y las combinaciones de cargas que genera la hidrodinámica marina sobre las estructuras soporte de tipo monopilote.

Resumen: En 2014 se publicó un artículo innovador en la revista Renewable Energy, en el cual sus autores recogían los resultados obtenidos en una investigación en la que se detectaban incertidumbres en el diseño de estructuras soporte y cimentaciones en parques eólicos offshore. Dicha reflexión se basaba en la “limitada” experiencia del sector por aquél entonces, y en la revisión de las normativas y recomendaciones existentes en ese momento. Básicamente, se analizaron la relación entre la vida útil y la probabilidad de fallo, las teorías de onda a emplear, los dominios hidrodinámicos de Morison, Froude-Krylov y difracción, así como los fenómenos de socavación y la consiguiente protección de las cimentaciones.

Con la experiencia obtenida desde aquella publicación, en el presente artículo se plantean nuevas matizaciones, como la no linealidad en la mecánica ondulatoria, el efecto que conlleva dicha no linealidad en las velocidades en el lecho, la variación en el comportamiento del número de Keulegan y Carpenter, la repercusión que tiene la ecuación KC-6 sobre la socavación, el análisis estadístico aplicado a las acciones y las combinaciones de cargas, etc. Todo ello teniendo en cuenta que las estructuras actuales han superado ya los cincuenta metros de profundidad, dando el salto a la ingeniería offshore y dejando atrás las clásicas técnicas de ingeniería marítima.

Conclusión y reflexión: Los avances en la energía eólica marina, tanto en rendimiento, como en optimización de procesos constructivos, equipamientos y desarrollo, deben acometerse

reflexionando sobre ciertas incertidumbres que se suscitan en el campo de la mecánica de ondas y en la interacción lecho-estructura. Entre las nuevas reflexiones planteadas, destacan:

- El empleo de teorías de ondas donde dominan los efectos no lineales conlleva una variación notable del campo de velocidades en superficie, lo cual supone incrementos en las fuerzas de arrastre. Este efecto es notable en estructuras en las que se cumple que $H/D > 10$ ó $L/D > 0,50$.
- Por otra parte, la variación del campo de velocidades en función de la no linealidad de la teoría de ondas empleada es mínima en el lecho, influyendo como consecuencia en el cálculo de la socavación directa.
- Las variaciones de la socavación empleando teoría lineal u órdenes superiores de Stokes son irrelevantes para los casos analizados.
- Cabe reseñar, que al aumentar las fuerzas en superficie pueden darse fenómenos de oscilaciones y pandeo, que afectan indirectamente a la socavación (efectos de segundo orden).
- Con relación al oleaje, debería matizarse la duración de los temporales, considerando un valor entre 3 y 6 horas, lo cual afecta al número de olas activas durante la tormenta, debido a la sensibilidad al período ondulatorio (pues $N = 3600 \cdot t / T_m$).
- Se recomienda el empleo del concepto de régimen medio de oleaje (Gauss, Weibull triparamétrico) en vez de conceptos de altura de ola significativa asociada a períodos de retorno bajos (como, por ejemplo, $H_{s 1 \text{ año}}$, muy común en la normativa europea).
- Es discutible el valor de ψ como relación entre $H_{s 5 \text{ años}}$ y $H_{s 50 \text{ años}}$. Esta correlación no siempre se cumple, como ocurre por ejemplo en los mares que bañan la Península Ibérica.

Como consecuencia de todo esto, se estima que existen notables mejoras a realizar en el campo de las acciones sobre las estructuras monopilotadas de energía eólica marina. Solo el futuro, el desarrollo y los potenciales fallos permitirán obtener conclusiones reales.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ARTÍCULO 1 DE 3:

New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines.

REFERENCIA:

Luengo Frades, J., Negro Valdecantos, V., García Barba, J., López Gutiérrez, J.S., y Esteban Pérez, M.D. (2019). New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy*, número 131, pp 667-677.

RESUMEN:

En 2014 se publicó un artículo innovador en la revista *Renewable Energy*, en el cual sus autores recogían los resultados obtenidos en una investigación en la que se detectaban incertidumbres en el diseño de estructuras soporte y cimentaciones en parques eólicos offshore. Dicha reflexión se basaba en la “limitada” experiencia del sector por aquél entonces, y en la revisión de las normativas y recomendaciones existentes en ese momento. Básicamente, se analizaron la relación entre la vida útil y la probabilidad de fallo, las teorías de onda a emplear, los dominios hidrodinámicos de Morison, Froude-Krylov y difracción, así como los fenómenos de socavación y la consiguiente protección de las cimentaciones.

Con la experiencia obtenida desde aquella publicación, en el presente artículo se plantean nuevas matizaciones, como la no linealidad en la mecánica ondulatoria, el efecto que conlleva dicha no linealidad en las velocidades en el lecho, la variación en el comportamiento del número de Keulegan y Carpenter, la repercusión que tiene la ecuación KC-6 sobre la socavación, el análisis estadístico aplicado a las acciones y las combinaciones de cargas, etc. Todo ello teniendo en cuenta que las estructuras actuales han superado ya los cincuenta metros de profundidad, dando el salto a la ingeniería offshore y dejando atrás las clásicas técnicas de ingeniería marítima.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.103>

2.2. Segundo artículo

En la Tabla 5 se recogen los principales datos del artículo:

TÍTULO	Preliminary design for wave run-up in offshore wind farms: Comparison between theoretical models and physical model tests
AUTORES	Jorge Luengo Frades, Vicente Negro Valdecantos, Javier García Barba, Mario Martín Antón, José Santos López Gutiérrez, María Dolores Esteban Pérez, y Luis Juan Moreno Blasco
REVISTA	Energies
EDITORIAL	MDPI
ISSN	1996-1073
DOI	10.3390/en12030492
AÑO	2019
NÚMERO DE PÁGINAS	17
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q2 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	2,707
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	2,990

Tabla 5. Características principales del segundo artículo del compendio de publicaciones.

Razón de ser del artículo: Esta investigación tiene como objetivo comparar los resultados obtenidos mediante formulación teórica con aquéllos obtenidos mediante ensayos en modelo físico, para el cálculo del run-up. Para ello, se utilizaron los datos de los ensayos llevados a cabo en Deltares para la estructura de gravedad de Aibel.

Resumen: La empresa noruega Aibel, que opera en la industria petrolífera (Oil & Gas), así como en el desarrollo de tecnología para las energías renovables marinas, diseñó una plataforma de

conversión energética en alta mar que se ubicaría en aguas de transición (20 a 40 metros de profundidad). La tipología de la cimentación de la plataforma es de gravedad, con cuatro pilas unidas en la parte superior por un anillo estructural. La plataforma está sometida a grandes cargas dinámicas por efecto del oleaje. La evaluación de la acción de las olas, las sollicitaciones, las elevadas cotas que alcanza el run-up y las burbujas de aire confinado han requerido el uso de modelos físicos para su estudio detallado. El objetivo de la investigación presentada en este artículo es comparar las formulaciones teóricas de los autores con los resultados de las pruebas en modelo físico realizadas por Deltares. Los test se llevaron a cabo en un tanque de oleaje de 75 m de largo, 8,7 m de ancho y 1,0 m de profundidad, a escala 1:60, asumiendo la similitud de Froude. Se ha verificado la elevada cota que alcanza el run-up tras el impacto del oleaje contra la estructura. Además, las formulaciones teóricas arrojan una buena correlación con respecto a las pruebas del modelo.

Conclusión y reflexión: La energía eólica marina está experimentando un tremendo crecimiento en los últimos años, y se espera que continúe esta tendencia. No obstante, han aparecido diversos problemas en diferentes parques eólicos. Uno de ellos es la elevada cota que alcanza el run-up tras el impacto del oleaje contra los aerogeneradores, lo cual provoca daños en estructuras y cubiertas. Por lo tanto, es esencial lograr una correcta evolución de la tecnología, calculando, en este caso, el nivel de cota donde se dispone la plataforma, ya sea mediante expresiones analíticas o mediante el ensayo en modelo físico. Esta investigación propone una formulación teórica en contraste con las pruebas llevadas a cabo en Deltares (anteriormente Delft Hydraulics) sobre una estructura de gravedad en zonas de transición en el Mar del Norte. Las principales conclusiones del artículo son:

- Los valores de run-up tradicionalmente considerados son considerablemente inferiores a los que se alcanzan en los parques eólicos actuales. Esto es debido a que las formulaciones tradicionales fueron concebidas para otro tipo de estructuras (no tan esbeltas), y para otras condiciones de hidrodinámica marina. Por tanto, a la hora de obtener el run-up en este tipo de instalaciones, con frecuencia se infravalora éste y las cotas de coronación quedan del lado de la inseguridad.
- Las formulaciones empleadas en el artículo se han diferenciado en dos grupos: aquéllas aplicables a elementos cilíndricos de tipo monopilote, y aquéllas aplicables a elementos tipo GBS. No obstante, no existe una frontera nítida entre ambas tipologías estructurales, por lo que será el calculista el que deba elegir la formulación más adecuada en cada caso concreto.
- Existe una buena correlación entre las fórmulas teóricas y los resultados arrojados por los ensayos en modelo físico. No obstante, dada la simplicidad de dichas fórmulas, su

aplicación debe quedar restringida a fases de predimensionamiento y diseño preliminar de los parques.

- Se propone como conclusión de todas las formulaciones y casuísticas analizadas, el empleo de la siguiente expresión para estimar la cota sobre el nivel del mar a la que deben instalarse las plataformas para no verse afectadas por el run-up ni sufrir overtopping:

$$2,50 < \frac{R_u}{H_s} < 3,00$$

Cuando haya más parques eólicos marinos en operación con pruebas de modelos adicionales y publicidad y diseminación de fallos o daños, será posible validar aún mejor las expresiones obtenidas en esta investigación.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ARTÍCULO 2 DE 3:

Preliminary design for wave run-up in offshore wind farms: Comparison between theoretical models and physical model tests.

REFERENCIA:

Luengo Frades, J., Negro Valdecantos, V., García Barba, J., Martín Antón, M., López Gutiérrez, J.S., Esteban Pérez, M.D., y Moreno Blasco, L.J. (2019). Preliminary design for wave run-up in offshore wind farms: Comparison between theoretical models and physical model tests. *Energies*, número 492, pp 1-17.

RESUMEN:

La empresa noruega Aibel, que opera en la industria petrolífera (Oil & Gas), así como en el desarrollo de tecnología para las energías renovables marinas, diseñó una plataforma de conversión energética en alta mar que se ubicaría en aguas de transición (20 a 40 metros de profundidad). La tipología de la cimentación de la plataforma es de gravedad, con cuatro pilas unidas en la parte superior por un anillo estructural. La plataforma está sometida a grandes cargas dinámicas por efecto del oleaje. La evaluación de la acción de las olas, las sollicitaciones, las elevadas cotas que alcanza el run-up y las burbujas de aire confinado han requerido el uso de modelos físicos para su estudio detallado. El objetivo de la investigación presentada en este artículo es comparar las formulaciones teóricas de los autores con los resultados de las pruebas en modelo físico realizadas por Deltares. Los test se llevaron a cabo en un tanque de oleaje de 75 m de largo, 8,7 m de ancho y 1,0 m de profundidad, a escala 1:60, asumiendo la similitud de Froude. Se ha verificado la elevada cota que alcanza el run-up tras el impacto del oleaje contra la estructura. Además, las formulaciones teóricas arrojan una buena correlación con respecto a las pruebas del modelo.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/en12030492>

2.3. Tercer artículo

En la Tabla 6 se recogen los principales datos del artículo:

TÍTULO	Action Strategy for Studying Marine and Coastal Works with Climate Change on the Horizon
AUTORES	Vicente Negro Valdecantos, José Santos López Gutiérrez, María Dolores Esteban Pérez, José María del Campo Yagüe, y Jorge Luengo Frades
REVISTA	Journal of Coastal Research
EDITORIAL	Coastal Education and Research Foundation, CERF
ISSN	0749-0208
DOI	10.2112/SI85-102.1
AÑO	2018
NÚMERO DE PÁGINAS	5
INDICIOS DE CALIDAD	Cuartil Q4 según JCR
FACTOR DE IMPACTO	1,053
FACTOR DE IMPACTO EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS	1,353

Tabla 6. Características principales del tercer artículo del compendio de publicaciones.

Razón de ser del artículo: La subida del nivel del mar es una cuestión de gran envergadura. Cada vez resulta más preocupante, pues de ella se deriva como efecto directo la regresión de la línea de costa (reduciéndose o perdiéndose así su potencial turístico, ecológico y de defensa del territorio), y como efectos indirectos la alarma social, la pérdida de productividad, etc. En el artículo se analizan las causas que han llevado a la situación actual, se establece una prognosis con distintos escenarios de futuro, y se plantean estrategias para mitigar o revertir la tendencia actual, dentro de las estrategias de sostenibilidad de la Agenda 2030, así como de los Objetivos

de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 13 (“Acción por el clima”), y el ODS 14 (“Vida submarina”).

Resumen: Los efectos del Cambio Climático se pueden analizar desde múltiples puntos de vista. En lo que concierne al ámbito portuario y la ingeniería costera, el efecto más nocivo es la subida del nivel del mar que se ha observado en todo el planeta desde comienzos del siglo XX, alcanzando valores de 1 a 2 milímetros anuales. En los últimos años, el ritmo de subida se ha acelerado considerablemente, alcanzado los 3 milímetros anuales en el período entre 1993 y 2003. En España, esta subida se estima de 3 a 5 milímetros al año, aunque este valor no es uniforme a lo largo de toda la franja costera. Las predicciones para la primera mitad del siglo XXI estiman una subida de más de 3 centímetros en el Cantábrico, entre 15 y 20 centímetros en el Mar Mediterráneo, y hasta 10 en el Golfo de Cádiz. Esto significa que las playas retrocederán entre 10 y 15 metros en el Cantábrico, entre 8 y 10 metros en el Mediterráneo, y alrededor de 8 metros en el Golfo de Cádiz. Estos movimientos pueden afectar a las estructuras y a las propiedades privadas emplazadas en la costa, así como crear alarma social entre los habitantes de esas zonas, en especial durante la aparición de eventos climatológicos de régimen extremal. El artículo reflexiona sobre todos estos fenómenos y propone una estrategia de actuación para alcanzar una zona costera resiliente, para así hacer que pueda resistir cualquier evento extremal que eventualmente ocurriese.

Conclusión y reflexión: Las consecuencias económicas de la desaparición o afección de las playas, los paseos marítimos y propiedades privadas en la franja costera debido a los efectos de la subida del mar y la erosión costera alcanzan un valor incuantificable en España. Y es que nuestro país tiene más de 8.000 kilómetros de costa, con un total de 2.000 kilómetros de playas. El Sol, el mar y las playas son motores para la economía nacional. Más de 80 millones de turistas visitan nuestro país cada año, y el 75% de ellos elige las playas como destino vacacional. Por este motivo, se ha empleado la Regla de Bruun y se han considerado las distintas tipologías de obras marítimas que existen en la franja costera (basándose en la profundidad a la que están cimentadas), para así hacer un análisis de la situación actual y una predicción de futuro.

Las obras marítimas en profundidades reducidas son altamente sensibles a la subida del nivel del mar y al impacto social (principalmente por su impacto visual). Esta investigación tiene en cuenta estos fenómenos y propone una estrategia de actuación para alcanzar la ansiada franja costera resiliente. Para ello, se aboga por la restauración costera y por la reubicación de elementos existentes en la misma.

Se ha propuesto una estrategia costera para España que, siguiendo los criterios de la Agenda 2030, permita luchar contra el cambio climático y los efectos de éste en la franja litoral. Cuenta con 3 etapas. La primera consiste en la revisión y evaluación de la dinámica marina, el clima marítimo y los niveles del mar, así como las tendencias que presentan dichos datos. La segunda analiza los efectos en la costa a partir de la zonificación morfológica de la misma, y aplicando un análisis teórico de la subida del nivel medio del mar con el año 2100 como horizonte. Finalmente, en la tercera etapa se proponen algunos indicadores e índices objetivos que permitan establecer políticas de acción, corrección y mitigación de los escenarios adversos detectados en la segunda etapa. En la franja costera española, desde la aprobación de la Ley 2/2013, las políticas llevadas a cabo tienen como objetivo la aplicación de estrategias contra la regresión costera. Están enfocadas a fines como la adaptación, la protección, la concienciación social, así como la reducción de las incertidumbres existentes, entre otros.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ARTÍCULO 3 DE 3:

Action strategy for studying marine and coastal works with climate change on the horizon.

REFERENCIA:

Negro Valdecantos, V., López Gutiérrez, J.S., Esteban Pérez, M.D., y Luengo Frades, J., (2018). Action strategy for studying marine and coastal works with climate change on the horizon. *Journal of Coastal Research*, número 85, pp 506-510.

RESUMEN:

Los efectos del Cambio Climático se pueden analizar desde múltiples puntos de vista. En lo que concierne al ámbito portuario y la ingeniería costera, el efecto más nocivo es la subida del nivel del mar que se ha observado en todo el planeta desde comienzos del siglo XX, alcanzando valores de 1 a 2 milímetros anuales. En los últimos años, el ritmo de subida se ha acelerado considerablemente, alcanzado los 3 milímetros anuales en el período entre 1993 y 2003. En España, esta subida se estima de 3 a 5 milímetros al año, aunque este valor no es uniforme a lo largo de toda la franja costera. Las predicciones para la primera mitad del siglo XXI estiman una subida de más de 3 centímetros en el Cantábrico, entre 15 y 20 centímetros en el Mar Mediterráneo, y hasta 10 en el Golfo de Cádiz. Esto significa que las playas retrocederán entre 10 y 15 metros en el Cantábrico, entre 8 y 10 metros en el Mediterráneo, y alrededor de 8 metros en el Golfo de Cádiz. Estos movimientos pueden afectar a las estructuras y a las propiedades privadas emplazadas en la costa, así como crear alarma social entre los habitantes de esas zonas, en especial durante la aparición de eventos climatológicos de régimen extremal. El artículo reflexiona sobre todos estos fenómenos y propone una estrategia de actuación para alcanzar una zona costera resiliente, para así hacer que pueda resistir cualquier evento extremal que eventualmente ocurriese.

DOI:

<https://doi.org/10.2112/SI85-102.1>

CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este tercer Capítulo, siguiendo la normativa de la EDUA, el documento de la Tesis Doctoral presentada por compendio de publicaciones deberá incluir una última sección, que contenga las conclusiones de la misma.

Por tanto, se exponen aquí las conclusiones de la investigación que ha dado lugar al presente documento, así como las nuevas líneas de investigación que se proponen para llevar a cabo en el futuro, y seguir así con la labor científica en este campo de la ingeniería.

3.1. Conclusiones

Tras varios años llevando a cabo la investigación que ha desembocado en la presente tesis, y tras haber discutido los resultados obtenidos, se ha generado una gran cantidad de conclusiones. Algunas de ellas son meros corolarios del estado del conocimiento. No obstante, la mayor parte resultan ser consideraciones innovadoras, y que pueden contribuir a mejorar el conocimiento de la ingeniería eólica offshore.

A continuación se exponen brevemente las principales conclusiones que se han podido extraer en estos años:

- En primer lugar, y como se ha venido reflejando a lo largo del texto, si se siguen estrictamente los criterios propuestos por la normativa vigente en cuanto a vida útil (20 años) y período de retorno del temporal de cálculo (50 años), la probabilidad de presentación del temporal de diseño durante la vida útil de la instalación es de un 33%, valor que resulta demasiado elevado:

$$T_r = \frac{-n}{\ln(1 - P_f)} \rightarrow P_r = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n\right) = 33\%$$

Esta probabilidad aumenta aún más cuando se sobrepasa la vida útil de los parques (“life extension”). Por ejemplo, para una vida útil de 25 años, la probabilidad de presentación

del temporal de diseño sería de un 40%, y para una de 30 años, sería de un 45%. Por tanto, se trata o bien de establecer una obsolescencia programada de los parques (esto es, reducir la vida útil de los mismos), o bien habrá que considerar períodos de retorno de cálculo mucho más elevados (de 100 a 200 años).

Por ejemplo, manteniendo la vida útil en 20 años, y considerando un período de retorno de 100 o de 200 años, la probabilidad de excedencia se reduce, respectivamente, a un 18% y a un 9%, valores mucho más conservadores que el 33% inicial.

Además de lo anterior, una vez aceptada la extensión de la vida útil de los parques, se aconseja volver a efectuar el cálculo de acciones y cargas sobre los elementos estructurales en base al conocimiento exhaustivo de un hiperciclo de estados del mar y de acuerdo a los largos registros de acciones climáticas (principalmente oleaje) que existen actualmente en los emplazamientos, y que no estaban disponibles hace tan sólo una década.

- Siguiendo con el enfoque probabilístico, también cabe destacar que se recomienda una probabilidad de fallo para las cimentaciones en eólica marina del 10% (lo cual se corresponde con un tratamiento de las mismas como estructura rígida según la normativa ROM de Puertos del Estado), en lugar del 20% que generalmente se aplica (lo cual correspondería a su tratamiento como estructura flexible). Se ha detectado que en ocasiones se han diseñado según criterios en talud (sobre todo en tipologías GBS), lo cual puede quedar del lado de la inseguridad (a nivel de acciones de diseño, sin perjuicio de que en el cálculo estructural ulterior se hayan aplicado rigurosos coeficientes de seguridad).
- Merece la pena destacar que la mayoría de los parques existentes se encuentran ubicados en emplazamientos que verifican la recomendación del Ábaco de Lé Méhauté (basado en los monomios no lineales de " H/gT^2 " y " h/gT^2 ") de que sean calculados siguiendo la teoría lineal de Airy, o bien teorías de Stokes de órdenes superiores. Acudir a este Ábaco (o a sus homólogos de Horikawa o Dean-Dalrymple) resulta de gran sencillez, y da una aproximación exacta de cuál es el modelo de mecánica de ondas óptimo para caracterizar el comportamiento de la hidrodinámica marina.
- En la presente investigación, se han observado diferencias en la velocidad orbital del oleaje empleando teoría de Stokes de tercer orden frente a teoría lineal de Airy. Estas diferencias han sido de sólo el 4% en el lecho, mientras que en superficie se alcanzaron

diferencias del 16% (con Stokes de tercer orden en ambos casos del lado de la seguridad). A la hora de considerar las cargas actuantes contra los elementos soporte estas diferencias pueden ser significativas. No obstante, a la hora de calcular la socavación, estas diferencias desaparecen, pues en la investigación se obtuvieron resultados idénticos en la profundidad del cuenco de socavación (188 milímetros en ambos casos).

- Destacar también que la marcada tendencia actual al crecimiento de los pilotes en diámetro y longitud lleva a aconsejar la utilización del dominio hidrodinámico de difracción ($D/L > 0,20$), en lugar del clásico dominio de Morison, asociado a pilotes de pequeño diámetro ($D/L < 0,05$), el cual era más frecuente hace unos años.
- La normativa en vigor propone distintos criterios a la hora de calcular la altura de ola de diseño. El primero de ellos, consiste en utilizar una altura de ola de diseño H_D definida por:

$$H_D = \psi \cdot H_{S_{1 \text{ año}}}$$

siendo

$$\psi = \frac{H_{S_{5 \text{ años}}}}{H_{S_{50 \text{ años}}}}$$

La normativa asegura que este criterio queda siempre del lado de la seguridad, pues el coeficiente ψ siempre es mayor que el coeficiente de rotura del oleaje por efecto fondo (Υ_b). Esto no siempre es así, lo que crea una incertidumbre que podría acarrear defectos en el diseño. Por ejemplo, considerando Gijón como emplazamiento y aplicando el método del POT con los datos obtenidos de Puertos del Estado, se obtiene que:

$$\psi = \frac{H_{S_{5 \text{ años}}}}{H_{S_{50 \text{ años}}}} = \frac{10,67}{13,89} = 0,76$$

Valor inferior al coeficiente de rotura, que toma valores en el rango de 0,78 a 0,81.

- Otro de los criterios propuestos por la normativa consiste en estimar la altura de ola significativa asociada a 100 años de período de retorno a partir de aquella asociada a 50 años:

$$\frac{H_{S_{100 \text{ años}}}}{H_{S_{50 \text{ años}}}} = 1,04 \sim 1,05$$

Valor que debería quedar, como afirma la DNV, del lado de la seguridad. Una vez más, esto no es así, pues tomando de nuevo el emplazamiento de Gijón, la relación anterior asciende a un valor de 1,06, mientras que en Alicante asciende a 1,07. En ambos casos, por tanto, el criterio de la normativa queda del lado de la inseguridad.

- Cada vez se emplean temporales de mayor duración para realizar el dimensionamiento y el cálculo resistente de los elementos soporte. Cuando la eólica offshore echó a andar, se comenzó considerando temporales de 3.000 olas activas, mientras que en la actualidad lo habitual es considerar temporales de unas 5.000 olas activas, con una tendencia a aumentar dicha cifra. Este aspecto permite al diseño quedar del lado de la seguridad, pues si se acude a la expresión de Longuet-Higgins:

$$H_{m\acute{a}x,N} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\ln N} + \frac{0,2886}{\sqrt{\ln N}} \right)$$

Se obtiene que la relación entre $H_{m\acute{a}x}$ y H_s alcanza el valor de 2 aconsejado por los estándares internacionales. Además, dado que el daño estructural se estabiliza para unos 7.000 impactos sobre la estructura, la relación entre $H_{m\acute{a}x}$ y H_s cumple el valor de 2 justificado anteriormente, el cual queda, además, del lado de la seguridad.

- En lo que se refiere al período ondulatorio a considerar, se recomienda acudir a conceptos espectrales, como podrían ser $T_{0,2}$ (o, mejor aún, $T_{-1,0}$), en lugar de los clásicos valores de T_z o T_p . También podría considerarse el período ondulatorio medio (T_m).
- Los modelos teóricos tradicionalmente empleados para calcular la cota del run-up infravaloran este fenómeno en las estructuras offshore. Esto es debido a que inicialmente fueron concebidos para ser empleados en otras tipologías estructurales y en otro tipo de emplazamientos, en los cuales la hidrodinámica marina tiene un comportamiento diferente.
- Los resultados arrojados por los modelos teóricos de cálculo del run-up utilizados en la investigación fruto de esta Tesis Doctoral guardan una buena correlación con aquellos resultados arrojados por los ensayos en modelo físico tomados como referencia. Por tanto, puede procederse a su aplicación en casos de parques eólicos offshore reales. No obstante, debido a su simplicidad, su uso se debe reducir exclusivamente al predimensionamiento y cálculo preliminar de los parques. En fases posteriores del diseño se deben implementar modelos más fiables.

- Para el cálculo del citado run-up, en esta investigación se ha diferenciado entre estructuras cilíndricas esbeltas tipo monopilote y estructuras tipo GBS. Para cada una de ellas, la formulación teórica óptima a aplicar es distinta. No obstante, la frontera entre ambas tipologías estructurales no es clara, por lo que debe ser el Ingeniero calculista el que decida cuál expresión utilizar. Como resumen, podría afirmarse que los modelos que mejor se ajustan para oleaje no limitado por efecto del fondo son los de Hiroi y Sainflou (con $H_{m\acute{a}x}$) ó los Ábacos de Goda (con H_s), mientras que cuando el oleaje sí está limitado por efecto del fondo, se ajustan bien los modelos de Hiroi y Sainflou (con H_B).
- Como conclusión de todas las formulaciones y casuísticas analizadas, se propone el empleo de la siguiente expresión para estimar la cota sobre el nivel del mar a la que deben instalarse las plataformas para no verse afectadas por el run-up ni sufrir overtopping:

$$2,50 < \frac{R_u}{H_s} < 3,00$$

- Deben considerarse los efectos del cambio climático a la hora de realizar los cálculos, tanto en profundidad (socavación), como en superficie (run-up y overtopping). La principal consecuencia de dicho cambio climático sobre los parques eólicos offshore es la subida del nivel del mar. Esta subida se produjo a un ritmo de 1 a 2 mm/año durante el siglo XX, ritmo que se ha visto acelerado hasta los 3 ó 5 mm/año en la primera mitad del siglo XXI. Esto implica retroceso de la línea costera (y afección a los parques emplazados nearshore), y aumento del calado (modificando la hidrodinámica marina en los parques emplazados en profundidades offshore).
- Con un escenario de subida del nivel medio del mar de 0,50 m, la altura de ola podría verse incrementada hasta 0,39 m, lo que supone un incremento del run-up de 0,88 a 1,05 metros. Aplicando la recomendación de Luengo *et al*, la cota de coronación de las plataformas de los parques debería elevarse entre 0,98 y 1,17 metros sobre el nuevo nivel medio del mar, lo cual supone un incremento absoluto de la cota de entre 1,48 y 1,67 metros sobre el nivel actual. Todo ello debido únicamente al efecto del cambio climático. Es posible que algunos parques cuyas cotas emergidas quedaban del lado de la seguridad durante los primeros años de su vida útil, queden del lado de la inseguridad al final de la misma.
- Dado que la velocidad ondulatoria aumenta con el calado y con la altura de ola (que, a su vez, también aumenta con el calado), con la subida del nivel del mar se incrementará dicha velocidad. Por tanto, el número de Keulegan-Carpenter, que es directamente proporcional a la velocidad, aumentará con la subida del nivel del mar, y al ser el parámetro que gobierna el

comportamiento de la socavación (según la expresión de Sumer-Fredsoe), la socavación máxima se verá incrementada con la subida del nivel del mar. Igual que en el caso anterior, podría darse la situación de que un parque que quede del lado de la seguridad durante los primeros años de su vida útil, deje de estarlo al final de la misma.

3.2. Futuras líneas de investigación

Tras estos tres largos años de lecturas, profundización en el estado del arte en la materia, viajes Alicante-Madrid, búsqueda de datos, reflexión y compleja escritura de artículos científicos, la presente Tesis Doctoral marca el inicio de nuevos retos que parten de alguna de las ideas, recomendaciones y matizaciones que se plantearon como objetivo y que han culminado después de un notable esfuerzo de todas las personas que desinteresadamente se han involucrado en este proyecto desde 2016. A continuación, se indican algunas de las posibles líneas de investigación a desarrollar en los próximos años:

- Aunque es un tema tratado con profusión en la presente Tesis Doctoral, la problemática de la socavación en los parques eólicos offshore requiere muchos más años de investigación. Se debe seguir discutiendo sobre si merece la pena proteger las cimentaciones contra la socavación, o si bien resulta más rentable permitir que se produzca socavación en las mismas durante la vida útil de los parques, y así ahorrar en los costes que supone la instalación de dichos elementos antisocavación (costes derivados de la explotación de canteras, empleo de enormes gánguiles, coste medioambiental...). Además, en caso de no instalar elementos antisocavación, se facilitarían enormemente fases posteriores de la instalación, como el desmantelamiento de la misma.
- Realizar ensayos en modelo físico resolviendo exitosamente la escala geométrica del terreno de cimentación (generalmente, arenas medias). Esto es vital, pues al desarrollar ensayos con una escala grande (1:10 a 1:20), se puede analizar bien la interacción lecho-estructura y el comportamiento mecánico de los materiales de la cimentación (en cuanto a socavación, licuefacción, debilitamiento durante la hincada...), pero es difícil implementar estados de mar extremos, por la dificultad de generar solicitaciones de oleajes tan energéticos (y precisamente, los elementos soporte y, sobre todo, su parte emergida, interesa analizarlos desde el enfoque extremal). Por el contrario, si los ensayos se desarrollan con una escala pequeña (1:100 a 1:200), resultaría fácil implementar los estados de mar extremos, pero el problema llegaría a la hora de analizar el comportamiento de la cimentación, puesto que para tal escala las arenas dejarían de comportarse según las fuerzas de gravedad, y lo harían según las viscosas, y además se

produciría la suspensión de las mismas en el fluido. Esto se puede solucionar empleándose instalaciones de macro escala (véase Deltares), lo cual no siempre es posible, o bien modelizando las arenas del lecho marino mediante derivados del carbón o materiales poliméricos.

- También resulta vital llevar a cabo una monitorización de las instalaciones existentes, y una posterior divulgación de los resultados por parte de las empresas privadas que explotan los parques. Estos datos podrían ser recogidos en forma de base de datos de acceso general. Todo ello referido a todas las fases de la instalación, desde el proyecto hasta la explotación. Esto mejoraría el conocimiento “real” de la interacción lecho-estructura, del fenómeno del run-up y overtopping en la coronación, y de las acciones ambientales actuantes sobre los elementos soporte. Este objetivo puede parecer muy optimista, teniendo en cuenta que las distintas compañías son muy celosas de su privacidad por motivos industriales y económicos. De hecho, a la hora de desarrollar esta investigación, se han obtenido (no con poco esfuerzo), datos similares procedentes de empresas diferentes, que no los han compartido entre sí por el recelo de la competitividad. Con una regulación normativa sólida en lo que a propiedad intelectual e industrial y a patentes se refiere, no debería haber problemas en compartir información por parte de las distintas compañías, y la tecnología se desarrollaría exponencialmente, aún más de lo que ya lo está haciendo.
- Otra de las líneas futuras consistiría en llevar un seguimiento pormenorizado de la vida residual añadida a los parques actualmente en explotación (lo que se conoce por “life extension”, o ampliación de la vida útil). Sería interesante analizar los efectos de llevar la explotación de los parques más allá de lo que inicialmente estaba previsto, determinar qué partes de estos estaban sobredimensionadas y cuáles no, etc.
- También se propone desarrollar extensas y rutinarias campañas de campo para comprobar la aplicabilidad real de las recomendaciones de diseño propuestas, el ajuste de éstas a la realidad, y posibles aspectos a mejorar en las mismas. Por ejemplo, acotar con mediciones reales las dimensiones los cuencos de socavación que se producen en las cimentaciones, el efecto sombra que producen unos elementos sobre otros, las cotas que alcanza la vena líquida tras el run-up, etc.
- Así mismo, se propone llevar a cabo ensayos a escala propios, para así poder analizar en primera persona las propiedades geotécnicas de los distintos terrenos de cimentación, las condiciones de los prototipos, el agua del mar, la temperatura, viscosidad, etc. Esto resulta altamente factible, teniendo en cuenta la codirección de la presente Tesis

Doctoral, pudiendo llevarse a cabo ensayos geotécnicos en el Laboratorio de la Escuela Politécnica Superior (Universidad de Alicante) y ensayos marítimos en el Laboratorio de Puertos (Escuela de Caminos de Madrid).

- Hacer la comprobación numérica de los efectos de orden cero, uno y dos de la socavación en elementos soporte tipo pilote. En esta investigación sólo se han vislumbrado dichos efectos, los cuales sería interesante poder cuantificarlos y analizarlos en profundidad.
- También se propone implementar modelos numéricos para obtener la subida del nivel del mar, no sólo en las zonas costeras (como ya existen), sino en profundidades de transición e indefinidas. Así se podría valorar con mayor exactitud las consecuencias que conlleva la subida del nivel del mar en los parques eólicos offshore.
- Una vez conocida la subida del nivel del mar en profundidades offshore, una línea de investigación interesante sería calcular de forma exacta, e incluso monitorizar en parques existentes, el incremento de los efectos climáticos y cargas sobre las estructuras eólicas, tanto en superficie (run-up) como en profundidad (socavación).

Ojalá en unos años estas propuestas que aquí se recogen como “futuras líneas de investigación” se hayan convertido en estado del arte de la eólica marina, lo cual no habrá hecho más que confirmar todas las ventajas que en esta Tesis Doctoral se plantean sobre esta forma de producción de energía eléctrica. Ojalá también que la presente Tesis Doctoral haya contribuido con su granito de arena a mejorar la eólica offshore, uniéndose así a la firme apuesta por su futuro.

Universidad de Alicante

CAPÍTULO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En este Capítulo se recogen las principales referencias bibliográficas que se han utilizado para llevar a cabo la investigación objeto de esta Tesis Doctoral. A continuación se incluye la relación completa de las mismas:

1. 4C Offshore. Disponible online: www.4coffshore.com
2. Airy, G.B., 1841. Tides and waves, Encyclopaedia Metropolitana, London, pp. 241-396.
3. Andersen, T.L.; Frigaard, P.; Damsgaard, M.L.; and De Vos, L., 2011. Wave run-up on slender piles in design conditions – Model tests and design rules for offshore wind. *Coastal Engineering*. 58 (4), 281-289.
4. Arena, F.; Laface, V.; Malara, G.; Romolo, A.; Viviano, A.; Fiamma, V.; Sannino, G.; Carillo, A. Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea. *Renewable Energy*, 2015, vol. 77, p. 125-141, ISSN: 0960-1481, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.002.
5. Auken, M., 2009. European Parliament Resolution, 20 February 2009, on the impact of extensive urbanization in Spain on individual rights of European citizens, on the environment and on the application of EU law, based upon petitions received (2008/2248(INI)).
6. Breusers, H.N.C.; Nicollet, G.; and Shen, H.W., 1977. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*. 15 (3), 211-252.
7. BP – British Petroleum. Statistical review of World energy. BP p.l.c. 2017: 66.
8. Bretsneider, C.L., 1951. Revised wave forecasting curves and procedure. University of California, Berkeley.
9. Bretsneider, C.L., 1959. Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves. University of California, Berkeley.
10. Bruun, P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways Harbours Division*, Volume 88, pp 117-130.
11. Bruun, P., 1988. The Bruun Rule of erosion by sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Volume 4, pp. 627-648.
12. Cao, H. and Wan, D. Benchmark computations of wave run – up on single cylinder and four cylinders by naoe – FOAM – STJU solver. *Applied Ocean Research*. 2017. 65, pp 327 – 337.

13. CERC. Coastal Engineering Manual. EM 1110-2-1100, CECW-CE, USACE Publications. Part II.; USACE: Washington, DC, USA, 2002.
14. CERC. Shore Protection Manual. Fourth Ed. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Centre. P.O. Vicksburg, Mississippi. 1984.
15. Chella, M.A.; Torum, A.; and Myrhaug, D., 2012. An overview of wave impact forces on offshore wind turbine substructures. Energy Procedia, Elsevier. 20, 217-226.
16. CIRIA/CUR, 1991. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, vol. 154.
17. Clauss, G.F. Wave forces on slender cylinders. Delft University of Technology. Chapter 12. 1992.
18. Coleman, N.L., 1971. Analyzing laboratory measurements at cylindrical piers in sand beds. IAHR Proceedings of the 14th Congress. Paris, France. 3, 307-313.
19. Copeiro, E., 1978. Extremal prediction of significant wave height. In: Coastal Engineering, International Conference on Coastal Engineering, Hamburg.
20. Dean, R.G.; and Maurmeyer, E.M., 1983. Models for beach profile response. In: Komar, P.D. (edition). Handbook of Coastal Processes and Erosion Boca Ratón. CRC Press, pp. 151-166.
21. Dean, R.G.; and Dalrymple, R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 2, World Scientific Publishing.
22. De la Peña, J.M., 2007. Guía Técnica de Estudios Litorales: Manual de Costas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
23. De Soneville, B.; Paulsen, B.T.; Hofland, B. Wave Impact Loads on Gravity Based Structures. Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE34. May 31 - June 5, 2015, St. John's, NL, Canada.
24. De Vos, L.; Frigaard, P.; De Rouck, J. Wave run-up on cylindrical and cone shaped foundations for offshore wind turbines. Coastal Engineering, 2007, 54(1): 17-29.
25. Diez, J.J., 1996. Guía de Costas de España. Alianza Editorial.
26. Diez, J.J., 2000. A review of some concepts involved in the sea-level rise problem. Journal of Coastal Research, Volume 29 (6).
27. Diez, J.J.; Esteban, M.D.; López-Gutiérrez, J.S.; and Negro, V., 2013. Meteorological influence on inland and coastal floods in the East of Spain. Journal of Coastal Research, Volume 29 (6).
28. DNV-GL. International Guidelines DNV-os-j101, on Design of Offshore Wind Turbine. 2013. Disponible online: <https://rules.dnvgl.com>.

29. DNV-GL. International Guidelines, DNV-GL-ST-0437, on Loads and Site Conditions for Wind Turbines. 2016. Disponible online: <https://rules.dnvgl.com>.
30. DNV-GL. International Guidelines, DNV-GL-ST-0126, on Support Structures for Wind Turbines. 2016. Disponible online: <https://rules.dnvgl.com>.
31. DNV-GL. Recommended Practice, DNV-rp-C205, on Environmental Conditions and Environmental Loads. 2010. Disponible online: <https://rules.dnvgl.com>.
32. Esteban, M.D.; Diez, J.J.; López-Gutiérrez, J.S.; Negro, V. Why offshore wind energy? *Renewable Energy*. 2011. 36 (1): 444-450.1
33. EWEA-Wind Europe (European Wind Energy Association). Key trends and statistics. EWEA Tech. Rep.; EWEA, Brussels, Belgium, 2017.
34. EWEA-Wind Europe (European Wind Energy Association). Key trends and statistics H1, for internal use only. EWEA Tech. Rep.; EWEA, Brussels, Belgium, 2018.
35. Fang, Z.; Xiao, L.; Guo, Y.; Kou, Y.; Li, J. Wave run – up on a fixed surface – piercing square column using multi – layer barrier. *Applied Ocean Research*. 2018. 71, pp 105 – 118.
36. Frigaard, P.; Andersen, T.L.; Rodriguez, J.R.; Sorensen, H.; Martinelli, L.; Lamberti, A.; Troch, P.; De Vos, L.; Kisacik, D.; Stratigaki, V.; Zou, Q.; Monk, K.; Vandamme, J.; Damsgaard, M.L.; Gravesen, H. Loads on entrance platforms for offshore wind turbines. Proceedings of the HydralabIII joint transnational access under meeting. Hannover, Germany. 2010. 25-28.
37. 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. 1974. 1702-1720.
38. Goda, Y., 2010. Random seas and design of maritime structures. Adv. Series Ocean Eng. 33, third ed.
39. Hands, E.B., 1980. Prediction of shore retreat and nearshore profile adjustments to rising water levels on the Great Lakes. CERC, Technical Memorandum, Volume 80.
40. Hands, E.B., 1983. The Great lakes as a Test Model for Profile Responses to Sea Level Changes. In: Komar, P.D. (edition). Handbook of Coastal Processes and Erosion Boca Ratón. CRC Press, pp. 176-189.
41. Harris, J.M.; Whitehouse, R.J.S.; and Sutherland, J., 2011. Marine scour and offshore-wind lessons learnt and future challenge. Proceedings of the OMAE 2011. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 5, 849-858.
42. Hasselmann, K.; Baruett, T.P. et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the JONSWAP. Hydraulic Engineering Reports. Deutches Hydrographisches Institut. 1973.

43. Hiroi, I. On a method of estimating the force of waves. *Journal of College of Engineering, Imperial University of Tokyo*. 1919. 10 (1): 1-19.
44. Horikawa, K., 1988. *Nearshore dynamics and coastal processes*. University of Tokyo Press.
45. Hughes, S.A., 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. In: *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 7, World Scientific Publishing.
46. IEA – International Energy Agency, 2017. *World Energy Outlook – Executive Report*. IEA Publications.
47. IEC. *International Standards, IEC 61400-1, on Design Requirements for Wind Turbines*. Third ed. 2005-2008.
48. IEC. *International Standards, IEC 61400-3, on Design Requirements for Wind Turbines*. 2009.
49. Jain, S.C., 1981. Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of Hydraulic Div.* 107 (5), 611-626.
50. Jiménez, M.; Castanedo, S.; Zhou, Z.; Coco, S.; and Medina, R. 2015. Changes induced by sea level rise on network properties of restoration areas. *EGU General Assembly (Vienna, Austria)*.
51. Keulegan, G.H.; Carpenter, L.H. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Journal Research of the National Bureau of Standards*. 1958. 60 (5): 423-440.
52. Lé Méhauté, B., 1976. *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag, New York.
53. Ley 28/1969, de 26 de abril, sobre Costas.
54. Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
55. Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral, y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
56. Longuet Higgins, M.S. On the statistical distribution of the heights of sea waves. *Journal of Marine Research*. 1952. 11 (3): 245–266.
57. Luengo Frades, J.; Negro, V.; García-Barba, J.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D. New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 2019, 131 (2019): 667-677.
58. Luengo Frades, J.; Negro, V.; García-Barba, J.; Martín-Antón, M.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; and Moreno Blasco, L.J., 2019. Preliminary design for wave run-up in offshore wind farms: Comparison between theoretical models and physical model tests. *Energies*, 12 (3), 492.

59. MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory. Technical Memorandum, Nº 69. U.S. Army Beach Erosion Board. Washington DC. 1954.
60. Matutano, C.; Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; and Esteban, M.D., 2016. Hydrodynamic regimes in offshore wind farms. *J. Coast. Res.* (2016) 892-896.
61. Matutano, C.; Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; and Del Campo, J., 2013. Dimensionless wave height parameter for preliminary design of scour protection in offshore wind farms. *Renew. Energy.* 359-365.
62. Matutano, C.; Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; and Esteban, M.D., 2013. Scour prediction and scour protections in offshore wind farms. Elsevier, *Renewable Energy*.
63. McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type. *Phil. Mag.* 38. 351-358.
64. Melville, B.W.; and Sutherland, A.J., 1988. Design methods for local scours at bridge piers. *J. Hydraulic Engineering, ASCE.* 114 (10), 1226-1240.
65. Morison, J.R.; Johnson, J.W.; O'Brien, M.P., 1950. Experimental studies on forces on piles. University of Berkeley (Chapter 25).
66. Mostafa, Y.E.; and Agamy, A.E., 2011. Scour around single pile and pile groups subjected to waves and currents. *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 8160-8178.
67. Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; Matutano, C. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 2014, 63: 125-132.
68. Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; and Matutano, C., 2014. An analysis of recent changes in Spanish Coastal Law. In: Green, A.N., and Cooper, J.A.G. (eds.), *Proceedings of the 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 66, pp. 448-453.
69. Negro, V.; Varela, O.; García-Palacios J.H.; López-Gutiérrez, J.S. *Diseño de Diques verticales (Design of vertical breakwaters)*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Senior. nº 26. 2ª edición (in Spanish), 2008.
70. Negro, V.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; Del Campo, J.M.; and Luengo Frades, J., 2018. Action strategy for studying marine and coastal works with climate change on the horizon. *Journal of Coastal Research*. *Proceeding of the 15th International Coastal Symposium.* 85, 506-510.
71. Nielsen, A.W. Final Report on the PSO Project "Wave run-up on offshore wind turbines". DHI – Energinet.dk.; DHI: Horsholm, Denmark, 2008; p. 43.
72. Nielsen, A.W.; Sumer, B.M.; and Petersen, T.U., 2014. Sinking of scour protections at Horns Rev 1 offshore wind farm. *Proceedings of the International Conference of Coastal Engineering. ICS 2014, Seoul.*

73. Ning, D.; Wang, R.; Chen, L.; Li, J.; Zang, J.; Cheng, L. Extreme wave run – up and pressure on a vertical seawall. *Applied Ocean Research*. 2017. 67, pp 188 – 200.
74. Offshore Wind. Disponible online: www.offshorewind.biz
75. Ortega, L.M.; and López, R., 2008. “Hormigón y acero”: a chronicle of the Spanish structural engineering in the latest 60 years. *Informes de la Construcción*. 60, 67-79.
76. Oumeraci, H.; Goda, Y.; and Takahashi, S., 2001. Experience made using the Hannover Flume of the Forschungs-zentrum küste (FZK): selected examples. In: *Proceedings of the International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century*.
77. Peregrine, D.H. Water wave impact on walls. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*. 2003. 35: 23–43.
78. Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech*. 2 (5). 417-445.
79. Pierson, W.J.; and Moskowitz, L.A., 1964. Proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res*.
80. Puertos del Estado, Ministerio de Fomento (Gobierno de España). Disponible online: www.puertos.es
81. Puertos del Estado. ROM 0.0-01. General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures. Ministry of Public Works, Spain. 2002.
82. Puertos del Estado. ROM 0.2-90. Actions in the design of Maritime and Harbour Works. Ministry of Public Works, Spain. 1990.
83. Puertos del Estado. ROM 0.3-91. Waves. Ministry of Public Works, Spain. 1991.
84. Puertos del Estado. ROM 1.0-09. Breakwaters (Part 1): Calculation and project factors. Climate Agents. Ministry of Public Works, Spain. 2009.
85. Puertos del Estado. ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en obras de atraque y amarre. Ministry of Public Works, Spain. 2012.
86. Qadar, A.; Ansari, S.A., 1994. Ultimate depth of scour around bridge piers. *Proceedings of the ASCE national conference on hydraulic engineering*. Buffalo, USA. 1, 51-55.
87. Real Decreto. B.O.E., Boletín Oficial del Estado, 1989. Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General para el desarrollo y ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, 27p.
88. Real Decreto. B.O.E., Boletín Oficial del Estado, 2014. Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral, y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

89. Sainflou, G. Essai sur les digues maritimes verticales. Annales Ponts et Chaussées. École Nationale des Ponts et Chaussées. 1928. 98 (1): 5-48.
90. Sano, M.; Manchaud, M.; and Medina, R., 2010. Coastal setbacks for the Mediterranean: a challenge for ICZM. Journal of Coastal Conservation, Volume 14, Issue 1.
91. Sarpkaya, T.; Isaacson, M. Mechanics of wave forces on offshore structures. Textbook by Van Nostrand Reinhold. New York. 1981.
92. Sarpkaya, T. Wave forces on offshore structures. Cambridge University Press. 2014.
93. Shen, M.C.; Meyer, R.E.; and Keller, J.E., 1969. Spectra of water waves in channels and around islands. Phys. Fluids. 14, 2289-2304.
94. Stive, M.J.F., 2004. How important is global warming for coastal erosion? Climate change, Editorial Comment, Volume 64, pp. 27-39.
95. Stokes, G.G., 1851. On the effect of the internal friction on the motion of pendulums, Pitt Press, pp. 8-106.
96. Suh, K.D.; Jung, H.Y.; Pyun, C.K. Wave reflection and transmission by curtainwall-pile breakwaters using circular piles. Ocean Engineering. 2007. 34 (14-15): 2100-2106.
97. Sumer, B.M.; Fredsoe, N.; and Christiansen, N., 1992. Scour around vertical pile in waves. J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng. (1992) 15-31.
98. Sumer, B.M.; and Fredsoe, J., 2002. The mechanics of scour in the marine environment, World Scientific Press, Singapore.
99. Torres Alfosea, F.J., 2010. Cuarenta años de leyes de Costas en España (1969-2009). Investigaciones geográficas, No. 52, 167-198.
100. Tucker, M.J.; and Pittz, E.G., 2001. Wave in ocean engineering, first ed., vol. 5, Elsevier Ocean Engineering Series.
101. Van der Meer, J.W. Conceptual Design of Rubble Mound Breakwaters. Delft Hydraulic Publication. 1993. 483 (1) Delft Hydraulics, The Netherlands.
102. Van der Meer, J.W. Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack (PhD thesis) Technical University of Delft, The Netherlands. 1988.
103. Viotti, C.; Carbone, F.; Dias, F. Conditions for extreme wave run – up on a vertical barrier by nonlinear dispersion. Journal of Fluids Mechanics. 2014. 748, pp 768 – 788.
104. Whitehouse, R.J.S., 1998. Scour at marine structures: a manual for practical applications. Thomas Telford, London.

105. Whitehouse, R.J.S.; Harris, J.M; Sutherland, J.; and Rees, J., 2011. The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations. *Marine Pollution Bulletin*. 62, 71-88.
106. Zang, J. et al. Steep wave and breaking wave impact on offshore wind turbine foundations—ringing re-visited. *Proc. 25th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Harbin, China. 2010.
107. Ziegler, L.; Gonzalez, E.; Rubert, T.; Smolka, U.; and Melero, J.J., 2018. Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82, 1261-1271.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

APÉNDICE. OTROS TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se citan otros trabajos relacionados con la temática de la presente Tesis Doctoral, y que han sido desarrollados en coautoría fruto de la investigación llevada a cabo en estos tres años de doctorado. Estos trabajos son los siguientes:

- Comunicación a Congreso nacional: “Barcos para la construcción de parques eólicos offshore: ventanas temporales y clasificación COVEMA”. Presentado en las XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos (Alicante, 2017), y publicado en el Libro de Ponencias del Congreso.
- Comunicación a Congreso nacional: “Estructuras en energía eólica offshore: el futuro flota”. Presentado en las XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos (Málaga, 2019).
- Comunicación a Congreso internacional: “Blue economy: Compatibility between the increasing offshore wind technology and the achievement of the SDG”. Aceptado en el International Coastal Symposium (Sevilla, 2020).
- Comunicación a Congreso internacional: “Offshore wind: Future floats”. Aceptado en el International Coastal Symposium (Sevilla, 2020).
- Comunicación a Congreso internacional: “Impact of offshore wind farms on marine ecosystems, pelagic species and fishing”. Aceptado en el International Coastal Symposium (Sevilla, 2020).

Los citados trabajos han servido para profundizar en la presente investigación, sirviendo así de indicio de calidad adicional a esta Tesis Doctoral.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ED|UA Escola de Doctorat
Escuela de Doctorado

edua.ua.es