



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**PREDIMENSIONADO DE SOPORTES
ESTRUCTURALES DE
AEROGENERADORES EÓLICOS
MARINOS**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS

Álvaro Gómez Montero

Dirigido por:

María Dolores Esteban Pérez,

María José Rodríguez Largacha

José Santos López Gutiérrez

Madrid 2023

RESUMEN

La energía eólica marina se ha expandido exponencialmente en las últimas décadas, convirtiéndose en una fuente renovable clave a nivel global.

Este trabajo revisa en detalle el estado del arte en cuanto a tipologías de cimentaciones de gravedad para aerogeneradores offshore, incluyendo sus fortalezas, debilidades y evolución histórica. Asimismo, estudia los diferentes tipos de cargas actuantes sobre estas estructuras a lo largo de su vida útil.

También examina las principales normativas y estándares de diseño aplicables en este campo, tanto genéricos como específicos para el sector eólico marino. Complementariamente analizan las técnicas de modelado numérico y experimental utilizadas actualmente para el análisis, diseño y validación de este tipo de estructuras.

Tras la revisión bibliográfica realizada, al detectar un vacío en el desarrollo de herramientas de cálculo de cimentaciones de gravedad para las etapas tempranas del proyecto, se propone una nueva herramienta que cubra esa necesidad y se explica el funcionamiento de las partes que la componen. Durante esta explicación se exponen también las limitaciones y mejoras que podrían realizarse para hacerla más competente.

Para finalizar, se pone a prueba con un caso práctico y se analizan las futuras líneas de investigación y desarrollo.

INDICE

RESUMEN	1
1. Introducción	12
2. Objeto del documento	18
3. Estado del arte	19
3.1. Tipos cimentaciones de gravedad	22
3.2. Tipos de cargas actuantes sobre aerogenerador	33
3.3. Normativas y Estándares de Diseño	40
3.4. Técnicas de Modelado y Cálculo	46
3.4.1. Modelos Numéricos	46
3.4.1.1. Métodos computacionales para aerodinámica e hidrodinámica	46
3.4.1.2. Métodos computacionales para mecánica estructural	49
3.4.1.3. Métodos computacionales para interacción suelo-estructura	50
3.4.1.4. Programas Informáticos Comerciales	51
3.4.1.5. Herramientas básicas de predimensionado	56

3.4.2.	Modelos Físicos	57
4.	Análisis de necesidad y tipología de nueva herramienta de cálculo.....	61
5.	Desarrollo de herramienta de predimensionamiento de cimentaciones de gravedad.....	62
5.1.	Metodología de desarrollo.....	62
5.2.	Aclaraciones de funcionamiento e Indicaciones de uso	63
5.3.	Elección de geometría	67
5.4.	Datos de Entrada.....	69
5.4.1.	Clasificación de datos de entrada	69
5.4.2.	Aspectos que mejorar	70
5.5.	Cargas de Oleaje.....	71
5.5.1.	Descripción de funcionamiento	71
5.5.2.	Aspectos que mejorar	78
5.6.	Cálculos de Estabilidad.....	79
5.6.1.	Descripción de funcionamiento	79
5.6.2.	Aspectos que mejorar	87
5.7.	Cálculos de Resistencia Mecánica	88
5.7.1.	Descripción de funcionamiento	88
5.7.2.	Aspectos que mejorar	92

5.8.	Salida de Resultados.....	93
5.8.1.	Descripción de funcionamiento	93
5.8.2.	Aspectos que mejorar	94
5.9.	Validación de herramienta con caso práctico.....	95
6.	Conclusiones y futuras líneas de investigación	104
	BIBLIOGRAFIA.....	105

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.. Tipologías de cimentaciones fijas (tethys.pnnl.gov)</i>	13
<i>Figura 2. Tres tipos comunes de flotadores para aerogeneradores (DNV GL, 2018)</i>	14
<i>Figura 3. Selección de tipo de cimentación en función de la profundidad (Esteban, 2009)</i>	15
<i>Figura 4. Estadísticas y calendario para 2022-2026 (WindEurope 2021)</i>	16
<i>Figura 5. Profundidad del mar en alrededor de Europa (DNV-GL, 2014)</i>	17
<i>Figura 6. Evolución del tamaño medio de los aerogeneradores. (GE Renewable Energy 2018; IRENA 2019c; 2016b; MHI Vestas 2018)</i>	19
<i>Figura 7. Número acumulado de cimentaciones en Europa a finales de 2020, por distintas tipologías. (WindEurope,2020')</i>	20
<i>Figura 8. Carga de cimentación de gravedad en Thorntonbank (Scaldis, 2018; www.maritimejournal.com)</i>	21
<i>Figura 9. Fabricación en dique seco y remolcado mediante barco (Parque eólico de Blyth; https://www.bamnuttall.co.uk/)</i>	21
<i>Figura 10. Tipos de cimentaciones de gravedad más comunes (A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines., 2023).</i>	22
<i>Figura 11. Izquierda: Cimentación de gravedad del parque eólico de Middelgrunden (Sorensen y Chozas, 2021). Derecha: Parque eólico Lehtirova (www.coydegroupp.com)</i>	23
<i>Figura 12. Cimentación de cajones de gravedad del parque eólico RØDSAND 2 (www.aarsleff.com)</i>	23
<i>Figura 13. Cimentación de cajones tronco-conicas</i>	24

<i>Figura 14. Cimentaciones del parque eólico Blyth (www.edf-renouvelables.com; www.ice.org.uk)</i>	24
<i>Figura 15. Construcción de cimentaciones del parque eólico de Vindeby (www.orsted.com)....</i>	26
<i>Figura 16. Sección del diseño de las cimentaciones del parque eólico de Middelgrunden (www.middelgrunden.dk)</i>	27
<i>Figura 17. Instalación de cimentación en el parque eólico de Nysted I (SBM Offshore)</i>	28
<i>Figura 18. Transporte de cimentaciones (Vattenfall, 2008)</i>	29
<i>Figura 19. Construcción de cimentaciones de gravedad en el parque eólico Thorntonbank I (Wikimedia)</i>	30
<i>Figura 20. Acopio de cimentaciones en dique, parque eólico de Fécamp (www.saipem.com) ..</i>	31
<i>Figura 21. Remolcado y acopio de cimentaciones en el parque eólico de Blyth (www.powerandcables.com)</i>	32
<i>Figura 22. Perfil vertical del viento y efecto según la posición de la pala (Bhattacharya, 2014)</i>	34
<i>Figura 23. Densidad espectral de energía de cargas dinámicas que muestran las posibilidades de diseño: soft-soft, soft-stiff y stiff-stiff (Bhattacharya, 2014)</i>	35
<i>Figura 24. Movimiento rotacional del oleaje</i>	36
<i>Figura 25. Rosa de Oleaje de la Boya de Villano-Sisargas (Puertos del Estado, 2023)</i>	37
<i>Figura 26. Propagación del oleaje y efecto Shoaling (COMET, 2006)</i>	38
<i>Figura 27. Campo de flujo de dos turbinas calculado con OpenFAST (www.nrel.gov)</i>	51
<i>Figura 28. Contorno del campo de velocidad para un aerogenerador (www.hawc2.dk)</i>	52

<i>Figura 29. Estructuras flotantes (arriba) y gráficos de contorno de las elevaciones de la superficie modeladas con WAMIT (www.cambridge.org).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 30. Vista 3D del modelado del posicionamiento de una estructura tipo Jacket (www.orcina.com).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 31. Esquema de flujo de trabajo de BLADED junto al programa SIMA (www.dnv.com) .</i>	<i>55</i>
<i>Figura 32. Modelo de interacción hidrodinámica con Ansys AQWA (www.inas.ro)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 33. Cálculo de viga online de acuerdo a CTE (www.calculocivil.com).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 34. Modelo físico de canal de una cimentación tipo Jacket (IHCantabria)</i>	<i>58</i>
<i>Figura 35. Laboratorio de modelo físico centrífugo con mesa vibratoria (cgm.engr.ucdavis.edu)</i>	<i>59</i>
<i>Figura 36. Mesa vibratoria (Izquierda) y modelo escalado (Derecha) para análisis sísmico de aerogenerador marino (www.journals.plos.org)</i>	<i>59</i>
<i>Figura 37. Túnel de viento para ensayo con aerogenerador escalado (Robert Fontecha et al) ..</i>	<i>60</i>
<i>Figura 38. Enlace de información a Puertos del Estado</i>	<i>64</i>
<i>Figura 39. Boyas físicas y de modelos numéricos (www.puertos.es)</i>	<i>64</i>
<i>Figura 40. Diagrama de flujo de trabajo</i>	<i>65</i>
<i>Figura 41. Parámetros de geometría de cimentación de gravedad para herramienta de cálculo.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 42. Entrada de datos de la herramienta de predimensionado.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 43. Lista desplegable de Hormigón</i>	<i>70</i>

<i>Figura 44. Distribución de presiones de oleaje según Goda (Xavier Gironella)</i>	73
<i>Figura 45. Distribución de presiones</i>	73
<i>Figura 46. Distribución</i>	76
<i>Figura 47. Valores modificables en cálculo de oleaje</i>	77
<i>Figura 48. Valores de coeficientes de seguridad modificables en cálculo de estabilidad</i>	80
<i>Figura 49. Valores de densidades modificables en cálculo de estabilidad</i>	80
<i>Figura 50. Dimensiones de cimentación equivalente (ROM 0.5-05)</i>	81
<i>Figura 51. Distribución de tensiones al terreno en método elástico</i>	82
<i>Figura 52. Diagrama de tensión trapezoidal y triangular.</i>	83
<i>Figura 53. Comprobación del vuelco plástico (ROM 0.5-05)</i>	86
<i>Figura 54. Secciones estudiadas de la cimentación</i>	88
<i>Figura 55. Tensiones máximas generadas por el axil y el momento flector</i>	89
<i>Figura 56. Parámetros modificables de la hoja de cálculo de resistencia mecánica</i>	91
<i>Figura 57. Detalle de sección con armado para esfuerzos de tracción</i>	92
<i>Figura 58. Vista de la salida de resultados en la hoja principal</i>	93
<i>Figura 59. Graficas de información general en salida de datos.</i>	93
<i>Figura 60. Recurso eólico a 100 metros de altura (http://infomar.cedex.es/)</i>	95

<i>Figura 61. Caracterización del periodo pico del oleaje del modelo numérico del emplazamiento del caso práctico (www.puertos.es)</i>	<i>96</i>
<i>Figura 62. Caracterización de la altura de ola significativa del oleaje del modelo numérico del emplazamiento del caso práctico (www.puertos.es)</i>	<i>96</i>
<i>Figura 63. Gráfica de distribución de pesos totales.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 64. Gráfica de volúmenes totales.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 65. Gráfica de esfuerzos axiales.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 66. Gráfica de flectores en la base</i>	<i>99</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Lista de diecisiete (17) casos de estudio de cimentaciones de aerogeneradores de gravedad (Vázquez et al, 2022).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2 Resumen de normativas y estándares de diseño</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3 Parámetros de la onda regular asociados a la teoría lineal del oleaje (ROM 2.0-11) ...</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4 Coeficientes de seguridad mínimos para proyectos de muelles de gravedad (ROM 0.5-05)</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 5 Salida de datos en la hoja de cálculos de estabilidad.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 6 Tensiones transmitidas al terreno obtenidas por el programa para el diagrama trapezoidal y triangular</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 7 Factor de la seguridad al hundimiento</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 8 Cargas de rotura horizontal según ROM</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 9 Factor de seguridad frente al deslizamiento</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 10 Factor de seguridad al vuelco plástico</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 11 Abertura máxima de fisuras en hormigón según clase de exposición (CE)</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 12 Relación entre tensión del acero, diámetro máximo de barra y abertura característica</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 13 Cuantías mínimas necesarias para resistencia y para fisuración.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 14 Geometría definitiva</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 15 Resultados de comprobaciones</i>	<i>97</i>

<i>Tabla 16 Cuantías de acero para tracción y limitación de fisuración.....</i>	100
---	------------

1. Introducción

El ser humano ha hecho uso gran parte de su historia del inagotable recurso de la energía eólica. Hallazgos arqueológicos ubican los primeros barcos de vela en el antiguo Egipto hace más de 5000 años, y Herón de Alejandría, ya en el siglo II, describió el “aneuriom”, un molino de viento de eje horizontal (EOI).

Pero no fue hasta hace tan solo 135 años (1888) cuando Charles Francis Brush, fundador de Brush Electric Company (que terminó formando parte de General Electric), construyó la primera turbina eólica capaz de generar electricidad operando automáticamente, dando comienzo a una nueva fuente de energía eléctrica. La competencia de los combustibles fósiles frenó su desarrollo inicialmente, pero tras la primera crisis del petróleo en los años 80 tuvo un gran impulso. En la década de los 90 la industria de la eólica terrestre ya era un éxito y se comenzó a investigar la posibilidad de ampliar fronteras.

El mayor potencial eólico del entorno marítimo, debido a una mayor velocidad, densidad y regularidad del aire llevo a instalar el primer aerogenerador marino (también conocido como *offshore*) en el año 1990, situado en Suecia, con una potencia de 220 kW, se encontraba a 350 metros de la costa y a una profundidad de 6 metros anclado al fondo marino con una estructura de trípode. A este acontecimiento le siguió la creación del primer parque eólico marino en 1991 en Vindeby, Dinamarca.

Desde entonces no ha cesado el desarrollo de nuevas instalaciones eólicas *offshore*, llegando hasta los 35,5 GW de potencia instalada en Europa (GWEC, 2021), demostrado su viabilidad. En el transcurso de este desarrollo, como consecuencia de intentar optimizar recursos según el medio en el que se encuentren las instalaciones, han surgido dos tipologías de tecnologías en función de la estructura de soporte de los aerogeneradores sobre la superficie del mar, las cimentaciones fijas y los soportes flotantes ancladas mediante cables o cadenas al fondo marino.

Las cimentaciones fijas (figura 1), en las que se centrará más este documento, se clasifican en 5 grupos principales (Böker, 2010):

- **Cimentaciones de gravedad:** Se basan en utilizar el peso de una estructura masiva de hormigón armado para anclar el aerogenerador al lecho marino. Suelen consistir en una base grande y plana con una torre central para soportar el aerogenerador

- **Monopilote:** Se trata de un solo pilote de acero que se hunde en el lecho marino. Es adecuada para aguas poco profundas y su diseño puede incluir refuerzos adicionales para aumentar la estabilidad.
- **Trípode:** Consiste en tres pilotes de acero hundidos en el lecho marino que se unen en la parte superior.
- **Jacket:** Son estructuras de acero en forma de torre que se apoya en cuatro o más pilotes de acero.
- **Cajones de succión:** Son estructuras cilíndricas o tronco-cónicas y su funcionamiento se basa en perforar el suelo, introducir la cimentación y aplicar una presión negativa en el interior de la cimentación mediante bombas de vacío.

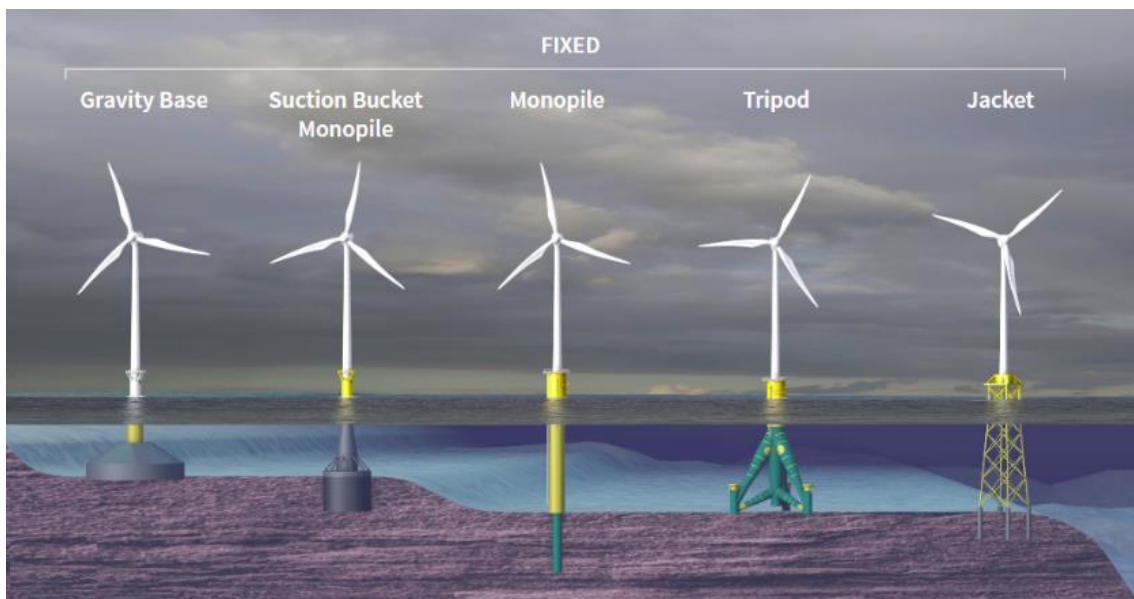


Figura 1.. Tipologías de cimentaciones fijas (tethys.pnnl.gov)

En el caso de las estructuras o cimentaciones flotantes se dividen principalmente en tres grupos (Roddier et al, 2010):

- **SPAR:** Son estructuras estabilizadas por lastre con el centro de gravedad por debajo del centro de flotabilidad, con las partes inferiores de la estructura más pesadas que las superiores.

- **Semi-sumergible:** Se trata de estructuras de flotación o boyancia neutra que suelen requerir de grandes dimensiones y peso para mantener la estabilidad.
- **TLP (Tension Leg Platform):** Son estructuras más livianas y pequeñas que otras tipologías, con una flotación positiva sujetos al fondo marino mediante amarres en tensión.



Figura 2. Tres tipos comunes de flotadores para aerogeneradores (DNV GL, 2018)

Tal y como puede observarse en la siguiente figura 3, en 2009 las cimentaciones fijas se encontraban limitadas para profundidades de 40 metros, a partir de ahí se consideraban como alternativa las cimentaciones flotantes debido al encarecimiento de las soluciones más convencionales, aunque aún hoy en día se encuentran en una etapa muy temprana de su desarrollo.

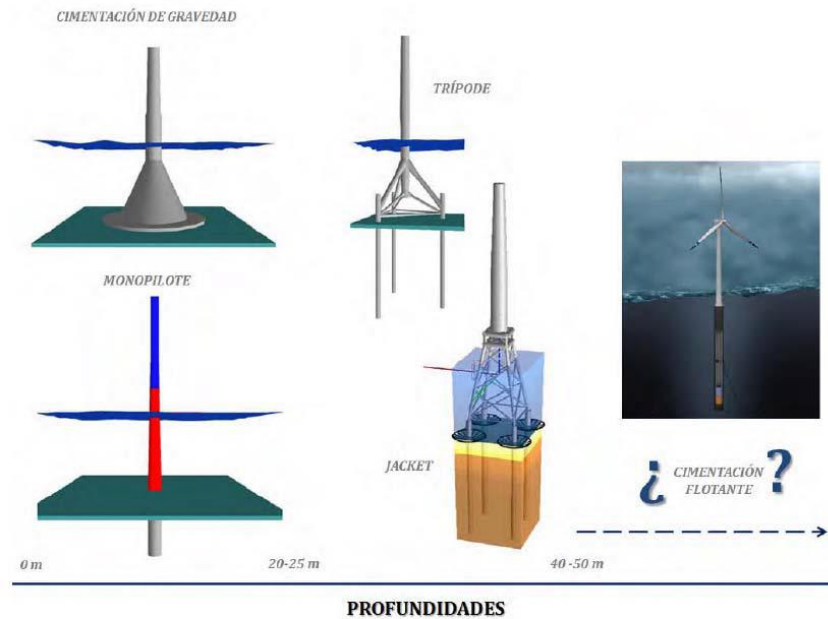


Figura 3. Selección de tipo de cimentación en función de la profundidad (Esteban, 2009)

En la actualidad las tecnologías de cimentaciones fijas se han optimizado en gran medida, habiendo llegado a profundidades de hasta 60 metros de profundidad en el parque eólico de Seagreen, en Escocia, con una tipología de Jacket (www.seagreenwindenergy.com).

En el caso de las cimentaciones de gravedad que se ven más afectadas por la profundidad, se han llegado hasta los 30 metros de profundidad en el parque eólico de Fécamp, en la costa francesa, esperándose su puesta en marcha para este año 2023.

Dentro de las cimentaciones convencionales, si bien es verdad que las monopile y de gravedad se consideraban antes para profundidades de hasta 25-30 metros, y las jacket y trípode para entre 30 y 50 metros, se tienen en cuenta otros factores a parte de la profundidad, como tipología de terreno, acciones a las que estarán sometidas, logística, etc., con el fin de determinar cuál es la alternativa idónea para cada caso.

Según los datos recabados por WindEurope en 2021, el porcentaje de potencia total instalada en mar respecto a la instalada en tierra ha crecido desde un 4,8% en 2012 a un 13,5% en 2021 tal y como puede verse en la Figura 4, y lógico pensar que esta progresión siga en aumento.

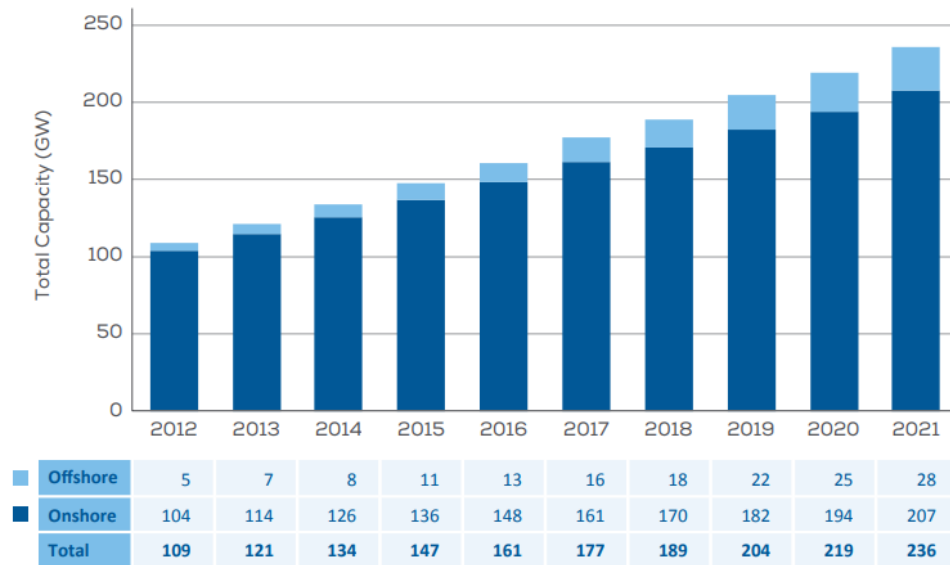


Figura 4. Estadísticas y calendario para 2022-2026 (WindEurope 2021)

Con la mayor parte de la capacidad instalada en Europa (más del 80%), Reino Unido, Alemania y Dinamarca son los líderes mundiales en términos de capacidad instalada de energía eólica marina. Este hecho se explica fácilmente observando la Figura 5 (profundidad del mar alrededor de Europa) y sabiendo cuales son las características que hacen más viable un emplazamiento para la instalación de aerogeneradores marinos, que resumiendo un poco son:

- Una profundidad inferior a 50-60 metros.
- Vientos constantes y fuertes que permitan una producción de energía constante y significativa
- Una distancia razonable a la costa para garantizar la conexión a la red eléctrica terrestre.
- Un clima estable que permita la realización de operaciones de mantenimiento y reparación.

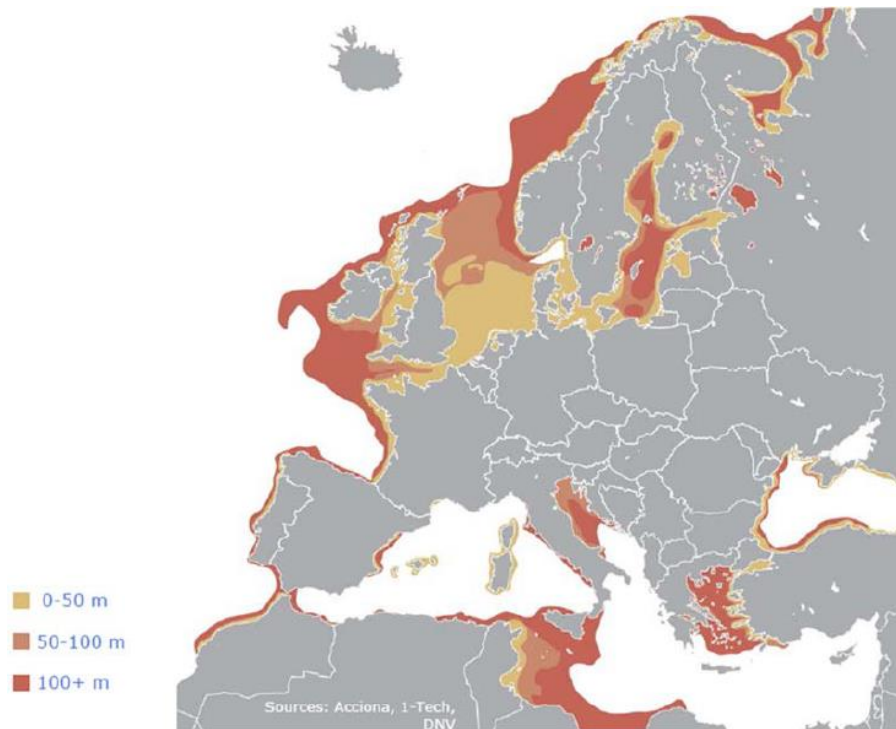


Figura 5. Profundidad del mar en alrededor de Europa (DNV-GL, 2014)

Con esto se entiende que el Mar del Norte sea uno de los lugares más desarrollados en cuanto a la energía eólica marina, con varios parques eólicos marinos instalados, al que le sigue el Mar Báltico, que cuenta también con varios proyectos en funcionamiento y en construcción. En un segundo plano podemos encontrar la costa oeste de Europa con países como Portugal, España y Francia que están invirtiendo en eólica marina.

2. Objeto del documento

El presente trabajo tiene por objeto, en primer lugar, revisar en detalle el estado del arte en cuanto a tipologías de cimentaciones de gravedad para aerogeneradores offshore, incluyendo sus fortalezas, debilidades y evolución histórica, así como estudiar los diferentes tipos de cargas actuantes sobre estas estructuras a lo largo de su vida útil.

También se pretende, para obtener una visión general de todos los aspectos involucrados en el desarrollo de esta tipología de cimentación, examinar las principales normativas y estándares de diseño aplicables en este campo, tanto recomendaciones específicas para el sector eólico marino, como códigos genéricos que puedan ser de aplicación. Adicionalmente, se analizarán las técnicas de modelado numérico y experimental utilizadas actualmente para el análisis, diseño y validación de este tipo de estructuras.

Sobre la base de la revisión bibliográfica realizada, se quiere identificar si existe la necesidad de una nueva herramienta enfocada al cálculo, de algún aspecto en concreto o del conjunto general, de cimentaciones de gravedad para aerogeneradores marinos.

En caso de que exista dicha necesidad, se llevará a cabo la explicación del funcionamiento de dicha herramienta, exponiendo su alcance, limitaciones y aspectos a mejorar.

Por ultimo se validará mediante la aplicación de un caso real.

En conclusión, este trabajo pretende tanto una recopilación actualizada del conocimiento sobre cimentaciones de gravedad para aerogeneradores marinos, como realizar, en caso de ser posible, una pequeña aportación a su avance y desarrollo.

3. Estado del arte

Si bien el entorno marino aporta ventajas que atraen al mercado de la eólica, como una menor limitación de espacios y un potencial energético mayor y más constante, también resulta un entorno más agresivo y difícil de operar. Esto naturalmente ha conducido al crecimiento del tamaño medio de los aerogeneradores con el fin de aprovechar más el recurso energético con cada posición instalada. Esto puede observarse en la figura 6, donde se observa que en 2010 el aerogenerador medio era de 3 MW de capacidad, y que se espera que alcancen los 15 o 20 MW para entre 2025 y 2030.

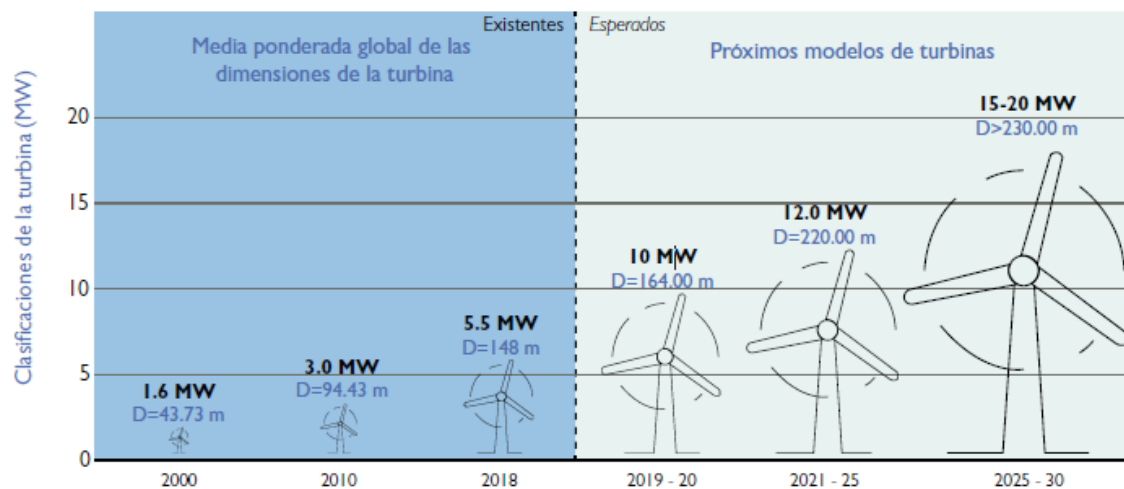


Figura 6. Evolución del tamaño medio de los aerogeneradores. (GE Renewable Energy 2018; IRENA 2019c; 2016b; MHI Vestas 2018)

Este incremento de capacidad va de la mano con un incremento de tamaño de la estructura que lo soporta, y aunque esta condición es aplicable también a los aerogeneradores instalados en tierra, los que se encuentran sometidos a la agresividad del entorno marino deben contar con estructuras que tienen que soportar la corrosión. Esto posiciona al hormigón con ventaja respecto al acero como material constructivo para estructuras eólicas marinas desde el punto de vista de durabilidad y mantenimiento. Sin embargo, otros aspectos como las dificultades de ejecución "in situ", logística del transporte, acopio y suministros juegan en contra de este, haciendo que finalmente la solución se decante por el acero.

De todas las tipologías de cimentaciones fijas al fondo marino la más vinculada al hormigón es sin duda las de gravedad, cuyo funcionamiento se basa en dar estabilidad al aerogenerador usando el peso de una estructura masiva, siendo el hormigón un material mucho más barato

por kilogramo de peso que el acero, aunque el precio unitario de cimentación depende de otros muchos factores. Dichas cimentaciones son una buena opción para emplazamientos con lecho marino relativamente plano, y son construidas en tierra firme y transportadas en barcos o pontonas a su posición definitiva.

Como se puede ver en la figura 7 la tipología de cimentación más usada ha sido la de monopilote, algo comprensible dado sus reducidos costes de almacenaje, transporte e instalación por la simplicidad de su estructura (Alexandre Mathern et al, 2021).

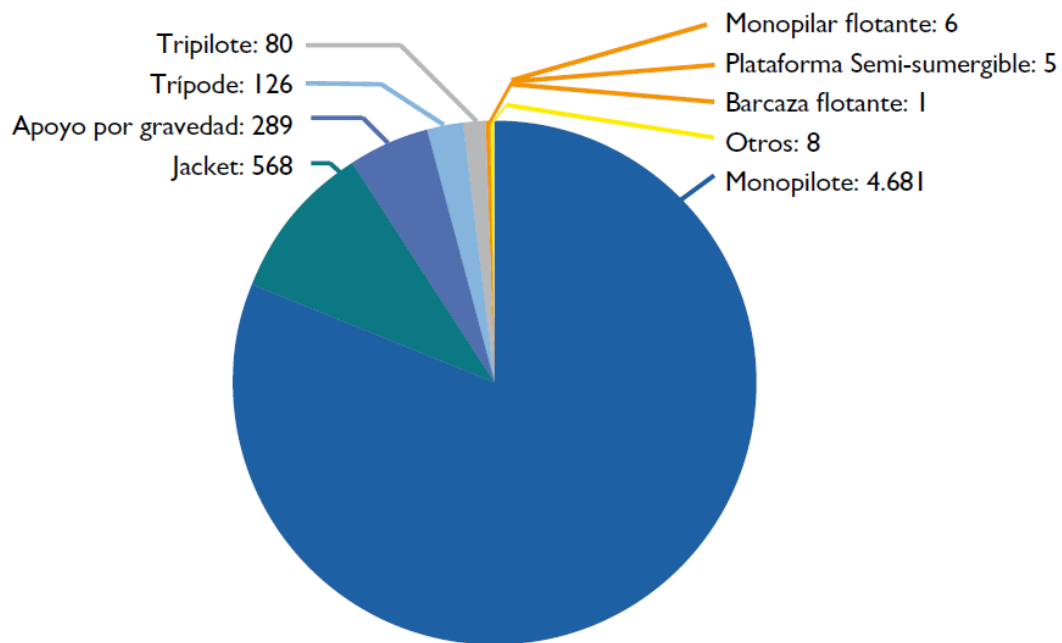


Figura 7. Número acumulado de cimentaciones en Europa a finales de 2020, por distintas tipologías.
(WindEurope, 2020')

Las cimentaciones de gravedad han visto penalizado su uso por las limitaciones que tiene con el fondo marino (debe tener una capacidad portante mínima y es preciso preparación de la base) y las costosas operaciones marítimas de transporte de las pesadas estructuras, como puede verse en la figura 8.



Figura 8. Carga de cimentación de gravedad en Thorntonbank (Scaldis, 2018; www.maritimejournal.com)

Como ocurre en otros ámbitos de la ingeniería, no existe una solución ideal y única para todos los casos, pero con la mejora de la técnica y bajo las condiciones apropiadas, como un fondo marino adecuado, diseños modulares, accesibilidad a diques secos próximos (figura 9) que permitan su fabricación en cadena y remolcado mediante pequeñas embarcaciones (como cajones flotantes), las cimentaciones de gravedad se postulan como las mejores alternativas para dar soporte a los aerogeneradores de un parque eólico marino.



Figura 9. Fabricación en dique seco y remolcado mediante barco (Parque eólico de Blyth; <https://www.bamnuttall.co.uk/>)

Para entender mejor las cimentaciones de gravedad se explica a continuación las tipologías que se pueden encontrar actualmente instaladas.

3.1. Tipos cimentaciones de gravedad.

A diferencia de lo que sucede en otras tipologías de cimentaciones (como las flotantes), donde simultáneamente se desarrollan diferentes modelos que compiten por destacar como el más competente, las cimentaciones de gravedad se clasifican según su generación. En la Figura 10 puede observarse siete (7) diseños desarrollados desde los inicios en 1991 hasta la actualidad, en esta evolución puede apreciarse que a medida que el tamaño de las turbinas y la profundidad aumenta también debe hacerlo el peso de las cimentaciones de gravedad, manteniéndose una relación aproximadamente cuadrática entre profundidad y peso. Todos estos diseños, y los que no figuran también, pueden agruparse en cuatro (4) clases o generaciones que se verán a continuación.

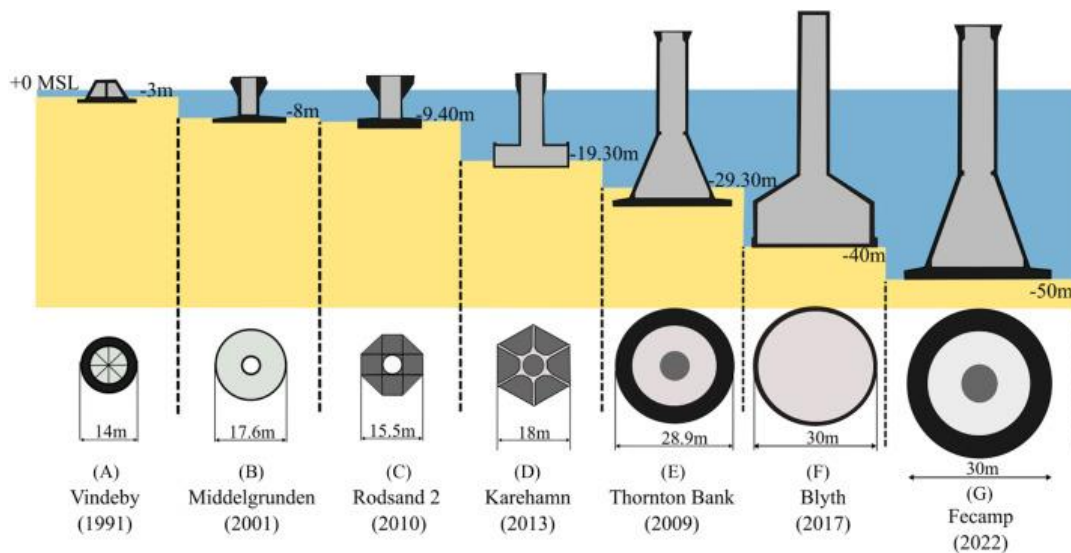


Figura 10. Tipos de cimentaciones de gravedad más comunes (A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines., 2023).

Esta necesidad de aumento de peso desemboca en que generación tras generación se busque un mayor aporte de este peso mediante materiales de relleno, lo que va cambiando el concepto.

- La primera generación de cimentaciones de gravedad consiste en una losa maciza de hormigón armado y un fuste vertical hueco. Resulta evidente la falta de desarrollo de la técnica ya que es una aplicación directa de una cimentación convencional de aerogenerador en tierra (figura 11).



Figura 11. Izquierda: Cimentación de gravedad del parque eólico de Middelgrunden (Sorensen y Chozas, 2021). Derecha: Parque eólico Lehtirova (www.coydegroupp.com)

- La segunda generación de cimentaciones de gravedad puede denominarse cimentaciones de cajones de gravedad ya que, como puede observarse en la Figura 12, la losa dispone de celdas abiertas en la parte superior de forma que puedan ser rellenas con áridos una vez posicionada la cimentación. Con esto se obtiene un aumento del peso sin incremento de hormigón.

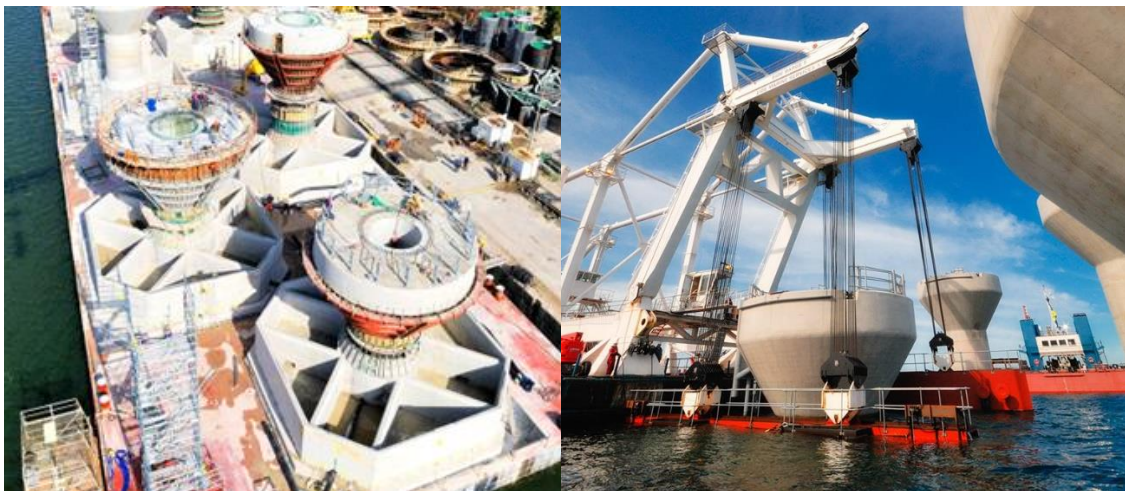


Figura 12. Cimentación de cajones de gravedad del parque eólico RØDSAND 2 (www.aarsleff.com)

- Las cimentaciones de gravedad de la tercera generación (Figura 13) marcan ya una diferencia notable con respecto a sus predecesoras en diseño conceptual. La base es un cajón cerrado con forma tronco-cónica conectado al fuste hueco desde el que se introduce el material de relleno y lastrado una vez se encuentra en su posición final.



Figura 13. Cimentación de cajones tronco-conicas

- Desarrollado para el parque eólico de Blyth (Figura 14), en Reino Unido (2017), nace la cuarta y última generación de cimentaciones de gravedad hasta ahora, con 41,45 MW de potencia total instalada a profundidades de hasta 35 metros y a 5,7 km de la costa. A primera vista puede confundirse con la tercera generación ya que la parte inferior también es un cajón cerrado con forma tronco-cónica, pero en este caso el fuste es metálico y está empotrado en la base.



Figura 14. Cimentaciones del parque eólico Blyth (www.edf-renouvelables.com; www.ice.org.uk)

Estas cuatro generaciones que clasifican las cimentaciones de gravedad constituyen casi la totalidad de las instaladas desde que se construyó el primer parque eólico. Esta clasificación ha sido tomada del artículo “Inventory proposal for gravity-based support structures in offshore wind farms” publicado por K. Vázquez, R.R. Rodríguez y M.D. Esteban en 2022. En la Tabla 1, extraída de dicho artículo, puede observarse el listado diecisiete (17) parques eólicos marinos de cimentaciones de gravedad estudiados para el desarrollo de un inventario de componentes

de cimentaciones de gravedad que ayude a mejorar el mantenimiento y la toma de decisiones de reparaciones durante su vida útil.

WF Name	Country	Year of commissioning	Status	Total power (MW)	WT Model	Depth (m)	Distance (km)	GBS type	References
Vindeby	Sweden	1991	Dismantled	4.95	Bonus 450 kW	2-4	2	Solid Concrete Plate	–
TunØ Knob	Denmark	1995	Operation	5	Vestas 500 kW	4	4-6	Solid Concrete Plate	–
Middelgrunden	Denmark	2001	Operation	40	Siemens 2 MW	4-8	2-3	Solid Concrete Plate	(Copenhagen Environment and Energy Office, 2003; Energikontor, 2000; Larsen et al., 2005; Sorensen et al., 2002; Volund and Hansen, 2000)
Nysted (Rødsand I)	Denmark	2003	Operation	166	Siemens 2.3 MW	6-12	10	Gravity Caisson Foundation	(Aarsleff, 2003; Thomsen et al., 2007)
Breitling	Germany	2006	Operation	2.5	Nordex 2.5 MW	2	0.5	GBS	–
Lillgrund	Sweden	2007	Operation	110	Siemens 2.3 MW	7-11	7	Gravity Caisson Foundation	Jeppsson et al. (2008)
Sprogø	Denmark	2009	Operation	21	Vestas V90 MW	10-16	10	Gravity Caisson Foundation	(Aarsleff, 2022)
Thornton Bank Phase I	Belgium	2009	Operation	30	Senvion 5 MW	18-24	30	Gravity Caisson Foundation – Conical slab	(Peire et al., 2009)
Rødsand II	Denmark	2010	Operation	207	Siemens 2.3 MW	7.5-12.5	8	Gravity Caisson Foundation	(Aarsleff, 2016; L. Krogh et al., 2005)
Avedøre Holme	Denmark	2011	Operation	10.8	Siemens 3.6 MW	2	–	Solid Concrete Plate	(Dong, 2008; Sorensen, 2009)
Vindpark Vänern	Sweden	2012	Operation	30	WWD 3 MW	4-10	7	Rock anchored foundation	Enmark and Oebrink (2010)
Hydropower Rudong I	China	2012	Operation	20	CSIC HZ H102-4.0 2 MW	3.5	2.8	GBS	–
Karenham	Sweden	2013	Operation	48	Vestas 3 MW	3.8	3.8	Gravity Caisson Foundation	–
Hydropower Rudong II	China	2015	Operation	80	Siemens 2.5 MW	3.5	2.8	GBS	–
Blyth	UK	2017	Operation	41.5	V 164 8 MW	35	5.7	Gravity Caisson Foundation	(Bam nutall, 2018; Bam nuttall, 2018)
Pori-Tahkolouto	Finland	2017	Operation	42	Siemens 4 MW	9-13	0.5	Gravity Caisson Steel Foundation	Eranti et al. (2011)
Fécamp	France	Planned for 2023	Under construction	497	SWT-7.0 MW	25-30	13-22	Gravity Caisson Foundation – Conical slab	(Boskalis and N.V., 2020; Parc éolien en mer de Fécamp, 2019)

Tabla 1 Lista de diecisiete (17) casos de estudio de cimentaciones de aerogeneradores de gravedad (Vázquez et al, 2022)

A continuación, se revisan en detalle algunos de los parques eólicos enumerados y las cimentaciones empleadas en ellos, con al menos un caso de cada generación.

- Parque eólico Vindeby

Como ya se ha comentado anteriormente Vindeby fue el primer parque eólico marino del mundo, instalado en 1991 frente a la costa de la isla de Lolland en Dinamarca. Según la información disponible en *tethys.pnnl.gov*, constaba de 11 turbinas Bonus Energy de 450 kW cada una, un total de 5MW instalados, y fue desmantelado en septiembre de 2017.

Tal y como puede verse en la figura 15, extraída del capítulo 4 de los videos producidos por Orsted para homenajear el 30 aniversario del parque eólico Vindeby, “The Vindeby legacy”, las

cimentaciones consistían en una losa circular de hormigón armado y un pedestal tronco cónico dividido en celdas. Se ubicaron en aguas poco profundas entre 2 y 6 m, sobre lechos de arcilla y arena. El peso variaba entre 347-587 toneladas según la profundidad de la posición.



Figura 15. Construcción de cimentaciones del parque eólico de Vindeby (www.orsted.com)

Para su instalación, las bases se lastraban y remolcaban flotando semisumergidas hasta su posición final.

- **Parque eólico Middelgrunden**

El parque eólico Middelgrunden está ubicado a unos 3 km de la costa de Copenhague, Dinamarca, en el estrecho de Oresund entre Dinamarca y Suecia. Comenzó sus operaciones en 2001 con una capacidad instalada de 40 MW y 20 turbinas de 2 MW cada una (www.power-technology.com).

Las cimentaciones de gravedad utilizadas son de primera generación, con una losa circular de 16 m de diámetro, un fuste hueco y la parte superior cónica (figura 16) para reducir las cargas de hielo (www.middelgrunden.dk).

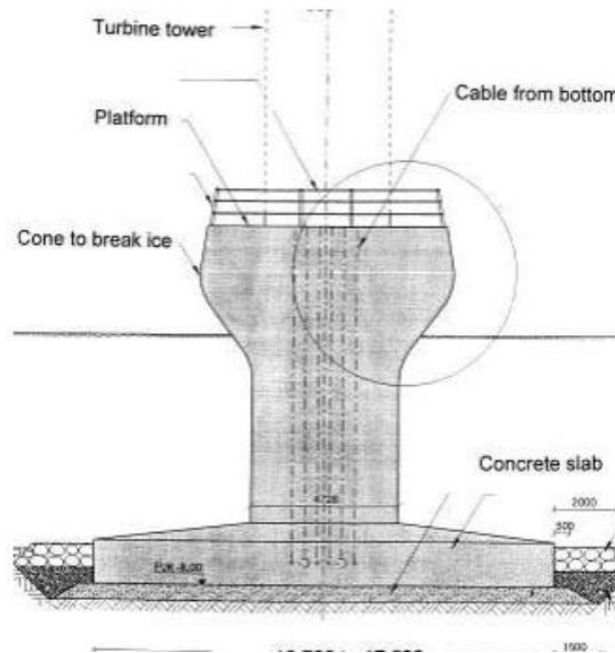


Figura 16. Sección del diseño de las cimentaciones del parque eólico de Middelgrunden (www.middelgrunden.dk)

La fabricación tuvo lugar en un dique seco del puerto de Copenhague (www.peri.com), y se ubicaron en posiciones entre 4 y 8 metros de profundidad.

- **Parque eólico Nysted I**

El parque eólico offshore Nysted I está ubicado en el Mar Báltico, al sur de la isla de Lolland en Dinamarca. Fue construido por la empresa ENERGI E2 y entró en operación en 2003. Consta de 72 aerogeneradores Bonus 2.3 MW, con rotores de 82 metros de diámetro y una altura de buje de 70 metros. La potencia total instalada es de 165,6 MW (www.thewindpower.net).

Las cimentaciones de gravedad son de segunda generación, cajones abiertos hexagonales de hormigón armado en la base y un fuste de forma tronco cónica invertida (figura 17). Con diámetro exterior de 27 metros y una altura total de 11 metros, y ubicadas en calados de entre 6 y 10 metros, el peso de cada GBS es de aproximadamente 5400 toneladas (Garcia et al., 2022).



Figura 17. Instalación de cimentación en el parque eólico de Nysted I (SBM Offshore)

Fueron construidas en dique seco, remolcadas sobre pontonas, y ubicadas en profundidades entre 6-10 metros. Finalmente se lastraba el interior con arena para dar estabilidad (Vindeby Offshore Wind Farm, 2021).

- Parque eólico Lillgrund I

Lillgrund es un parque eólico marino localizado a 7 km de la costa sur de Suecia en el estrecho de Öresund, entrando en operación en 2007 (Jeppsson et al., 2008). Cuenta con 48 turbinas Siemens de 2.3 MW, sumando una capacidad total de 110 MW (Vattenfall, 2008).

Las cimentaciones de gravedad empleadas son de segunda generación, con un diseño muy similar al del parque eólico Nysted I, cajones abiertos hexagonales en la base y un fuste de forma tronco cónica invertida (figura 18). Se fabricaron 5 alturas de bases entre 10.3 y 14.3 m, con diámetros de 19 m. Las bases llenas de lastre pesaban entre 2102 y 2254 toneladas (Flodérus, 2008).



Figura 18. Transporte de cimentaciones (Vattenfall, 2008)

Las bases se prefabricaron directamente sobre barcasas de transporte en astilleros de Polonia. Luego se remolcaron flotando hasta la ubicación final donde tras posarlas controladamente en el lecho marino con ayuda de chorros de agua se lastraban llenando el interior con arena y grava (Jeppsson et al., 2008).

- **Parque eólico Thorntonbank I**

El parque eólico Thorntonbank I, completado en 2009, está ubicado a unos 26 km de la costa de Bélgica en el Mar del Norte. Cuenta con 6 turbinas de 5 MW cada una, alcanzando una capacidad total de 30 MW (<https://www.4coffshore.com>).

Las cimentaciones de gravedad son de tercera generación, con una losa circular de 23.5 m de diámetro y espesor variable entre 0,7 y 1,5 metros, un fuste troncocónico hueco y un fuste cilíndrico (figura 19), ambos de 0,5 metros de espesor (<https://windeurope.org>). Cada cimentación pesaba entre 2800-3000 toneladas vacía, con una cuantía aproximada de 200 kg de acero por metro cubico de hormigón de armadura pasiva y 32 cables pretensados.



Figura 19. Construcción de cimentaciones de gravedad en el parque eólico Thorntonbank I (Wikimedia)

Fueron fabricadas en tierra firme en aproximadamente 6 meses, y transportados parcialmente sumergidas desde el muelle hasta su posición (<https://www.offshorewind.biz>). La preparación del lecho marino consistió en dragado y deposición de dos capas de roca triturada.

- **Parque eólico Fécamp**

El parque eólico de Fécamp está situado frente a las costas de Normandía, Francia. Consta de 83 aerogeneradores de última generación con una potencia unitaria de 7 MW, y una potencia total instalada de 497 MW (EDF Renouvelables, 2023). Se extiende sobre una superficie de 75 km² y la producción anual estimada es de 1.995 GWh, suficiente para abastecer el consumo doméstico de 770.000 habitantes (Le Marin, 2022).

Las cimentaciones de gravedad de este parque (figura 20) son de la tercera generación, cada una con un peso de 5000 toneladas (Saipem, 2022), tienen una altura de 32 metros y un diámetro de 31 metros en la base (Bourriot, 2022).



Figura 20. Acopio de cimentaciones en dique, parque eólico de Fécamp (www.saipem.com)

Fueron construidas en los astilleros de Le Havre en un periodo de 2 años. Luego fueron remolcadas y posicionadas en el lecho marino. La instalación de las 71 cimentaciones se realizó en menos de 2 meses (Saipem, 2022).

Fécamp será el segundo parque eólico marino de Francia y el primero a gran escala en utilizar cimentaciones GBS (parc-eolien-en-mer-de-fecamp.fr).

- Parque eólico Blyth

El parque eólico offshore Blyth ubicado a 5 km frente a la costa de Blyth, Northumberland, en el Mar del Norte, consta de 5 aerogeneradores Vestas V164 de 8.3 MW cada uno, con rotores de 165 m de diámetro. La potencia total instalada es 41.5 MW (www.edf-renouvelables.com).

Las cimentaciones de gravedad utilizadas son de cuarta generación (figura 21), con un fuste cilíndrico de acero empotrado en un cajón hueco de hormigón armado. Cada una tiene 30 m de

diámetro en su base, 60 m de altura y 15.000,00 toneladas de peso (Blyth Offshore Demonstrator, 2017).



Figura 21. Remolcado y acopio de cimentaciones en el parque eólico de Blyth (www.powerandcables.com)

La construcción se llevó a cabo en un dique seco y luego se remolcaron semisumergidas a su ubicación final, donde tras posarse a profundidades de hasta 40 m. Antes de instalar las turbinas se lastraron, como es común en esta tipología, rellenando el interior con arena o gravas, (Blyth Offshore Demonstrator, 2017).

3.2. Tipos de cargas actuantes sobre aerogenerador

A lo largo de su vida útil los aerogeneradores marinos se ven expuestos a una amplia gama de cargas de diferente naturaleza. Comprender y analizar estas cargas correctamente es esencial para un diseño seguro.

El viento, la misma fuente de energía es al mismo tiempo una de las principales fuerzas actuantes sobre casi toda la estructura. Su velocidad y dirección afectan directamente a la respuesta estructural de las palas del rotor y la torre. La fuerza del viento actúa sobre las palas, generando un momento de flexión que se transmite a la torre, además de actuar directamente sobre esta.

La variación del nivel del mar también es un componente importante a la hora de tener en cuenta acciones sobre la estructura, ya que oscilan entre los 0 y 11 metros, llegando a alcanzar hasta 17 metros en casos como Bahía de Fundy, Canadá.

Además del viento, las olas y variaciones de nivel del mar, también pueden considerarse otras acciones en función del emplazamiento, como las corrientes marinas, la sismicidad, el hielo, huracanes y el tráfico marítimo.

- ***El Viento***

Lo primero que hay que tener en cuenta con el viento es que no es constante ni en el espacio ni en el tiempo. Esto quiere decir que un mismo intervalo de tiempo el aire ejerce una presión diferente según su posición ya que su velocidad y densidad varían en función de la presión atmosférica, temperatura y humedad. Al mismo tiempo para una misma posición estas propiedades también variarán en función del tiempo.

La fuerza con la que el viento actúa sobre una superficie se calcula como:

$$F = 0.5 * \rho * A * V^2 * C_d$$

Donde:

F : representa la fuerza del viento sobre la superficie expuesta.

ρ : (ρ) es la densidad del aire.

A : es el área efectiva de la superficie perpendicular al flujo del viento.

V : es la velocidad del viento relativa a la superficie.

C_d : es el coeficiente de arrastre, que depende de la forma y rugosidad de la superficie, es una propiedad específica de cada objeto estructural.

Se puede generalizar que la velocidad del viento aumenta con la altura más de lo que disminuye su densidad, por lo que a mayor altura mayor es la fuerza de empuje de este. Es por ello que se busca colocar el rotor a la mayor altura posible dentro de las limitaciones técnicas actuales. En la figura 22 se representa el perfil variable del viento, donde se puede apreciar su variación con la altura respecto a la rasante.

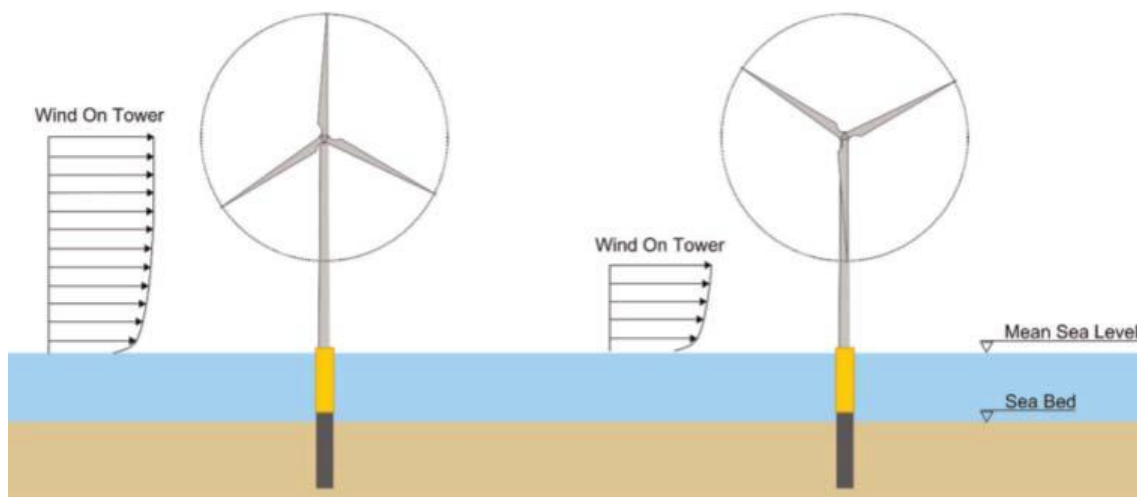


Figura 22. Perfil vertical del viento y efecto según la posición de la pala (Bhattacharya, 2014)

Esta figura también sirve para explicar el efecto fundamental del viento sobre el aerogenerador. Para ello es importante entender que la frecuencia natural del rotor corresponde a la velocidad de giro del rotor, y dado que esta es variable según la velocidad del viento, la frecuencia natural resultante es un rango de frecuencias que se denomina 1P. Por otro lado, el paso de las palas

frente a la torre resulta en una disminución de carga por efecto sombra, esta variación de carga dinámica tiene otro rango de frecuencias el cual es una relación directa de los valores extremos de 1P por el número de palas que tiene el aerogenerador, en un caso como el de la figura 15 sería 3P.

En la figura 23 puede apreciarse ambos rangos de frecuencias con sus márgenes de seguridad (líneas discontinuas), indicando los tipos de diseño posibles (*soft-soft*, *soft-stiff* y *stiff-stiff*) para evitar que la frecuencia del conjunto de la estructura coincida y entre en resonancia.

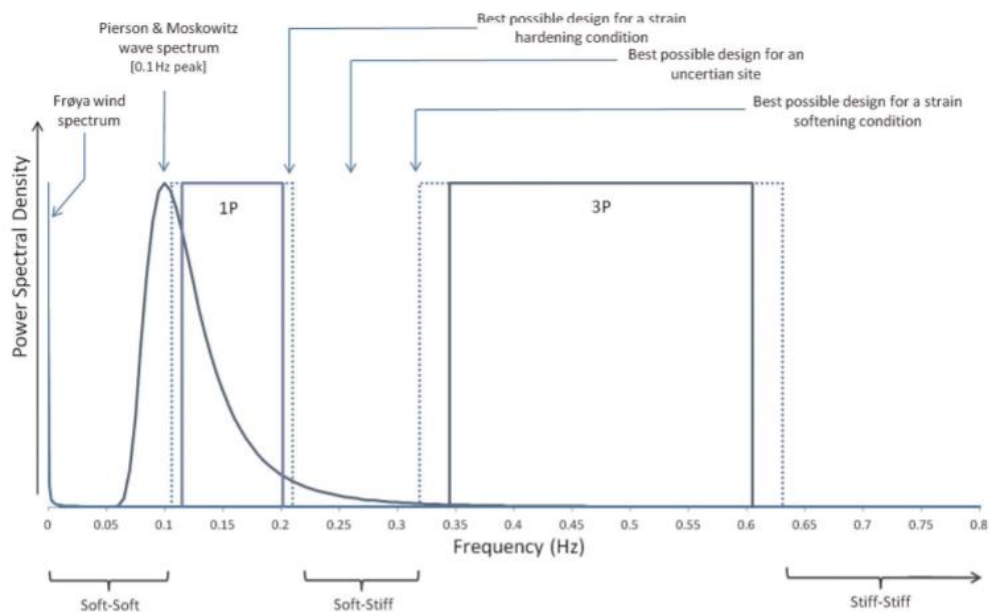


Fig. 4 Frequency spectrum of the dynamic loads showing design choices

Figura 23. Densidad espectral de energía de cargas dinámicas que muestran las posibilidades de diseño: *soft-soft*, *soft-stiff* y *stiff-stiff* (Bhattacharya, 2014)

- El Oleaje

El oleaje es una consecuencia de la interacción entre el viento y la superficie del agua. Las perturbaciones generadas en esta por el viento generan ondas que se pueden propagar en cualquier dirección. Estas perturbaciones, u oleaje, tienen una altura, longitud de onda y periodo característico según las condiciones meteorológicas y topografía submarina del lugar.

El efecto del oleaje sobre las estructuras puede dividirse en dos categorías:

- Carga estática: La columna de agua genera una fuerza vertical (empuje hidrostático) equivalente al peso del volumen de agua equivalente ocupado por el cuerpo afectado. Esta carga se calcula utilizando el principio de Arquímedes.
- Carga dinámica: Es la producida por las variaciones de la presión hidrostática debido al movimiento rotacional de la onda del oleaje. Este movimiento varía en función de la profundidad relativa, para aguas de profundidad indefinida se considera idealmente circular, mientras que en aguas someras o de transición esta rotación se transforma en una elipsis. Como puede observarse en la Figura 24, este movimiento de rotación es menor conforme aumenta la profundidad, teniendo su máximo a nivel de superficie y llegando a ser nulo en el lecho marino para profundidades indefinidas. Esta profundidad relativa es una relación directa entre el calado y la longitud de onda del oleaje.

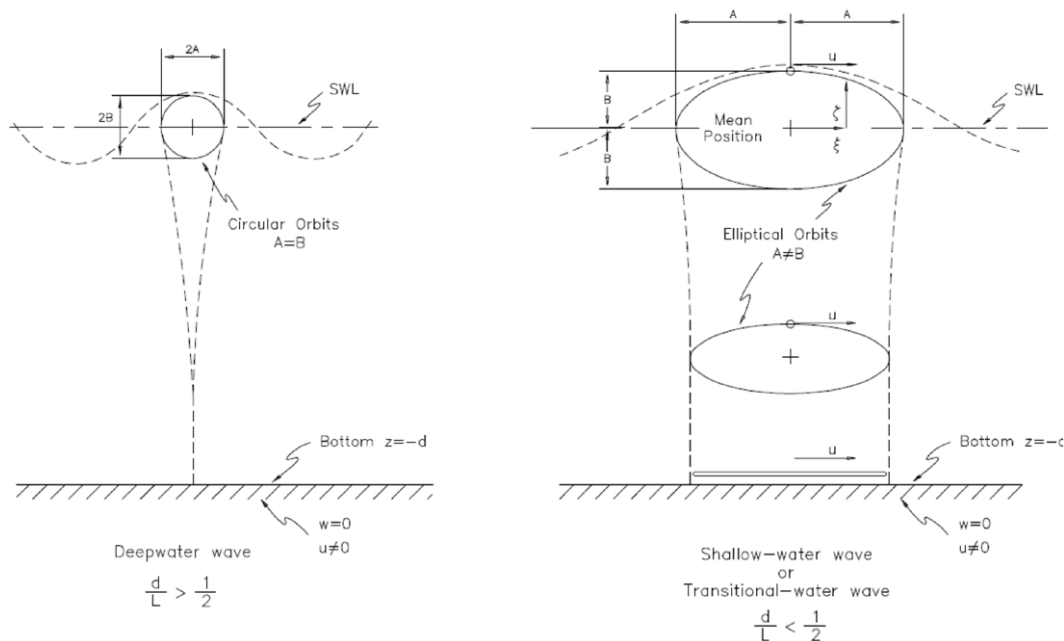


Figura 24. Movimiento rotacional del oleaje

El oleaje se caracteriza en régimen medio (condiciones habituales) y régimen extremal (temporales) y sus parámetros principales son la altura significativa, periodo pico, dirección y espectros. Los esfuerzos que ejerzan las olas sobre las estructuras dependen de la relación de estos parámetros con la profundidad.

Para recopilar series temporales representativas de dichos parámetros se instalan las boyas ancladas en un emplazamiento y miden durante meses o años de forma que podamos caracterizar con suficiente fiabilidad los diferentes oleajes que se dan en una zona.

Estos datos registrados se representan gráficamente en las rosas de oleaje (Figura 25), que nos proporcionan la distribución direccional del oleaje en un punto. Mediante un histograma circular se muestra la frecuencia relativa de procedencia del oleaje desde cada dirección.

Rosa de Altura Significante (m) para Oleaje - Boya de Villano-Sisargas

Periodo: 1998 - 2022 - Eficacia: 82.87%

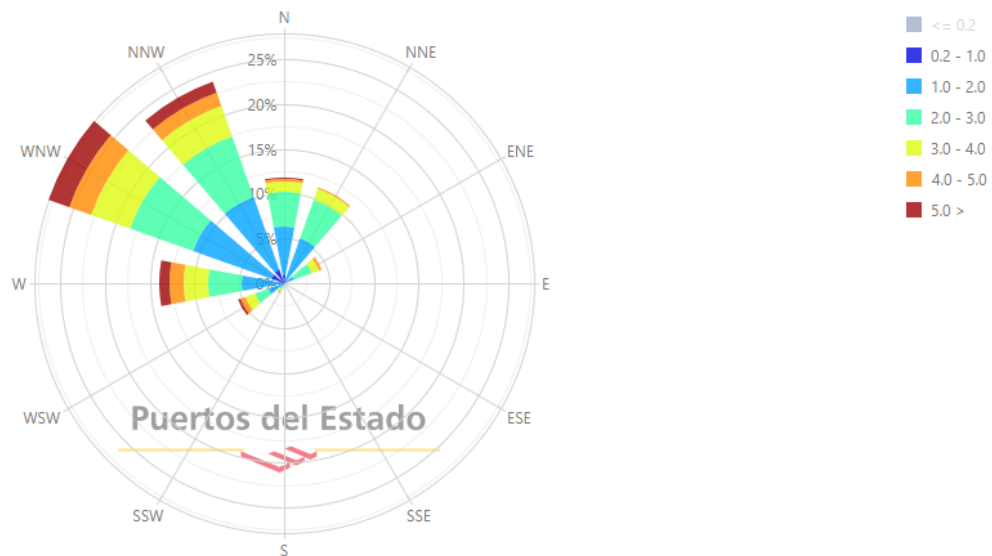


Figura 25. Rosa de Oleaje de la Boya de Villano-Sisargas (Puertos del Estado, 2023)

Esto permite identificar la dirección predominante del oleaje y posibles direcciones secundarias. Es información muy valiosa para orientar adecuadamente la cimentación y diseñar protecciones frente al oleaje dominante.

Un factor muy importante a la hora de caracterizar el oleaje en la ubicación de la estructura es saber si la ola está rota o no. El efecto Shoaling, explicado gráficamente en la Figura 26 obtenida del programa COMET, describe la influencia de la proximidad del fondo sobre la velocidad del oleaje cuando se encuentra en aguas poco profundas.

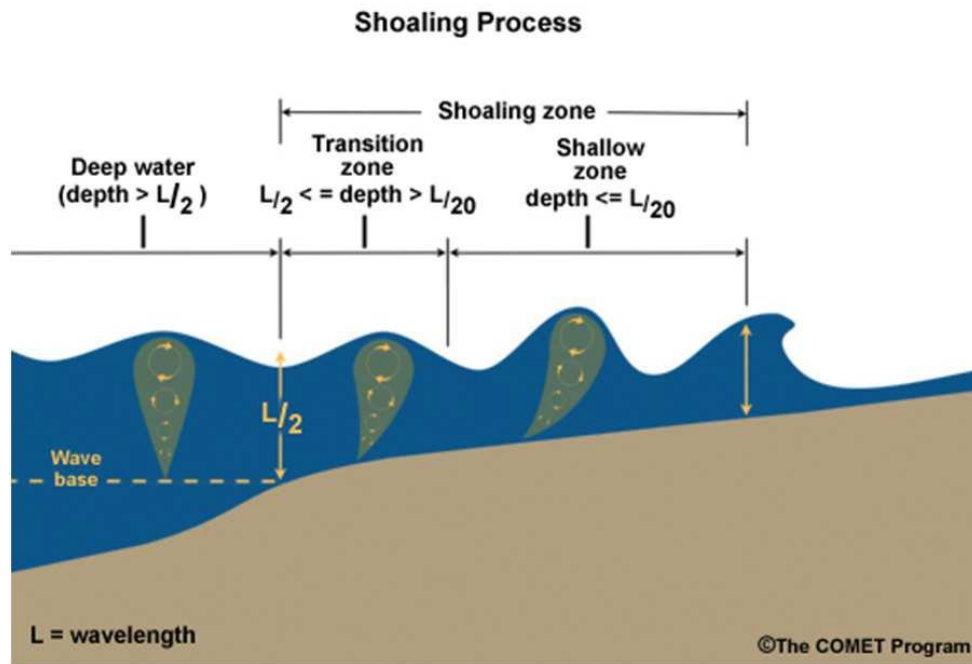


Figura 26. Propagación del oleaje y efecto Shoaling (COMET, 2006)

Cuando el oleaje siente el fondo disminuye su velocidad y transforma esa energía cinética en energía potencial, es decir, incrementa su altura, esto sucede hasta que se vuelve inestable y rompe, en ese momento libera gran parte de su energía de forma turbulenta.

- **Niveles del Mar**

El nivel del mar es variable, y como se ha explicado anteriormente la profundidad es un factor importante en los esfuerzos que el oleaje puede ejercer sobre las estructuras. Aunque hay muchos factores que influyen en esta variación, los más considerables y estudiados son las mareas astronómicas y meteorológicas.

La marea astronómica es la variación del nivel del mar debido a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol.

La marea meteorológica es la variación del nivel por efecto del viento y diferencias de presión atmosférica.

- ***Otras cargas***

Existen otras cargas actuantes que deben tenerse en cuenta pero que no han sido aplicadas en el modelo objeto de este trabajo, y son:

- Corrientes: pueden generar esfuerzos y socavación del lecho. Se estudian dirección, velocidad y variabilidad.
- Hielo: puede impactar contra la estructura. Se estudian concentración, espesor, velocidad, probabilidad de icebergs.
- Sismicidad: puede requerir análisis sísmico. Se estudia amenaza sísmica del área.
- Huracanes: viento y oleaje extremos. Se estudian trayectorias y frecuencias.
- Crecimiento de organismos: aumento de cargas y rugosidad. Se estudian tasas de crecimiento.
- Tráfico marítimo: posible impacto de embarcaciones. Se estudian rutas y densidad de tráfico.

3.3. Normativas y Estándares de Diseño

Los estándares actuales para estructuras de eólica marina provienen de la evolución de códigos previos del ámbito marítimo como la industria petrolera y naval. A continuación, se desarrollarán algunas de los más importantes.

- ***Det Norske Veritas (DNV)***

DNV (www.dnv.com) es una de las principales sociedades de clasificación y aseguramiento de calidad para la industria marítima y energética offshore. Fue establecida en 1864 en Noruega inicialmente para la clasificación de buques. En 2013 DNV y Germanischer Lloyd (GL), otra entidad certificadora, se fusionaron pasando a llamarse DNV GL. Finalmente, en enero del 2021 DNV GL cambia de nombre otra vez a DNV. Según un comunicado oficial de DNV en su web (www.dnv.es), sobre las consecuencias de este cambio, todos los certificados con el nombre DNV GL seguirán siendo válidos.

Ha contribuido al desarrollo de estándares técnicos para buques, plataformas petroleras y más recientemente turbinas eólicas offshore. Algunos ejemplos son las “*DNV Rules for Classification of Ships*”, “*DNV-OS-C101*” para plataformas de acero, y “*DNV-OS-J101*” para estructuras soporte de turbinas eólicas marinas.

La DNV-OS-J101 (*DNV Offshore Standard*) proporciona requisitos técnicos para el diseño estructural de plataformas fijas offshore, incluyendo estructuras soporte de turbinas eólicas. Fue publicada originalmente en 2004 y actualizada en varias revisiones desde entonces.

Esta norma es ampliamente utilizada en la industria eólica offshore junto con la DNV-OS-J102 enfocada en aerogeneradores. Cubre temas clave como:

- Materiales y fabricación de estructuras de acero: requisitos para chapas, perfiles, tuberías, soldaduras.
- Cargas ambientales: modelos para olas, viento, corrientes, mareas, hielo. Combinación de cargas.
- Análisis estructural: métodos de elementos finitos, análisis de fatiga y fractura.

- Diseño de uniones y secciones: resistencia estática y fatiga de componentes.
- Integridad estructural: inspección, monitoreo y mantenimiento. Reparaciones.

Esta norma internacional es un referente para ingenieros diseñando estructuras soporte seguras y optimizadas de turbinas eólicas marinas. Permite cumplir con las mejores prácticas y regulaciones técnicas del sector.

- ***American Petroleum Institute (API)***

API (www.api.org) es una asociación que representa a la industria petrolera y del gas en Estados Unidos. Fue fundada en 1919 y cuenta con más de 600 organizaciones miembros.

La API ha desarrollado más de 700 estándares técnicos relacionados con el sector petrolero, incluyendo muchos enfocados en plataformas marinas. Algunos ejemplos destacados son:

- API RP 2A para el diseño de estructuras fijas offshore. Engloba cargas, análisis, materiales, fabricación, instalación. Actualizado frecuentemente desde los años 50.
- API RP 2MET para el diseño y análisis de plataformas petroleras y estructuras similares. Se trata de base para diseño conceptual.
- API RP 2SIM sobre integridad estructural para plataformas fijas. Trata la evaluación de daños, reparaciones e inspección.
- API RP 2T para la optimización de diseño de estructuras marina ancladas en tensión al fondo marino (TLP).

Estos estándares API se complementan con códigos de otras organizaciones como ISO, ASME, AWS para proveer un marco regulatorio completo al diseño de instalaciones offshore.

- ***Normas ISO***

La ISO (www.iso.org) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización, fundada en 1947 y con sede en Ginebra, Suiza. Cuenta con representantes de 165 países y ha publicado más de 24.000 estándares internacionales.

La ISO desarrolla normas técnicas en prácticamente todos los campos, incluyendo estándares relevantes para la ingeniería offshore y estructuras marinas, algunas de las más destacadas son:

- ISO 19902:2007: requisitos y recomendaciones generales para el diseño y construcción de estructuras marinas fijas de acero.
- ISO 19903:2019: evaluación de la resistencia estructural de estructuras marinas de acero fijas.
- ISO 19904-1:2016: requisitos generales para estructuras marinas de hormigón.
- ISO 19901-1:2015: requisitos meteorológicos y oceanográficos para el diseño y operación de instalaciones marítimas.

Estos estándares ISO son reconocidos y aplicados mundialmente en el diseño de plataformas petroleras, cimentaciones y estructuras de soporte para turbinas eólicas marinas. Cubren aspectos de cargas ambientales, análisis estructural, materiales, integridad estructural, entre otros.

- ***Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)***

BSH (www.bsh.de) es la Oficina Federal de Navegación Marítima e Hidrografía de Alemania y ha desarrollado estándares técnicos para instalaciones marítimas en aguas alemanas, las más relevantes son:

- BSH 7005: contiene requisitos para el diseño, construcción y operación de plataformas fijas y estructuras de soporte de turbinas eólicas offshore. Cubre condiciones ambientales, análisis de cargas, diseño estructural, inspección, etc.

- BSH 7006: especifica requisitos mínimos para investigaciones geotécnicas marinas destinadas al diseño de cimentaciones.
- BSH 7013: establece requisitos para la protección catódica y recubrimientos para estructuras de acero marinas.
- BSH 7008: provee requisitos específicos para el diseño geotécnico y estructural de cimentaciones de aerogeneradores eólicos marinos.

Estos estándares BSH son ampliamente utilizados en Alemania y han servido de base para códigos internacionales como las normas DNV-OS-J101.

- ***Eurocódigos***

Según lo establecido por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, los Eurocódigos, desarrollados por el Comité Europeo de Normalización (CEN) desde los años 1990, conforman un conjunto de normas europeas que establecen reglas de diseño estructural para obras de construcción, que los Organismos Nacionales de Normalización de cada país, en España UNE, se encargan de publicar la norma nacional compuesto por el Eurocódigo que aplique para cada norma y un anejo nacional.

Los Eurocódigos más relevantes para el diseño de estructuras de soporte de aerogeneradores marinos son:

- EN 1990 Eurocódigo 0: Bases de diseño estructural. Establece requisitos de seguridad, acciones, combinación de acciones, etc.
- EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Engloba cargas de viento, oleaje, corrientes y hielo.
- EN 1993 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Reglas de diseño para estructuras metálicas.
- EN 1997 Eurocódigo 7: Diseño geotécnico. Requisitos para diseño de cimentaciones.

Estos Eurocódigos (disponibles en “www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/21-eurocodigos”) constituyen normas europeas robustas que pueden aplicarse en el diseño conceptual y detallado de estructuras marinas complementándolas con estándares offshore específicos como la ISO 19902 y la DNV-OS-J101.

- ***Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM)***

Las ROM son documentos técnicos publicados por Puertos del Estado de España (www.puertos.es) que establecen metodologías de análisis y diseño de obras marítimas y portuarias. Las principales ROM relacionadas con estructuras offshore son:

- ROM 0.0-01. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas. Establece requisitos generales de diseño como estados límite, vida útil, acciones, etc.
- ROM 0.3-91. Recomendaciones para el análisis del clima marítimo y determinación de acciones ocasionadas por el oleaje.
- ROM 0.4-95. Acciones Climáticas para el Proyecto de las Obras Marítimas y Portuarias (II): Viento.
- ROM 0.5-05. Geotecnia para las Obras Marítimas y Portuarias.
- ROM 1.0-09. Recomendaciones generales para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre. Aplicable al diseño conceptual de estructuras offshore.

Actualmente está en desarrollo la ROM 1.2 para estructuras de abrigo fijas y flotantes.

Estas recomendaciones aportan metodologías prácticas y se pueden complementar con códigos internacionales más específicos como la ISO 19902 y la DNV-OS-J101 para el diseño detallado de estructuras marinas para aerogeneradores.

Para finalizar la revisión de las normativas y estándares de diseño se presenta la tabla ## como resumen de lo visto.

Entidad	Descripción
Det Norske Veritas (DNV)	- Organismo de certificación noruego fundado en 1864. - Activo en sectores marino, energético y de infraestructura. - Desarrolla estándares técnicos para diseño y construcción marítimos.
American Petroleum Institute (API)	- Organización estadounidense que desarrolla estándares para la industria de petróleo y gas. - Cubre temas como equipos, operaciones y mantenimiento. - API RP 2A: estándar de diseño de plataformas marinas fijas.
Normas ISO	- Organización internacional para estandarización. - Desarrolla normas para productos, servicios y sistemas. - ISO 19902: estándar de diseño de estructuras marinas.
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	- Agencia marítima y oceanográfica de Alemania. - Regula construcciones marítimas en aguas alemanas. - Desarrolla guías técnicas para el sector eólico offshore.
Eurocódigos	- Conjunto de normas europeas para diseño de estructuras. - Cubren acero, hormigón, mampostería, madera, entre otros. - Se aplican en proyectos terrestres y marítimos.
Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM)	- Conjunto de normas técnicas españolas para ingeniería marítima y portuaria. - Desarrolladas por puertos del estado y CEDEX. - Aplicables al diseño de instalaciones marinas.

Tabla 2 Resumen de normativas y estándares de diseño

3.4. Técnicas de Modelado y Cálculo

Los modelos son representaciones que buscan describir el comportamiento de un sistema bajo ciertas condiciones. Existen dos tipos principales de modelos: los modelos de cálculo numérico y los modelos físicos (Banks et al., 2005). A continuación, se presenta una revisión de las principales técnicas de modelado y cálculo utilizadas actualmente para el análisis, diseño y cálculo de aerogeneradores marinos.

3.4.1. Modelos Numéricos

Los modelos de cálculo numérico consisten en representaciones matemáticas con base de ecuaciones que describen los principios físicos del sistema, cuando estos modelos se vuelven muy complejos se suelen implementar en programas informáticos que agilizan los cálculos (Anderson, 1995). Estos permiten representar sistemas muy complejos, pero requieren ser calibrados con datos experimentales.

3.4.1.1. Métodos computacionales para aerodinámica e hidrodinámica

El diseño y análisis de aerogeneradores marinos requiere modelar adecuadamente la aerodinámica y la hidrodinámica, los métodos analíticos tradicionales tienen limitaciones para representar la compleja física acoplada. Por ello, los métodos computacionales que resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales ofrecen mayor precisión (Otter et al., 2021). A continuación, se detallan los más relevantes.

- *Boundary Element Method (BEM)*

El Método de Elementos de Contorno es un método numérico fue desarrollado inicialmente para aplicaciones en mecánica de fluidos y acústica en los años 1960 y 1970 (Brebbia y Dominguez, 1992).

El principio fundamental del BEM es transformar las ecuaciones diferenciales gobernantes (ej. ecuaciones de Navier-Stokes, acústicas, elásticas) en integrales de contorno usando identidades integrales como los teoremas de Green. Luego, estas integrales de contorno se discretizan sobre los nodos de la malla frontera. Esto resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas que se

resuelve para las variables de interés (ej. velocidad, presión, desplazamiento) (Katsikadelis, 2016).

El BEM es ampliamente utilizado en ingeniería marítima para analizar el comportamiento hidrodinámico de plataformas y estructuras fijas y flotantes. Permite modelar eficientemente efectos como difracción y radiación de olas, interacción fluido-estructura, y fuerzas de arrastre (Wu et al., 2019). Resulta más eficiente que otros métodos como CFD, detallado a continuación, pero tiene limitaciones en geometrías y condiciones de flujo complejas.

- ***Computational Fluid Dynamics (CFD)***

La dinámica de fluidos computacional es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos (Versteeg y Malalasekera, 2007). Se basa en la discretización de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos, como las ecuaciones de Navier-Stokes, en un dominio espacial y temporal. Esto da lugar a un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden resolverse numéricamente.

Las principales áreas de aplicación de la CFD incluyen aerodinámica, transferencia de calor, dinámica de fluidos biomecánicos y procesos químicos. En energía eólica, la CFD se utiliza para modelar turbinas, estelas e interacción aeroelástica con alta fidelidad (Sanderse et al., 2021).

Resulta una herramienta versátil para el análisis avanzado de flujos, con la que obtener información detallada, pero su alto consumo de recursos limita aplicaciones más rutinarias.

- ***Blade Element Momentum Theory (BEMT)***

La teoría del Momento del Elemento de Pala combina la teoría del momento de cantidad de movimiento y la teoría de elemento de pala para determinar la distribución de cargas aerodinámicas a lo largo de las palas (Hansen, 2008).

Por un lado, la teoría de elemento de pala divide cada pala en secciones transversales más pequeñas llamadas elementos. Las fuerzas aerodinámicas se calculan en cada elemento basándose en los coeficientes de sustentación y resistencia de la sección del perfil aerodinámico. Luego, las contribuciones de todos los elementos se integran para obtener las cargas totales en la pala.

Por otro lado, la teoría de cantidad de movimiento modela la interacción entre el flujo de aire incidente y el disco actuador formado por las palas en rotación. Esto permite calcular la velocidad inducida en el disco actuador y la cantidad de movimiento extraída del viento.

Al acoplar estas teorías, la BEMT logra determinar la distribución óptima de ángulo de paso de pala que maximiza la extracción de energía del viento. También predice parámetros importantes como la potencia, el empuje y el torque del rotor (Manwell et al., 2009).

Aunque resulta un método eficiente, presenta limitaciones para modelar efectos transitorios como la aerodinámica no estacionaria debido al movimiento de las palas. Por ello, se han desarrollado métodos, explicados a continuación, como Free Vortex Wake method (Sebastian y Lackner, 2012).

- ***Free Vortex Wake method (FVW)***

El Método de Estela de Vórtices Libres es un método aerodinámico de mediana-alta fidelidad para modelar turbinas eólicas (Sebastian y Lackner, 2012). Captura efectos transitorios en la estela mejor que métodos cuasi-estacionarios anteriormente vistos como BEMT.

Este método discretiza la estela detrás de las palas como vórtices liberados desde los extremos y traza su difusión. Los vórtices inducen velocidades que influyen las fuerzas aerodinámicas en las palas (van Garrel, 2003). Presenta un buen balance entre fidelidad y eficiencia computacional. Es más preciso que BEMT pero mucho más rápido que otros métodos como LES (Large Eddy Simulation) o DNS (Direct Numerical Simulation).

- **Enfoques Híbridos**

Se busca combinar eficiencia de BEMT con precisión de CFD y vórtices en zonas locales. Un enfoque es usar CFD solo alrededor de la pala y BEM lejos.

Otro es acoplar diferentes dominios (pala, estela próxima y lejana). Los métodos híbridos equilibran costo computacional con capacidad de modelar física detallada.

3.4.1.2. Métodos computacionales para mecánica estructural

- *Finite Element Method (FEM)*

El método de elementos finitos (FEM) es uno de los más utilizados en análisis estructurales. Discretiza la estructura en pequeños elementos interconectados mediante nodos. Los elementos más comunes son barra, placas y sólidos. Dentro de cada elemento se definen funciones de forma para aproximar el campo de desplazamientos (Bachynski et al., 2021).

Ensamblando las ecuaciones elementales se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que representa el comportamiento estructural global. Este sistema se resuelve para obtener los desplazamientos nodales. Con ellos se calculan tensiones y se verifica la resistencia.

Esto permite considerar geometrías complejas, comportamientos no lineales de materiales, cargas dinámicas y condiciones de contorno variadas. Requiere discretizaciones finas para unas precisiones altas.

Se utiliza tanto en etapas iniciales de diseño como en verificación detallada de tensiones y deformaciones locales. También se acopla con métodos CFD para analizar interacción fluido-estructura.

- *Finite Volume Method (FVM)*

El método de volúmenes finitos es una técnica computacional ampliamente utilizada en dinámica de fluidos y transferencia de calor. Recientemente también se ha adoptado en el análisis estructural de aerogeneradores offshore (Wang et al., 2018).

Discretiza el dominio en volúmenes de control y conserva el flujo a través de las caras de cada volumen. Para ello, integra las ecuaciones diferenciales en forma integral sobre cada volumen de control.

Esto lo hace apropiado para problemas de turbulencia. También permite considerar discontinuidades y comportamientos fuertemente no lineales.

En comparación con elementos finitos, puede ser más eficiente computacionalmente al minimizar las operaciones de ensamblaje global. Sin embargo, la implementación de condiciones de contorno puede ser más compleja.

FVM es una alternativa atractiva a FEM en problemas específicos de aerogeneradores offshore donde la convección y no linealidades son relevantes, como flujo alrededor de turbinas, dinámica de cables y propagación de fisuras.

3.4.1.3. Métodos computacionales para interacción suelo-estructura

- *Discrete Element Method (DEM)*

El Método de Elementos Discretos es una técnica numérica muy utilizada en ingeniería geotécnica y mecánica de rocas para modelar el comportamiento de medios granulares como suelos, rocas y otros materiales fragmentados (Zhao et al., 2019; Ma et al., 2022).

Fue originalmente propuesto por Cundall y Strack en 1979 para modelar el movimiento e interacción de discos y esferas bajo cargas estáticas y dinámicas (Cundall and Strack, 1979). Posteriormente se extendió a modelar partículas de forma arbitraria en 2D y 3D.

En este método el medio se representa como una colección de partículas discretas que interactúan en sus puntos de contacto a través de fuerzas normales y tangenciales, las cuales se modelan mediante leyes constitutivas (O'Sullivan, 2011; Ma et al., 2022).

El movimiento de las partículas (traslación y rotación) se rastrea calculando en cada paso de tiempo las ecuaciones de Newton-Euler. Permite incorporar en detalle propiedades como forma, tamaño, distribución granulométrica, porosidad, etc. (Ma et al., 2022).

DEM se aplica en problemas como propagación de ondas, penetración, fractura, estabilidad de taludes, interacción suelo-estructura, entre muchos otros (O'Sullivan, 2011; Ma et al., 2022).

Se puede acoplar con CFD, FEM y métodos híbridos pero requiere alto coste computacional (Ma et al., 2022).

3.4.1.4. Programas Informáticos Comerciales

En la actualidad existen varios programas informáticos que emplean uno o varios de los métodos computacionales anteriormente descritos y son usados en el campo de la ingeniería eólica marina y terrestre. Seguidamente se describen algunos ejemplos.

- **FAST/OpenFAST de *National Renewable Energy Laboratory (NREL)***

Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence (figura 27) es un conjunto de módulos desarrollado por NREL para modelado aero-hidro-servo-elástico no lineal de aerogeneradores en dominio del tiempo. Incorpora diferentes módulos acoplados, incluyendo AeroDyn para aerodinámica mediante BEM, HydroDyn para hidrodinámica con teoría de flujo potencial, SubDyn para dinámica de la subestructura, y MoorDyn para líneas de anclaje (Jonkman et al., 2022).

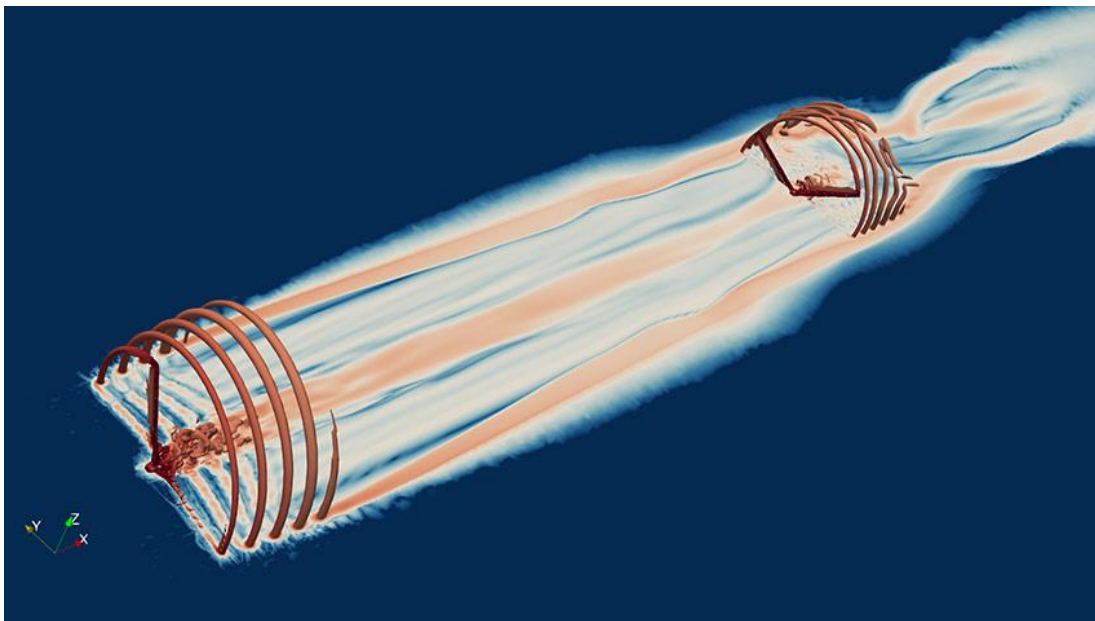


Figura 27. Campo de flujo de dos turbinas calculado con OpenFAST (www.nrel.gov)

Permite simular la turbina, góndola, torre, plataforma y líneas de anclaje de forma integral, calculando cargas, estabilidad y respuesta ante condiciones extremas (Wang et al., 2021). Es ampliamente utilizado en la industria eólica offshore como herramienta de investigación y diseño.

- **HAWC2 de Danmarks Tekniske Universitet (DTU)**

Horizontal Axis Wind turbine simulation Code 2nd generation es un código desarrollado en DTU para análisis aeroelástica de turbinas eólicas. Incorpora un modelo aerodinámico basado en BEM y estelas tipo vórtice, y un modelo estructural de multicuerpo flexible mediante FEM (Larsen y Hansen, 2022).

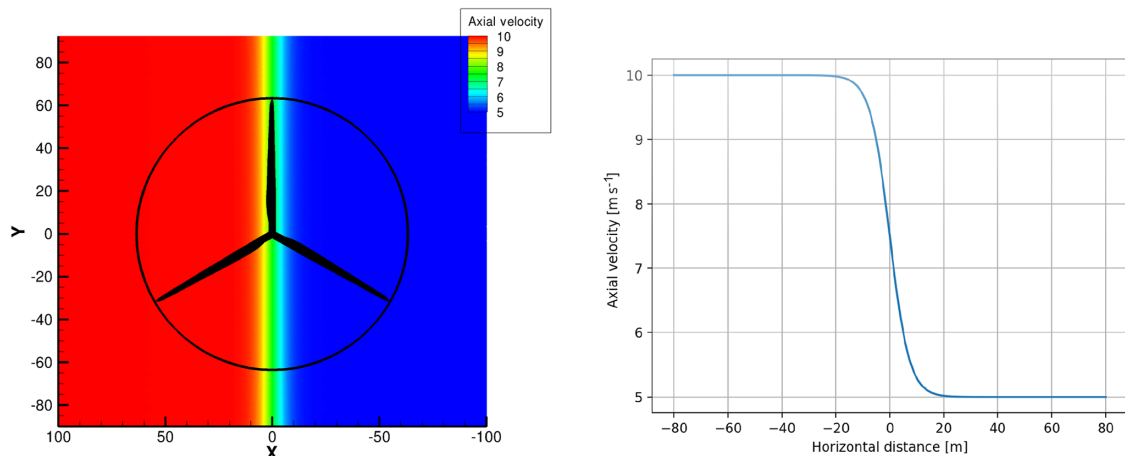


Figura 28. Contorno del campo de velocidad para un aerogenerador (www.hawc2.dk)

Permite analizar palas flexibles, torre y cimentación, incluyendo módulos de control y diferentes tipos de carga. Ha sido extensamente validado para el cálculo de cargas aerodinámicas y respuesta estructural de aerogeneradores fijos y flotantes (Bak et al., 2013).

Se utiliza ampliamente en investigación y como herramienta de diseño en la industria eólica.

- **WAMIT de WAMIT Inc.**

Wave Analysis at MIT es un código desarrollado en *Massachusetts Institute of Technology* para análisis de hidrodinámica mediante teoría de potencial y método de paneles. Como se observa en la figura 29, permite evaluar la distribución de presiones y fuerzas fluctuantes sobre plataformas offshore debido a olas, y calcular coeficientes de radiación, masa, amortiguamiento y restitución (WAMIT, 2022).

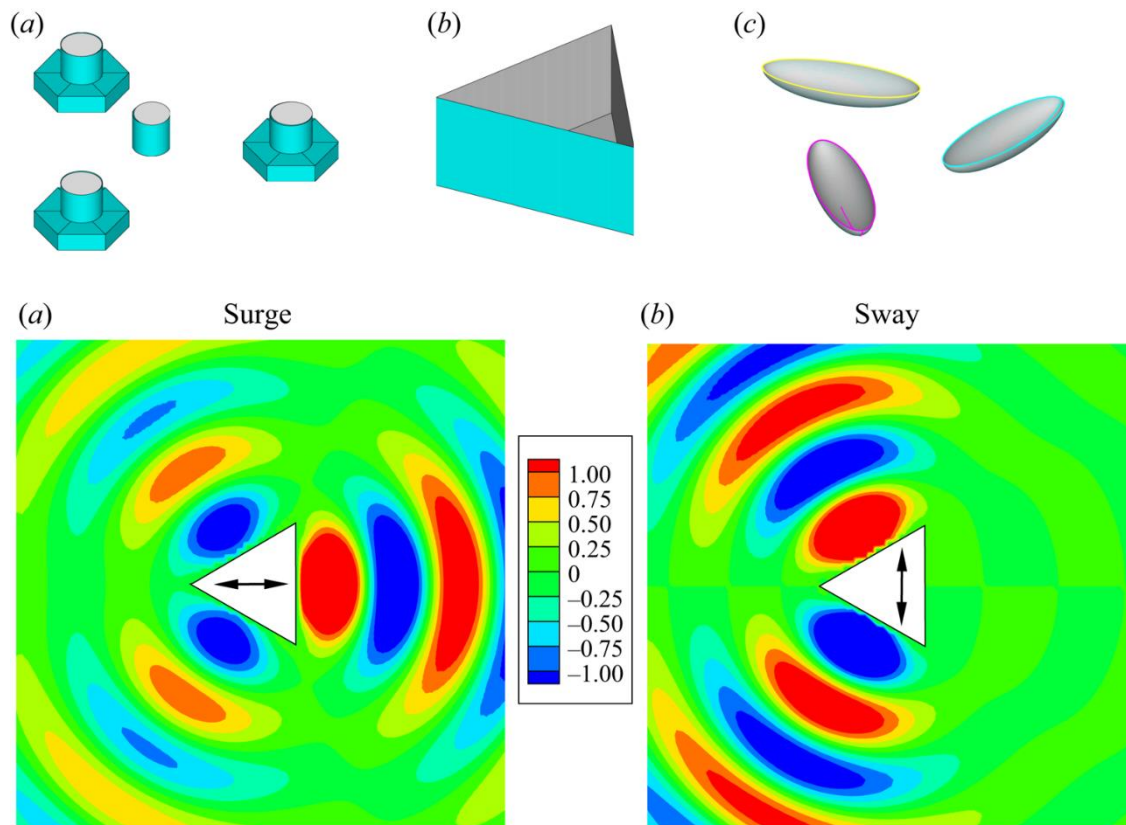


Figura 29. Estructuras flotantes (arriba) y gráficos de contorno de las elevaciones de la superficie modeladas con WAMIT (www.cambridge.org)

Se utiliza para analizar respuesta a olas de plataformas y cuerpos offshore tanto en régimen lineal como no lineal. Sus resultados se acoplan con herramientas integrales de diseño como FAST para un modelado completo de plataformas flotantes.

- OrcaFlex de Orcina Ltd.

OrcaFlex es un programa desarrollado para el análisis dinámico de líneas de anclaje, tuberías, cables y otros componentes marinos. Utiliza el método de elementos finitos para discretizar estos componentes en segmentos, y aplica la teoría de vigas de Euler-Bernoulli para modelar su comportamiento (Orcina, 2022).

Incorpora modelos hidrodinámicos basados en Morison y fuerzas de arrastre para calcular las cargas debidas a corrientes y olas. También incluye efectos de peso, flotabilidad, pretensado y fricción, como puede observarse en la figura 30.

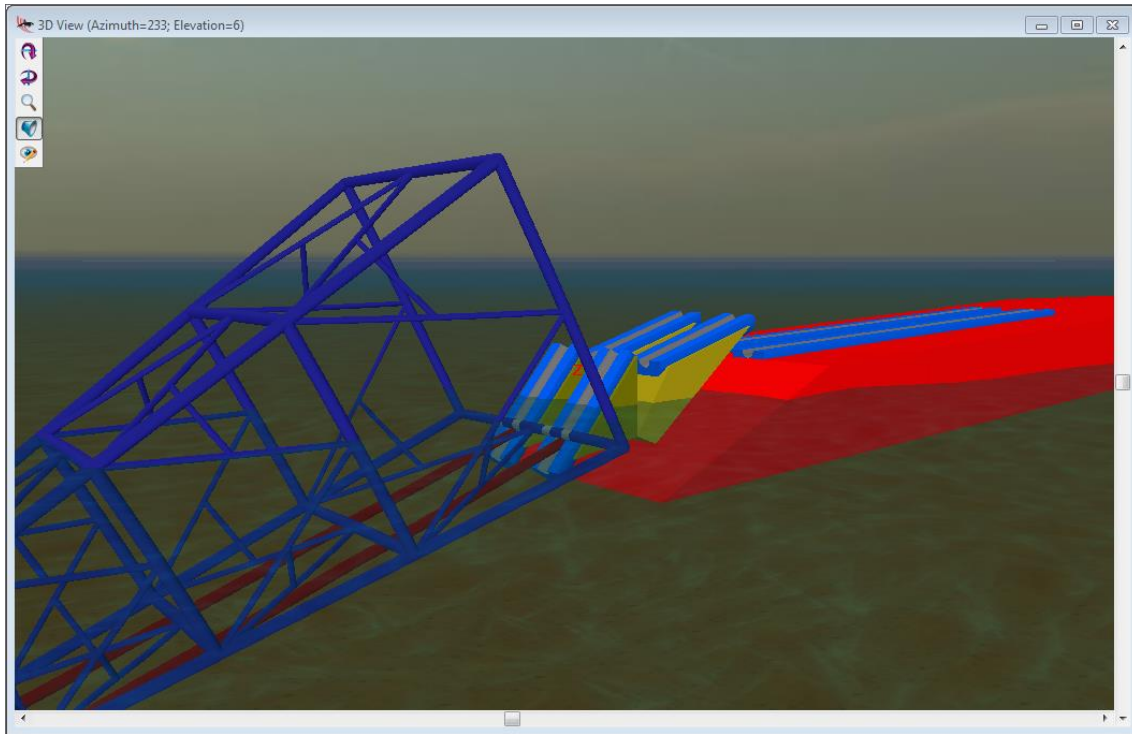


Figura 30. Vista 3D del modelado del posicionamiento de una estructura tipo Jacket (www.orcina.com)

Permite realizar análisis estáticos, cuasiestáticos y dinámicos sujetos a diferentes condiciones de carga. Es ampliamente utilizado en la industria offshore para el diseño de líneas de anclaje y cables submarinos.

En el contexto de aerogeneradores marinos, OrcaFlex destaca por sus capacidades para modelar detalladamente las líneas de anclaje, considerando sus propiedades no lineales y acoplamientos con la dinámica global de la plataforma flotante. Es un complemento valioso a herramientas integrales como FAST.

Bladed de Det Norske Veritas (DNV)

Bladed es un software desarrollado para modelado y simulación de turbinas eólicas. Permite realizar análisis integrado de cargas aerodinámicas, dinámica estructural, controles, y aspectos eléctricos del aerogenerador (DNV, 2022).

Incorpora un modelo aerodinámico basado en BEM junto con modelos avanzados de estela como el *Generalized Dynamic Wake* para capturar efectos no estacionarios. También incluye un modelo estructural de multicuerpo flexible.

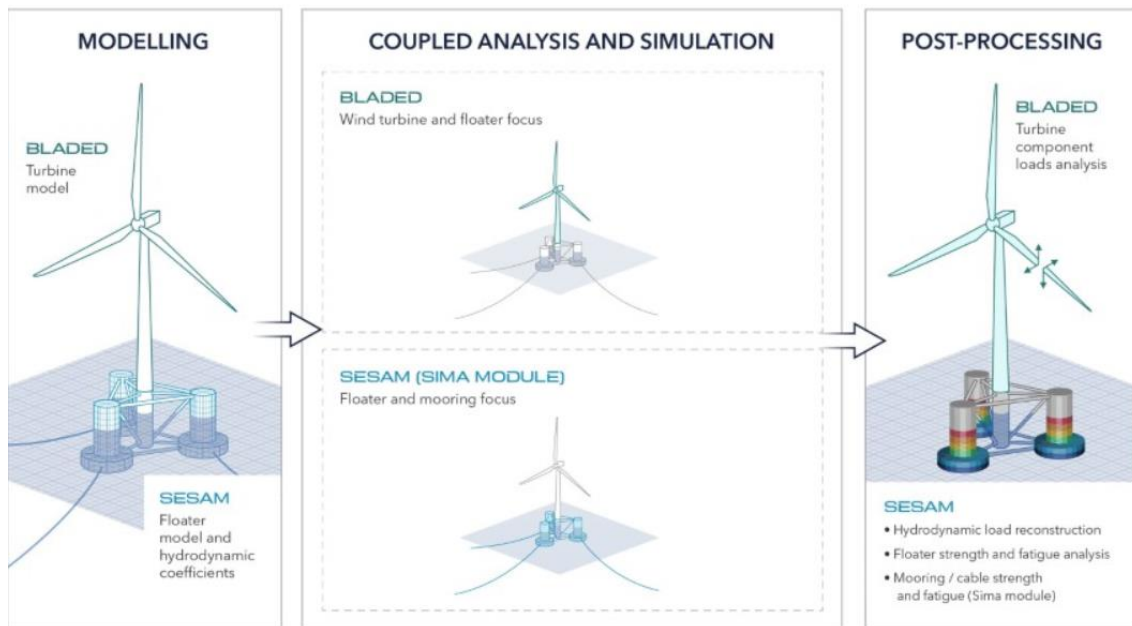


Figura 31. Esquema de flujo de trabajo de BLADED junto al programa SIMA (www.dnv.com)

Bladed cuenta con capacidades para diseño y optimización de palas, así como análisis de cargas extremas y fatiga. Permite modelar una amplia gama de configuraciones de turbinas tanto fijas como flotantes. Es ampliamente utilizado por la industria eólica como herramienta de diseño, certificación y licenciamiento.

Para aerogeneradores marinos, Bladed se suele acoplar con herramientas como SESAM para hidrodinámica y OrcaFlex para líneas de anclaje, logrando un modelado integral de plataformas flotantes.

Anslys AQWA de ANSYS Inc

Anslys AQWA es un software desarrollado por Ansys para análisis hidrodinámico de estructuras offshore basado en la teoría de flujo potencial (Ansys, 2022).

Utiliza el método de paneles para discretizar la superficie sumergida de la estructura y calcular la distribución de presiones debido a oleaje regular e irregular. Permite considerar difracción, radiación y reflexión de ondas, así como efectos viscosos (figura 32).

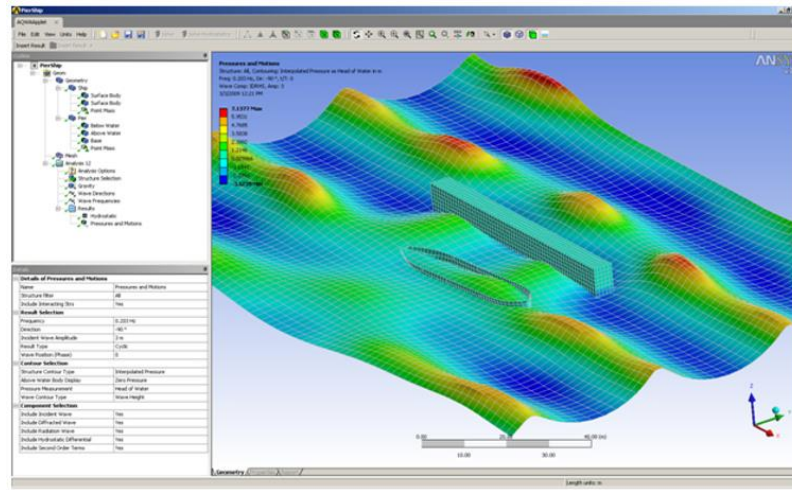


Figura 32. Modelo de interacción hidrodinámica con Ansys AQWA (www.inas.ro)

En el caso de aerogeneradores marinos, AQWA se utiliza para modelar la interacción hidrodinámica de las plataformas fijas o flotantes con oleaje y corrientes. Los resultados se acoplan luego con herramientas como FAST para un análisis integral de cargas y dinámica.

3.4.1.5. Herramientas básicas de predimensionado

Se ha realizado una intensa búsqueda de aplicaciones, programas u hojas de cálculo que permitan obtener un diseño preliminar, como sucede en otras áreas de la ingeniería civil donde fácilmente se pueden encontrar hojas de cálculo, aplicaciones para móvil o plataformas web (figura 33), donde introduciendo parámetros básicos como distancia y peso, cualquier persona con conocimientos básicos de ingeniería pero sin formación en programas de cálculo puede comprobar, por ejemplo, si una viga cumple el requisito de flecha máxima.

Cálculo viga de acero (Gratis)
CTE DB SE-A

DATOS	
GEOMETRÍA	
Tipo de viga (?)	Longitud de viga L(m) (?)
Bi-articulada	6
CARGA PERMANENTE	
Tipo de Carga	Valor de carga p(kN/m) (?)
Uniforme continua	20
SOBRECARGA DE USO	
Tipo de Carga (?)	Valor de carga p(kN/m) (?)
Uniforme continua	30
MATERIALES	
Tipo de Perfil (?)	Tipo de acero (?)
IPN	S275
LIMITACIÓN DE FLECHA	
Límite de flecha (?)	Flecha máxima L/xxx (?)
Límite relativo	L / 300

DETALLES DEL CÁLCULO		
Normativa	Comprobaciones	
» Código Técnico de la Edificación CTE, DB SE-A, Seguridad estructural - Acero	» Cortante (art. 6.2.4 CTE DB SE-A) Vd = 219.4 < V _{ed} = 758.58 OK	
Material	» Flexión (art. 6.2.6 CTE DB SE-A) Md = 329.1 < M _{ed} = 374.03 OK	
» Límite elástico: f _y = 265 N/mm ² » Módulo de elasticidad: E = 210.000 N/mm ²	» Flexión y cortante (art. 6.2.8 CTE DB SE-A) Vd = 219.40 < V _{ed} /2 = 379.29 No necesaria	
Reacciones	» Abolladura del alma (art. 6.3.3.4 CTE DB SE-A) d/t = 24.74 < 70·ε = 65.92 No necesaria	
Esfuerzos pésimos	Flecha máxima	
» Combinación de cargas: G + Q » Momento de cálculo Md = 329.1 kN·m » Cortante de cálculo Vd = 219.4 kN	» Flecha absoluta: 17 mm » Flecha relativa: L / 352.6 » Posición: 3 m (distancia al apoyo "A")	
X(m) (distancia punto A)	Momento (kNm)	Cortante (kN)
0	0	219.4
0.3	62.53	197.46
0.6	118.48	175.52
0.9	167.84	153.58
1.2	210.63	131.64
1.5	246.83	109.7
1.8	276.45	87.76
2.1	299.48	65.82
2.4	315.94	43.88
2.7	325.81	21.94
3	329.1	0
3.3	325.81	-21.94
3.6	315.94	-43.88
3.9	299.48	-65.82
4.2	276.45	-87.76
4.5	246.83	-109.7
4.8	210.63	-131.64
5.1	167.84	-153.58
5.4	118.48	-175.52
5.7	62.53	-197.46
6	0	-219.4

Figura 33. Cálculo de viga online de acuerdo a CTE (www.calculocivil.com)

El resultado de la búsqueda ha sido nulo. No se ha encontrado ninguna aplicación, herramienta o web que permita un cálculo simplificado de ninguno de los componentes o del conjunto general de la estructura de un aerogenerador.

3.4.2. Modelos Físicos

Los modelos físicos son representaciones a escala del sistema real construidas a partir de materiales diferentes (Box & Liu, 1999). Estos modelos no necesitan calibración de datos, pero precisan un escalado.

El escalado del modelo involucra no solo reducir las dimensiones geométricas, sino también escalar adecuadamente otras variables relevantes (Heller, 2011). Algunos de los principales problemas de escalado son:

- Escalado dinámico: se debe conservar la relación entre fuerzas inerciales y viscosas. Esto resulta difícil de lograr alterando la velocidad o viscosidad del fluido en el modelo (Piomelli, 1999).

- Escalado de rugosidad: la rugosidad relativa aumenta en modelos a escala, alterando la fricción sobre superficies (Shen et al., 2011).
- Similitud de materiales: las propiedades de los materiales del modelo, como densidad y elasticidad, difieren de los materiales reales (Kennedy et al., 2001).
- Efectos de tamaño finito: el tamaño finito del modelo altera efectos geométricos como tensión superficial o pérdidas por fricción (Murphy et al., 1994).
- Incertidumbre en mediciones: los instrumentos de medición también se escalan, aumentando los errores relativos (Kwon et al., 2013).

El escalado inadecuado puede llevar a diferencias significativas entre el comportamiento del modelo y el sistema real. Se deben analizar cuidadosamente las distorsiones y aplicar correcciones empíricas.

Los modelos físicos a escala permiten estudiar el comportamiento de cimentaciones offshore bajo cargas realistas recreando condiciones controladas. Algunos ejemplos son:

- Modelos de canal para estudiar interacción suelo-estructura: se recrea el lecho marino y la cimentación en un canal hidráulico (figura 34) donde se generan olas y corrientes escaladas (Li et al., 2020). Permiten medir deflexiones, vibraciones y resistencia.

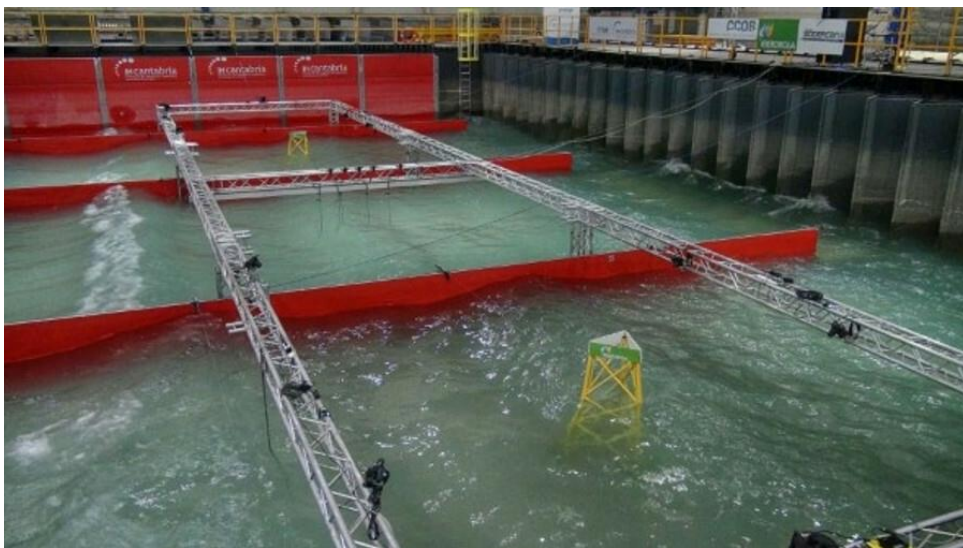


Figura 34. Modelo físico de canal de una cimentación tipo Jacket (IHCantabria)

- Modelos centrífugos: la muestra de suelo se somete a altas aceleraciones mediante equipos centrífugos (figura 35) aumentando las tensiones efectivas y simulando condiciones a mayor profundidad (Zhang et al., 2019). Útiles para estudiar comportamiento del suelo.

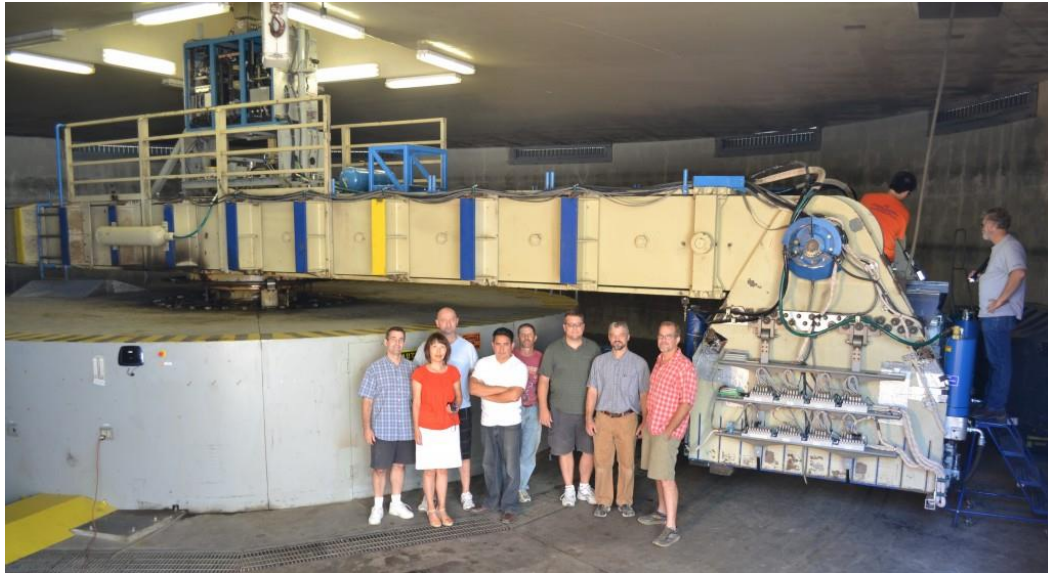


Figura 35. Laboratorio de modelo físico centrífugo con mesa vibratoria (cgm.engr.ucdavis.edu)

- Modelos de terremotos en mesa vibradora: la cimentación se monta sobre una plataforma (figura 36) que genera movimientos sísmicos tridimensionales (Li et al., 2017). Permiten evaluar integridad estructural ante sismos.



(a) Shaking table



(b) Test model

Figura 36. Mesa vibratoria (Izquierda) y modelo escalado (Derecha) para análisis sísmico de aerogenerador marino (www.journals.plos.org)

- Modelos aeroelásticos: se utilizan túneles de viento (figura 37) para generar flujos sobre modelos flexibles de turbinas y cimentación (Wang et al., 2018). Sirven para validar modelos teóricos de aerodinámica y dinámica estructural acoplada.



Figura 37. Túnel de viento para ensayo con aerogenerador escalado (Robert Fontecha et al)

4. Análisis de necesidad y tipología de nueva herramienta de cálculo

La energía eólica se ha expandido exponencialmente en las últimas décadas, convirtiéndose en una fuente renovable clave a nivel global (WWEA, 2022). Sin embargo, su corta historia en comparación con otros campos de la ingeniería implica que las herramientas para el análisis y diseño de sistemas eólicos son relativamente incipientes (Sørensen, 2021).

Por un lado, en el ámbito del cálculo integral y de detalle, se observa una cantidad de multifísicas complejas debido al acoplamiento entre palas, góndola, torre, cimentación y terreno, que los métodos computacionales actuales (FEM, BEM, FVM, etc.) enfrentan por separado (Sørensen et al., 2002). Aunque los programas informáticos actuales combinan estos métodos en busca de un análisis y cálculo global, siguen existiendo grandes vacíos y necesidad de mejora en el rendimiento que podría conseguirse con nuevas herramientas que combinen más eficientemente las diferentes metodologías.

Por otro lado, tras una intensa búsqueda, como se ha visto en el apartado “3.4.1.5 Herramientas básicas de predimensionamiento”, no se ha encontrado ninguna herramienta para los cálculos de predimensionado, en fases tempranas o de estudio de viabilidad del proyecto, para el conjunto del aerogenerador o para sus componentes por separado.

Esta carencia de herramientas específicas para el predimensionamiento temprano de aerogeneradores y sus componentes representa una limitación importante en el desarrollo óptimo de proyectos eólicos. Contar con estimaciones más precisas desde las primeras etapas permite orientar adecuadamente las decisiones de diseño, reducir incertidumbres, acotar mejor los costos y plazos, y evaluar diferentes conceptos y tecnologías alternativas.

Por todo ello, se opta por el desarrollo de una nueva herramienta de predimensionamiento de cimentaciones de gravedad. Dada la fase de estudio para la que está pensada y la precisión de los resultados que se requiere, esta debe ser una herramienta que no precise formación previa en su manejo, tan solo conocimientos previos en ingeniería estructural y marítima.

Esta podría ser la primera de un conjunto de herramientas que cubriesen todo el espectro de tipologías de cimentaciones para aerogeneradores, de forma que ahorrasen recursos en fases tempranas y ayudasen a optimizar la elección de cimentación más adecuada para cada entorno.

5. Desarrollo de herramienta de predimensionamiento de cimentaciones de gravedad

5.1. Metodología de desarrollo.

En primer lugar, se lleva a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica sobre las tipologías existentes de cimentaciones de gravedad, así como los estándares, normativas y recomendaciones de diseño que son aplicadas, además de las metodologías y herramientas de cálculo empleadas.

En base a esta información se ha generado una hoja de cálculo empleando formulaciones básicas recogidas en normativas y estándares vigentes. Estos cálculos se realizan a partir de una geometría parametrizada que se asemeja a las estudiadas en el estado del arte.

La hoja de cálculo ha sido dividida en diferentes pestañas según su función, indicando en cada parte las normativas sobre las que se apoya y los parámetros que son modificables en base a estas.

Cada una de estas partes ha sido testada por separado mediante la comprobación de problemas ya resueltos y contrastados.

5.2. Aclaraciones de funcionamiento e Indicaciones de uso

El alcance de esta herramienta son cálculos preliminares que deben validarse posteriormente mediante cálculos más detallados, y no sustituye un diseño detallado. Esta herramienta no evalúa diferentes combinaciones de acciones, si no que estudia, en un único plano, el caso desfavorable de alineación de las cargas del oleaje con las transmitidas por el aerogenerador.

Todas las unidades de medida están en el Sistema Internacional.

Para un correcto funcionamiento el usuario debe tener conocimientos básicos de ingeniería marítima y estructural, de forma que sepa interpretar los datos de salida en función de los parámetros de entrada, y saber cuáles y como modificarlos para que el modelo sea válido.

Se parte de la premisa de que el usuario se encuentra en fase de estudio de prediseño de aerogeneradores para un parque eólico y por tanto dispone de los datos precisos del emplazamiento (marítimos y geotécnicos) donde quiere ubicarlos. En caso de no ser así, para las características geotécnicas se debe recurrir a especialistas geotécnicos que puedan asesorar, y así tomar decisiones en base a las recomendaciones de la ROM0.5-05.

Para los datos de oleaje, en caso de no disponer de datos precisos, tal y como se indica en la Figura 38 se ha dispuesto un enlace directo a la web “Puertos del Estado” donde se podrán obtener datos históricos y en tiempo real que ayuden al usuario a estimar la altura de ola significativa y periodo pico que debe tener en cuenta para el diseño de la cimentación.

Las cargas del conjunto de aerogenerador y torre sobre la cimentación deberán ser las facilitadas por el tecnólogo, en caso de no disponer de ellas se recomienda aplicar las de uno de características similares o mayores para estar por el lado de la seguridad.

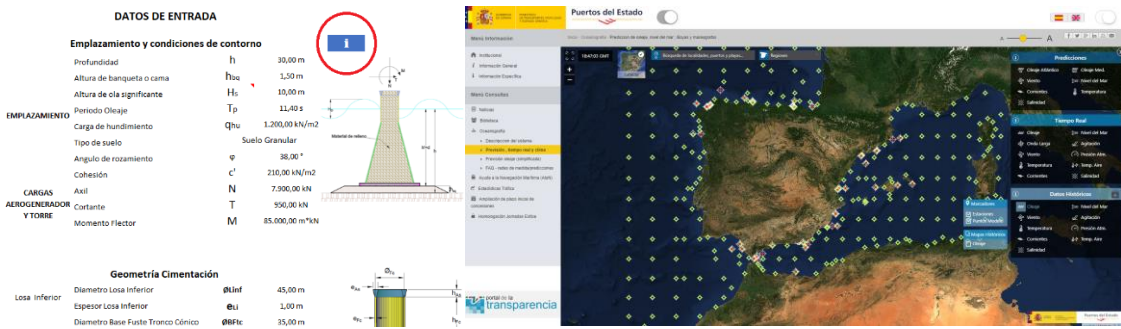


Figura 38. Enlace de información a Puertos del Estado

Dentro de esta plataforma, como podemos ver en la figura 39, podremos elegir entre datos de boyas reales (como la boya de Estaca de Bares), marcadas en rojo, con datos históricos acumulados, o boyas ficticias, en color verde, que nos aportan datos que no proceden de medidas directas, si no de modelos numéricos.

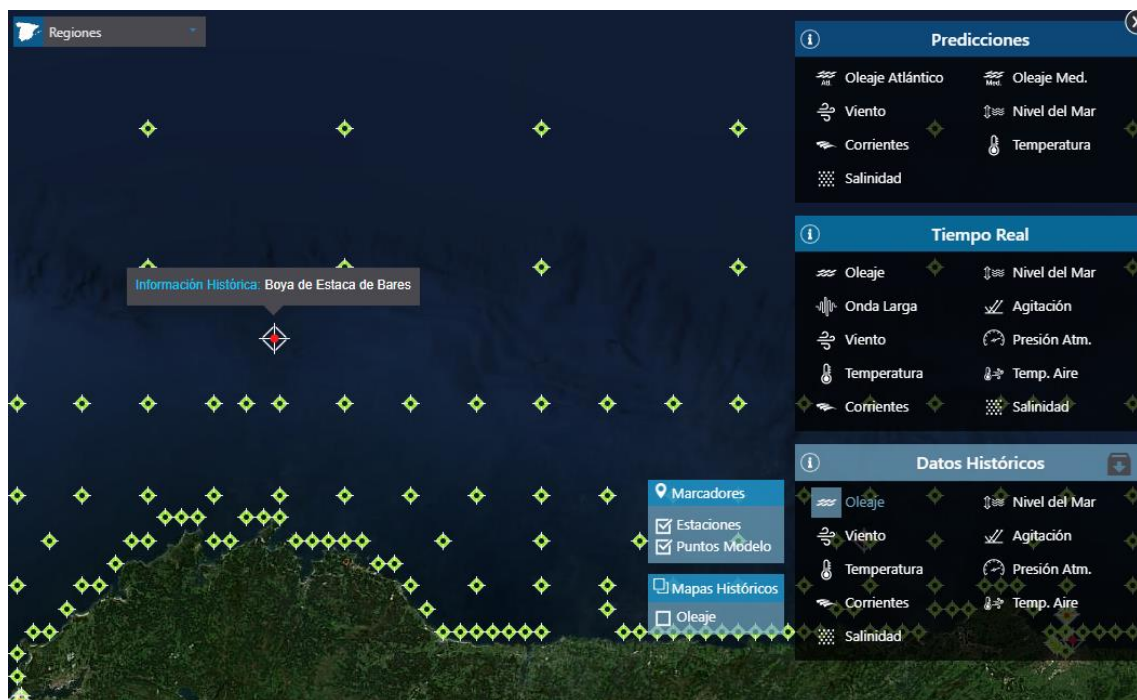


Figura 39. Boyas físicas y de modelos numéricos (www.puertos.es)

La hoja de cálculo está protegida para evitar modificaciones involuntarias, salvo las casillas marcadas en color para introducción de datos de partida. En caso de querer cambiar algún parámetro de cálculo de las hojas de cargas de oleaje, estabilidad o resistencia mecánica deberá desbloquearse únicamente la casilla necesaria.

El funcionamiento de la herramienta, explicado en la figura 40, consta principalmente de cinco (5) partes:

- La hoja de instrucciones y aclaraciones: Esta es la única parte que se encuentra fuera del flujo de trabajo de la hoja. Su única función es proporcionar al usuario las indicaciones básicas de uso y aclaraciones sobre algunas consideraciones tomadas en los cálculos, de forma que si este lo desea pueda modificarlos.
- La hoja de datos de entrada y salida de resultados: Esta parte podría considerarse la interfaz de la herramienta, ya que es la que interactúa con el usuario. En ella se introducen los datos de partida, que alimentarán el resto de hojas, las cuales a no ser que el usuario desee hacer una modificación en las formulaciones, coeficientes de seguridad o parámetros básicos (en los que se emplean los valores más desfavorables para seguridad y simplicidad de uso), no serán modificadas. Al mismo tiempo se obtendrá los resultados de los cálculos y comprobaciones.

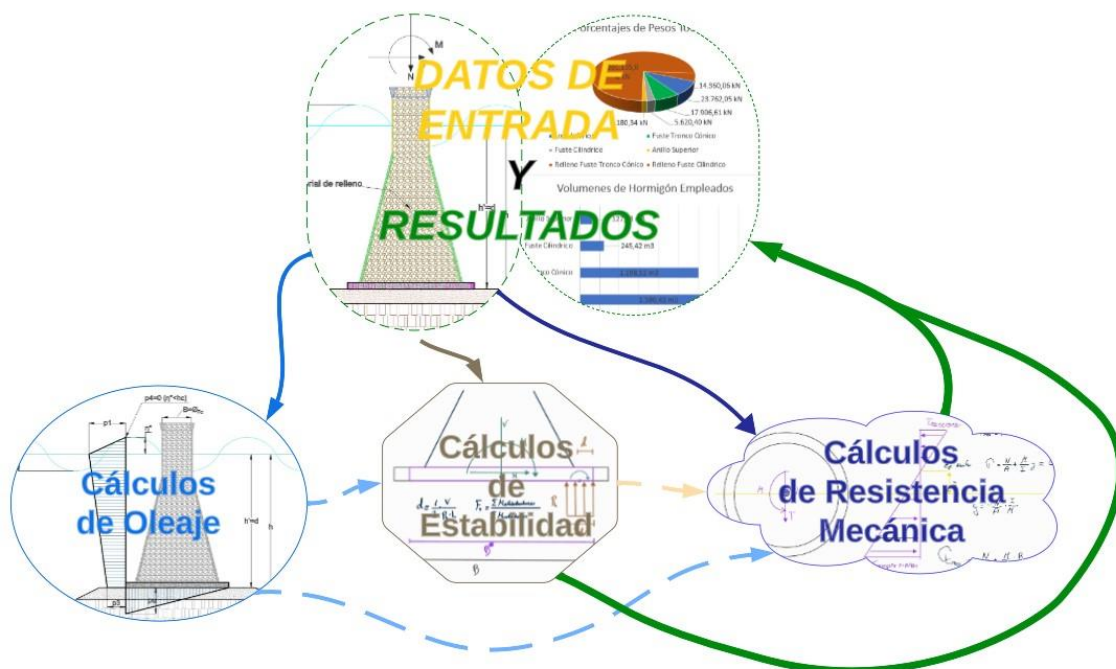


Figura 40. Diagrama de flujo de trabajo

- Hoja de cálculos de oleaje: Esta obtiene datos de la hoja de datos de entrada y salida de resultados (oleaje y geometría) y a su vez alimenta a las de cálculo de estabilidad y de resistencia mecánica.
- Hoja de cálculos de estabilidad: Recibe datos de las dos anteriores, cargas de aerogenerador y geometría de la primera y fuerzas de oleaje de la segunda, con lo que genera el total de fuerzas actuantes sobre la cimentación.
- Hoja de cálculos de resistencia mecánica: toma información de todas las anteriores para analizar los máximos esfuerzos de tracción y compresión en dos secciones significativas de la cimentación.

A continuación, tras una breve explicación de la geometría seleccionada, se procederá a detallar más minuciosamente el funcionamiento de cada una de las hojas de cálculo, explicando las normativas, consideraciones y formulaciones empleadas.

También se comentarán los aspectos a mejorar de cada apartado, con el fin de conseguir mejorar la herramienta.

5.3. Elección de geometría

Un aspecto esencial para que esta resulte una herramienta de uso sencillo es parametrizar una geometría simplificada en base alguna de las tipologías estudiadas, que han demostrado su efectividad. Para el caso de las cimentaciones de gravedad se han planteado las dos últimas generaciones, ya que como se ha visto anteriormente son las que han alcanzado mayores profundidades, y por tanto estarán menos limitadas.

Como puede observarse en la figura 41, finalmente se eligió la tercera generación de cimentación de gravedad, ya que la cuarta, además de haber sido menos empleada hasta ahora, implicaría un análisis más complejo debido a la naturaleza de estructura mixta.

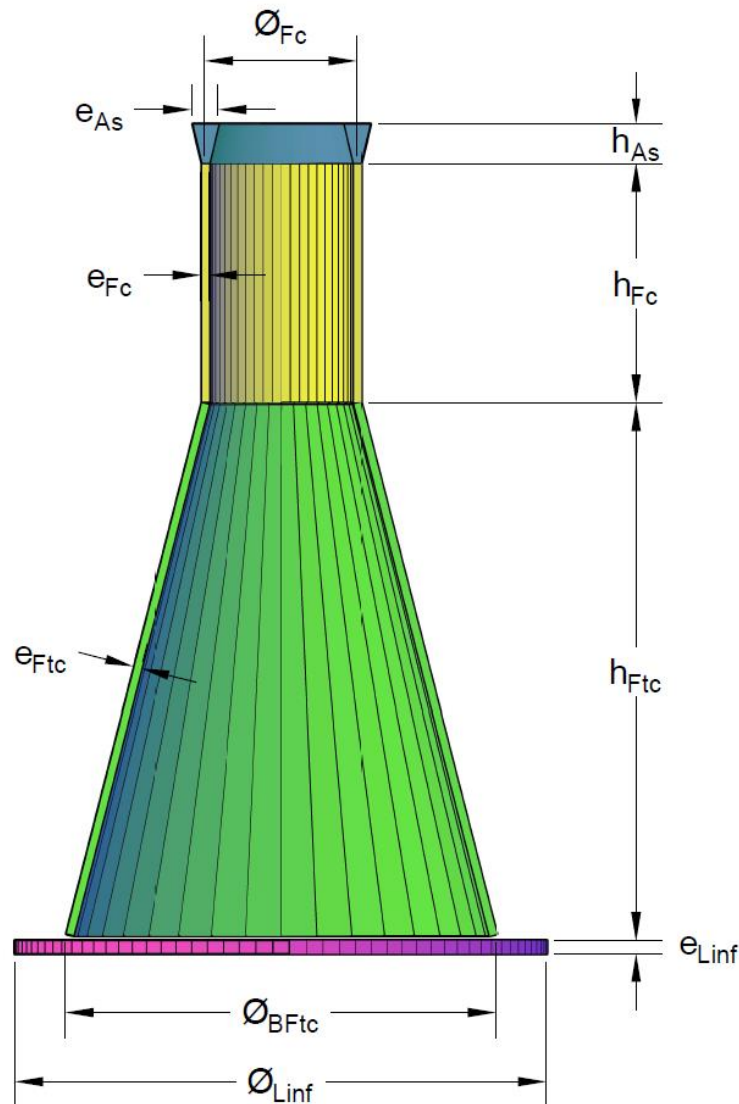


Figura 41. Parámetros de geometría de cimentación de gravedad para herramienta de cálculo.

Esta se compone de cuatro (4) partes diferenciadas tal y como pueden observarse en la figura 39: Una losa inferior (en color lila), un fuste tronco cónico (color verde), un fuste cilíndrico (en amarillo) y un anillo superior de coronación (en azul).

Los parámetros que definen esta geometría, y que el usuario de la herramienta deberá calibrar para encontrar el equilibrio entre funcionalidad y eficiencia, son:

- $\varnothing_{Lin}$: Diámetro de losa inferior
- e_{Li} : Espesor de losa inferior
- $\varnothing_{BFtc}$: Diámetro Base Fuste Tronco Cónico
- e_{Ftc} : Espesor del Fuste Tronco Cónico
- h_{Ftc} : Altura Fuste Tronco Cónico
- $\varnothing_{Fc}$: Diámetro Fuste Cilíndrico
- e_{Fc} : Espesor Fuste Cilíndrico
- h_{Fc} : Altura Fuste Cilíndrico
- e_{As} : Espesor Anillo Superior
- h_{As} : Altura Anillo Superior

Es importante resaltar que esta geometría es solo un acercamiento al diseño final, en el cual, la aplicación de pretensados u otra tipología de materiales, entre otras cosas, pueden afectar notablemente al resultado final.

5.4. Datos de Entrada

5.4.1. Clasificación de datos de entrada

La entrada de datos se divide en dos partes principales, los datos de emplazamiento y condiciones de contorno y los de geometría de la cimentación y materiales a emplear.

Emplazamiento y condiciones de contorno

Se deben introducir los datos de profundidad, altura de banqueta (si la hubiera, en caso contrario dejarlo en 0), datos del oleaje a estudiar y las características geotécnicas del fondo marino.

También se solicitan las cargas transmitidas por el conjunto de aerogenerador y torre a la cimentación en cabeza.

Como se puede observar en la figura 42, la entrada de datos se acompaña con un dibujo esquemático a modo indicativo.

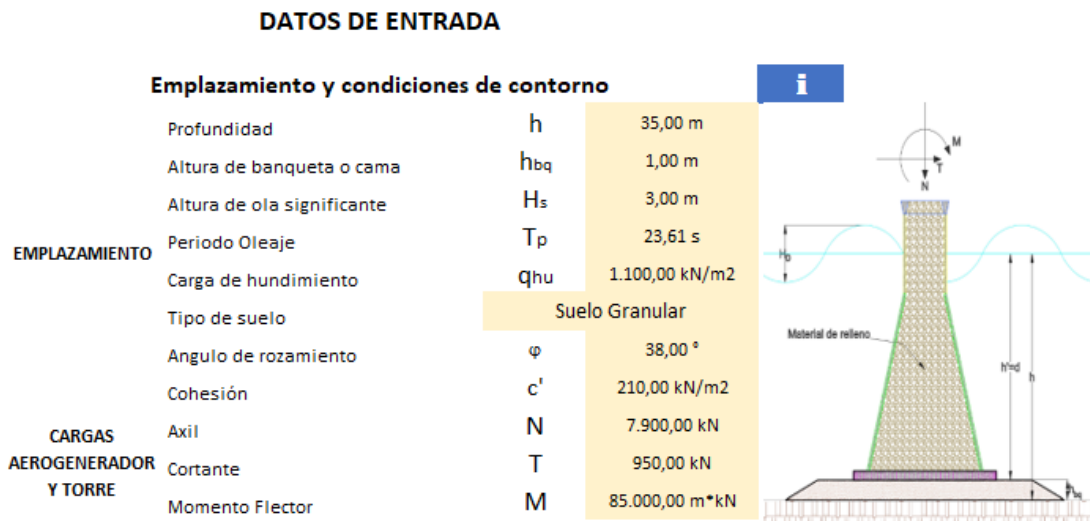


Figura 42. Entrada de datos de la herramienta de predimensionado.

La profundidad hace referencia al nivel medio del mar, sin especificar variaciones este, que dependen de cada ubicación. Se recomienda que el usuario, para estar del lado de la seguridad introduzca la máxima que pueda darse.

Geometría de cimentación y materiales a emplear

Los parámetros de geometría se deben introducir según lo indicado en el apartado “5.2. Elección de geometría”.

Los materiales de diseño, hormigón y acero de refuerzo, se eligen de entre una lista de desplegables (figura 43), en función de la elección se muestran sus propiedades de resistencia. Si el usuario desea emplear otros deberá desbloquear la celda donde se muestran las resistencias características f_{ck} y f_y y simplemente introducir el valor deseado.



Figura 43. Lista desplegable de Hormigón

La nomenclatura de los materiales es la indicada por el actual Código Estructural.

5.4.2. Aspectos que mejorar

La mejora de este aspecto de la herramienta va de la mano con la mejora del resto de las hojas, en la medida que se amplie la capacidad de cálculo se hace necesario precisar más datos.

5.5. Cargas de Oleaje

5.5.1. Descripción de funcionamiento

Los cálculos llevados a cabo en esta hoja están basados principalmente en la teoría lineal del oleaje o de Airy y en el método de Goda corregido (1985) para empujes de oleaje.

La teoría de Airy modela las olas como una superposición de perturbaciones sinusoidales progresivas de pequeña amplitud que se desplazan sobre la superficie libre de un fluido idealizado (Holthuijsen, 2010). Sus ecuaciones, recogidas en la ROM (Tabla 3), parten de varias simplificaciones:

- Se considera un fluido no viscoso e incompresible
- El movimiento predominantemente horizontal y vertical e irrotacional, periódico y dominado por la gravedad.
- Un fondo horizontal fijo e impermeable.

		Profundidades reducidas $h/L < 1/20$	Profundidades intermedias $1/20 \leq h/L \leq 1/2$	Aguas profundas $h/L > 1/2$
ONDA PROGRESIVA				
Superficie libre (η)		$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right]$ 1)		
Celeridad de la onda ($c = L/T$)		$\sqrt{gh}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT}{2\pi}$
Longitud de onda (L)		$\sqrt{gh} \cdot T$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidad de las partículas	Horizontal (u)	$\frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[\frac{2\pi h}{L} \right]} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
	Vertical (w)	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{h} \right) \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[\frac{2\pi h}{L} \right]} \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
Aceleración de las partículas	Horizontal ($\delta u / \delta t$)	$\frac{H}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right) \sqrt{\frac{g}{h}} \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[\frac{2\pi h}{L} \right]} \sin \theta$	$2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
	Vertical ($\delta w / \delta t$)	$-2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right) \cos \theta$	$-\frac{H}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[\frac{2\pi h}{L} \right]} \cos \theta$	$-2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
Presión (p)		$\rho_w g (\eta - z)$	$\rho_w g \eta \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[\frac{2\pi h}{L} \right]} - \rho_w g z$	$\rho_w g \eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho_w g z$

Tabla 3 Parámetros de la onda regular asociados a la teoría lineal del oleaje (ROM 2.0-11)

Las ecuaciones para calcular los parámetros del oleaje en la teoría de Airy varían en función de la profundidad relativa, que es la relación entre la profundidad y la longitud de onda. Aunque en esta hoja se proporciona la información de la profundidad relativa en que se encuentra el oleaje (aguas profundas, intermedias o someras) es solo a modo informativo, por simplicidad se asume que siempre se está en aguas intermedias.

La longitud de onda se ha obtenido con un proceso de cálculo iterativo con 1000 líneas de repetición y una precisión de un decimal, mediante la fórmula de Airy:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$$

Donde:

- L = Longitud de onda en metros
- g = Aceleración de la gravedad en m/s². Es un dato bloqueado en la pestaña de cálculos de oleaje.
- T = Período de la ola en segundos. Es un dato de entrada.
- h = Profundidad del agua en metros. Es un dato de entrada.

Se ha comprobado con un amplio rango de combinaciones de periodos y profundidades esperables, dando un resultado satisfactorio en todos los casos.

Una vez hallada la longitud de onda se obtienen los parámetros necesarios para calcular las presiones ejercidas por el oleaje según Goda en su revisión de 1985.

Para el cálculo de las fuerzas del oleaje se han barajado otros métodos como el de Hiroi, el método de Sainflou modificado, el de Miche-Rundgren y el de Minikin entre otros. Habiéndose optado finalmente por el método de Goda de 1985 ya que es el único que considera el empuje vertical del oleaje.

En la figura 44 se puede observar dicha distribución de presiones para una geometría general.

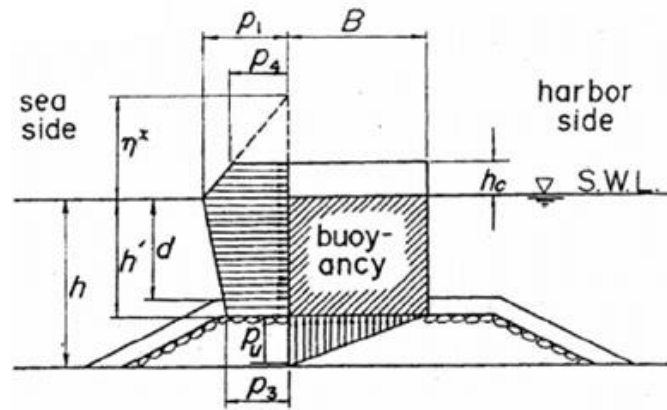


Figura 44. Distribución de presiones de oleaje según Goda (Xavier Gironella)

Estas leyes de presiones se han aplicado, con algunas consideraciones, a la geometría característica de la cimentación de gravedad. La figura 45 se adjunta en la pestaña del cálculo del oleaje para ayudar a la interpretación de los resultados en caso de una revisión de estos.

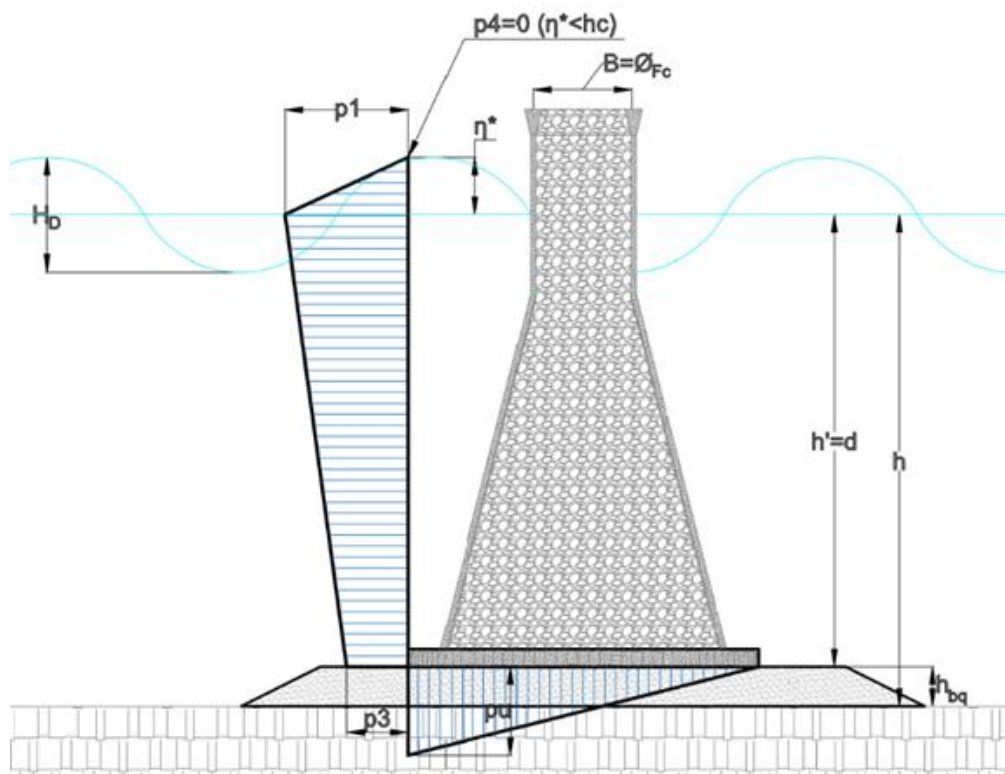


Figura 45. Distribución de presiones

Como puede observarse se considera que p_4 siempre será cero (0), ya que, aunque la altura de empuje del oleaje pueda llegar a superar la de coronación de la cimentación, igualmente ejercerá presión sobre la torre, siendo transmitido este esfuerzo igualmente a la cimentación.

La fuerza total ejercida sobre la cimentación, siguiendo el diagrama presiones indicado en la figura 44, varia en función de la sobreelevación η^* y los valores de presión p_1 , p_3 y p_u , que se detallan a continuación.

La presión “ p_1 ” es la máxima presión de empuje horizontal ejercida sobre la estructura, que se da siempre en la cota de la superficie libre.

La presión “ p_3 ” por el contrario es la menor presión de empuje horizontal, bajo la superficie, que ejerce el oleaje sobre la estructura. Esto se debe a la naturaleza del movimiento del oleaje como se ha visto en el apartado “3.2 Tipos de cargas actuantes sobre aerogeneradores”.

Por último, “ p_u ” es la máxima presión vertical ejercida por el oleaje sobre la estructura.

Las formulas de Goda para calcular estos parametros son:

$$\eta^* = 0.75 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot H_D$$

$$p_1 = 0.50 \cdot [1 + \cos \beta] \cdot [\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta] \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_D$$

$$p_3 = \alpha_1 \cdot p_1$$

$$p_u = 0.50 \cdot [1 + \cos \beta] \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho_w \cdot H_D$$

Donde:

- H_D : es la altura de ola de diseño. Aquí se asume que el oleaje esta fuera de la zona de rotura, por lo que se puede simplificar su cálculo como $H_D = 1,8 \cdot H_s$
- β : es el ángulo de incidencia del oleaje. Para estar del lado de la seguridad se asume que siempre es perpendicular. Este parámetro puede modificarse en la pestaña

- α_1 : es un coeficiente adimensional que representa el efecto del periodo del oleaje en la presión ejercida por este. Tiene su máximo de 1,1 en aguas someras y el mínimo de 0,6 en aguas profundas.
- α_2 : es un coeficiente adimensional que relaciona el aumento de la pendiente del fondo con el aumento de las presiones ejercidas por el oleaje.
- α_3 : es un coeficiente adimensional de distribución lineal de presiones.

Las formulas de goda para calcular estos coeficientes son:

$$\alpha_1 = 0.60 + \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{L}}{\sinh\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \left(\frac{h_b - d}{3 \cdot h_b} \right) \cdot \frac{H_D^2}{d^2}, \frac{2 \cdot d}{H_D} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)} \right]$$

Donde:

- h: es la profundidad en metros y se obtiene de los datos de entrada.
- L: es la longitud de onda (en metros) del oleaje en la ubicación de la cimentación
- h_b : es la profundidad a una distancia de la cimentación de cinco veces la altura de ola de diseño.
- d: es la profundidad descontando la banqueta y la capa de protección contra la socavación.

Una vez obtenidas la distribución de presiones del oleaje sobre la estructura, se calcula las fuerzas totales que generan estas. Para hacer esto la estructura se descompone en tres partes según su geometría:

- La losa inferior: donde se aplican las cargas verticales hacia arriba y una pequeña fuerza horizontal
- El fuste tronco cónico: debido a la inclinación de su paramento vertical, la fuerza del oleaje se descompone en vertical y horizontal hacia abajo.
- El fuste cilíndrico: recibe únicamente fuerza horizontal y comprende también la parte correspondiente al anillo superior, que por simplicidad se desprecia el pequeño aumento de superficie con respecto al fuste cilíndrico.

Las resultantes de estas fuerzas, junto a las distancias de aplicación (al eje de simetría vertical para las fuerzas verticales y a la cara inferior de la losa para las cargas horizontales) se recogen en una tabla (véase ejemplo en figura 46) para consulta del usuario. Estos datos son los que alimentas a las hojas de cálculo de estabilidad y resistencia mecánica.

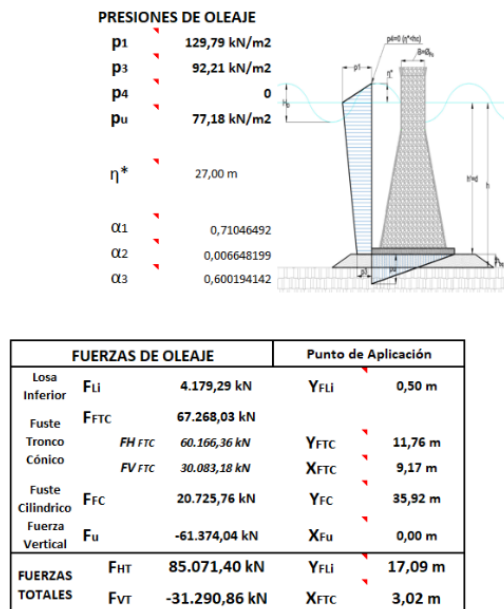


Figura 46. Distribución

Para un mejor manejo de la herramienta se listan a continuación los parámetros (ya definidos anteriormente) que afectan al resultado de estas fuerzas, a los que se les ha asignado un valor por defecto, y que el usuario puede variar en la hoja de cargas de oleaje (figura 47) con el fin de afinar los cálculos en caso de disponer de datos más precisos:

- d : la herramienta considera por defecto un espesor nulo de protección contra la socavación, por lo que se iguala su valor al de h' , que es la profundidad menos la altura de la banqueta. En caso de modificarlo se deberá desbloquear la casilla C8 para restarle la altura de la banqueta y la de la protección contra la socavación.
- β : el ángulo de incidencia del oleaje, que se mide con respecto a la perpendicular del paramento vertical sobre el que incide el oleaje, se considera 0 con el fin de estar del lado de la seguridad. Para modificar el ángulo solo hay que desbloquear la casilla C12 e introducir el ángulo de incidencia en grados sexagesimales.
- θ : Ante la incertidumbre de la topografía del fondo marino, y asumiendo que la elección de la ubicación del parque eólico se hará buscando las mejores condiciones, se considera un fondo plano. Para que el modelo considere pendiente solo hay que desbloquear la casilla C15 e introducir el ángulo (en grados sexagesimales) con respecto a la horizontal.

	B	C
3	Aguas de transición	
5	T	23,61 s
6	h	35,00 m
7	h'	34,00 m
8	d	34,00 m
9	H_D	5,40 m
10	L₀	870,32 m
11	L	419 m
12	β	0,00 °
13	ρ_w	1.025,00 kg/m ³
14	g	9,81 m/s ²
15	θ	0,00 °
16	h_b	35,00 m
17	h_c	100,00 m

Figura 47. Valores modificables en cálculo de oleaje

5.5.2. Aspectos que mejorar

Algunas de las mejoras que se podrían implementar a esta parte de la herramienta son:

- Variación de las formulaciones de Airy en función de la profundidad relativa. Aunque para la mayoría de casos (debido a los condicionantes de distancias mínimas y máximas a la costa, limitaciones de profundidad de esta tipología de cimentaciones y caracterización del oleaje para casos desfavorables) el oleaje se encontrara en profundidades relativas intermedias, es posible que se dé el caso en el que se encuentre en aguas someras o profundas. En este caso el modelo estará siendo menos preciso.
- Incorporación de la formulación de para ola rora en el cálculo de empujes mediante el método de Goda. Al igual que en el apartado anterior, por simplicidad del modelo, considerando que estadísticamente no influirá en la precisión del modelo, solo se ha contemplado el caso de ola no rota.

5.6. Cálculos de Estabilidad

5.6.1. Descripción de funcionamiento

En este apartado se recopilan todas las fuerzas actuantes sobre el aerogenerador, incluyendo las de su propio peso, para analizar la estabilidad estructural mediante tres (3) comprobaciones: seguridad frente al deslizamiento, vuelco y hundimiento.

Para las tres comprobaciones se establecen unos coeficientes de seguridad que se deben cumplir. Estos coeficientes están introducidos por defecto siguiendo la recomendación de la ROM0.5-05 (véase tabla 4) para coeficientes de seguridad mínimos en proyectos de muelles de gravedad.

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.5.5	Deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	1,5	1,3	1,1
3.5.5	Deslizamiento en el contacto de la banquetta y el terreno natural	1,5	1,3	1,1
3.5.4	Hundimiento	2,5	2	1,8
3.5.6 y 3.7.11.3	Vuelco plástico	1,5	1,3	1,1
3.8	Estabilidad global	1,4	1,3	1,1
—	Erosión interna del trasdós	MP	—	—
—	Socavación del pie del intradós	MP	—	—

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.2 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de adecuar los coeficientes de seguridad recomendados.

Nota 3: Los coeficientes de seguridad indicados frente al hundimiento corresponden al uso de la fórmula polinómica (apartado 3.5.4.8) o al uso de métodos de rebanadas. Para otros métodos se usarán los coeficientes de seguridad mínimos que se indican en la Tabla 3.5.6.

Tabla 4 Coeficientes de seguridad mínimos para proyectos de muelles de gravedad (ROM 0.5-05)

En caso de que el usuario desee seguir las recomendaciones de otra norma o asumir por cuenta propia otros valores, este solo debe desbloquear las casillas E9, E10 y E11 (marcadas en color salmón) y modificar los valores (figura 48).

	B	C	D	E
8				
9	COEFICIENTES DE SEGURIDAD	Coef. Seguridad al Deslizamiento	CSD	1,30
10		Coef. Seguridad al Vuelco	CSV	1,30
11		Coef. Seguridad al Hundimiento	CSH	2,00

Figura 48. Valores de coeficientes de seguridad modificables en cálculo de estabilidad

También están a disposición del usuario datos básicos de densidades del hormigón, agua y arena para relleno y lastrado de la cimentación (figura 49), por si este considera oportuno modificarlos (casillas E3, E4 y E5).

	B	C	D	E
2		Datos de partida		
3	DENSIDADES	Hormigón Armado	ρ_{HA}	2.548,00 kg/m ³
4		Agua	ρ_w	1.025,00 kg/m ³
5		Arena Limpia Saturada	ρ_{as}	2.100,00 kg/m ³

Figura 49. Valores de densidades modificables en cálculo de estabilidad

Una vez recopilada toda la información, lo primero que hace la hoja de cálculo es obtener los pesos totales de cada parte de la cimentación, así como el peso del lastrado. Se considera que la cimentación está completamente rellena con arena limpia saturada.

De esta forma puede obtenerse el sumatorio total de fuerzas axiales, cortantes y de momento flector actuantes sobre la base de las estructuras, que se sintetizan en la tabla 5, donde se puede ver la aportación de esfuerzos según su naturaleza de origen, pesos

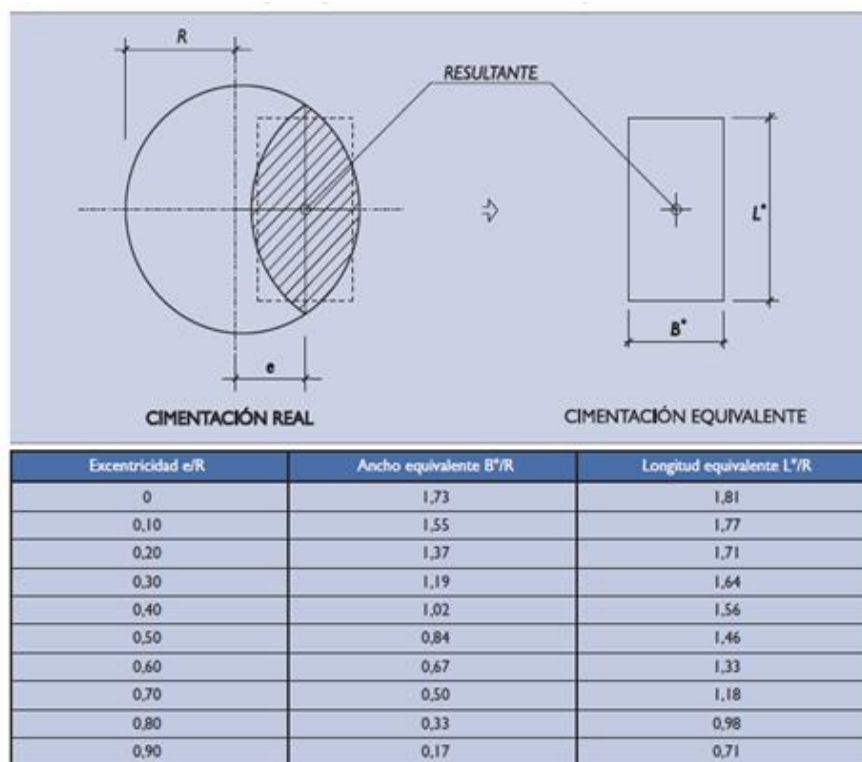
SUMATORIO DE FUERZAS TOTALES EN BASE DE CIMENTACIÓN			
ORIGEN	Axil N	Momento M	Cortante T
PESO PROPIO	144.834,97 kN	0,00 m*kN	0,00 kN
CARGAS AEROGENERADOR Y TORRE	7.900,00 kN	85.000,00 m*kN	950,00 kN
CARGAS OLEAJE	-12.332,45 kN	391.415,89 m*kN	27.950,84 kN
TOTAL	140.402,52 kN	476.415,89 m*kN	28.900,84 kN

Tabla 5 Salida de datos en la hoja de cálculos de estabilidad.

Las fuerzas producidas por el viento deben estar contempladas en las cargas introducidas del aerogenerador, se considera despreciable la fuerza ejercida por el viento sobre la parte del aerogenerador que está por encima de la superficie marina.

Una vez obtenidos los esfuerzos totales se calcula la excentricidad de las cargas, que es un parámetro básico para obtener las tensiones transmitidas al terreno. Esta se obtiene como la relación entre la carga de axil y el momento flector.

Con objeto de simplificar el modelo y estar dentro del lado de la seguridad, se usa una relación entre este valor y el radio de la losa para obtener las dimensiones de una cimentación equivalente rectangular (figura 50) siguiendo la recomendación de la ROM 0.5-05.



Esta ROM admite como procedimiento de comprobación de la seguridad algunos métodos basados en "experiencias contrastadas similares". A efectos de comparar presiones de cimentación, se define en esta ROM "presión vertical de comparación" $p_{v,comp}$, que se define como el mayor de los tres valores siguientes de p_v :

- El que corresponde a la combinación cuasi permanente.
- El 90% del que correspondería a la combinación fundamental ⁽⁵⁾ que conduzca a mayor valor de p_v .
- El 80% del máximo valor de p_v que corresponda a las combinaciones accidentales.

(5) Para este cálculo particular, los valores de las acciones no se mayorarán ($\gamma_G = \gamma_Q = 1$)

Figura 50. Dimensiones de cimentación equivalente (ROM 0.5-05)

Como la ROM solo da solución para valores exactos de un decimal, la herramienta de cálculo interpola para valores intermedios, de forma que en el caso que para este caso se obtendría:

$$B^* = 21,57 \text{ m} \quad L^* = 27,22 \text{ m}$$

Con estas dimensiones equivalentes se realizan las tres (3) comprobaciones de seguridad anteriormente mencionadas.

Comprobación de Seguridad frente al Hundimiento.

Para esta comprobación se usa el método elástico, que supone que la superficie de contacto plana entre cimentación y terreno genera una ley de tensiones también plana, que puede descomponerse en la suma de tensiones debida al axil y al momento flector.

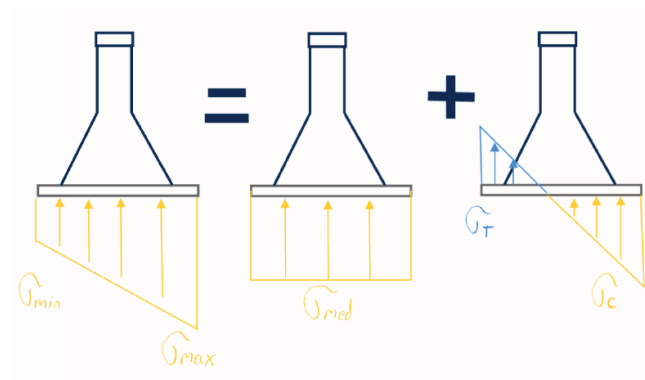


Figura 51. Distribución de tensiones al terreno en método elástico

Esto, partiendo de la premisa de que no se pueden desarrollar tensiones de tracción entre suelo y cimentación, nos da dos posibles diagramas de tensiones, uno trapezoidal y otro triangular. Cuando la excentricidad es menos que el ancho de la cimentación en el plano estudiado entre seis (6) se obtiene el diagrama trapezoidal, y cuando es mayor o igual la triangular.

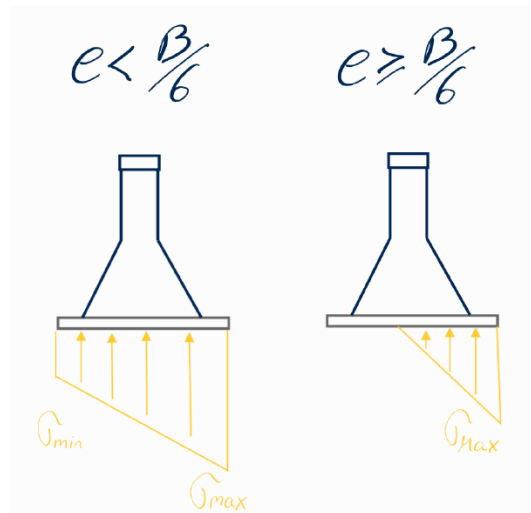


Figura 52. Diagrama de tensión trapezoidal y triangular.

El programa calcula las tensiones transmitidas al terreno para ambas opciones (tabla 6) y extrae solo la que aplica en cada caso, según la relación explicada.

TENSIONES TRANSMITIDAS AL TERRENO		
Tensión Trapezoidal	σ_{Max}	464,84 kN/m ²
	σ_{Min}	13,42 kN/m ²
Tensión Triangular	σ_{Max}	465,21 kN/m ²
	b	22,18 kN/m ²

Tabla 6 Tensiones transmitidas al terreno obtenidas por el programa para el diagrama trapezoidal y triangular

La comprobación de seguridad al hundimiento se obtiene con estas tensiones máximas y la carga de hundimiento del terreno (introducida en la entrada de datos), se obtiene la relación entre ellas (q_{hu} / σ_{Max}) y se compara con el coeficiente de seguridad establecido. Como se puede ver en la tabla 7, esta información se resume y se le añade un mensaje de “CUMPLE” si la relación es mayor que el coeficiente de seguridad al hundimiento, y “NO CUMPLE” si la relación es menor.

HUNDIMIENTO		CUMPLE
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}
464,84 kN/m ²	550,00 kN/m ²	2,37

Tabla 7 Factor de la seguridad al hundimiento

La tensión admisible se considera a la carga de hundimiento entre el coeficiente de seguridad CSH. Es importante que el usuario comprenda que el hundimiento no se produce al superar la carga de hundimiento en un único punto, si no cuando se da en suficientes puntos como para que se produzca una pauta de rotura en el terreno.

Además, se recuerda que las tensiones se han obtenido sobre una superficie equivalente menos a la real, por lo que en esta comprobación se está bastante del lado de la seguridad. Por lo tanto, valores ligeramente inferiores al coeficiente de seguridad podrían considerarse admisibles.

Comprobación de Seguridad frente al Deslizamiento

La ROM 0.5-05 establece que toda cimentación superficial no arriostrada debe cumplir el siguiente criterio de estabilidad al deslizamiento:

$$H_{(rotura)} = V \operatorname{tg} \phi_c + a \cdot S + (E_p - E_a) + R_c$$

Donde:

V = carga vertical efectiva.

ϕ_c = ángulo de rozamiento del contacto del elemento de cimentación con el terreno.

a = adhesión cemento-terreno.

S = superficie de apoyo.

E_p = empuje pasivo en la profundidad D (cara frontal que se opone al deslizamiento).

E_a = empuje activo en la profundidad D (cara trasera).

R_c = otras posibles resistencias del contorno de los alzados laterales del cemento.

Los términos E_p , E_a y R_c son suprimidos de la ecuación debido a que no se contempla que haya terreno por encima de la cimentación, por lo que no habrá empujes activos, pasivos ni otras resistencias.

A partir de aquí se estudian dos casos, que dependen de los datos de entrada, si es terreno es cohesivo o granular.

En el caso de que el suelo sea cohesivo, al estar saturado, se desprecia la resistencia por contacto y solo se considera la ejercida por la adhesión. Además, según indicaciones de la propia ROM 0.5-05 para este tipo de suelos se puede tomar como valor de adhesión suelo-cimiento el de la cohesión del terreno. De esta forma queda la ecuación simplificada:

$$H_{(Rotura)Cohesivos} = c' \cdot S$$

Si por el contrario es un suelo granular se despreciará la adhesión suelo-cimentación, quedando la ecuación simplificada:

$$H_{(Rotura)Granulares} = V \cdot \operatorname{tg} \phi_c$$

La herramienta de predimensionado, al igual que en el caso de las tensiones transmitidas al terreno, obtiene las cargas para ambos casos como puede verse en la tabla 9, pero solo se toma el dato de una en función del tipo de suelo seleccionado en los datos de entrada.

CARGA HORIZONTAL DE ROTURA		
Carga H de rotura (Suelo Cohesivo)	H_{RotC}	123.298,43 kN
Carga H de rotura (Suelo Granular)	H_{RotG}	66.467,93 kN

Tabla 8 Cargas de rotura horizontal según ROM

La carga de rotura seleccionada se compara con la carga total horizontal que actúa sobre la cimentación y se obtiene la relación H_{Rot}/H_{Cal} que se compara con el coeficiente de seguridad al deslizamiento. Como puede verse en la tabla 9, extraída del modelo, si el resultado de la relación es mayor que el CSD se obtiene el mensaje “CUMPLE” en verde, si por el contrario es menor el mensaje es “NO CUMPLE” en rojo.

DESPLAZAMIENTO		CUMPLE
H_{Rot}	H_{calc}	H_{Rot} / H_{calc}
6,65E+04 kN	2,89E+04 kN	2,30

Tabla 9 Factor de seguridad frente al deslizamiento

Al igual que en la comprobación al hundimiento, se recuerda que los cálculos han sido realizados con la superficie equivalente rectangular, que es menor que la original, por lo que valores inferiores al CSD pero muy cercanos pueden ser considerados.

Comprobación de Seguridad frente al Vuelco

Para esta comprobación se usa el método de vuelco plástico, que a diferencia del vuelco rígido, este método si tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno.

Tomando de referencia las indicaciones de la ROM 0.5-05 para vuelco plástico (figura 51), la plastificación del terreno bajo el borde de la cimentación, cuando esta gira como un cuerpo rígido desplaza el eje de rotación una distancia d_o .

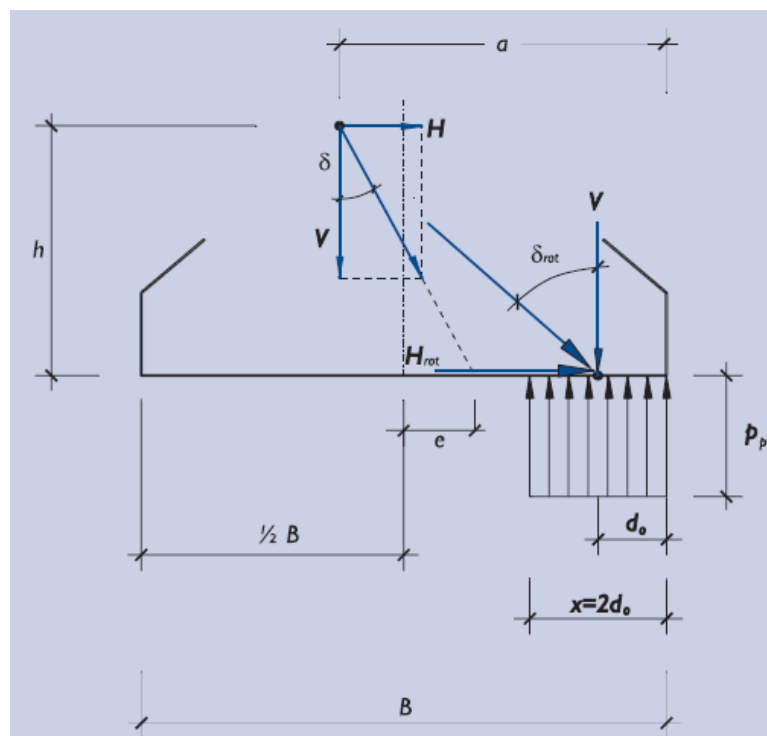


Figura 53. Comprobación del vuelco plástico (ROM 0.5-05)

El coeficiente de seguridad frente al vuelco plástico se calcula como la relación entre el momento de la fuerza horizontal que produce la rotura (calculada anteriormente), que es el máximo momento resistente, y el momento volcador de las fuerzas actuantes sobre la estructura.

$$F = M_{\text{res}} / M_{\text{vol}}$$

Se toma p_p como la carga de hundimiento q_h introducida en datos de entrada.

Para comprobar si cumple los criterios de seguridad se compara el factor de seguridad F con el coeficiente de seguridad de vuelco (CSV) definido por defecto según indicaciones de la propia ROM. Como puede observarse en la tabla 10

VUELCO PLÁSTICO		CUMPLE
ΣM_{res}	ΣM_{vol}	$\Sigma M_{\text{res}} / \Sigma M_{\text{volc}}$
1,19E+06 m*kN	4,91E+05 m*kN	2,41

Tabla 10 Factor de seguridad al vuelco plástico

De igual forma que las comprobaciones anteriores podrían tolerarse factores de seguridad ajustados debido al cambio de geometría equivalente.

5.6.2. Aspectos que mejorar

Las modificaciones principales que podrían mejorar el apartado del cálculo de estabilidad de la cimentación serían:

- Un método para obtener las tensiones transmitidas al terreno más refinado. Si bien la metodología actual de cimentación rectangular equivalente proporciona resultados aceptables para el nivel general en el que trabaja la herramienta de predimensionado, integrar un método que proporcione las tensiones para la geometría circular permitiría apurar más las comprobaciones de estabilidad.
- Incorporar una corrección por banqueta en la comprobación de hundimiento. Al posar la estructura sobre una banqueta se le da un apoyo más plana y de mayor resistencia que el propio terreno.

5.7. Cálculos de Resistencia Mecánica

5.7.1. Descripción de funcionamiento

Esta parte de la herramienta de predimensionado estudia la resistencia a compresión y tracción de dos secciones representativas de todo el fuste de la cimentación.

Se parten de los datos generados en las pestañas de cálculo de oleaje y de estabilidad, además de la entrada de datos.

La sección 1 se encuentra en la parte inferior del fuste cilíndrico y la sección 2 en la base del fuste tronco cónico.

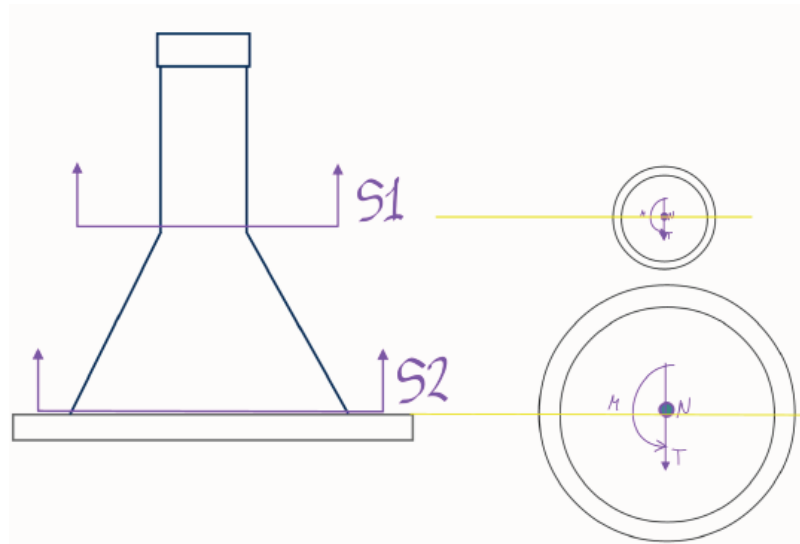


Figura 54. Secciones estudiadas de la cimentación

Dentro de cada sección se evalúa la resistencia a las tensiones máximas de compresión y de tracción (si las hubiera) generadas por el momento flector y el esfuerzo axial.

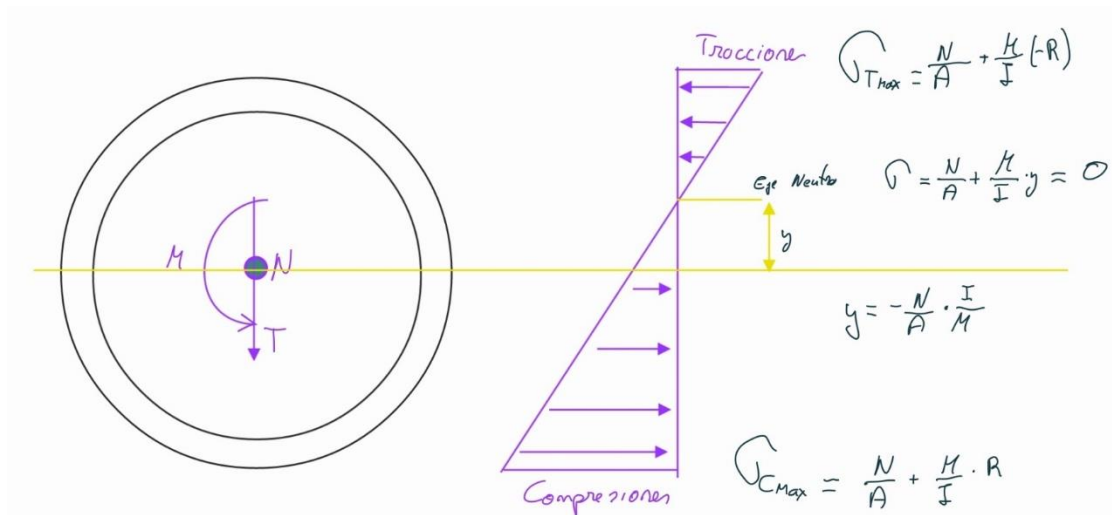


Figura 55. Tensiones máximas generadas por el axil y el momento flector

Para la resistencia a compresión se considera solo el hormigón. Una vez obtenidas las máximas compresiones en la sección simplemente se divide entre la resistencia de cálculo del hormigón f_{cd} , obtenida de dividir la resistencia característica (dependiente de la selección del material de la entrada de datos) entre su coeficiente de minoración γ_{MH} , según recomendaciones del Código Estructural. De esta forma obtenemos un factor de seguridad de la resistencia a compresión. Ya que a la resistencia de los materiales se les aplica coeficientes de minoración, la condición para cumplir esta comprobación es que el factor sea mayor que 1.

En el caso de la resistencia a la tracción se considera el acero como elemento resistente. Dado que establecer un factor de resistencia sería bastante complicado, ya que la cuantía de este se puede variar según los requerimientos, incluso estableciendo varias filas de armado, se ha optado por realizar dos comprobaciones.

La primera es la cuantía de acero necesaria para soportar los esfuerzos de tracción, que se obtiene con el límite elástico de acero minorado.

La segunda comprobación es la cuantía necesaria para evitar que el hormigón supere los límites de fisuración establecidos. Para ello se ha tomado como referencia el Código Estructural (tabla 11), que establece la abertura máxima de las fisuras para el hormigón según su clase de exposición.

Clase de exposición	w_{max} (mm)	
	Hormigón armado (para la combinación cuasi-permanente de acciones)	Hormigón pretensado (para la combinación frecuente de acciones)
X0 ⁽²⁾ , XC1 ⁽²⁾	0,4	0,2
XC2, XC3, XF1, XF3, XC4	0,3	0,2 ⁽¹⁾
XS1, XS2, XD1, XD2, XD3, XF2, XF4, XA1 ⁽³⁾	0,2	Descompresión
XS3, XA2 ⁽³⁾ , XA3 ⁽³⁾	0,1	

⁽¹⁾ Adicionalmente deberá comprobarse que las armaduras activas se encuentran en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación cuasi-permanente de acciones,

⁽²⁾ Para las clases de exposición X0 y XC1, la abertura de fisura no influye normalmente en la durabilidad. Los valores recogidos en la tabla para estos casos se establecen para garantizar un aspecto aceptable,

⁽³⁾ La limitación relativa a las clases XA1, XA2 y XA3 solo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar a la armadura.

Tabla 11 Abertura máxima de fisuras en hormigón según clase de exposición (CE)

El código estructural también aporta una relación simplificada entre tensión de acero, diámetro máximo de las barras y la abertura característica (tabla 12).

Tensión del acero ² [N/mm ²]	Diámetro máximo de la barra [mm]		
	$w_k = 0,4$ mm	$w_k = 0,3$ mm	$w_k = 0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Tabla 12 Relación entre tensión del acero, diámetro máximo de barra y abertura característica

Una vez obtenido la tensión máxima para la abertura de fisura característica y diámetro de barra máximo se obtiene la cuantía de acero necesaria (tabla 13).

TENSIONES MÁXIMAS EN S1		-2.402,56 kN/m ²
As Resistencia	As Fisuración	Kg Acero /m ³
11,4 cm ² /m ²	30,9 cm ² /m ²	24,08 kg/m ³

TENSIONES MÁXIMAS EN S2		-1.211,05 kN/m ²
As Resistencia	As Fisuración	Kg Acero /m ³
38,8 cm ² /m ²	105,3 cm ² /m ²	82,16 kg/m ³

Tabla 13 Cuantías mínimas necesarias para resistencia y para fisuración.

El parámetro de abertura máxima de fisura (W_k) y el diámetro máximo de barra están fijados por defecto y no son accesibles desde la entrada de datos, pero pueden modificarse desbloqueando las casillas E5 y E6 (figura 56) de la hoja de cálculo de resistencia mecánica, marcadas en color salmón.

	B	C	D	E
2	Datos de partida			
3	Características del Hormigón	Compresión H. Armado	f_{cd}	20.000,00 kN/m ²
4		Tracción H. Armado	f_{ct,m}	2.896,47 kN/m ²
5		Abertura característica de f	W_k	0,2 mm
6		Diámetro máxio de armadu	ØAcero	25 mm
7		Coefficiente de minoración	γ_{MH}	1,50

Figura 56. Parámetros modificables de la hoja de cálculo de resistencia mecánica

Como información complementaria también se aportan otros parámetros que pueden ser de interés para el usuario, como kg de acero por m³ y una posible distribución del armado.

Se añade una imagen representativa de la sección del armado (figura 57) para indicar los parámetros facilitados.

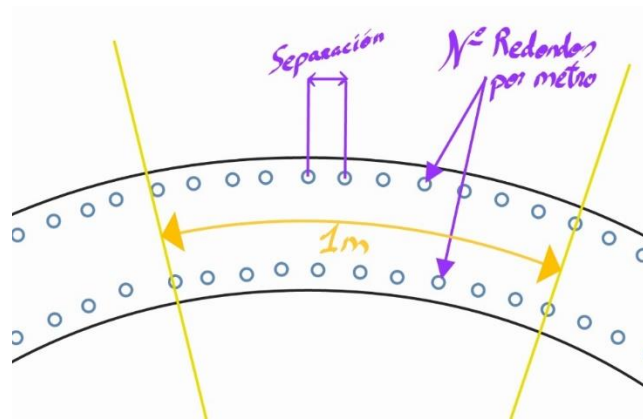


Figura 57. Detalle de sección con armado para esfuerzos de tracción

Es importante aclarar que este armado solo corresponde para los esfuerzos de tracción.

5.7.2. Aspectos que mejorar

Este es posiblemente el apartado que más margen de mejora tenga. Algunas de las mejoras que se podrían implementar son:

- Aumento del número de secciones.
- Comprobación de las secciones a esfuerzos de cortante.
- Comprobación de resistencia de la losa inferior.
- Obtención de un armado más completo.

5.8. Salida de Resultados

5.8.1. Descripción de funcionamiento

Este apartado, como se puede observar en la figura 58 recopila la información principal de los resultados de las hojas de cálculo, de forma que se puedan visualizar al mismo tiempo que introduces los datos de entrada y de esta forma ajustar los parámetros hasta dar con una solución óptima.

SALIDA DE RESULTADOS					
COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD			COMPROBACIONES DE RESISTENCIA		
HUNDIMIENTO			COMPRESIONES MÁXIMAS EN S1		
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}	σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
464,84 kN/m ²	550,00 kN/m ²	2,37	4.537,71 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	4,41
VUELCO PLÁSTICO			COMPRESIONES MÁXIMAS EN S2		
ΣM_{res}	ΣM_{volc}	$\Sigma M_{res} / \Sigma M_{volc}$	σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
1,19E+06 m ³ *kN	4,91E+05 m ³ *kN	2,41	2.960,44 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	6,76
DESPLAZAMIENTO			TENSIONES MÁXIMAS EN S1		
H_{rot}	H_{calc}	H_{rot} / H_{calc}	-2.402,56 kN/m ²		
6,65E+04 kN	2,89E+04 kN	2,30	As Resistencia	As Fisuración	Kg Acero / m ³
			11,4 cm ² /m ²	30,9 cm ² /m ²	24,08 kg/m ³
			TENSIONES MÁXIMAS EN S2		
			-1.211,05 kN/m ²		
			As Resistencia	As Fisuración	Kg Acero / m ³
			38,8 cm ² /m ²	105,3 cm ² /m ²	82,16 kg/m ³

Figura 58. Vista de la salida de resultados en la hoja principal

También aporta una serie de graficas con información concentrada de la solución adoptada como pesos totales, volúmenes de hormigón empleados, y esfuerzos en la base, que pueden resultar de interés para el usuario.

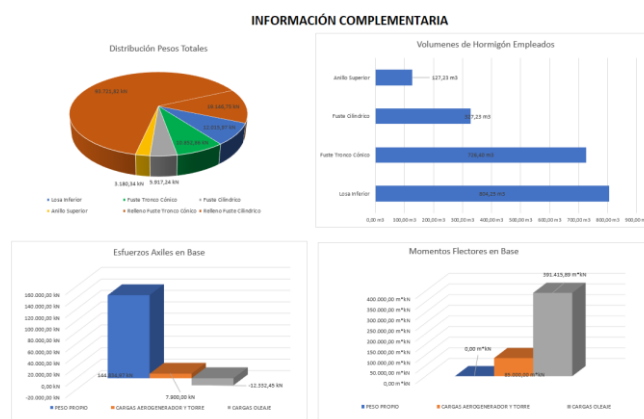


Figura 59. Graficas de información general en salida de datos.

5.8.2. Aspectos que mejorar

Al igual que le ocurre a la entrada de datos, los aspectos a mejorar dependen de la evolución de las otras hojas, ya que cuantos más se afinen o amplíen los cálculos más información de salida habrá para mostrar.

5.9. Validación de herramienta con caso práctico.

A continuación, se pone a prueba la herramienta un caso práctico para evaluar si esta es válida o no.

Se ha escogido un posible caso real de estudio, ubicado a 10 km del faro de Trafalgar, en Cádiz. Este emplazamiento se caracteriza por su alto potencial eólico, como puede observarse en la figura 60 extraída del Visor de Información Geográfica Marina, también cuenta con profundidades inferiores a los 50 metros, en concreto para este caso se tomará 42 metros.



Figura 60. Recurso eólico a 100 metros de altura (<http://infomar.cedex.es/>)

Estos dos factores, suponiendo además que el lecho marino es de alta capacidad portante, como ya se ha explicado anteriormente son clave en la elección de las cimentaciones de gravedad.

Los datos geotécnicos de partida son:

- Angulo de rozamiento $\varphi = 36^\circ$
- Cohesión $c' = 210,00 \text{ kN/m}^2$
- Carga de hundimiento $q_{hu} = 1.200,00 \text{ kN/m}^2$

El aerogenerador para este caso de estudio se considerará de 5MW y 125 metros de diámetro de rotor, lo que puede equivaler a las siguientes cargas:

- Axil N = 7.900,00 kN
- Cortante T = 950,00 kN
- Momento flector M = 85.000,00 m*kN

Los datos de caracterización (véase figura 61 y 62) se han obtenido de una boya ficticia (modelo numérico) de la web de puertos del estado.

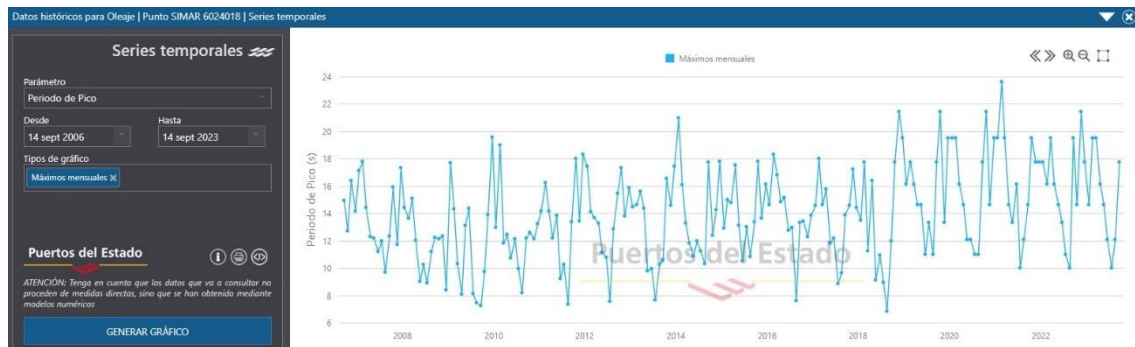


Figura 61. Caracterización del periodo pico del oleaje del modelo numérico del emplazamiento del caso práctico (www.puertos.es)

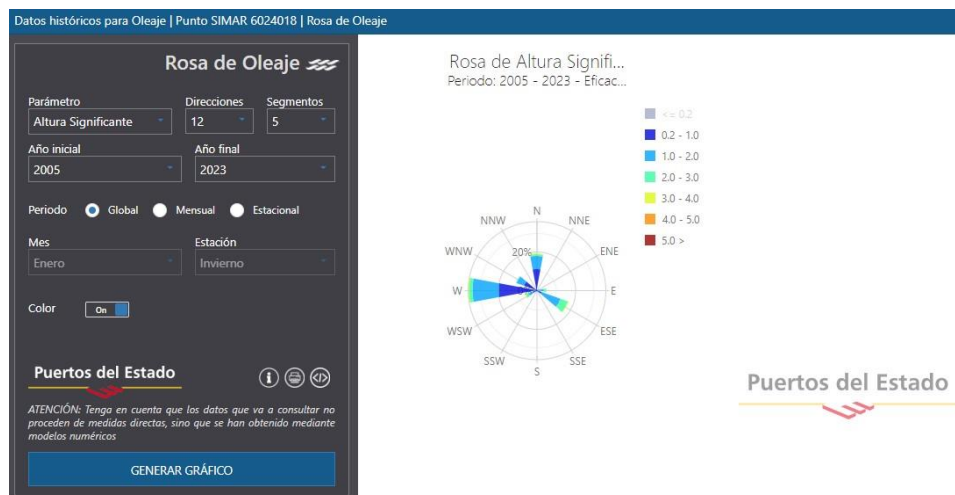


Figura 62. Caracterización de la altura de ola significativa del oleaje del modelo numérico del emplazamiento del caso práctico (www.puertos.es)

A partir de estos datos se ha ido probando variaciones de los parámetros, partiendo de dimensiones similares a las de casos reales, y en función de los resultados obtenidos se ha vuelto a modificar o no, hasta que se ha llegado a la geometría indicada en la tabla 14:

Geometría y Materiales			
Losa Inferior	Diametro Losa Inferior	ϕ_{Linf}	32,00 m
	Espesor Losa Inferior	e_{Li}	1,00 m
Fuste Tronco Cónico	Diametro Base Fuste Tronco Cónico	ϕ_{BFtc}	24,00 m
	Espesor Fuste Tronco Cónico	e_{Ftc}	0,60 m
	Altura Fuste Tronco Cónico	h_{Ftc}	22,00 m
Fuste Cilindrico	Diametro Fuste Cilindrico	ϕ_{Fc}	10,00 m
	Espesor Fuste Cilindrico	e_{Fc}	0,70 m
	Altura Fuste Cilindrico	h_{Fc}	20,00 m
Anillo Superior	Espesor Anillo Superior	e_{As}	2,00 m
	Altura Anillo Superior	h_{As}	3,00 m
Materiales	Hormigón Armado	HA-30	$f_{ck}= 30.000 \text{ kN/m}^2$
	Acero en refuerzo	B-500	$f_y= 500.000 \text{ kN/m}^2$

Tabla 14 Geometría definitiva

Los resultados de todas las comprobaciones son satisfactorios como puede verse en la tabla 15.

SALIDA DE RESULTADOS

COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD

HUNDIMIENTO		CUMPLE
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}
596,02 kN/m2	600,00 kN/m2	2,01

VUELCO PLÁSTICO		CUMPLE
$\sum M_{res}$	$\sum M_{Volic}$	$\sum M_{res} / \sum M_{Volic}$
1,16E+06 m*kN	6,10E+05 m*kN	1,90

DESPLIZAMIENTO		CUMPLE
H_{Rot}	H_{calc}	H_{Rot} / H_{calc}
6,52E+04 kN	3,09E+04 kN	2,11

COMPROBACIONES DE RESISTENCIA

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S1		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
6.016,28 kN/m2	20.000,00 kN/m2	3,32

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S2		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
3.476,25 kN/m2	20.000,00 kN/m2	5,75

TENSIONES MÁXIMAS EN S1		-3.584,66 kN/m2
A_s Resistencia	A_s Fisuración	K_g Acero /m3
15,8 cm2/m2	43,0 cm2/m2	33,55 kg/m3

TENSIONES MÁXIMAS EN S2		-1.622,40 kN/m2
A_s Resistencia	A_s Fisuración	K_g Acero /m3
29,3 cm2/m2	79,6 cm2/m2	62.11 kg/m3

Tabla 15 Resultados de comprobaciones

Observando la siguiente gráfica (figura 63) obtenida de la salida de resultados, se observa que la mayor parte del peso de la estructura proviene del material de relleno.

Distribución Pesos Totales

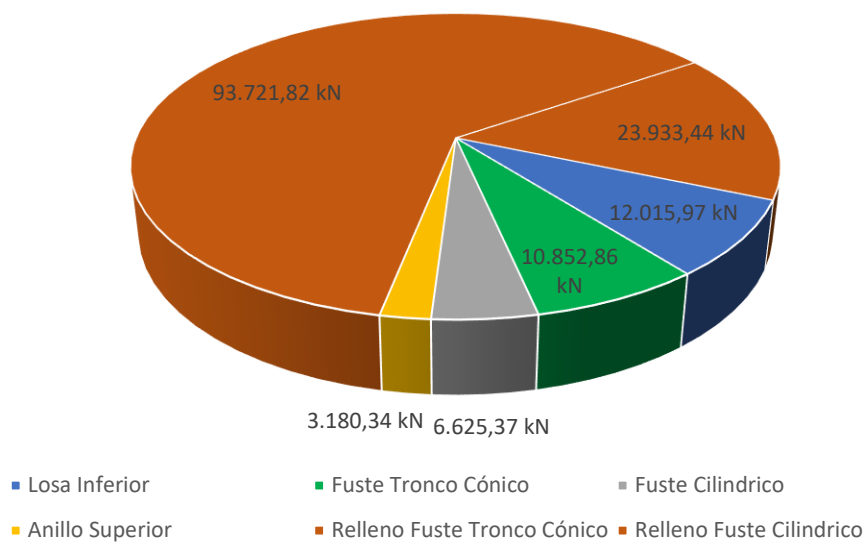


Figura 63. Gráfica de distribución de pesos totales.

En las siguientes figuras se puede ver el total de volúmenes de hormigón y los máximos esfuerzos flectores y axiles en la base.

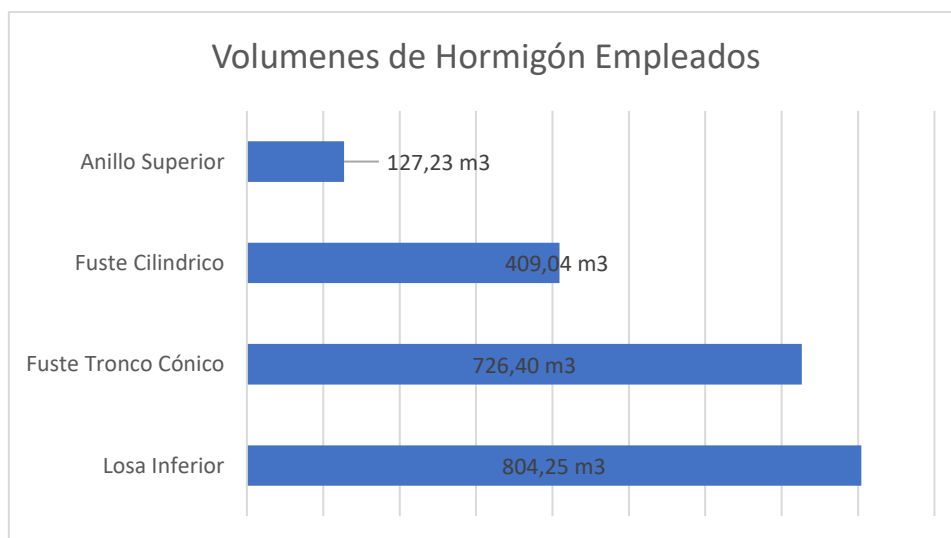


Figura 64. Gráfica de volúmenes totales.

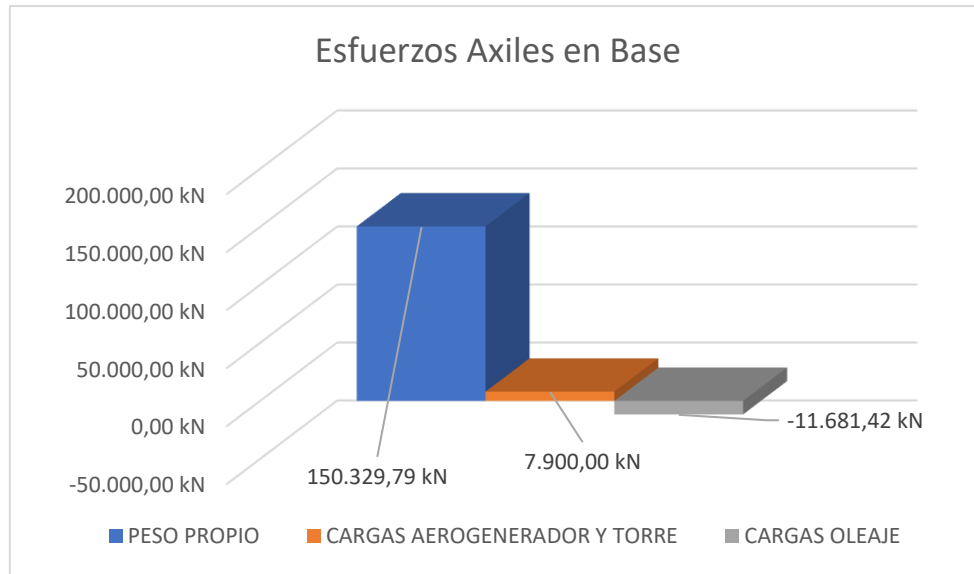


Figura 65. Gráfica de esfuerzos axiales.

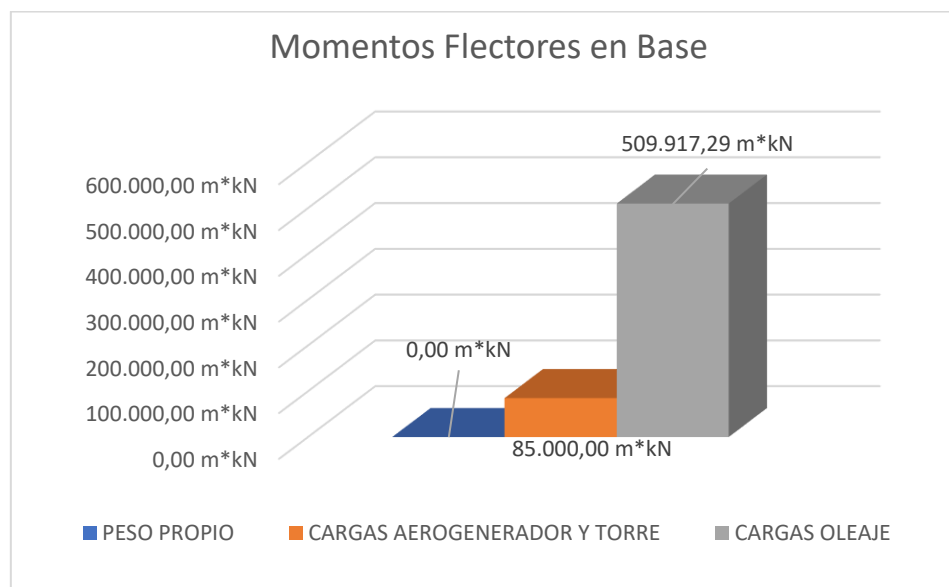


Figura 66. Gráfica de flectores en la base

Se observa que la mayor aportación de axil es del peso propio, el cual es proviene mayoritariamente del relleno, y que el momento flector es principalmente el producido por el oleaje.

Como dato extra se obtiene las cuantías de necesarias para la resistencia de esfuerzos de tracción y para limitación por fisuración del hormigón en la base del fuste tronco cónico.

Cuantías de Acero por limitación de Resistencia Mecánica a Tracción	Area Acero por m ²	A_S Resistencia	29,3 cm ² /m ²
	Kg Acero por m ³	Kg Acero /m ³	22,86 kg/m ³
	Nº Redondos por m lineal	Nº Red por ml	4 Ø/m
	Separación Ø en 1 Fila	Separación Ø	50,0 cm

Cuantías de Acero por limitación de Fisuración	Area Acero por m ²	A_S Fisuración	79,6 cm ² /m ²
	Kg Acero por m ³	Kg Acero /m ³	62,11 kg/m ³
	Nº Redondos por m lineal	Nº Red por ml	10 Ø/m
	Separación Ø en 1 Fila	Separación Ø	20,0 cm

Tabla 16 Cuantías de acero para tracción y limitación de fisuración

A continuación, con el fin de contrastar los resultados, se muestran los datos de partida y resultados para otros casos de estudio.

Caso 1
DATOS DE ENTRADA
Emplazamiento y condiciones de contorno

EMPLAZAMIENTO	Profundidad	h	40,00 m
	Altura de banqueta o cama	h_{bq}	3,00 m
	Altura de ola significativa	H_s	4,00 m
	Periodo Oleaje	T_p	23,61 s
	Carga de hundimiento	q_{hu}	1.200,00 kN/m ²
	Tipo de suelo	Suelo Granular	
	Angulo de rozamiento	φ	38,00 °
CARGAS AEROGENERADOR Y TORRE	Cohesión	c'	210,00 kN/m ²
	Axil	N	7.900,00 kN
	Cortante	T	950,00 kN
	Momento Flector	M	85.000,00 m*kN

Geometría y Materiales

Losa Inferior	Diametro Losa Inferior	$\varnothing_{Linf}$	35,00 m
	Espesor Losa Inferior	e_{Li}	1,00 m
Fuste Tronco Cónico	Diametro Base Fuste Tronco Cónico	$\varnothing_{BFtc}$	28,00 m
	Espesor Fuste Tronco Cónico	e_{Ftc}	0,70 m
	Altura Fuste Tronco Cónico	h_{Ftc}	25,00 m
	Diametro Fuste Cilindrico	$\varnothing_{Fc}$	10,00 m
Fuste Cilindrico	Espesor Fuste Cilindrico	e_{Fc}	0,70 m
	Altura Fuste Cilindrico	h_{Fc}	15,00 m
	Espesor Anillo Superior	e_{As}	2,50 m
Anillo Superior	Altura Anillo Superior	h_{As}	4,00 m
Materiales	Hormigón Armado	HA-30	$f_{ck}= 30.000 \text{ kN/m}^2$
	Acero en refuerzo	B-500	$f_y= 500.000 \text{ kN/m}^2$

SALIDA DE RESULTADOS
COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD

HUNDIMIENTO		CUMPLE
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}
547,97 kN/m ²	600,00 kN/m ²	2,19

VUELCO PLÁSTICO		CUMPLE
$\sum M_{res}$	$\sum M_{volc}$	$\sum M_{res} / \sum M_{volc}$
1,66E+06 m*kN	7,56E+05 m*kN	2,19

DESlizamiento		CUMPLE
H_{Rot}	H_{calc}	H_{Rot} / H_{calc}
8,74E+04 kN	4,48E+04 kN	1,95

COMPROBACIONES DE RESISTENCIA

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S1		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
5.349,45 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	3,74

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S2		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
2.814,96 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	7,10

TENSIONES MÁXIMAS EN S1		-3.031,58 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
3,1 cm ² /m ²	8,4 cm ² /m ²	6,59 kg/m ³

TENSIONES MÁXIMAS EN S2		-1.239,80 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
38,1 cm ² /m ²	103,5 cm ² /m ²	80,76 kg/m ³

Caso 2

DATOS DE ENTRADA

Emplazamiento y condiciones de contorno			
EMPLAZAMIENTO	Profundidad	h	25,00 m
	Altura de banqueta o cama	h_{bq}	0,00 m
	Altura de ola significativa	H_s	2,50 m
	Periodo Oleaje	T_p	25,00 s
	Carga de hundimiento	q_{hu}	1.200,00 kN/m ²
	Tipo de suelo	Suelo Cohesivo	
	Angulo de rozamiento	φ	35,00 °
CARGAS AEROGENERADOR Y TORRE	Cohesión	c'	190,00 kN/m ²
	Axil	N	7.900,00 kN
	Cortante	T	950,00 kN
	Momento Flector	M	85.000,00 m*kN

Geometría y Materiales

Losa Inferior	Diametro Losa Inferior	ϕ_{Linf}	24,00 m
	Espesor Losa Inferior	e_{Li}	1,00 m
Fuste Tronco Cónico	Diametro Base Fuste Tronco Cónico	ϕ_{BFtc}	20,00 m
	Espesor Fuste Tronco Cónico	e_{Ftc}	0,70 m
	Altura Fuste Tronco Cónico	h_{Ftc}	10,00 m
	Diametro Fuste Cilindrico	ϕ_{Fc}	10,00 m
Fuste Cilindrico	Espesor Fuste Cilindrico	e_{Fc}	0,70 m
	Altura Fuste Cilindrico	h_{Fc}	20,00 m
	Espesor Anillo Superior	e_{As}	2,00 m
Anillo Superior	Altura Anillo Superior	h_{As}	2,00 m
Materiales	Hormigón Armado	HA-30	$f_{ck}= 30.000 \text{ kN/m}^2$
	Acero en refuerzo	B-500	$f_y= 500.000 \text{ kN/m}^2$

SALIDA DE RESULTADOS

COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD

HUNDIMIENTO		NO CUMPLE
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}
628,93 kN/m ²	600,00 kN/m ²	1,91

VUELCO PLÁSTICO		CUMPLE
$\sum M_{res}$	$\sum M_{volc}$	$\sum M_{res} / \sum M_{volc}$
4,52E+05 m*kN	2,64E+05 m*kN	1,71

DESPLAZAMIENTO		CUMPLE
H_{Rot}	H_{calc}	H_{Rot} / H_{calc}
5,62E+04 kN	1,67E+04 kN	3,37

COMPROBACIONES DE RESISTENCIA

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S1		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
4.884,51 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	4,09

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S2		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
2.145,28 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	9,32

TENSIONES MÁXIMAS EN S1		-2.632,16 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
6,1 cm ² /m ²	16,5 cm ² /m ²	12,89 kg/m ³

TENSIONES MÁXIMAS EN S2		-769,00 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
48,9 cm ² /m ²	133,0 cm ² /m ²	103,71 kg/m ³

Caso 3

DATOS DE ENTRADA

Emplazamiento y condiciones de contorno			
EMPLAZAMIENTO	Profundidad	h	53,00 m
	Altura de banqueta o cama	h_{bq}	0,00 m
	Altura de ola significante	H_s	7,00 m
	Periodo Oleaje	T_p	14,00 s
	Carga de hundimiento	q_{hu}	1.300,00 kN/m ²
	Tipo de suelo	Suelo Cohesivo	
CARGAS AEROGENERADOR Y TORRE	Angulo de rozamiento	φ	38,00 °
	Cohesión	c'	210,00 kN/m ²
	Axíl	N	7.900,00 kN
	Cortante	T	950,00 kN
	Momento Flector	M	85.000,00 m*kN

Geometría y Materiales

Losa Inferior	Diametro Losa Inferior	ϕ_{Linf}	46,00 m
	Espesor Losa Inferior	e_{Li}	1,00 m
Fuste Tronco Cónico	Diametro Base Fuste Tronco Cónico	ϕ_{BFtc}	37,00 m
	Espesor Fuste Tronco Cónico	e_{Ftc}	0,70 m
	Altura Fuste Tronco Cónico	h_{Ftc}	17,00 m
Fuste Cilindrico	Diametro Fuste Cilindrico	ϕ_{Fc}	11,00 m
	Espesor Fuste Cilindrico	e_{Fc}	0,70 m
	Altura Fuste Cilindrico	h_{Fc}	36,00 m
Anillo Superior	Espesor Anillo Superior	e_{As}	3,50 m
	Altura Anillo Superior	h_{As}	4,00 m
Materiales	Hormigón Armado	HA-30	$f_{ck} = 30.000 \text{ kN/m}^2$
	Acero en refuerzo	B-500	$f_y = 500.000 \text{ kN/m}^2$

SALIDA DE RESULTADOS

COMPROBACIONES DE ESTABILIDAD

HUNDIMIENTO		CUMPLE
σ_{Max}	σ_{Adm}	q_{hu} / σ_{Max}
622,60 kN/m ²	650,00 kN/m ²	2,09

VUELCO PLÁSTICO		CUMPLE
$\sum M_{res}$	$\sum M_{volc}$	$\sum M_{res} / \sum M_{volc}$
2,91E+06 m*kN	1,74E+06 m*kN	1,67

DESPLAZAMIENTO		CUMPLE
H_{Rot}	H_{calc}	H_{Rot} / H_{calc}
2,21E+05 kN	6,80E+04 kN	3,26

COMPROBACIONES DE RESISTENCIA

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S1		NO CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
20.345,22 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	0,98

COMPRESIONES MÁXIMAS EN S2		CUMPLE
σ_{MaxC}	f_{cd}	f_{cd} / σ_{MaxC}
3.377,95 kN/m ²	20.000,00 kN/m ²	5,92

TENSIONES MÁXIMAS EN S1		-16.012,45 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
301,7 cm ² /m ²	819,7 cm ² /m ²	639,40 kg/m ³

TENSIONES MÁXIMAS EN S2		-1.891,75 kN/m ²
A_s Resistencia	A_s Fisuración	Kg Acero /m ³
23,1 cm ² /m ²	62,8 cm ² /m ²	48,98 kg/m ³

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Con apenas treinta años de experiencia, el sector de la ingeniería eólica marina ha experimentado un crecimiento y desarrollo exponencial. Durante este tiempo, se han desarrollado varias tipologías de cimentaciones que permitan soportar las dimensiones crecientes de los aerogeneradores y adaptarse a los diferentes entornos optimizando los recursos lo máximo posible.

Las cimentaciones de gravedad se prestan como una alternativa competente bajo las condiciones de buena capacidad portante del terreno y profundidades moderadas. Estas han evolucionado a lo largo de 4 generaciones diferenciadas, buscando una aportación de peso por parte del material de relleno (o lastrado) cada vez mayor.

Tras la revisión del estado del arte y viendo su evolución, es comprensible esperar un aumento del uso de esta tipología de cimentaciones, así como un aumento significativo de sus dimensiones para soportar los aerogeneradores cada vez mayores y el aumento de las profundidades donde se ubican.

Es imperativo y necesario que, tanto las normativas y recomendaciones, como las metodologías y programas de cálculo se desarrollen a la par, de forma que cubran las necesidades que generan proyectos de estas características.

El ámbito de las metodologías de cálculo computacionales parece muy avanzado y con bastante inercia de progreso, pero otros aspectos como las herramientas de cálculo para predimensionado, extensamente usadas en otros ámbitos de la ingeniería civil más antiguos, parecen no haberse desarrollado. Esto puede dificultar la incorporación a este sector en auge a ingenierías que no acumulen experiencia suficiente en este ámbito.

Una posible línea de investigación y desarrollo, viendo que los resultados del caso práctico para validar la herramienta se asemejan a los de modelos reales, podría ser la de la elaboración de una herramienta o conjunto de herramientas con las que se pueda realizar una estimación de cálculo para cada una de las tipologías de cimentaciones con una baja inversión de recursos, de forma que se pueda evaluar en poco tiempo que tecnología es más adecuada para cada caso.

BIBLIOGRAFIA

- VÁZQUEZ, Kerman, RODRÍGUEZ, R.R. y ESTEBAN, M.D., 2022. Corrosion Prediction Models in the Reinforcement of Concrete Structures of Offshore Wind Farms. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, ISSN 2077-1312. DOI 10.3390/jmse10020185.
- VÁZQUEZ, K., RODRÍGUEZ, R.R. y ESTEBAN, M.D., 2022. Inventory proposal for gravity-based support structures in offshore wind farms. *Ocean Engineering*, vol. 266, ISSN 00298018. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113098.
- DYMARSKI, P., CIBA, E. y MARCINKOWSKI, T., 2016. Effective Method for Determining Environmental Loads on Supporting Structures for Offshore Wind Turbines. *Polish Maritime Research*, vol. 23, no. 1, ISSN 2083-7429. DOI 10.1515/pomr-2016-0008.
- ESTEBAN, M., LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J.-S. y NEGRO, V., 2019. Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, ISSN 2077-1312. DOI 10.3390/jmse7030064.
- ESTEBAN, M.D., COUÑAGO, B., LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J.S., NEGRO, V. y VELLISCO, F., 2015. Gravity based support structures for offshore wind turbine generators: Review of the installation process. *Ocean Engineering*, vol. 110, ISSN 00298018. DOI 10.1016/j.oceaneng.2015.10.033.
- IACS, Obejtives, Strategy and Action Plan (2014-2015), Adopted by Council at C69, June 2014. Rev.1, Nov.2014., [sin fecha]. S.l.: s.n.
- IWICKI, P. y PRZEWŁÓCKI, J., 2020. Short Review and 3-D FEM Analysis of Basic Types of Foundation for Offshore Wind Turbines. *Polish Maritime Research*, vol. 27, no. 3, ISSN 2083-7429. DOI 10.2478/pomr-2020-0044.
- MATHERN, A., VON DER HAAR, C. y MARX, S., 2021. Concrete Support Structures for Offshore Wind Turbines: Current Status, Challenges, and Future Trends. *Energies*, vol. 14, no. 7, ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en14071995.
- NIKLAS, K., 2017. Strength Analysis of a Large-Size Supporting Structure for an Offshore Wind Turbine. *Polish Maritime Research*, vol. 24, no. s1, ISSN 2083-7429. DOI 10.1515/pomr-2017-0034.
- OTTER, A., MURPHY, J., PAKRASHI, V., ROBERTSON, A. y DESMOND, C., 2021. A review of modelling techniques for floating offshore wind turbines. *Wind Energy*, ISSN 1095-4244, 1099-1824. DOI 10.1002/we.2701.
- ASHWATHAAPPA, K. and SHRIDHARA, B., 2010. *Production and Operations Management*. 2nd ed. Mumbai: Himalaya Publishing House.
- CUNDALL, P.A. and STRACK, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies.

Géotechnique. 29(1), pp. 47-65.

JONSSON, P., 2008. Logistics and Supply Chain Management. London: McGraw-Hill.

O'SULLIVAN, C., 2011. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective. London: Spon Press.

SLACK, N. and LEWIS, M., 2011. Operations Strategy. 3rd ed. Harlow: Pearson Education.

BOURRIOT, R., 2022. Geotechnical design of offshore wind turbine gravity-based foundations. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 54, pp. 60-79.

MA, S. et al., 2022. DEM modelling of geotechnical problems: A review. *Computers and Geotechnics*, 140, p.104535.

WANG, G. et al., 2004. Product-driven supply chain selection using integrated multi-criteria decision-making methodology. *International Journal of Production Economics*, 91(1), pp. 1-15.

ZHAO, J. et al., 2019. Advances in discrete element method modeling of geotechnical problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), pp. 941-958.

KOCH, C., 2012. Contested overruns and performance of offshore wind power plants. MSc. Chalmers University of Technology.

DNV, 2022. Software for offshore wind turbines design. [online] Dnv.com. Available at: <https://www.dnv.com/oilgas/offerings/software/wind-turbines-design.html> [Accessed 17 October 2022].

SAIPEM, 2022. Fécamp offshore wind farm. [online] Saipem. Available at: <https://www.saipem.com/en/projects/fecamp-offshore-wind-farm> [Accessed 17 October 2022].

Wu, C., Young, Y.L., Nepf, H.M. (2019). Retardance Coefficients for Flexible Vegetation: Comparison between Fielddata and Numerical Estimations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(8).

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill.

Brebbia, C.A., Dominguez, J. (1992). Boundary Elements: An Introductory Course. Computational Mechanics Publications.

Airy, G.B. (1845). Tides and waves. *Encyclopaedia Metropolitana*.

Cummings, A., Turner, S., Sivakugan, N. (1990). Geotechnical Engineering: A Practical Problem

Solving Approach. Springer.

Das, B.M., Sivakugan N. (2017). Fundamentals of Soil Mechanics. Cengage Learning.

Dean, R.G., Dalrymple, R.A. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Publishing Co.

Goda, Y. (1985). Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press.

Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. World Scientific Publishing Co.

Holthuijsen, L.H. (2010). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press.

Katsikadelis, J.T. (2016). Boundary elements theory and applications. Elsevier.

Kirkgoz, M.S., Akoz, M.S., Oner, A.A. (1992). Impact pressures and forces of breaking waves on vertical walls. Ocean Engineering, 19(4), 323-347.

Ministerio de Fomento (2005). Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera.

Sánchez-Arcilla, A., González-Marco, D. (2008). Coastal dynamics and rapid coastal changes. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

US Army Corps of Engineers (2002). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, Washington, D.C. (in 6 volumes).

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education Ltd.

ROM 0_3-91 Clima Marítimo Español.pdf, S.l.: s.n.

ROM 0_5-05 Geotecnia para las Obras Marítimas y Portuarias.pdf. S.l.: s.n.

ROM 2.0-11 Obras de Atraque y Amarre Criterios generales.pdf, S.l.: s.n.

Codigo estructural Anejo 19.pdf,. S.l.: s.n.

DNV Fixed-offshore-wind-structure-design.pdf,. S.l.: s.n.

AN_UNE-EN 1992-1-1.pdf,. S.l.: s.n.