

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA ALREDEDOR DE AEROGENERADORES MARINOS

Autor: Sergi Casases López

Director: José Maria Alsina Torrent

Alba Ramos Cabal

Convocatoria: 2020-2021



Escuela Técnica Superior en
Ingeniería Industrial de Barcelona



ETSEIB

Resumen

El presente proyecto consiste en analizar y comparar la hidrodinámica del flujo marino alrededor de dos tipos concretos de estructuras offshore: el monopilote y el tipo *jacket*. El principal enfoque de dicho estudio es analizar cómo las distintas estructuras, con sus respectivas bases, afectan el campo de velocidades del flujo marino y, consecuentemente, el fenómeno de socavación. A tal efecto, primero se realiza su diseño en tres dimensiones mediante el uso de un software CAD para modelado mecánico, *SOLIDWORKS* [1], y seguidamente se realiza una simulación y análisis por vía de un código de hardware desarrollado para resolver problemas de fluidos con superficie libre, *DualSPHysics* [2]. Además, mediante *Paraview* [3], una aplicación de visualización y análisis de datos multiplataforma, se complementa visualmente el análisis numérico obtenido con *DualSPHysics*.

Previamente se desarrollan las principales conclusiones obtenidas en diversos estudios relacionados con el fenómeno de la socavación y la estabilidad de las estructuras. Se analizan los vórtices originados en la base de la estructura, se documentan las especificaciones de diseño de los dos tipos de estructura estudiados y se especifican las simplificaciones efectuadas en el presente estudio.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con las conclusiones mostradas en otros estudios, y se analizan sus similitudes y diferencias. En términos generales, se concluye una mayor aparición de vórtices de herradura en la base de la estructura del monopilote, concordando con un estudio realizado por M. Welzel et al. [4]. Por otro lado, se deduce un mayor efecto de esfuerzos cortantes en dirección y en las patas de la estructura *jacket*. Por último, remarcar que no se han observado diferencias notables entre las dos profundidades analizadas.

Índice

Resumen.....	3
1. Prefacio	7
1.1. Origen del proyecto.....	7
1.2. Requerimientos previos	7
2. Introducción	8
2.1. Objetivos del proyecto	8
2.2. Alcance del proyecto.....	8
2.3. Comparativa entre energía onshore y offshore.....	8
2.4. Previsiones en el sector de la energía eólica	10
3. Estructuras y cimentaciones	12
3.1. Estructuras por gravedad	12
3.2. Estructuras trípode.....	13
3.3. Estructuras monopilote.....	13
3.4. Estructuras de tipo <i>jacket</i>	15
3.5. Cimentaciones	17
4. Estabilidad y normas de diseño generales de las estructuras	18
4.1. Monopilote.....	19
4.2. <i>Jacket</i>	21
5. Socavación y normas de diseño generales de las estructuras	23
5.1. Monopilote.....	23
5.2. <i>Jacket</i>	25
6. DualSPHysics	28
6.1. Longitud de suavizado o suavizado Kernel.....	28
6.2. Ecuación de la conservación del momento.....	29
6.3. Ecuación de la continuidad	29
6.4. Métodos de integración	30
6.5. Cómputo de la simulación y GPU/CPU.....	30
7. Sistema diseñado	32
7.1. Diseño de la estructura monopilote.....	32
7.2. Diseño de la estructura <i>jacket</i>	36
7.3. Interfaz gráfica FreeCAD	38
7.4. Dimensiones del sistema en <i>FreeCAD</i>	39
7.5. Características del flujo	40
7.5.1. Análisis de las olas regulares	41
7.6. Damping o amortiguamiento	42

7.7. Ejecución y postproceso.....	42
8. Resultados y discusión	44
8.1. Estudio en el eje x	45
8.2. Estudio en el eje z.....	50
8.3. Estudio en el eje y	54
9. Impacto ambiental del proyecto.....	57
10. Gastos del proyecto	60
11. Conclusiones.....	61
12. Futuros Proyectos	62
Bibliografía	63

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

El límite de emisiones de CO₂ establecido por diversos protocolos, la búsqueda de la seguridad energética, así como el lento avance en el desarrollo de la fusión nuclear, han favorecido al estudio y desarrollo de las energías renovables, entre las que se encuentra la energía eólica y, más específicamente, la eólica marina. Ésta aprovecha la fuerza del viento que se produce en alta mar para generar electricidad. Su elevado potencial y valor estratégico le sitúan como una de las fuentes renovables que puede jugar un papel crucial para permitir alcanzar una economía climáticamente neutra en 2050.

Hay diversos tipos de estructuras offshore, elementos sobre los que se apoyan los aerogeneradores, entre los que destacan las estructuras por gravedad, monopilotes, de tipo trípode y, finalmente, tipo *jacket* (ver figuras en el apartado 3). Uno de los principales problemas a los que se enfrenta continuamente el sector es a la desestabilización de estas estructuras por culpa del fenómeno de la socavación. Este fenómeno viene generado por una serie de vórtices que aparecen en la base de la estructura debido a la continua acción del oleaje y de las corrientes marinas. Aun presentando una amenaza tan grande para la estabilidad de estas estructuras, hay muy pocos estudios acerca de la evolución temporal de este fenómeno, por lo que la gran mayoría de diseños y prevenciones se realizan en base a experiencias y datos previos de otras instalaciones. Además, debido a que mayoritariamente los parques eólicos marinos instalados hasta la fecha utilizan estructuras de tipo monopilote, hay una gran diferencia en cantidad de información disponible entre éstos últimos y las estructuras restantes.

1.2. Requerimientos previos

En primer lugar, se debe analizar el estado del arte y los requisitos de diseño de las dos estructuras a estudiar en el presente proyecto, además de analizar los diversos estudios existentes en referencia al fenómeno de la socavación. Se debe aprender a manejar las herramientas de diseño CAD y hardware para fluidos como son *SOLIDWORKS* y *DualSPHysics*, respectivamente. Además, se debe aprender el funcionamiento de *FreeCAD*, una interfaz gráfica para *DualSPHysics* y de *Paraview*, una multiplataforma de visualización y análisis de datos.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

Analizar y comparar el campo de velocidades de un flujo al pasar alrededor de las dos estructuras a estudiar en el presente proyecto: el monopilote y el tipo *jacket*. Además, también se analizará en la medida de lo posible la aparición de vórtices en la base de las estructuras. A tal efecto, se seguirán los pasos y requerimientos establecidos en el apartado 1.2.

2.2. Alcance del proyecto

Los principales puntos a tratar en el presente trabajo son los mencionados en el apartado 2.1, los cuales se describirán mayoritariamente de forma cualitativa.

A tal efecto, no formará parte de este proyecto analizar de forma cualitativa o cuantitativa las cargas y momentos generados sobre las estructuras diseñadas por las fuerzas del oleaje y corriente. Tampoco se tiene en cuenta el aerogenerador en el diseño del sistema y simulaciones realizadas.

2.3. Comparativa entre energía onshore y offshore

A principios de los años 70, la comunidad científica empezó a estudiar y desarrollar las energías renovables en búsqueda de una alternativa para las energías tradicionales. A día de hoy, y debido a los grandes avances tecnológicos de las últimas décadas, ya no debemos hablar de alternativas sino de realidades. Los principales factores por los que, en los últimos años, la comunidad científica ha sido empujada hacia las mencionadas energías renovables son, en primer lugar, los límites de emisiones de gases de invernadero establecidos en diferentes convenciones y protocolos, como el Protocolo Kyoto. En segundo lugar, la búsqueda de la seguridad energética en conjunto con el lento avance en el desarrollo de la fusión nuclear.

En cómputos generales, la energía eólica es una de las energías más limpias que existen hoy en día, caracterizada por dejar impactos mínimos y locales en el medio ambiente. Además, es una de las fuentes de energía más baratas [5], lo que fomenta su inversión y desarrollo. Consta segunda dentro de las energías renovables más producidas hasta la fecha [6], solamente detrás de la energía hidroeléctrica. Además, al contrario que esta última, el aprovechamiento de su energía primaria es considerablemente más sencillo y su rango de acción mucho más amplio, abarcando casi la totalidad del planeta. El principio básico de la energía eólica es el siguiente: el calentamiento irregular de la superficie terrestre por parte del sol genera aire en movimiento, es decir, viento. Un aerogenerador aprovecha la energía cinética del viento y la transforma en energía eléctrica o mecánica, las cuales se pueden aprovechar para una infinidad de usos prácticos.

Dentro de la energía eólica se pueden diferenciar dos categorías diferentes: la *onshore* y la *offshore*. La energía eólica onshore es la energía obtenida del viento por aerogeneradores

ubicados en tierra y es, según la empresa española Greenalia “*a día de hoy la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables*” [7]. Por el contrario, la eólica offshore, cuyo desarrollo tecnológico y ritmo de instalación es más lento que su análoga onshore, aprovecha la energía cinética del viento de alta mar.

A continuación, se exponen las principales características, ventajas y desventajas de ambos tipos de eólica. Tal y como se podrá ver, ambas presentan numerosas similitudes, pero sus escasas diferencias son suficientes como para poder hablar de dos ramas distintas.

Por un lado, la eólica onshore requiere de procesos de instalación mucho más asequibles, tanto a nivel técnico como económico. Estas facilidades tanto en el transporte como en la instalación han hecho que su penetración en el mercado sea mucho mayor que la eólica offshore. Adicionalmente, debido al menor contacto con la humedad en comparación con su análoga, no requieren de un elevado mantenimiento.

Con todo, presentan ciertos inconvenientes, siendo el primero su impacto visual y acústico. Por este motivo, se procura construir los parques eólicos *onshore* en ubicaciones de poco valor ambiental. Un efecto secundario derivado del primero es que, al construirse en terrenos lejanos a las grandes poblaciones, se requieren cables de distribución muy extensos con tal de poder conectar la electricidad producida con la red. Por otro lado, se debe considerar que los vientos terrestres son más impredecibles y lentos que los vientos que se encuentran en el mar. Los diferentes obstáculos que se encuentran en tierra los ralentizan, hecho que influye negativamente en los aerogeneradores terrestres, ya que todo aerogenerador está diseñado para trabajar de manera óptima a una velocidad de viento específica.

Por otro lado, se encuentra la eólica *offshore*, cuyos procesos de instalación y mantenimiento son considerablemente superiores debido a su ubicación geográfica. Su instalación acarrea diversas dificultades, como la instalación de la torre o el ensamblaje de las palas en alta mar. Es por ello que contar con equipos adecuados de elevación se vuelve imprescindible en dichas operaciones. Debido a un mayor contacto con humedad, requieren de un mantenimiento constante y preciso, además de tener que coexistir con las cargas marinas (oleaje y corriente), hecho que dificulta el diseño y crea incertidumbre estructural.

Estas cargas marinas son absorbidas por las estructuras y fundaciones de los aerogeneradores marinos, los cuales requieren de un proceso de desarrollo, constructivo y logístico mucho más delicado. Actualmente el debate acerca de cómo mejorar y optimizar dichos elementos está en auge, principalmente gracias a la ambición de aprovechar el potencial energético del viento en alta mar. Si se consigue revolucionar y reducir el coste de dichas cimentaciones, el coste global de los parques eólicos *offshore* se vería drásticamente reducido, por lo que el crecimiento de los proyectos llevados a cabo sería exponencial. No obstante, cabe señalar que, a mayor profundidad, mayores son las cargas hidrodinámicas ejercidas sobre la estructura, por lo que la complejidad de los estudios dinámicos aumenta en la misma medida.

Con todo, la eólica *offshore* presenta una gran ventaja. El mayor beneficio es que el viento en alta mar es más confiable y estable. Incluso en aguas poco profundas, el viento tiende a ser más predecible y veloz que en tierra, principalmente debido a la falta de obstáculos y a un coeficiente

de rugosidad del terreno de clase 0 [8]. Los rápidos vientos constantes contribuyen a una fuerte producción de electricidad en los parques offshore.

A continuación, se presenta una comparativa gráfica de la producción acumulada en Europa entre la eólica *onshore* y la *offshore*.

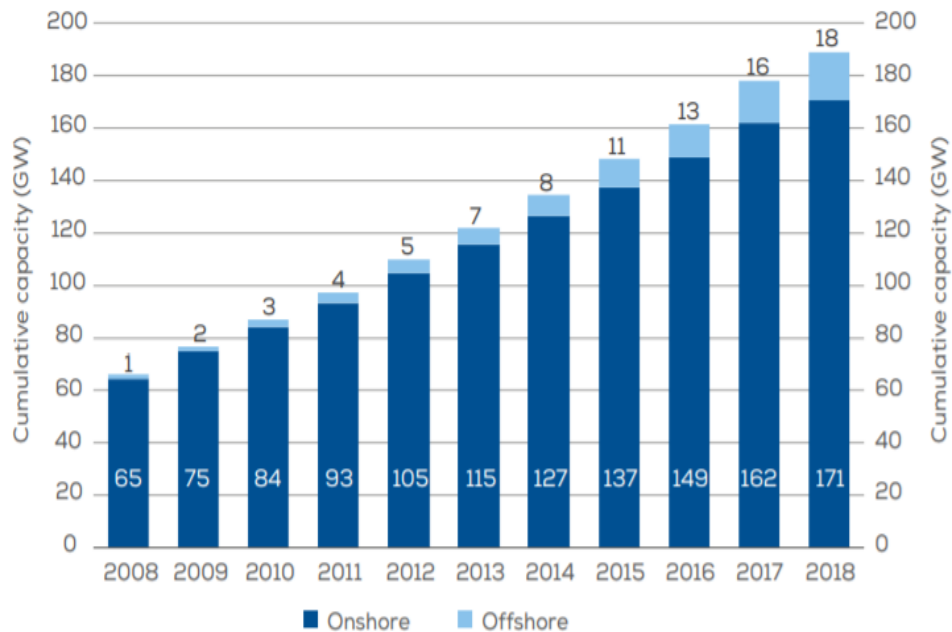


Figura 1: Potencia acumulada en parques eólicos onshore y offshore en Europa [9]

2.4. Previsiones en el sector de la energía eólica

En el último año se han instalado en Europa 14,7 GW de energía eólica, lo que supone un descenso del 6% respecto a 2019. De esta forma, el total acumulado en Europa asciende a los 220 GW. De estos 14,7 GW, un 80% fueron de nuevas instalaciones terrestres [10]. Mientras tanto, la eólica marina sigue aumentando su presencia en Europa con un fuerte ritmo de instalación, representando el 20% restante. Concretamente, en el año 2020 se conectaron a red 2,9 GW de potencia instalada *offshore*.

COUNTRY	NUMBER OF WIND FARMS CONNECTED ¹	CUMULATIVE CAPACITY (MW)	NUMBER OF TURBINES CONNECTED	CAPACITY CONNECTED IN 2020 (MW)	NUMBER OF TURBINES CONNECTED IN 2020
UK	40	10,428	2,294	483	69
Germany	29	7,689	1,501	219	32
Netherlands	9	2,611	537	1,493	172
Belgium	11	2,261	399	706	81
Denmark	14	1,703	559	0	0
Sweden	5	192	80	0	0
Finland	3	71	19	0	0
Ireland	1	25	7	0	0
Portugal	1	25	3	17	2
Spain	1	5	1	0	0
Norway	1	2	1	0	0
France	1	2	1	0	0
Total	116	25,014	5,402	2,918	356

Figura 2: De derecha a izquierda, número de parques conectados, capacidad acumulada, número de turbinas conectadas, capacidad conectada en 2020 y número de turbinas conectadas en 2020 en Europa [10]

Con todo, el número de países que el año pasado contaron con nuevos proyectos conectados a la red fueron únicamente 5, tal y como se puede observar en la figura anterior. Este dato escenifica que todavía queda mucho camino por recorrer para afrontar el gran desafío que supone el cambio climático. Se espera que Europa construya 105 GW de nuevos parques eólicos en los próximos 5 años, de los cuales más del 70% serán *onshore*. A pesar que estos últimos datos puedan llamar al optimismo, aún no es suficiente para lograr los objetivos marcados en el Green Deal [11].

El Green Deal, también conocido como el Pacto Verde de la UE, es un plan que pretende a través de una serie de acciones concretas luchar contra el cambio climático y convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro en el año 2050. El objetivo de este 'EU Green Deal' es que Europa tenga una economía limpia, con el menor número de emisiones posibles. Para ello, el avance en el desarrollo y construcción de parques eólicos *offshore* debe coger fuerza y experimentar un aumento notable en su ritmo de instalación.

3. Estructuras y cimentaciones

En este apartado se expondrán los principales tipos de estructuras usados hasta la fecha. Cabe recordar que, debido al entorno agresivo al que se enfrentan, tanto por las cargas eólicas como hidrodinámicas, el estudio e investigación detrás de dichas estructuras es exhaustivo.

Hay una variedad suficientemente diversa como para poder adaptarse a todo tipo de suelos marinos y condiciones de oleaje. La estructura más común es la denominada monopilote, elegida para la mayoría de las instalaciones de parques eólicos de poca profundidad. Las estructuras con base por gravedad, con un comportamiento similar al monopilote, también han sido frecuentemente utilizadas. A medida que las estructuras eólicas han ido aumentando de tamaño, y se buscan mayores distancias de la costa y por defecto profundidades mayores, otros diseños como la estructura *jacket* han ido ganando fuerza en el mercado actual.

A continuación, se presentarán más detalles sobre las estructuras anteriormente mencionadas, así como otros diseños utilizados en menor medida.

3.1. Estructuras por gravedad

Son estructuras hechas típicamente de hormigón o acero y, tal y como indica su nombre, hacen uso de su peso para resistir los esfuerzos hidrodinámicos y eólicos. A menudo se añade peso extra en la base para una mayor estabilidad. En este tipo de cimentación un gran esfuerzo cortante es transmitido al fondo marino y debe ser resistido por la base [12].

Cabe destacar que el fondo del mar tiene que ser debidamente preparado para aguantar el enorme peso de la estructura, llevando a cabo un estudio constante de las condiciones del suelo marino para evitar que la estructura se vaya hundiendo. Tienden a usarse en profundidades inferiores a los 30 metros [13].

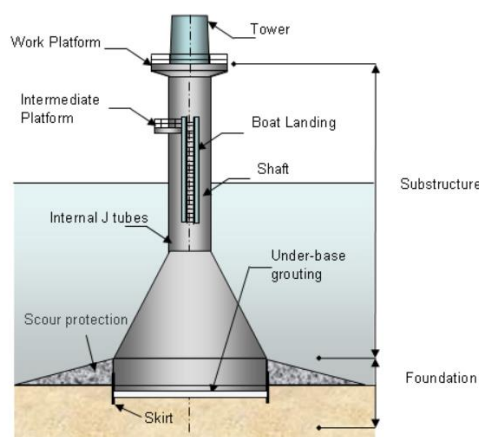


Figura 3: Representación de una estructura por gravedad [13]

3.2. Estructuras trípode

Consiste de una columna central conectada a tres columnas o pilotes periféricos mediante arriostramientos diagonales. Esta estructura es principalmente utilizada en proyectos de larga duración ubicados en ambientes hostiles. Debido a sus propiedades y complejidad, es generalmente la opción más cara. Con todo, si se tiene en cuenta la durabilidad, dicha desventaja podría compensarse [12].

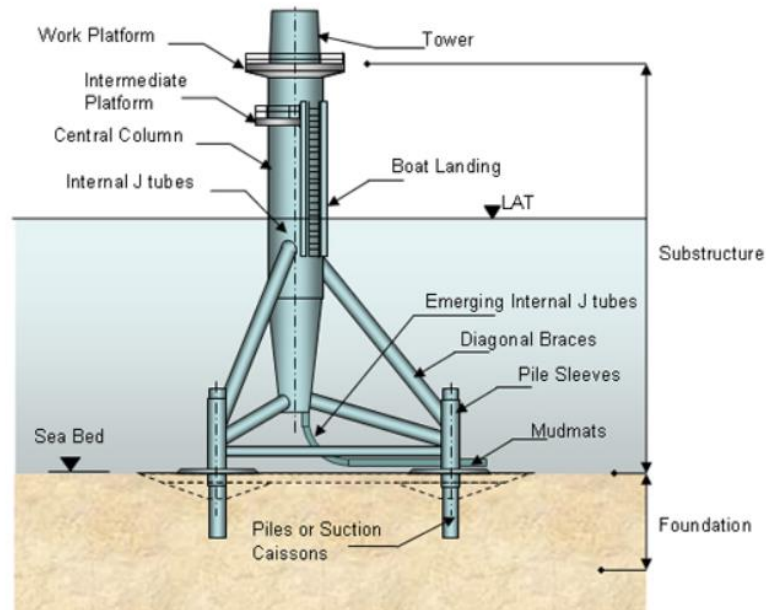


Figura 4: Representación de una estructura trípode [13]

3.3. Estructuras monopilote

Debido a que el monopilote es una de las estructuras a modelar y analizar en el presente proyecto, se realizará una descripción más detallada de su diseño, principales componentes y características.

Usualmente hechas de acero, son tubos típicamente de cuatro a seis metros de diámetro y de 8 a 12 milímetros de grosor [14]. Una de sus principales ventajas es su sencillo diseño y, para las dimensiones previamente mencionadas, fácil manufacturación. Hasta la fecha se usaban en profundidades no superiores a los 20-30 metros, aunque recientemente se ha estado trabajando en una nueva generación de estructuras monopilotes, las cuales alcanzan diámetros de 10 metros y estarían pensadas para profundidades de hasta 50 metros [15]. El tamaño cada vez mayor del monopilote conlleva desafíos, tanto de tipo logístico, de instalación y fabricación.

Un aspecto esencial a considerar con las estructuras monopilote que dan soporte a turbinas eólicas es que su carga horizontal, generalmente debida a la acción del oleaje y del viento y transmitidas al subsuelo mediante el movimiento lateral del mismo, tiene una magnitud comparable a su carga vertical, generada por la acción de la gravedad. Además, debido a su baja

relación de esbeltez y rigidez a la flexión, el sistema se comporta de manera rígida. Es por ello que los requisitos que tienden a regir el diseño de dichas estructuras son la deformación lateral y la rigidez, en lugar de centrarse tanto en la resistencia lateral máxima [16].

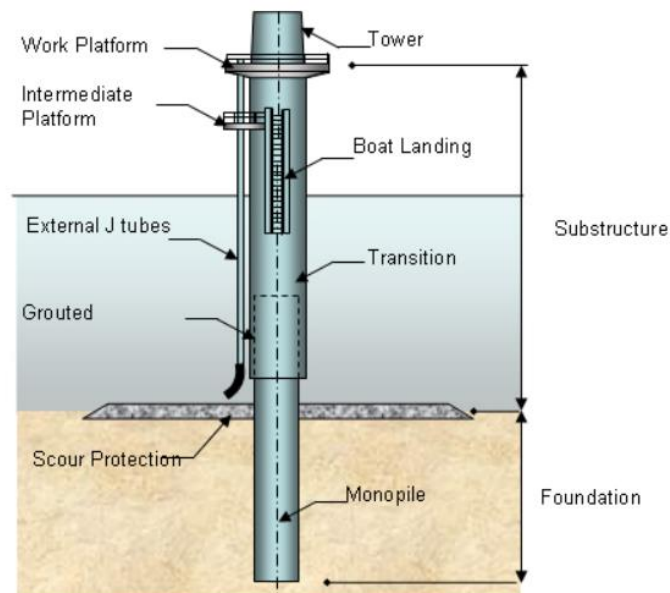


Figura 5: Representación de una estructura monopilote [13]

Con mucha diferencia, el monopilote es la estructura más utilizada, llegando a ocupar aproximadamente un 80% del mercado global. Aunque se prevé que dicha estructura seguirá monopolizando el mercado, se están investigando nuevos conceptos y desarrollando nuevas plataformas para abarcar profundidades mayores y terrenos distintos.

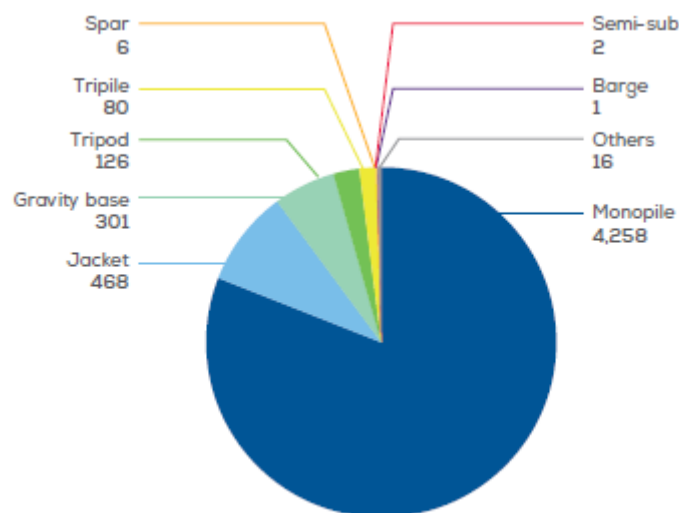


Figura 6: Cuota de mercado de los distintos tipos de estructuras [10]

3.4. Estructuras de tipo *jacket*

Debido a que las estructuras *jacket* son, junto con los monopilotes, objeto de estudio en este proyecto, se realizará una descripción más detallada de su estructura y principales componentes.

La estructura *jacket* consiste en unas patas principales, relativamente verticales y de menor diámetro que el utilizado en una estructura monopilote, arriostradas en forma de celosía mediante barras de menor tamaño [17]. Es una cimentación con la que se alcanza una alta eficiencia del material, pero su difícil construcción, transporte y montaje hacen de dicha estructura una opción menos económica. Este tipo de cimentaciones transmiten a la cimentación cargas axiales de compresión y de tensión. Su uso es altamente extendido en ubicaciones que rondan los 50 metros de profundidad.

Existen una gran variedad dentro de la propia categoría, cada una diseñada específicamente para un tipo de terreno y entorno marino. Entre los más comunes, podemos destacar:

- OWEC Quattropod: es el modelo más común del sector, caracterizado por sus cuatro pilotes verticales interconectados entre sí. El tipo de arriostramiento utilizado depende del modelo y de los esfuerzos a los que se verá sometido. Se utiliza en aguas profundas [17].

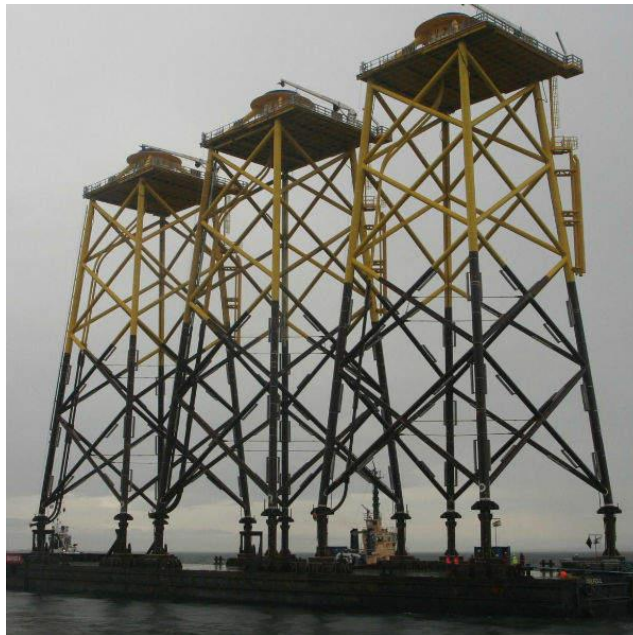


Figura 7: Imagen de una estructura *jacket* de tipo OWEC Quattropod [18]

- Hotchief Solutions: caracterizado por tener tres en lugar de cuatro pilotes verticales, este modelo es menos común que el anterior. También se usan barras arriostradas para reforzar la estructura [17].



Figura 8: Imagen de una estructura Jacket Hotchief [19]

- Twisted Jacket: estructura formada por tres pilotes verticales, típicamente de mayor diámetro que la estructura Hotchief, inclinados alrededor de un pilote central. Requiere de menos soldaduras debido al menor número de tirantes y su construcción es más segura, ya que se fabrica y ensambla horizontalmente, por lo que se trabaja siempre a alturas relativamente bajas [17].



Figura 9: Imagen de estructura jacket de tipo Twisted [20]

3.5. Cimentaciones

Otro factor importante a tener en cuenta es el tipo de anclaje o cimentación utilizado, es decir, el método empleado para anclar la estructura al subsuelo marino. Principalmente destacan dos tipos principales de anclajes, los cuales son el uso de pilotes o el uso de cubetas de succión. El primer caso consiste en pilotes metálicos unidos a los postes o patas de dos formas distintas. La primera es fijar el pilote de la cimentación a la pata mediante unos conectores soldados a las patas. La segunda forma es encajando los pilotes de las cimentaciones en el interior de las patas de la estructura [16].

El segundo tipo de anclajes, denominado cubetas o anclajes de succión, consiste en un pilote, pero de mayor diámetro. Este tubo lleva una bomba conectada en su parte superior que extrae agua de su interior, creando una diferencia de presión y facilitando que el pilote sea absorbido por el terreno [21]. A continuación, se presenta una imagen con algunas posibles combinaciones de estructura con cimentación.

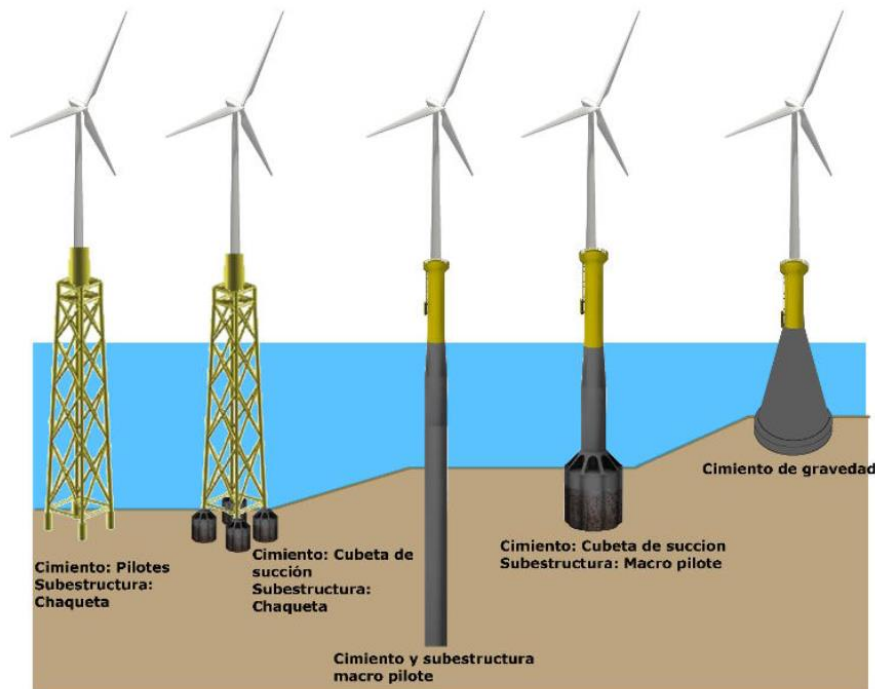


Figura 10: Representación de distintas combinaciones de estructura – cimentación [12]

4. Estabilidad y normas de diseño generales de las estructuras

Las duras condiciones ambientales hacen que el diseño y la construcción de las estructuras y cimentaciones de las turbinas en alta mar sean un desafío. Éstos deben tener en cuenta el peso y la altura de la turbina, la profundidad del agua, la carga de viento, las cargas de olas y corrientes, y las condiciones especiales del suelo en el que se ubican. El conocimiento de la dinámica de todo el sistema estructura-cimentación del aerogenerador es importante para predecir la respuesta dinámica.

Además del ya importante desafío que dicho estudio implica, con el objetivo de lograr una mayor recolección de energía, el sector avanza actualmente hacia aguas más profundas. Además, este último avance viene acompañado de la ampliación de las propias turbinas eólicas marinas (ver Figura 11). Las constantes tendencias ascendentes tanto en la profundidad del agua como en el tamaño de las turbinas han llevado a un aumento consecuente de la carga, hechos que agravan aún más las tensiones y deformaciones de los cimientos.

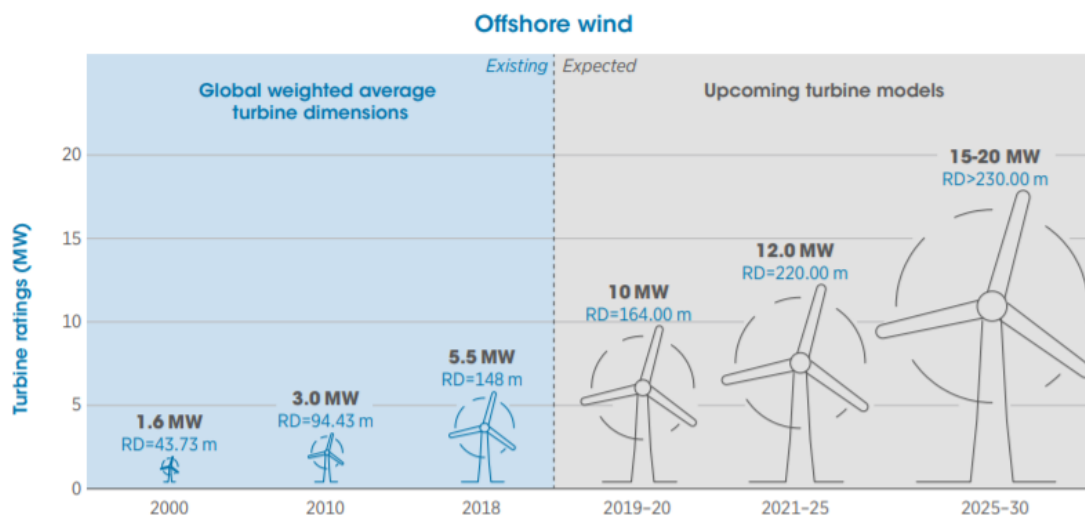


Figura 11: Evolución del tamaño de las turbinas eólicas marinas [22]

En general, el diseño de toda estructura pasa por analizar los estreses y momentos en dos escenarios específicos. Estos son el estado límite de servicio (ELS) y el estado límite último (ULS). El primero consiste en, según los expertos, *“un tipo de estado límite que, de ser rebasado, produce una pérdida de funcionalidad o deterioro de la estructura, pero no un riesgo inminente a corto plazo”*. En el sector eólico dichos requerimientos generalmente los marcan los fabricantes de aerogeneradores y exigen que, bajo dichas condiciones, el aerogenerador no experimente una inclinación superior a los 0,5 grados con respecto a la vertical. De todas formas, los diversos organismos involucrados en el sector pretenden aumentar esta cifra, ya que el diseño de los propios aerogeneradores les permite trabajar incluso experimentando mayores inclinaciones [12].

La definición general del segundo escenario es, según los expertos, *“un estado límite tal que, de ser rebasado, la estructura completa o una parte de la misma puede colapsar al superar su*

capacidad resistente". En el sector eólico para el análisis de dicho estado se busca diseñar un sistema estructura – cimentación capaz de transmitir cargas al fondo marino en una situación singular de altura de ola (período de retorno de 50 años) [12].

Finalmente, el diseño también tiene que tener en cuenta la frecuencia natural del sistema aerogenerador – estructura con tal de no entrar en resonancia.

4.1. Monopilote

Estas estructuras resisten las fuerzas y momentos provenientes de las cargas cíclicas laterales transfiriendo dichos esfuerzos al suelo marino, distribuyendo dicha presión horizontalmente a lo largo de la longitud del monopilote empotrada en el subsuelo. La longitud de dicho empotramiento depende de las condiciones de trabajo a las que se ve sometida la estructura, así como de las propiedades del lecho marino. Aunque dichas características dependen enormemente del emplazamiento, una longitud de 30 metros es ampliamente usada en profundidades no superiores a 20-30 metros, debido a que cumple de forma suficiente con los criterios de diseño, incluida la estabilidad vertical y requisitos de deflexión horizontal, en una gran variedad de entornos [23].

Es de importancia recordar que, en las estructuras monopilote, las cargas horizontales producidas por el viento y el oleaje tienen el mismo orden de magnitud que las cargas gravitacionales que soporta la estructura. A su vez, cabe destacar que cuanto mayor sea el diámetro, mayores serán las cargas laterales.

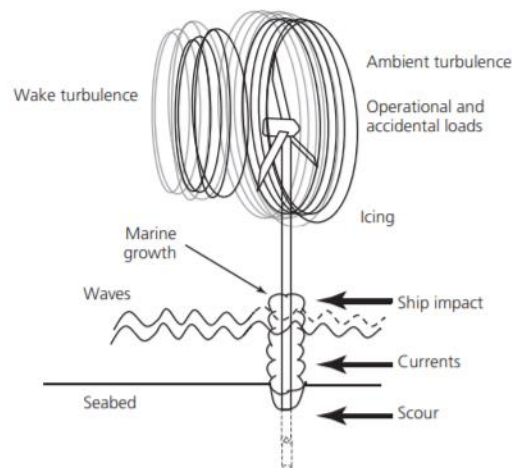


Figura 12: Representación de los esfuerzos a los que se ve sometido el sistema aerogenerador – monopilote [23]

Otro factor importante a tener en cuenta es la frecuencia natural del sistema, resultando clave si se quiere realizar un estudio adecuado de su comportamiento dinámico. La resonancia ocurre cuando una frecuencia de excitación se acerca a la frecuencia natural del sistema. Llegar a este estado implica una mayor carga de esfuerzos sobre la estructura, lo que acorta drásticamente su tiempo de vida. Por esta razón, el diseñador debe asegurar que el sistema completo no

entrará en resonancia ni con las frecuencias de rotación de las aspas del aerogenerador ni con las cargas cíclicas ambientales [12].

Como una primera aproximación, la frecuencia natural del monopilote se puede determinar simplificando su geometría. Dicha simplificación se muestra en la Figura 13. Teniendo en cuenta esta consideración, la frecuencia natural del sistema turbina-monopilote puede aproximarse por (Tempel, 2006) mediante la siguiente ecuación:

$$f_{nat}^2 = \frac{3,04}{4(\pi)^2} \frac{EI}{(0,227\mu L + M)L^3} \quad (1)$$

Donde:

μ = es la masa por unidad de longitud del puntal.

L = longitud del puntal.

EI = rigidez a la flexión del puntal.

M = masa de la turbina.

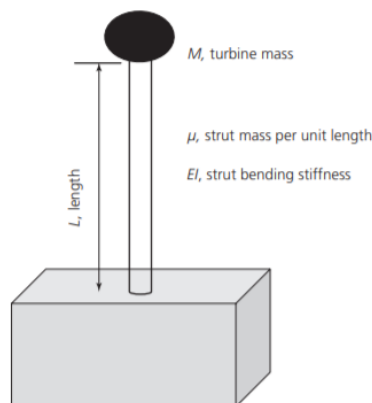


Figura 13: Modelo estructural simplificado de un sistema turbina-monopilote [23]

La siguiente figura muestra los rangos de excitación de una turbina eólica marina, así como las densidades espectrales de potencia y frecuencias tanto del viento como del oleaje estándar. A modo de aclaración, la densidad espectral es, según diversos expertos, “la energía total del oleaje por unidad de área horizontal [...] para cada diferente frecuencia y dirección que compone el oleaje” [24].

La franja entre los 0,017 Hz y 1 Hz se encuentra la llamada región *soft-stiff*, la región anterior se denomina *soft-soft* y la región ubicada más allá de 1 Hz se denomina *stiff-stiff*. Éstas dos últimas no son aceptables para un adecuado funcionamiento de la turbina, ya que, si cae en la primera, tal y como su nombre indica, el sistema turbina – monopilote se considera demasiado blando,

mientras que caer en la segunda región no trae consecuencias negativas, pero llegar a esa región de frecuencia implica una enorme inversión [23].

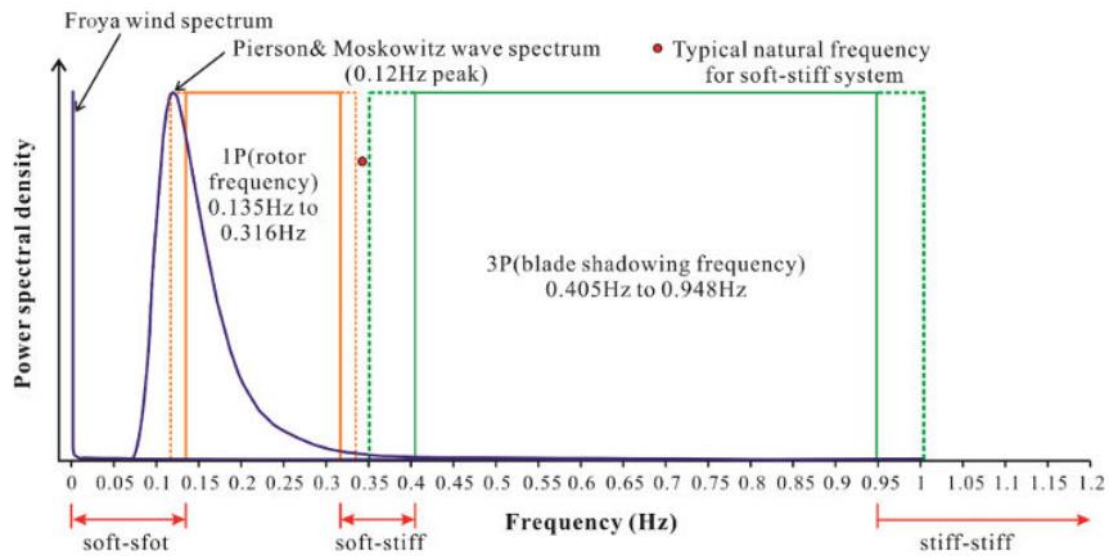


Figura 14: Rango de frecuencias y densidad espectral de viento y oleaje [12]

Ahora bien, con tal de caer en la región *soft-stiff*, se necesita también de una rigidez estructural y dinámica relativamente alta. Dicha rigidez puede obtenerse a partir de los siguientes procesos: aumentando el diámetro del monopilote o aumentando el grosor de la pared de la pila. Ambos procesos presentan una serie de desventajas. Por un lado, el primero implica que el aumento del diámetro trae consigo el aumento de la superficie de impacto del oleaje. Por otro lado, el segundo método resulta menos eficiente si el objetivo deseado es ganar rigidez.

Aun llevando varias décadas monopolizando el mercado, y al contrario que la determinación de las cargas ambientales ejercida sobre los monopilotes o las frecuencias naturales de excitación, el comportamiento del sistema pilote – suelo a lo largo del tiempo ante estas cargas cíclicas no está bien documentado.

En resumen, dado que no existe un modelo fiable de previsión del comportamiento, los estándares de diseño que se utilizan en la fabricación de estas estructuras son el cumplimiento de los requisitos de rotación y desplazamiento lateral del monopilote ante una carga estática y dinámica extrema [23]. Además, en los países con riesgo sísmico como Estados Unidos o Taiwán se requiere asumir el estado de cargas ante un terremoto [12].

4.2. Jacket

El análisis in situ es el análisis estructural que se utiliza para simular de la forma más cercana posible al comportamiento de la estructura durante su servicio. Dicho análisis se utilizó por primera vez en plataformas marinas, con el objetivo de asegurar que la estructura resista las

cargas de servicio, tanto las gravitacionales como las causadas por el oleaje y el viento. De este modo, se comprueba la integridad de la estructura y se descarta una rotura prematura.

El principal objetivo es encontrar su estado límite último (ULS). Si los miembros no satisfacen el máximo requisito de resistencia, lo que resulta en deformación o pandeo, se considera el miembro tubular en cuestión como no apto y se trabaja en desarrollar un nuevo diseño, ya sea retocando íntegramente la forma de la estructura o sencillamente aumentando el diámetro o grosor del tubo. El pandeo de un tubo puede ser tanto flexional como torsional, en función de si únicamente existen fuerzas en el eje axial o, además, dando lugar al segundo tipo de flexión, existen fuerzas transversales.

Es importante determinar la fuerza cortante máxima del medio ambiente para el dimensionamiento de los tubos que forman el arriostamiento de la estructura. Con respecto al dimensionamiento de las piernas de la plataforma, se debe determinar el momento de vuelco máximo.

Para el análisis del estado último de servicio se deben considerar, tal y como su nombre indica, los casos de carga más críticos. Particularmente, se dividen las cargas en estáticas y cargas combinadas.

- Cargas estáticas. Esfuerzos debidos únicamente a cargas estáticas, donde se incluyen las cargas gravitatorias debido al propio peso de la unidad o al peso del aerogenerador.
- Cargas combinadas. Esfuerzos debidos a cargas combinadas, donde las cargas estáticas aplicables, como las descritas anteriormente, se combinan con cargas ambientales de carácter dinámico, como las producidas por las olas y la corriente.

Además, se deben de realizar dos estudios distintos:

- Operaciones normales. Tensiones debidas a la carga ambiental y estática en condiciones normales. Se utiliza para comprobar el funcionamiento normal de la plataforma.
- Tormenta severa. Tensiones debidas a cargas ambientales severas combinadas con las cargas estáticas nominales de la estructura.

Del mismo modo que con la estructura monopilote, se debe comprobar que las cargas dinámicas ambientales, tanto viento como oleaje, así como el movimiento de las palas del rotor, no entren en resonancia con la frecuencia natural de la estructura. Recordar que, si se diese el caso, la estructura experimentaría una amplificación de las cargas dinámicas.

5. Socavación y normas de diseño generales de las estructuras

La socavación es un fenómeno causado por olas y corrientes, y consiste en la erosión del fondo marino alrededor de la base de las estructuras offshore. Este fenómeno pone en peligro la capacidad operativa de las estructuras offshore ya que compromete su estabilidad. Hasta la primera década de los años 2000, las principales investigaciones que giraban en torno a la socavación de pilares en aguas tenían como objeto de estudio pilares de puentes en condiciones de corriente constante. La investigación de la socavación en el medio marino no se ha producido hasta apenas unos años, donde se ha estado sometiendo pilares a condiciones de corrientes y oleajes encontradas en alta mar [25].

En los últimos años se ha enfatizado el peligro a nivel estructural causado por dicho fenómeno y se han obtenido métodos y sistemas para estudiarlo a lo largo del tiempo. En este apartado se discutirán las principales normas de diseño presentes en el desarrollo, cálculo y construcción tanto de estructuras monopilote como *jacket*.

5.1. Monopilote

La socavación local representa un factor significativo tanto en la deformación, rigidez de la base, frecuencia natural y vida útil del monopilote [26]. Es un proceso causado por un complejo sistema de vórtices alrededor de la estructura en cuestión, donde entran en juego cambios en los gradientes de presión y velocidad del flujo alrededor de la base. A continuación, se detalla el proceso.

El flujo, al acercarse y tratar de bordear la estructura se acelera, transformando el gradiente de velocidad vertical en un gradiente de presión que choca contra la estructura. Este efecto provoca una corriente vertical descendente que, al impactar sobre el suelo marino, se transforma en un vórtice. Este vórtice, conocido como el vórtice de herradura debido a su aspecto al observar desde arriba, arrastra todo tipo de sedimentos y partículas lejos de la base de la estructura. Este fenómeno, junto con otros vórtices generados por la interrupción del flujo (ver Figura 15), son los que provocan el fenómeno de la socavación en estructura de tipo pila [27].

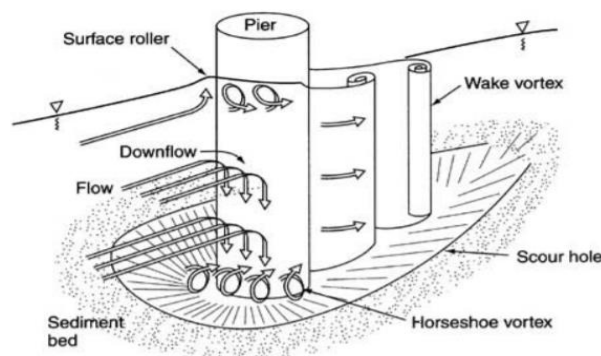


Figura 15: Vórtices generados debido a la interrupción del flujo por una estructura tipo pila [27]

Para caracterizar la forma en que aparece la socavación en la vecindad de un pilote, es necesario conocer su profundidad máxima y extensión alrededor de la estructura. En consecuencia, las

investigaciones realizadas hasta la fecha se han dirigido a predecir numéricamente estos parámetros [26].

La profundidad de socavación adimensional, caracterizada como el cociente entre la propia profundidad de socavación (S) y el diámetro (D) del monopilote, es un parámetro que puede ser utilizado y comparado entre una infinidad de dimensiones de monopilote. Señalar que dicho parámetro se obtiene de forma empírica, es decir, se basa en estudios, no existiendo una formulación puramente teórica. Por ello, existen multitud de pequeñas variaciones a su formulación original (S/D). Su eficiencia depende de las condiciones de la estructura a diseñar en comparación con los estudios empíricos. Por otro lado, recordar que hay más estudios sobre estructuras monopilote que *jacket* [25].

Diversos estudios observaron que dicho parámetro depende de otros parámetros adimensionales como el número de Keulegan-Carpenter o el número de Reynolds [25]. El primer parámetro, también conocido como número de periodo, describe “la importancia relativa de las fuerzas de arrastre más las fuerzas de inercia de los objetos en un flujo de fluido oscilatorio” [28] y se define como:

$$K_c = \frac{V \cdot T}{L} \quad (2)$$

Donde:

V = amplitud de la oscilación de la velocidad de flujo [m/s].

T = período de la oscilación [s]

L = dimensión característica del objeto, como por ejemplo el diámetro [m]

Por otro lado, el número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia y viscosas de un flujo en una expresión adimensional, y sirve para describir si éste es laminar o turbulento. Se define como:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

u = velocidad del fluido [m/s]

D = dimensión característica (diámetro de una tubería, distancia recorrida, etc.) [m]

μ = viscosidad dinámica [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

Hay dos métodos principales para detener la socavación en monopilotes situados en entornos marinos, donde la acción de corrientes y oleaje es combinada. El primero consiste en diseñar y construir protecciones que aseguren la integridad de la base de la estructura. El segundo, trata de anular dicho fenómeno mediante el aumento de la profundidad del anclaje de la cimentación o del diámetro de la estructura.

En la actualidad, existen diversos sistemas de protección que giran en torno al primer método comentado anteriormente. Entre los más usados encontramos el uso de escolleras de piedra, cabeceo de piedra y hormigón, colchón de tela con lechada, etc. De entre todas las existentes, la protección más usada es la escollera de piedra arrojada (ver Figura 16). Esta técnica consiste en la colocación de piedras alrededor de la base del monopilote. Esto se debe al bajo costo de este material y a su pronta disponibilidad, aunque presenta problemas como su instalación y susceptibilidad a producir daños debido al impacto de las corrientes y olas [25]. Esta técnica es altamente eficaz, pero se debe cuidar el tamaño de las piedras empleadas, así como el espesor de las capas de protección.

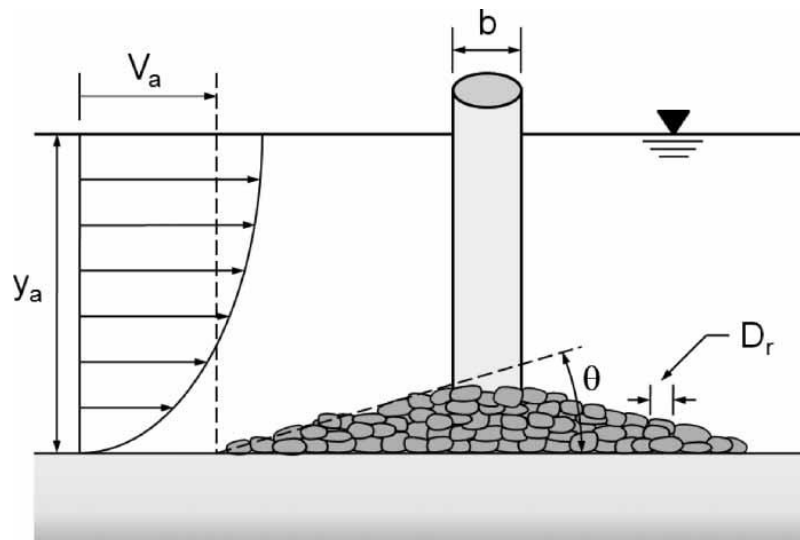


Figura 16: Representación de una escollera de piedras en un monopilote [29]

5.2. Jacket

El fenómeno de la socavación depende en gran medida de la forma del objeto que obstaculiza el flujo o corriente. Por ello, las observaciones realizadas para estructuras monopilote y mencionadas en el apartado anterior no se pueden transferir a las estructuras tipo *jacket*. Si bien, en términos generales, dicha estructura es una combinación de pequeñas pilas, estas patas adicionales hacen que el flujo se contraiga, provocando que las corrientes ganen mayor velocidad. Además, nuevos vórtices pueden llegar a aparecer en el sotavento de la base, agravado todavía más el arrastre de las partículas del suelo marino.

Aunque la investigación de la socavación en estructuras tipo *jacket* está lejos de encontrarse en el mismo nivel de madurez que el de las estructuras monopilote, se considera el ángulo y

diámetro de los postes laterales, así como la relación entre la extensión de la estructura y el diámetro de la pila principal, como los factores estructurales más determinantes [4].

Los resultados obtenidos por un estudio realizado por M. Welzel et al. [4] determinó que el fenómeno de la socavación dependía principalmente del tipo de flujo, es decir, dependiendo de si se trataba de un flujo de corriente o dominado por olas.

En flujos dominados por olas, la topografía del lecho reveló una migración de la arena en forma de ondas de cresta larga en dirección de la ola. Del mismo modo que en flujos dominados por ola, en flujos de corriente se observaron migraciones de partículas en la dirección del propio flujo. Eso sí, la cresta obtenida fue más corta y los sedimentos en este caso se depositaron de forma simétrica alrededor de los postes de la estructura. En ambos casos el principal factor causante de dicho fenómeno fue también el vórtice de herradura.

A continuación, se presentan los datos obtenidos en el estudio realizado por M. Welzel et al. bajo un efecto conjunto de flujo de corriente y dominado por olas. Se trabajó con un total de 9 combinaciones posibles, obtenidas a partir de definir tres velocidades de corriente, y tres números de Keulegan-Carpenter (K_c). En los resultados mostrados en la Figura 17, cabe señalar que los resultados graficados son la media de los datos obtenidos en los tres sensores, tanto del poste P1 como P3 (ver la ubicación de los 6 sensores en el gráfico a)).

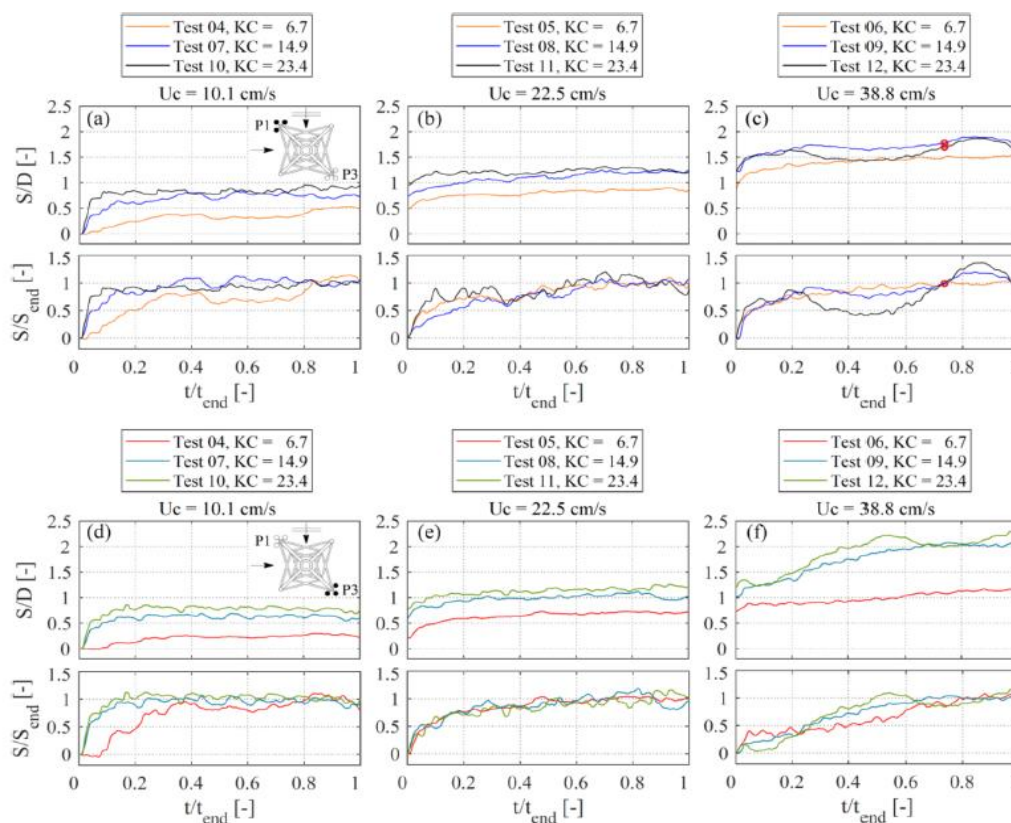


Figura 17: Representación gráfica de: 1) parámetro de socavación adimensional (S/D) a lo largo del tiempo normalizado (t/t_{end}); 2) parámetro de socavación adimensional normalizado con el valor final (S/S_{end}) a lo largo del tiempo normalizado (t/t_{end}) [4]

Tal y como se observa en la figura anterior, la profundidad de socavación tanto en el poste 1, situado a barlovento de la corriente, como la profundidad en el poste 3, situado a sotavento de la corriente, muestran valores similares en condiciones donde la corriente se ve dominada por el impacto de las olas (gráficos a), b), d) y e)). Bajo estas condiciones, la socavación sigue la misma tendencia ascendente en ambos postes al aumentar el número K_c . Por otro lado, en un flujo donde la velocidad de corriente gana importancia al impacto de las olas, se aprecian diferencias entre las profundidades de ambos postes (ver gráficos c) y f)). Bajo estas condiciones, se observa como la socavación en el poste 3 presenta mayor dependencia al número K_c que el poste situado a barlovento de la corriente.

Por otro lado, si se toman los resultados obtenidos en el poste menos expuesto a la influencia de los postes vecinos, el P1, y se comparan con los resultados obtenidos en un estudio realizado por Schendel (2018) [30] en una estructura monopilote, se observa que el fenómeno de socavación progresa de manera más lenta en la estructura *jacket*. Además, tal y como se expone en el estudio, la profundidad de socavación presenta una menor dependencia a la velocidad de corriente del flujo [4].

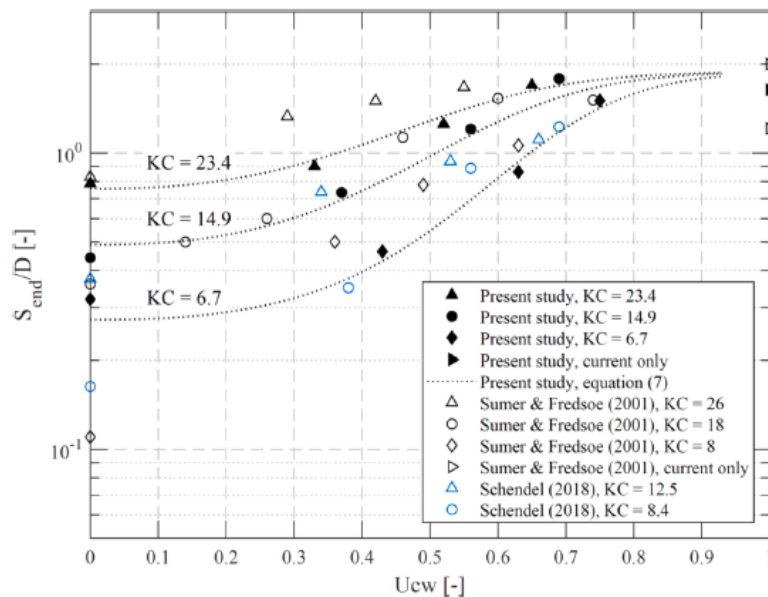


Figura 18: Comparación de la profundidad de socavación del poste P1 con datos de un monopilote obtenidos del estudio de Schendel (2018) en relación a la velocidad de corriente (u_{cw}). $U_{cw} = 0$ describe flujo con efecto único de oleaje, y $U_{cw} = 1$ describe flujo con efecto único de corriente [4]

Dicho esto, en el estudio ideado por M. Welzel et al. también se expone que, en un trabajo llevado a cabo por Rudolph et al. (2004) [31], donde la separación entre postes es menor y por lo tanto la contracción del flujo aumenta, la socavación obtenida fue de 3 a 4 veces superior a la comparable con una estructura monopilote.

En definitiva, no existe una caracterización y descripción únicas de la socavación en estructuras *jacket*, ya que depende en gran medida de la geometría estructural de la base. Por otro lado, no se encuentran una gran cantidad de estudios al respecto, por lo que el presente trabajo pretende ayudar en este aspecto.

6. DualSPHysics

En este apartado se desarrollará una descripción del hardware empleado para comparar la hidrodinámica del flujo marino alrededor de las estructuras offshore *jacket* y monopilote.

El programa con el que se ha trabajado, *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) [2], es un código de hardware desarrollado para resolver problemas de fluidos con superficie libre. Se caracteriza por resolver ecuaciones diferenciales trabajando en el sistema Lagrangiano y en un entorno sin malla, donde las partículas representan el flujo, interactúan con las estructuras y puede exhibir una gran deformación.

La técnica que emplea consiste en discretizar un conjunto de partículas en unas dimensiones definidas por el usuario. La distancia inicial del conjunto de vecinos a una partícula determinada se establece a partir de una función circular o esférica en función de si se está trabajando en 2D o en 3D. En cada cómputo se calculan las nuevas propiedades físicas de cada partícula, y en función de estas cantidades las partículas realizan su desplazamiento correspondiente.

Las leyes de conservación de la dinámica de fluidos se obtienen a partir de sus formas diferenciales gracias a una serie de integrales basadas en una función de interpolación. De esta manera se obtienen estimaciones fiables a cada cómputo de la simulación.

A continuación, se presentan los principales conceptos y pasos empleados por el programa para el desarrollo de sus simulaciones.

6.1. Longitud de suavizado o suavizado Kernel

Mediante una distancia espacial conocida como longitud de suavizado y una función núcleo, la cantidad física de cualquier partícula se puede obtener sumando las propiedades relevantes de todas las partículas que se encuentran dentro del rango del núcleo. Señalar que una función núcleo para un operador A es el conjunto de todos los vectores cuya imagen bajo A sea el vector nulo.

DualSPHysics ofrece dos longitudes de suavizado principales, las cuales no se basan en la distancia h sino en la denominada distancia adimensional, descrita como el cociente entre la distancia entre dos partículas a y b y la propia distancia de suavizado h [31]. De esta manera se describen los dos siguientes suavizados Kernels: *Cubic spline* y *Quintic spline*.

Cada partícula influye de forma ponderada en el resultado final de la partícula de interés en función de la distancia a la que se encuentre de dicha partícula. En el primer método, la influencia de todas las partículas que se encuentren a más de dos veces la distancia de suavizado queda menospreciada. Es por ello que se considera como el método más eficiente, ya que permite reducir el tiempo de computación al preservar recursos aun obteniendo resultados casi idénticos a los obtenidos por medio de la segunda opción. La diferencia de precisión en los resultados obtenidos se encuentra en el grado de los polinomios utilizados en el suavizado Kernel, siendo de grado 3 el primer método y de grado 5 el segundo.

6.2. Ecuación de la conservación del momento

En mecánica de fluidos, la ecuación que relaciona la suma de fuerzas que actúan sobre un determinado fluido viscoso con su aceleración se caracteriza de la siguiente manera:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \Gamma \quad (4)$$

Donde:

Γ = términos de disipación, donde se incluyen la disipación térmica y principalmente fenómeno de transporte de la viscosidad.

g = gravedad [m/s^2]

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

∇P = gradiente de presión del fluido [Pa]

v = velocidad del fluido [m/s]

En relación al término de la viscosidad, *DualSPHysics* incluye dos opciones principales para hacer referencia a dicho fenómeno. Ambas opciones describen como disipa energía el fluido con el movimiento.

- Viscosidad artificial: este método fue propuesto por Monaghan [32], y su uso se ha extendido enormemente debido, en gran parte, a su simplicidad. Es la empleada en el presente trabajo.
- Viscosidad Laminar y turbulencia SPS.

6.3. Ecuación de la continuidad

Es una expresión matemática del principio de conservación de la masa. Para un volumen de control que tiene una sola entrada y una sola salida, el principio de conservación de la masa establece que, para un flujo en estado estacionario, el flujo de masa en la entrada debe ser igual al flujo de masa en la salida [33].

En SPH, la ecuación de la continuidad es la parte más crítica, debido a que se utiliza para calcular los cambios en la densidad de las partículas, ya que éstas únicamente experimentan fluctuaciones en su densidad, no en su masa. Su ecuación es la siguiente:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

Donde:

$\frac{d\rho_a}{dt}$ = variación de la densidad de una partícula a con respecto al tiempo [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]

m_b = masa de una partícula vecina b. Recordar que mediante el método de suavizado *Cubic spline*, una partícula b es vecina de a si se encuentra a una distancia inferior a $2 \cdot h$ [kg].

v_{ab} = velocidad de la partícula a respecto de la partícula b [m/s]

∇_a = gradiente de la velocidad de a.

W_{ab} = función de peso Kernel.

6.4. Métodos de integración

DualSPHysics proporciona dos métodos de integración para resolver las ecuaciones diferenciales en el sistema Lagrangiano. El primero de ellos, empleado cuando se conocen los valores de las derivadas del momento, velocidad y posición, es la integración de Verlet. Este procedimiento de integración de ecuaciones diferenciales de segundo orden se utiliza especialmente cuando las derivadas de segundo orden son únicamente función de las variables del problema, ya sean dependientes o independientes. En *DualSPHysics*, este método de cálculo es numéricamente menos estable, pero necesita de menos tiempo de cómputo.

El otro método empleado, denominado integrador simpléctico, es un sistema de integración que trabaja en el sistema hamiltoniano, y permite obtener mejores soluciones a coste de mayor tiempo de cómputo.

6.5. Cómputo de la simulación y GPU/CPU

Una vez el sistema ha sido diseñado y todos los parámetros han sido establecidos por el usuario, el código de SPH sigue tres etapas fundamentales en cada iteración de la simulación. Únicamente para la primera iteración, el programa se centra en crear la lista de vecinas de cada partícula. En caso que se haya elegido el método de suavizado *Qubic spline*, el cual ha sido empleado en este proyecto, el dominio del sistema se divide en pequeñas cajas de lado $2 \cdot h$. A continuación, y en función de la distancia entre partículas preestablecida por el usuario, se llenan dichas cajas con el correspondiente número de partículas.

La segunda etapa consiste en la interacción inicial entre partículas seguido del cálculo de las ecuaciones de conservación del momento y de continuidad para cada una de ellas. Cabe destacar que tanto las ubicadas en una misma celda, junto con las de las celdas adyacentes, son candidatas a ser partículas vecinas. Recordemos que la velocidad de cada una de ellas vendrá determinada por la media de velocidades de sus partículas contiguas.

Finalmente, la última etapa del proceso consiste en, primero, actualizar el tiempo al de la siguiente etapa de simulación o iteración. En segundo lugar, actualizar las propiedades físicas de cada partícula.

Estos dos últimos pasos se repiten para cada iteración, y el primero se modifica de forma que el número y posición de partículas en cada celda viene en este caso predeterminado por el movimiento de las partículas en la etapa anterior.

Por otro lado, un factor a tener en cuenta a la hora de trabajar con este programa es su gran versatilidad. Dicho hardware permite indistintamente realizar la computación de la simulación mediante la CPU o la GPU del ordenador. Eso sí, para poder trabajar con la GPU, se necesita tener una plataforma de computación desarrollada por *nVidia* denominada *CUDA* [34]. Con todo, cabe mencionar que, debido a la elevada segmentación de la GPU, ésta permite la gestión de los resultados intermedios (interacción entre partículas) de forma más rápida y eficiente.

A continuación, se presenta una imagen con los pasos empleados en la computación de una simulación tanto si se trabaja en CPU o GPU.

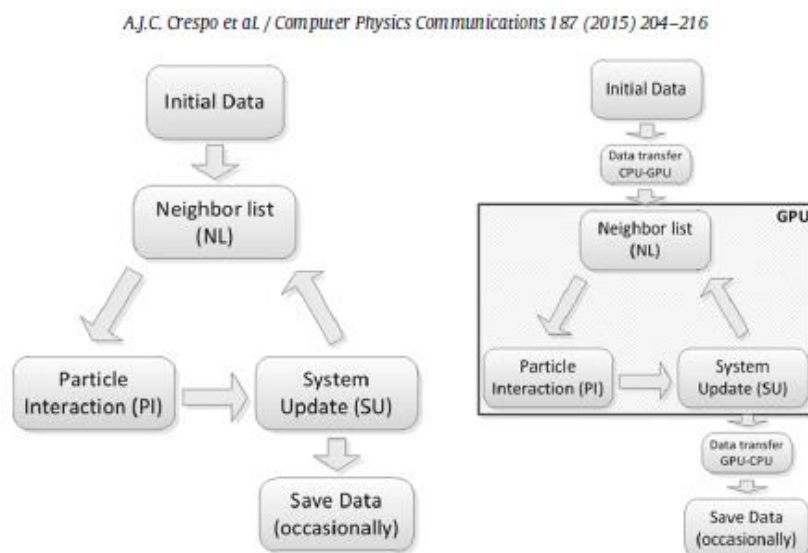


Figura 19: Diagrama de las etapas de computación en CPU y GPU respectivamente [2]

7. Sistema diseñado

Tal y como se ha documentado en el primer apartado, el objetivo principal del presente trabajo radica en comparar el comportamiento del flujo marino al toparse con una cimentación de tipo monopilote o en una de tipo *jacket*. De este modo, se pretende obtener una perspectiva clara del contraste en el campo de velocidades en ambas estructuras para, de esta forma, deducir el posible comportamiento de la socavación en éstas.

Con todo, en este apartado se detallan los modelos estructurales empleados, así como las consideraciones y detalles de las simulaciones ejecutadas.

7.1. Diseño de la estructura monopilote

En primer lugar, señalar que, debido al enfoque cualitativo del trabajo, no se necesitaba realizar un diseño idéntico a un monopilote real. Es por ello que detalles como los engranajes, las conexiones u otros componentes se han simplificado u obviado con tal de facilitar y optimizar el diseño. Además, debido a que la zona de estudio del flujo marino únicamente involucra la estructura, tanto la cubierta como la cimentación han sido excluidas del diseño. No obstante, diversos cálculos y consideraciones han tenido que realizarse con tal de no salir de las especificaciones.

El primer factor a considerar es la longitud de la estructura, la cual depende íntegramente del emplazamiento del parque eólico que desee desarrollarse. En este caso, debido a que el estudio no toma como referencia las características geográficas y climatológicas de ninguna ubicación en particular, la longitud debe considerarse en base a otros criterios.

Dos son las razones por las que se ha decidido trabajar con un valor de 50 metros de profundidad. El primero y más importante es que se desea trabajar en las mismas condiciones de contorno con ambos modelos, tanto con el monopilote como con la estructura tipo *jacket*. Como, en término de profundidades, los rangos de acción de ambas estructuras no se solapan, una de las dos debía someterse a un aumento o reducción de su tamaño. El segundo motivo se ha presentado en el apartado 4. Este consiste en ver que el sector busca avanzar hasta aguas más profundas con tal de aprovechar todo el potencial energético del viento en alta mar. Es por ello que la comunidad científica, en vistas que estas nuevas profundidades dejarían en desuso los monopilotes actuales, está desarrollando una nueva generación de monopilotes capaz de ubicarse en profundidades que rondan los 50 metros. Por este motivo se ha decidido que sea el monopilote que se adapte a las profundidades con las que se trabaja con estructuras tipo *jacket*.

Con todo, se deben seguir una serie de normas una vez la profundidad ha sido establecida. La primera especificación a considerar es que la altura total de la estructura debe ser mayor que la altura máxima de la cresta de la ola que se pueda formar en situaciones de oleaje bajo, las cuales no llegan a superar los 2 metros de altura [16]. Con todo, todo diseño prioriza la seguridad en la cubierta y por ello se añaden algunos metros de seguridad. En el presente trabajo se ha considerado adecuado añadir 5 metros con tal de minimizar posibles afectaciones a la cubierta. En consecuencia, la longitud del monopilote diseñado será de 57 metros.

Debido a que el estudio de fuerzas y desplazamientos del monopilote bajo diferentes condiciones de oleaje no forma parte de las especificaciones del trabajo, no se diseñará el anclaje de la estructura ni la parte que va inmersa en el suelo marino. Aun así, ésta debe tenerse en cuenta para el dimensionado final de la estructura. Por otro lado, comentar que, en caso de realizar un diseño completo, se debe realizar un estudio geotécnico y dinámico previos con tal de determinar la longitud adecuada.

El segundo aspecto a considerar es el diámetro del monopilote. Es importante destacar que, a mayor diámetro, mayor superficie de impacto del flujo marino, por lo que mayores serán las cargas dinámicas experimentadas. Ahora bien, ¿un aumento de la longitud de la estructura conlleva obligatoriamente un aumento de su diámetro?

En un estudio realizado por Jithin et al. [35] se llevaron a cabo diversas simulaciones en las que se analizaron parámetros tales como la flexión, la deformación o el desplazamiento de monopilotes con distinto ratio longitud – diámetro bajo unas mismas condiciones de cargas. El estudio concluyó que, bajo unas mismas condiciones de entorno, una menor ratio longitud – diámetro acarrea una menor flexión, estrés y desplazamiento en el monopilote. De hecho, estos resultados concuerdan con la tendencia vista en el sector eólico. A continuación, se muestra una tabla con los principales datos extraídos del estudio realizado por Jithin et al. [35].

Ratio	Máximo estrés [kN/m ²]	Máximo desplazamiento [m]
3	53.516,91	0,021
4	91.256,52	0,027
5	198.139,53	0,036
6	338.904,31	0,049
7	747.653,56	0,064

Tabla 1: Estrés y desplazamientos máximos obtenidos para 5 monopilotes con ratios altura - diámetro distintos

Por otro lado, no se puede obviar la relación directa entre el aumento del diámetro con el aumento de las cargas dinámicas recibidas por parte de la estructura. La transmisión de estas cargas al suelo marino, en dirección también horizontal, se realizan a lo largo de la superficie de la cimentación inmersa en el subsuelo. De este modo, un aumento del diámetro conllevará a un aumento de la longitud empotrada.

En un estudio realizado por Vicente Negro et al. [14], se establecieron tres relaciones básicas a partir de regresiones lineales entre las características principales de un monopilote, las cuales son la longitud total, la longitud empotrada, el diámetro y el peso de la estructura. Algunos de los datos con los que se buscó establecer dichas relaciones se muestran a continuación.

Wind Farm	Water depth (m)	Max water depth (m)	Diameter (m)	Length (m)	Driving length (m)	Weight (t)
Belwind	15 to 24	24	5	72	48	550
Horns Rev 2	9 to 17	17	3.9	40	23	280
Horns Rev 1	6 to 14	14	4	42	28	230
Samso	10 to 13	13	4.5	45	32	300
Anholt	15 to 19	19	5	54	35	630
EnBW Baltic 1	16 to 19	19	4.3	37	18	215
Borkum Riffgrund 1	23 to 29	29	5.9	66	37	700
Amrumbank West	20 to 25	25	6	70	45	800
DanTysk	21 to 31	31	6	65	34	730
Riffgat	18 to 23	23	6	70	47	720
Lely	5 to 10	10	3.7	30	20	89
Prinses Amalia	19 to 24	24	4	54	30	320
Egmond aan Zee	18	18	4.6	60	42	250
Bockstigen	6	6	2.1	21	15	43
Utgrunden 1	7 to 10	10	3.65	33.7	23.7	165
North Hoyle	7 to 11	11	4	25	14	250
Kentish Flats	5	5	4	38	33	247
Scroby Sands	5 to 10	10	4.2	42	32	200
Robin Rigg	4 to 13	13	4.3	35	22	310
Rhyl Flats	6 to 12	12	4.7	40	28	235
Barrow	15 to 20	20	4.75	60	40	530
Gunfleet Sands	0 to 15	15	5	50	35	423
Teesside	8 to 16.5	16.5	5	48	31.5	160
Burbo Bank	2 to 8	8	5	52	44	400
Sheringham Shoal	17 to 22	22	5.2	61	39	530
Lincs	8.5 to 16.3	16.3	5.2	48	31.7	480
Gwynt Mór	12 to 28	28	6	70	42	700
Greater Gabbard	20 to 32	32	6	60	28	700
Walney Phase 2	24 to 30	30	6	68	38	805
London Array	0 to 25	25	7	85	60	650

Figura 20: Datos empleados en la configuración de las regresiones lineales [14]

A continuación, se desarrollan las relaciones mencionadas anteriormente.

$$L_T = 14 \cdot D - 17 \quad (6)$$

$$L_D = 8 \cdot D - 5 \quad (7)$$

$$W = 16,5 \cdot L_T - 392 \quad (8)$$

Donde:

L_T = longitud total del monopilote en metros.

L_D = longitud empotrada en metros.

D = diámetro del monopilote.

W = Peso total del monopilote.

Tal y como se puede observar en base a los datos presentados en la Figura 20, si se pretende modelar una estructura monopilote de longitud 57 metros con anclaje por pilote, seguramente se necesite como mínimo que éste presente la misma longitud. De este modo, se obtendría una longitud total superior a 120 metros, hecho que conllevaría un diámetro superior a los 9,79 metros, siguiendo las relaciones anteriores. Dado a que dicha combinación (emplear pilotes tanto para la estructura como para la cimentación) es la más empleada en el sector, y no se

tienen datos que indiquen que la tendencia vaya a cambiar, se decide trabajar con un valor de diámetro de 10 metros.

Finalmente, el último factor a determinar es el grosor de la estructura. Arany et al., 2017 [36], presentó una relación inicial entre el diámetro y el grosor de la estructura, la cual se presenta a continuación.

$$t = 6,35 + \frac{D}{100} \text{ [cm]} \quad (9)$$

Donde:

t = grosor de la estructura, en centímetros.

D = diámetro de la estructura, en metros.

Con todo, en el mismo estudio señalan que el valor obtenido con la expresión anterior puede no proporcionar necesariamente la estabilidad suficiente para evitar el pandeo local o global del pilote, o para garantizar que el pilote pueda introducirse en el lecho marino mediante los métodos de instalación más simples. Además, trabajar con una estructura poco rígida podría implicar trabajar en la región de frecuencias *soft-soft*, por lo que el sistema se volvería más sensible a las frecuencias externas generadas por el viento, la corriente y las palas del aerogenerador. Por este motivo, y debido a falta de datos trabajando con diámetros de tal magnitud, se decide multiplicar el valor obtenido en la expresión anterior por 1,5, obteniendo así un valor de grosor de 96,75 milímetros. A continuación, se muestra el diseño definitivo obtenido mediante la herramienta de software CAD para modelado mecánico, *SOLIDWORKS* [1].

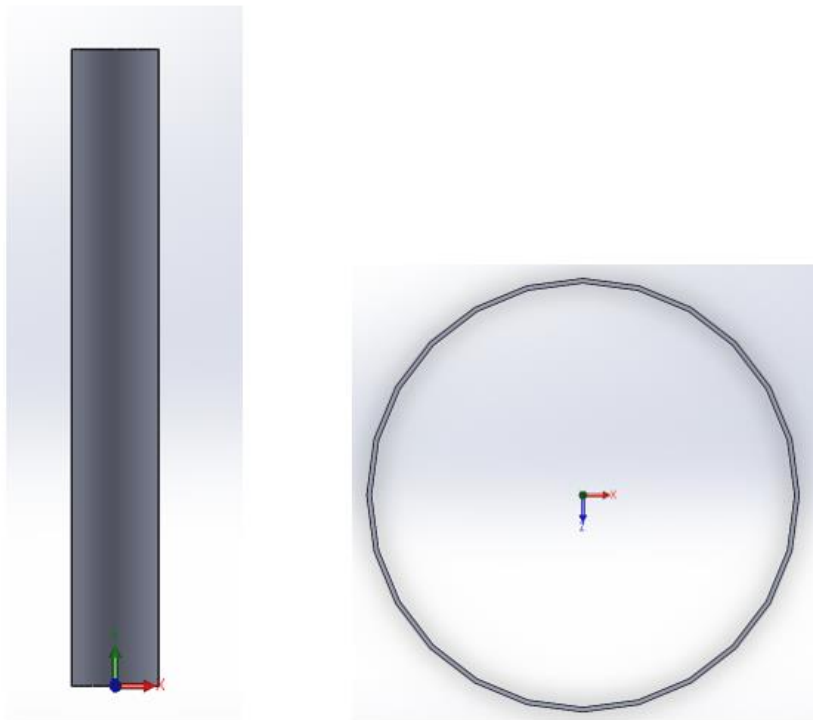


Figura 21: A la izquierda, vista frontal del modelo y a la derecha, vista en planta

7.2. Diseño de la estructura *jacket*

Para el modelado de la estructura tipo *jacket* se toman las mismas consideraciones puntualizadas en el apartado anterior. Por ello, tanto la cubierta como la cimentación quedan excluidas del modelo. De todas formas, se detallarán tanto las especificaciones utilizadas como las excluidas pero necesarias en un diseño real. Recordar que, en este trabajo, debido a un enfoque genérico y cualitativo, no se realiza un diseño para una ubicación concreta. Por ello, la altura de la estructura, para ser equivalente al monopilote, también tendrá un valor de 57 metros.

En primer lugar, se acostumbra a partir del diseño de una estructura ya construida y ubicada en condiciones similares a las del emplazamiento elegido. Normalmente se empieza con el modelado de las patas verticales, para luego avanzar con el dimensionado de las barras que forman el arriostramiento. Finalmente se diseñan las cimentaciones de la estructura, siendo las más empleadas hasta la fecha los postes verticales o pilotes. Para su correcto dimensionado, se debe realizar un correcto análisis de la capacidad de carga de cada uno de los pilotes. Según la norma API RP2A, la carga de diseño que cada pilote de la fundación debe aguantar debe ser 1,5 la carga máxima sobre éste. A continuación, se presenta la ecuación para encontrar la carga máxima sobre cada pilote:

$$Q_d = Q_f + Q_p = \int_{z=0}^L f(z)A_s(z)dz + q \cdot A_p \quad (10)$$

Donde:

Q_f = Capacidad de carga por fuste.

Q_p = Capacidad de carga por punta.

$f(z)$ = capacidad de fricción unitaria de la superficie (fuerza por unidad de área)

$A_s(z)$ = superficie lateral del pilote por unidad de longitud.

q = capacidad de punta unitaria (fuerza por unidad de área)

A_p = área bruta de la punta.

L = longitud del pilote

En relación a la configuración del arriostramiento de la estructura, hay diversas posibilidades, cada una de ellas presentando una serie de ventajas e inconvenientes. La primera de ellas y la más utilizada es la combinación denominada tipo X (tipo 5 en la Figura 22). Esta combinación es muy común, sobre todo en aguas que presentan un cierto riesgo a sufrir actividad sísmica, debido a su elevada rigidez y ductilidad [37]. Cabe destacar que las barras horizontales son

opcionales, y su uso se basa en función de cuánto se desea reforzar el plano horizontal en esos puntos [38].

Las combinaciones tipo 1 (también denominada tipo Z) y 2 carecen de poca simetría, por lo que su uso se limita a aguas tranquilas y siempre cuidando los esfuerzos que sufre la estructura en el plano horizontal. La combinación tipo 3, al igual que las dos anteriores, consta de pocas barras, por lo que se reducen costes de soldadura y de juntas. También su empleo se limita a ubicaciones de aguas tranquilas y con un riesgo sísmico muy bajo.

Finalmente, la configuración tipo 4, también conocida como tipo K o tipo V, presenta una buena simetría y resistencia en el plano horizontal. Se utiliza en aguas profundas y su principal desventaja se encuentra en el marco económico [37].

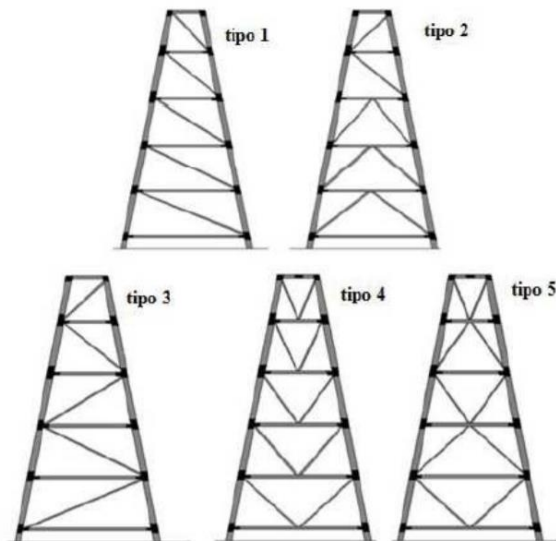


Figura 22: Principales tipos de arriostramientos empleados en el sector [37]

La configuración elegida para el diseño de este trabajo es el tipo X, debido a su uso extendido y generalizado en todo tipo de aguas, recalando su mayor uso en aguas con riesgo sísmico. Con tal de simplificar el diseño las barras horizontales se han obviado. Puntualizar que el dimensionado tanto del grosor como del diámetro de las barras arriostradas y de las patas verticales se debe realizar tras estudios exhaustivos. Con todo, en este trabajo se han tomado valores estándar de secciones tubulares proporcionados por *SOLIDWORKS*, los cuales son muy similares a los valores empleados en estructuras reales, si bien es cierto que hay un pequeño sobredimensionamiento.

A continuación, se muestra el diseño definitivo obtenido mediante la herramienta de software CAD para modelado mecánico, *SOLIDWORKS*.

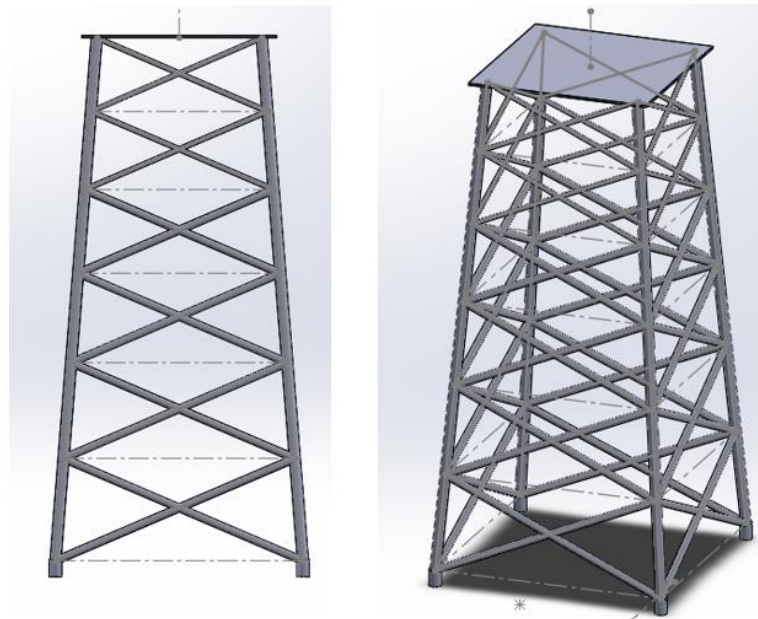


Figura 23: A la izquierda, vista frontal de la estructura jacket y a la derecha vista dimétrica. Las líneas discontinuas son líneas constructivas que han servido durante el modelado del diseño.

Finalmente, destacar que con tal de poder trabajar con dichos modelos en *DualSPHysics*, se han tenido que exportar en formato *.stl para poder integrarlos al programa. Además, se aconseja trabajar y retocar el tamaño de las estructuras con *Blender* [39]. *Blender* es un software de diseño gráfico que se define como “un programa informático multiplataforma, dedicado especialmente al modelado, iluminación, renderizado, la animación y creación de gráficos tridimensionales”. Este software permite de forma intuitiva y eficiente realizar modificaciones y ajustes de escala a las estructuras importadas, acciones que se vuelven imprescindibles dado que el tamaño de la zona de estudio en el interfaz *FreeCAD* puede variar considerablemente (ver escala en el apartado 7.4).

7.3. Interfaz gráfica FreeCAD

FreeCAD proporciona una interfaz gráfica de usuario para *DualSPHysics*. Incluye un soporte para el preprocesamiento con *GenCase*, la simulación con *DualSPHysics* y proporciona para el postprocesamiento varias herramientas dentro del paquete de *DualSPHysics*. Es por ello una interfaz muy útil para todo tipo de simulaciones relacionadas con el estudio de flujos y su interacción con el entorno.

Cabe destacar que en un futuro el código será modular, por lo que se podrán integrar diversos solucionadores, como el propio SPH. Con todo, hoy por hoy, esta interfaz está diseñada principalmente para trabajar con *DualSPHysics*. A continuación, se describe el sistema diseñado para ubicar las estructuras monopilote y *jacket*.

En primer lugar, recalcar que se ha utilizado *DualSPHysics* para trabajar en un sistema 3D. Este hecho cobrará valor más adelante. Las principales figuras creadas en la interfaz *FreeCAD* son las siguientes:

- Volumen de contorno: es un dominio virtual, simulado a partir de unas líneas rojas, y delimitan el volumen donde se va a conservar la masa (partículas).
- Suelo marino: necesario para dar soporte a las partículas. Longitudinalmente tendrá la misma dimensión que el volumen de contorno. También dará soporte a las estructuras. Se crea a partir de un bloque de tipo “cubo sólido”.
- Pistón: será el elemento empleado para simular el movimiento del oleaje. También formado a partir de un bloque de tipo “cubo sólido”, pero, al contrario que el elemento anterior, se le otorgará un movimiento de tipo “Pistón de olas regulares”. Las principales características del sistema de movimiento son la profundidad, la altura de ola generada, así como el período del oleaje.
- Paredes laterales y pared del extremo final: elementos de tipo “cubo sólido”, son necesarios para evitar que las partículas de fluido se derramen del volumen de contorno. Recordar que éste es un dominio virtual, por lo que necesita de soporte si se desea mantener fluido en su interior. Las paredes laterales no serían necesarias en caso de realizar una simulación en 2D.
- FillBox: esta herramienta se utiliza para delimitar el emplazamiento y dimensiones del volumen inicial de partículas. Es decir, se establece el recipiente del volumen, pero no el número de partículas que hay en éste.

7.4. Dimensiones del sistema en FreeCAD

En este apartado se detallarán de forma resumida las principales características de cada uno de los elementos mencionados anteriormente.

En primer lugar, comentar que se ha trabajado con una escala 1:100. Este hecho se debe principalmente a que, de este modo, se puede trabajar con un número de partículas asequible, hecho que deriva en un tiempo de computación no muy elevado. De este modo, las principales dimensiones de los elementos del sistema son las siguientes:

	CARACTERÍSTICAS	X	Y	Z
Volumen de Contorno	DIMENSIONES [m]	6,000	0,750	1,500
	UBICACIÓN [m]	0,000	-0,375	-0,750
Suelo	DIMENSIONES [m]	6,000	0,750	0,025
	UBICACIÓN [m]	0,000	-0,375	-0,750
Pistón	DIMENSIONES [m]	0,025	0,750	1,475
	UBICACIÓN [m]	0,000	-0,375	-0,725
Pared final	DIMENSIONES [m]	0,025	0,750	1,475
	UBICACIÓN [m]	5,975	-0,375	-0,725
Pared derecha	DIMENSIONES [m]	5,950	0,025	0,975
	UBICACIÓN [m]	0,000	-0,375	-0,725
Pared izquierda	DIMENSIONES [m]	5,950	0,025	0,975
	UBICACIÓN [m]	0,000	0,350	-0,725
FillBox	DIMENSIONES [m]	5,950	0,700	0,450
	UBICACIÓN [m]	0,025	-0,350	-0,725

Tabla 2: Dimensiones y ubicaciones de los elementos del sistema en FreeCAD

En la Tabla 2 se puede apreciar que el valor de la profundidad, en lugar de ser de 0,5 metros (50 metros a escala real), es de 0,45 metros. Este cambio busca una reducción del tiempo de cálculo, ya que un volumen de *FillBox* menor implica una menor cantidad de partículas dada una distancia determinada. Además, debido a que el objetivo del trabajo radica en el estudio del flujo principalmente cerca de la base de la estructura, dicha disminución no supone una gran alteración en los resultados finales.

A continuación, se presentan dos vistas del sistema definitivo diseñado con *FreeCAD*:

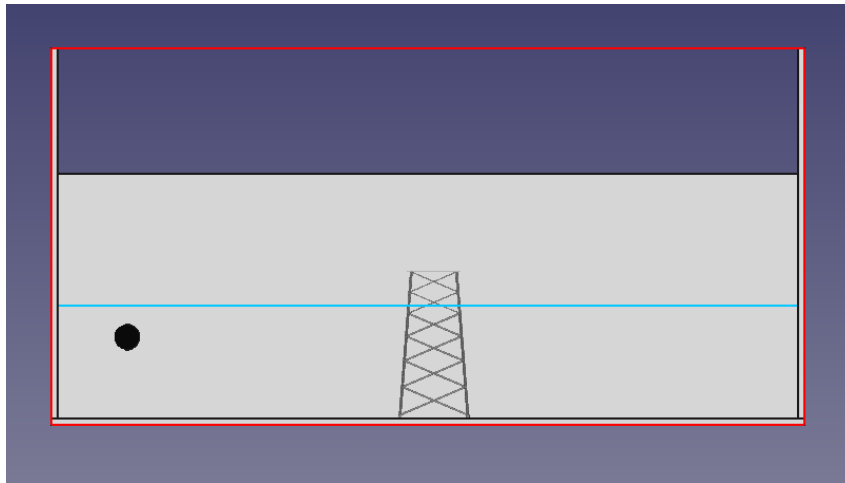


Figura 24: Vista frontal del sistema con la estructura jacket importada (se ha eliminado la pared derecha para mejorar la visualización)

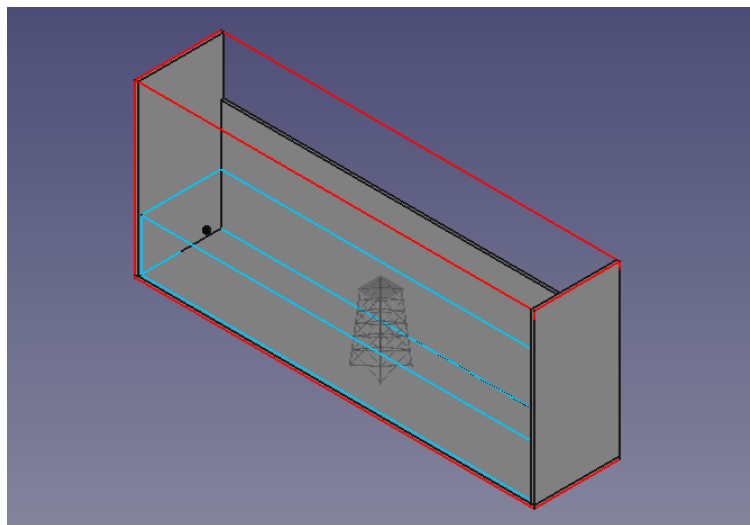


Figura 25: Vista isométrica del sistema con la estructura jacket importada

7.5. Características del flujo

En este apartado se documentan, por una parte, las principales características del flujo que se ha utilizado en este trabajo, siendo estos principalmente el valor de la viscosidad y la distancia entre partículas. El primer término hace referencia a la turbulencia del fluido. Es decir, este valor nos indica cómo y cuánta energía disipa nuestro fluido con el movimiento. Para la realización de este estudio se tomó como valor base el valor propuesto por los creadores de *DualSPHysics*, ya

que es el que emplean en sus ejemplos para simular flujos marinos en los denominados *wave tanks*. Este valor es de 0,01.

El segundo término cobra importancia con la resolución de los datos obtenidos, ya que a menor distancia entre partículas mayor número de ellas, por lo que el flujo obtenido será más realista. De todos modos, se debe encontrar un balance con este término, ya que poner un valor la mitad de pequeño que el anteriormente probado conllevará a un tiempo de simulación mucho mayor, pero la calidad de la resolución puede ser casi idéntica. Después de realizar varias pruebas con un volumen de sistema mucho menor, se ha decidido que una distancia entre partículas de 0,02 metros es suficiente.

7.5.1. Análisis de las olas regulares

Las olas regulares son aquellas ondas que mantienen la misma frecuencia, longitud de onda y amplitud. Como cabe esperar, no son las olas que se encuentran en el mar, siendo éstas las llamadas irregulares. Estas últimas se consiguen mediante la combinación de olas regulares, siendo tres el mínimo requerido para reproducir de forma auténtica el oleaje marino [40].

Con todo, debido a que el objetivo radica en una comparación de flujos en igualdad de condiciones de contorno, en el presente trabajo se ha utilizado un movimiento de pistón generador de olas regulares. Además, para obtener cálculos precisos con irregulares, se debe tener una superposición mínima de 15 olas regulares, hecho que eleva innecesariamente el tiempo de cálculo ya que el presente trabajo tiene un carácter meramente cualitativo [40]. Por ello, la elección de las olas regulares se asume como la más lógica.

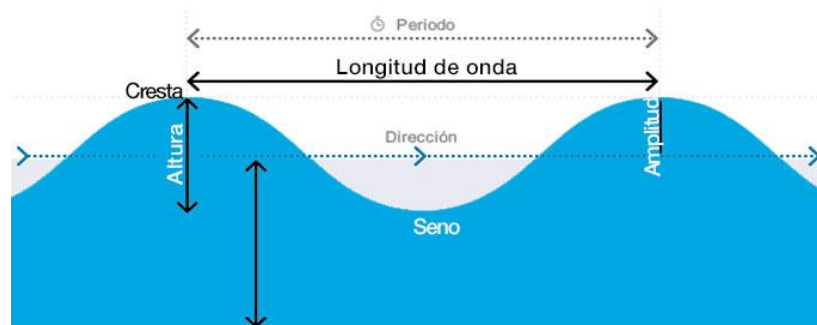


Figura 26: representación gráfica de una ola regular [40]

Aunque para el desarrollo del presente trabajo no ha sido necesaria la utilización de las diversas teorías de olas, mencionar que de entre las principales la más utilizada es la Teoría de Airy.

El movimiento otorgado al pistón, de clase "Generador de olas regulares", presenta los siguientes parámetros principales:

- Altura de ola.
- Periodo.
- Fase.

Debido a que se desea realizar el estudio en condiciones de tormenta, los valores establecidos y ya escalados para la altura de ola y el período son, respectivamente, de 0,08 metros y 1,35 segundos. La fase se ha establecido en 0 grados.

7.6. Damping o amortiguamiento

Las olas generadas deben amortiguarse, sino el oleaje generado es devuelto al chocar contra la pared del extremo y acaba impactando con el oleaje de periodos futuros. Este fenómeno debe solucionarse ya que, de no hacerlo, se estaría trabajando con un flujo alejado de la realidad. Hay dos formas principales de amortiguar el oleaje, las cuales son las pasivas y las activas. En este trabajo únicamente se ha empleado el primer método, el cual consiste en amortiguar la energía de las olas y reducir la reflexión ejercida por el límite del dominio del modelo. Los sistemas pasivos de absorción de ondas consisten en colocar una pendiente suave al final del sistema o bien en colocar pantallas, a modo de “esponjas”, delante de los límites para disipar una gran cantidad de la energía. En la siguiente figura se muestran gráficamente ambas opciones.

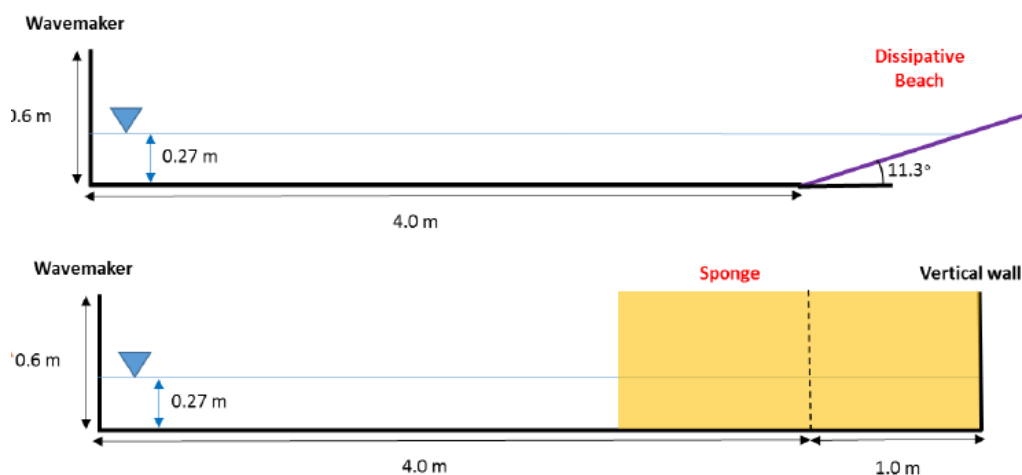


Figura 27: Arriba se muestra el amortiguamiento del oleaje mediante una pared inclinada o playa, abajo se muestra el amortiguamiento mediante una zona “esponja” [41]

En el presente trabajo, debido a la gran profundidad con la que se trabaja (45 metros), se plantea la hipótesis que ambas estructuras se encuentran alejadas de la costa, por lo que se ha utilizado el amortiguamiento mediante una zona “esponja” ya que simula de forma más verídica las condiciones de trabajo.

7.7. Ejecución y postproceso

Antes de ejecutar la simulación, desde la propia interfaz de *FreeCAD* se debe presionar el botón *GenCase*, un programa que se implementa en *DualSPPhysics* y se usa para definir la configuración inicial de la simulación. Una vez realizado dicho paso, *FreeCAD* permite ejecutar las simulaciones

desde el propio programa. De todos modos, también existe la opción de ejecutarla a partir del sistema intérprete de comandos *Command Prompt*, llamando al guion de *Shell* o *Batch file*, que consiste en un archivo de texto con una serie de órdenes y datos que se crea gracias a *GenCase*.

Esta segunda opción presenta dos ventajas. En primer lugar, permite realizar modificaciones al modelo diseñado en *FreeCAD* de forma más eficiente, ya que se pueden ver todos los elementos creados y sus características de forma más compacta y sintetizada a través de las líneas de código. En segundo lugar, permite añadir líneas de código para el postproceso, el cual resulta necesario si se desea analizar el campo de velocidades en una zona determinada del modelo.

A continuación, se muestra el código empleado en el postproceso.

```
52 :postprocessing
53 set dirout2=%dirout%\particles
54 %partvtk% -dirin %diroutdata% -savevtk %dirout2%/PartFluid -onlytype:-all,+fluid
55 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
56
57 %partvtk% -dirin %diroutdata% -savevtk %dirout2%/PartPiston -onlytype:-all,+moving
58 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
59
60 %partvtkout% -dirin %diroutdata% -savevtk %dirout2%/PartFluidOut -SaveResume %dirout2%/_ResumeFluidOut
61 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
62
63 %measuretool% -dirin %diroutdata% -points velocity.txt -onlytype:-all,+fluid -vars:-all,+vel -savecsv
64 %dirout2%/_velocity -savevtk %dirout2%/velocity
65 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
```

Figura 28: Código empleado en el postproceso

Cabe destacar que los tres primeros párrafos son necesarios para poder visualizar las simulaciones en la herramienta *Paraview*, siendo el último el necesario para estudiar el campo de velocidades. Tal y como se puede observar, el código llama a un archivo externo de texto llamado *velocity.txt* donde previamente se han escrito las coordenadas exactas de los puntos de interés (ver dichos puntos en el próximo apartado). Comentar que todas las lecturas y modificaciones del código proporcionado por *GenCase* se han efectuado gracias a *Notepad++* [42], un editor de texto y código libre.

8. Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras analizar el campo de velocidades en puntos estratégicos alrededor de las estructuras, haciendo hincapié en la base de éstas. Es de importancia destacar que, debido a la distancia entre partículas empleada, no ha sido factible la visualización clara del vórtice de herradura en la base de las estructuras. Con tal de poder observar dicho fenómeno se hubiera necesitado reducir en gran medida la distancia entre partículas, pero a su vez se hubiera aumentado de forma exponencial el tiempo de simulación. Por otro lado, la máxima profundidad a la que se ha podido realizar un análisis numérico del campo de velocidades ha sido a un metro del fondo marino (0,01 metros en el modelo). Si se estudiaban zonas más cercanas al fondo marino, en muchos instantes de la simulación se obtenían errores numéricos. Se deduce que, del mismo modo, una reducción de la distancia de partículas y el consecuente incremento de éstas facilitarían el estudio en zonas incluso más cercanas al suelo. De todos modos, destacar que, aunque los vórtices o remolinos son uno de los principales mecanismos de disipación de energía en los fluidos, éstos suelen encontrarse a escasos centímetros del suelo, por lo que el grado de calidad de la simulación (distancia entre partículas) debe de ser muy elevado. Eso sí, cuanta mayor es la energía disipada, mayor es el tamaño del vórtice.

Debido a la gran diferencia geométrica entre las bases de ambas estructuras, estos puntos se han escogido de forma estratégica con el objetivo de trabajar en zonas equivalentes y poder así realizar una comparación óptima. A continuación, se presenta un esquema de la ubicación de los puntos elegidos. Cabe mencionar que el estudio se realiza cubriendo 2 niveles de profundidad, los cuales corresponden a 1 y 2,5 metros del fondo marino. A estas distancias ya se está por encima de la capa límite, por lo que esta variedad de puntos se considera suficiente.

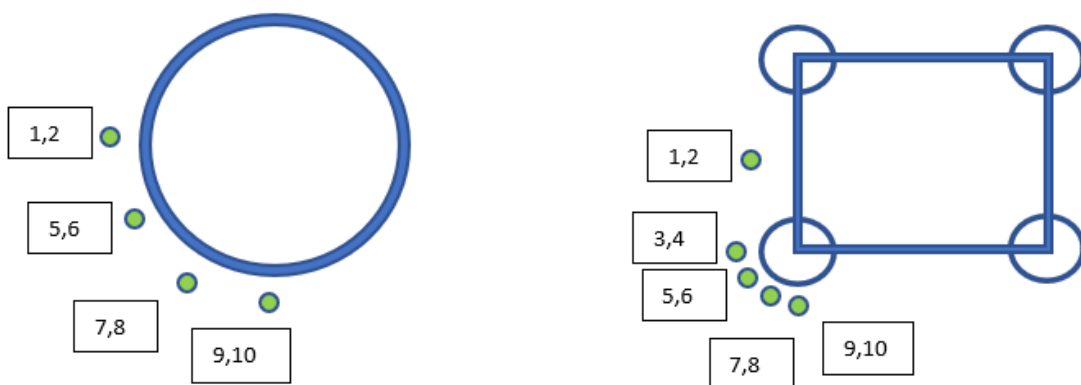


Figura 29: Distribución de los puntos de estudio para ambas estructuras en una vista en planta; a la izquierda el monopilote y a la derecha la estructura jacket.

Para cada ubicación, el número menor representa la coordenada situada a 1 metro del suelo marino, mientras que la mayor representa la situada a 2,5 metros.

A continuación, se presenta el análisis del campo de velocidades obtenido en las respectivas simulaciones. En los apartados 8.1 y 8.2 se comparan, respectivamente, las velocidades obtenidas en dirección x y z , ya que es el principal plano de acción del vórtice de herradura. Finalmente, en el apartado 8.3 se discutirá acerca del campo de velocidades obtenido en el eje y .

8.1. Estudio en el eje x

En la región central de la estructura (puntos 1 y 2 en ambas estructuras), sus respectivas geometrías influyen de manera drástica en los resultados obtenidos. En el caso del monopilote, se observa una desaceleración grande del flujo en la zona central debido al contacto con la estructura. Este fenómeno se observa de forma evidente tanto en Paraview como en la Figura 29, donde se aprecia la gran reducción de velocidad en dicha zona. Este gradiente de velocidad se transforma en un gradiente de presión, conduciendo el flujo hacia abajo dando lugar al vórtice de herradura.

Otro fenómeno apreciable en Paraview tras aplicar zoom a la zona de estudio es el apilamiento que experimentan las partículas tras golpear el monopilote. Este amontonamiento se debe, por un lado, porque dichas partículas se ven obstaculizadas por la propia estructura, por otro, porque se ven comprimidas por las partículas que fluyen detrás de éstas, y, por último, porque se ven empujadas por la corriente descendente del flujo que ha chocado frontalmente contra el monopilote en capas superiores. Este fenómeno, observable en Paraview, podría ser indicativo del vórtice de herradura varias capas más abajo. Por otro lado, destacar que este apilamiento inicial favorece, tal y como se verá a continuación, a una aceleración del fluido a medida que éste trata de bordear la estructura. A mayor apilamiento, mayor presión en el punto de estancamiento y mayor es la aceleración experimentada a posteriori. Éste último efecto favorece la aparición de vórtices de estela, arrastrando consigo sedimentos de la base.

Por otro lado, en el caso de la estructura *jacket*, se aprecia una aceleración del flujo debido a la contracción que sufre al atravesar la estructura. En función del tipo de suelo marino del emplazamiento, esta aceleración puede favorecer un cierto desplazamiento de sedimentos. Con todo, dicho efecto es más leve que el ocasionado por un vórtice de herradura. A continuación, se muestra una comparativa de la velocidad en x para ambas estructuras.

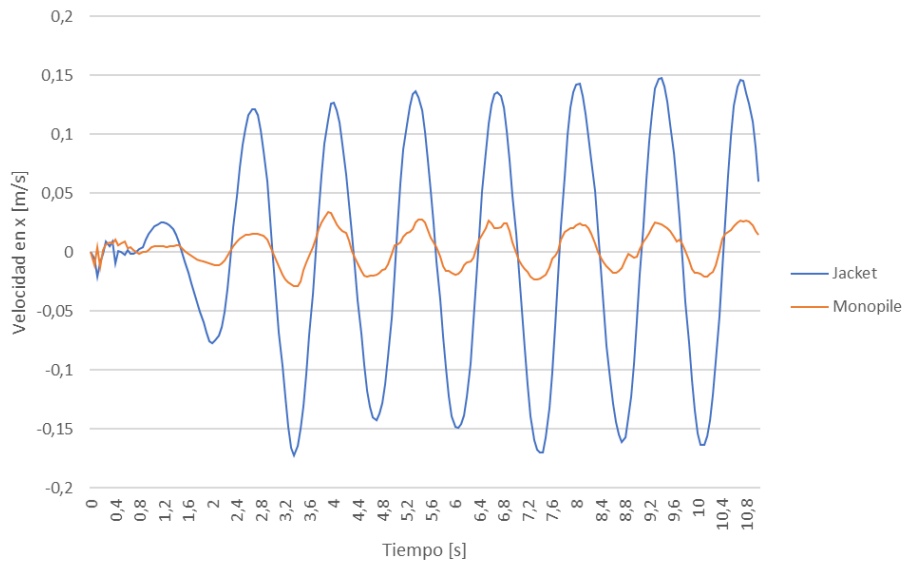


Figura 30: Velocidad en dirección x en el punto 1 de ambas estructuras

A continuación, se precede a realizar un análisis local del campo de velocidades, empezando por comparar los puntos 1 y 2 del monopilote con los puntos 3 y 4 en la estructura *jacket*.

Localmente en la estructura *jacket* se observa un menor riesgo de socavación. Esto se deduce de la menor desaceleración que padece el flujo al entrar en contacto con esta estructura (ver Figura 31), hecho que conlleva a un menor gradiente de presión en dirección vertical y , y, por lo tanto, a una menor corriente descendente de fluido. Además, en la plataforma de visualización Paraview se observa una mayor acumulación de partículas en el monopilote que en la estructura *jacket*. Este fenómeno es, entre otros factores, debido a la evidente diferencia de diámetro entre ambas pilas, factor que provoca que el área transversal de flujo que choca frontalmente con el monopilote sea superior al área que colisiona con cada una de las patas de la estructura *jacket*, dando lugar también a esta diferencia de acumulación de flujo inmóvil.

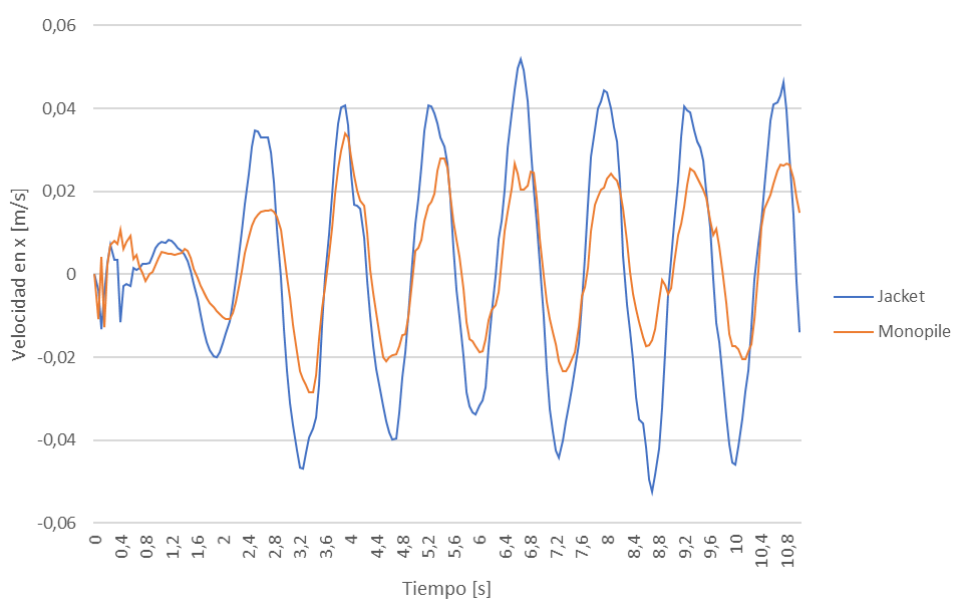


Figura 31: Campo de velocidad en dirección x ; 1) Análisis del punto 1 en el monopilote, 2) Análisis del punto 3 en la estructura *jacket*

Analizando las diferencias entre el campo de velocidades a 1 metro y 2,5 metros, se observa para el monopilote una ligera diferencia, donde a menor distancia del fondo mayor aceleración presenta el flujo. En la estructura *jacket*, por el contrario, no se observa ningún efecto destacable.

Cabe destacar que, durante el estudio del presente proyecto se ha observado que en los gráficos donde se comparan ambas profundidades, por el simple hecho de analizar las estructuras por separado se pierde la apreciación de la diferencia de magnitud entre ambos campos de velocidad. Por ello, se ha añadido a dichas comparaciones una tercera velocidad. Esta velocidad, denominada estándar, se ha obtenido a partir de analizar la hidrodinámica en unas coordenadas tales que no hubiera interferencias o distorsiones debido a las estructuras. Es decir, es la velocidad que tendrían las partículas de las zonas de estudio si no hubiesen colisionado con las estructuras. De este modo, se puede apreciar la mayor desaceleración alrededor de la base del monopilote que de la estructura *jacket* (ver Figura 32).

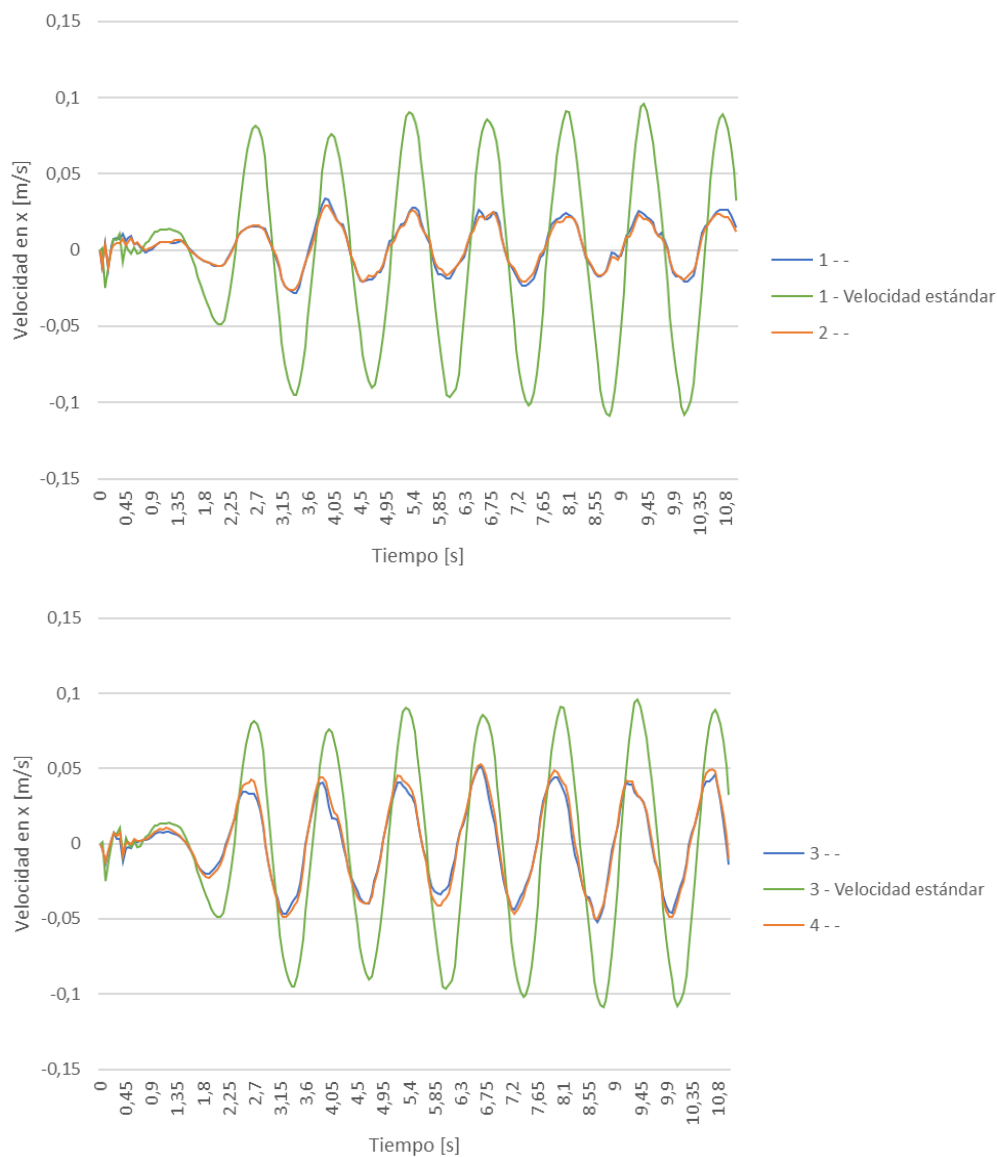


Figura 32: Arriba, comparación de velocidades en x a 1 y 2,5 metros del fondo en el monopilote para los puntos 1 y 2, abajo comparación de velocidades en x a 1 y 2,5 metros del fondo en la estructura *jacket* para los puntos 3 y 4

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el flujo sufre una aceleración al bordear las pilas fruto de la previa acumulación de fluido en los puntos de la zona central. Por tanto, dicha aceleración es directamente proporcional a la cantidad de partículas amontonadas. De este modo, se deduce que el fluido que bordee la pila del monopilote ganará inicialmente más velocidad que el flujo que bordee las cuatro patas de la estructura *jacket*. Este fenómeno se puede observar en la Figura 33, donde se ha graficado el campo de velocidad en x para el punto 5 de ambas estructuras.

En relación a una comparación entre ambas profundidades, no se aprecian grandes diferencias para ambas estructuras salvo una sutil aceleración en la capa situada a 2,5 metros con respecto a la inferior (ver Figura 34). Gracias a la incorporación de la velocidad estándar, se puede apreciar claramente la mayor desaceleración de la estructura *jacket* en esta zona de las pilas.

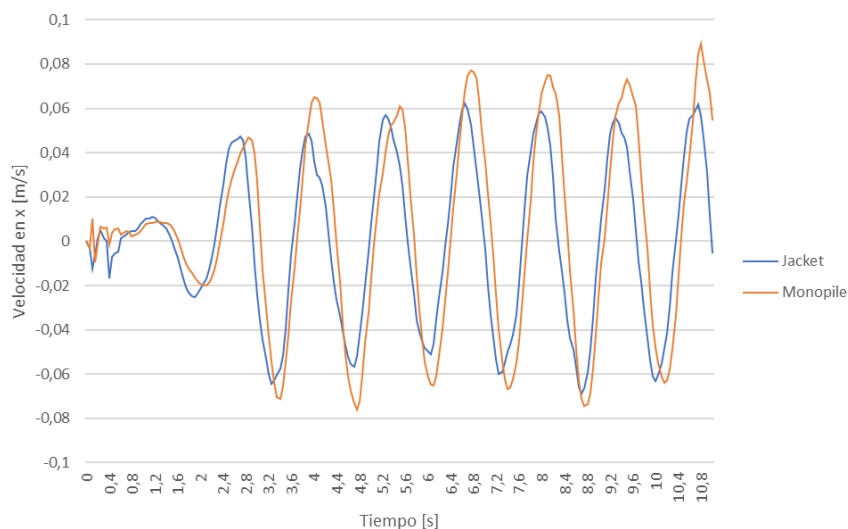
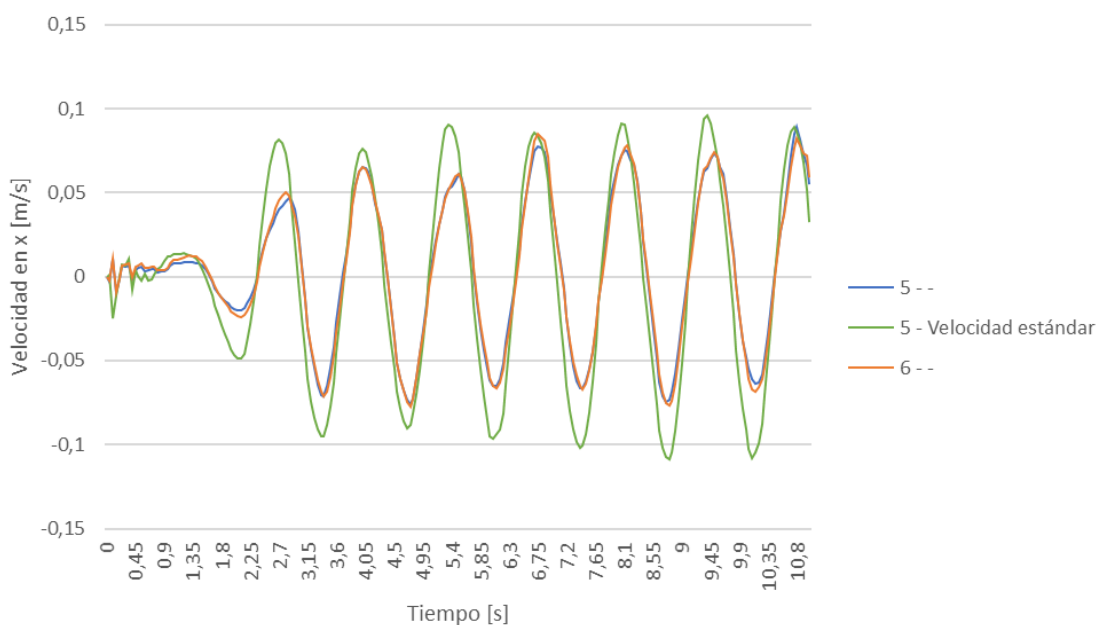


Figura 33: Campo de velocidad en x en el punto 5 de ambas estructuras



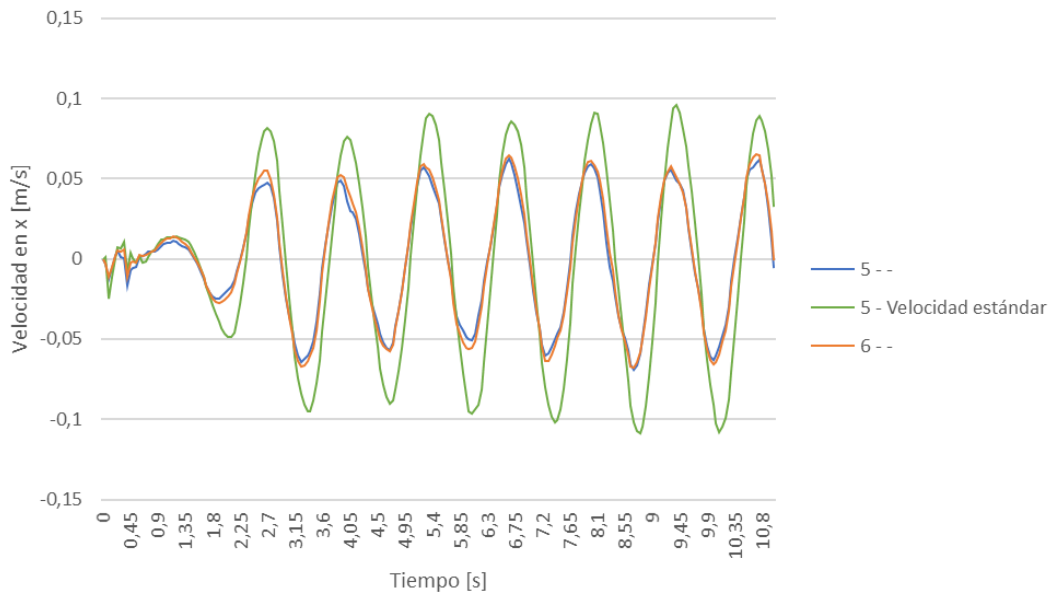


Figura 34: Arriba, comparación de velocidades en x a 1 y 2,5 metros del fondo en el monopilote para los puntos 5 y 6, abajo comparación de velocidades en x a 1 y 2,5 metros del fondo en la estructura *jacket* para los puntos 5 y 6

Para las dos zonas de estudio restantes (puntos 7-8 y 9-10) se observa una gradual nivelación de la velocidad entre ambas estructuras, por lo que la magnitud de los vórtices de estela debería ser similar. Por otro lado, sigue sin observarse diferencia alguna entre los datos obtenidos a 1 metro y 2,5 metros del lecho marino.

Es importante destacar que el pequeño desfase que se observa en la Figura 35 se debe, entre otros motivos, a la diferencia de tamaño entre las pilas. Es decir, en ambas estructuras los puntos 9 y 10 forman 90° con los puntos 1 y 2, pero el diámetro del monopilote, siendo considerablemente mayor que cada pata de la estructura *jacket*, hace que sus respectivos puntos 9 y 10 estén más alejados del pistón generador de olas que sus análogas.

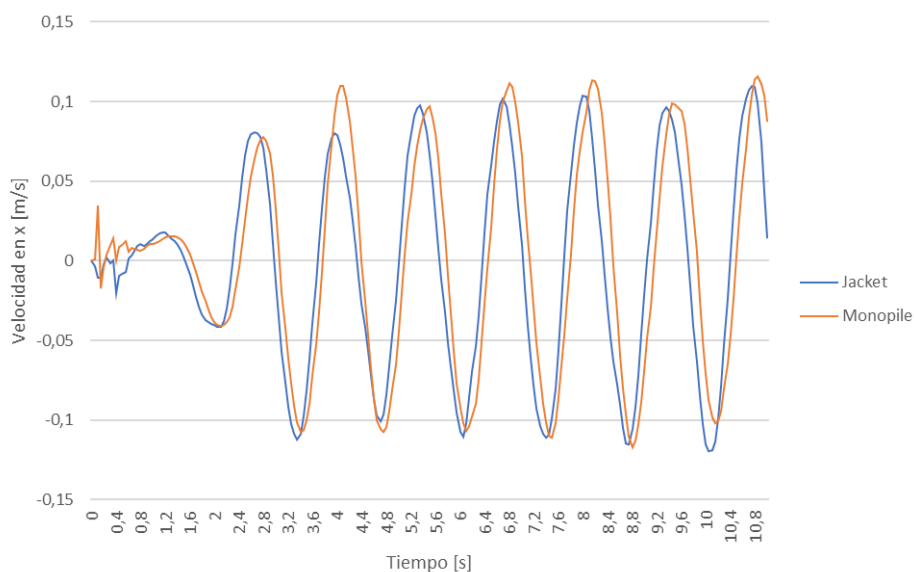


Figura 35: Campo de velocidad en x en el punto 9 de ambas estructuras

8.2. Estudio en el eje z

En este apartado se presentan los principales análisis y resultados obtenidos a partir del estudio del campo de velocidades en el eje z. En primer lugar, destacar la presencia de mayores perturbaciones en los resultados obtenidos, fruto de la mayor inestabilidad y caos del fluido en la zona de estudio.

Analizando la zona central (puntos 1 y 2 en ambas estructuras), se observa una mayor aceleración en el flujo de la estructura *jacket* debido a la contracción que sufre al atravesar la estructura. Además, los picos de velocidad son más definidos ya que las partículas no se encuentran envueltas en corrientes descendentes y acumulaciones de fluido que perturban la trayectoria de las mismas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dicha zona.

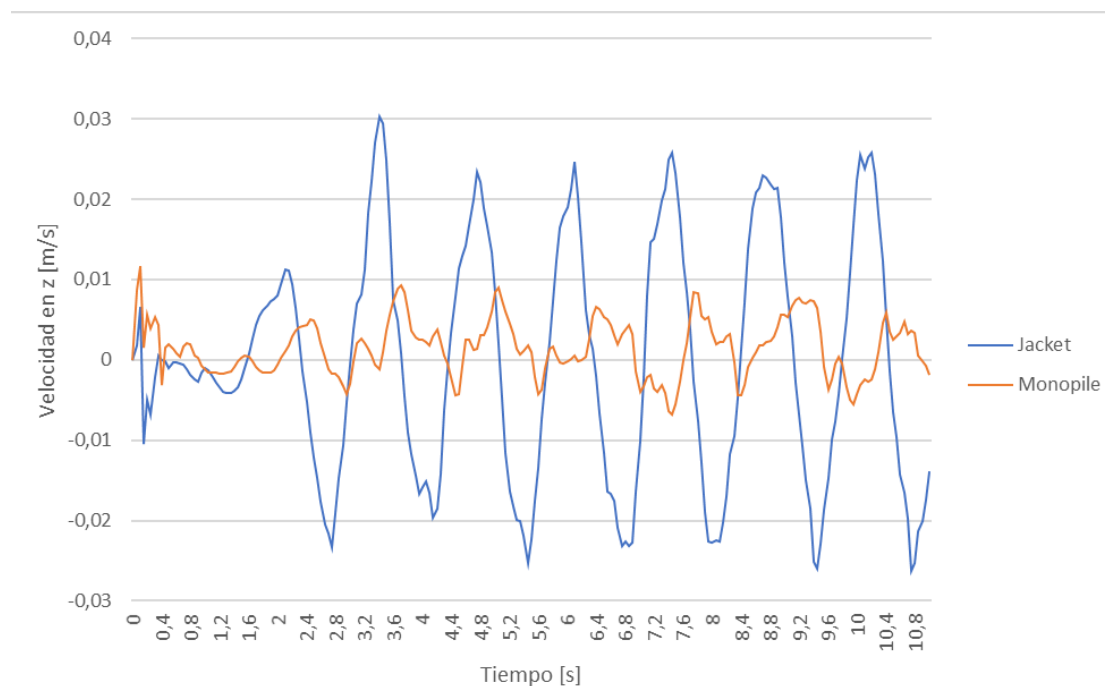


Figura 36: Velocidad en dirección z en el punto 1 de ambas estructuras

A continuación, se procede a realizar un análisis local, tomando únicamente una de las cuatro patas de la estructura *jacket* y comparándola con el propio monopilote. Los resultados obtenidos muestran que, si bien la perturbación es remarcable en ambas simulaciones, en el caso del monopilote la amplitud del campo de velocidades es más constante. En cambio, en el flujo de la estructura *jacket* se observa una mayor variabilidad en la amplitud de los picos (ver Figura 36). Este fenómeno, si bien es difícil cuantificar y definir su impacto, podría significar la aparición de vórtices de herradura de menor tamaño en la base de esta última estructura. Tal y como se ha explicado anteriormente, el tamaño de los vórtices es directamente proporcional a la pérdida de energía del fluido, por lo que, si se observa únicamente la velocidad, ésta es menor en el flujo del monopilote. Con todo, recordar que la energía de flujo, es decir, la componente que mide la energía de un fluido en función de la presión que tiene, y que no se estudia en el presente proyecto, también juega un papel importante.

En definitiva, aunque el estudio de la presión se escapa al alcance de este proyecto, es importante remarcar su relevancia. No obstante, analizando los resultados únicamente desde un punto de vista cinemático, se deducen remolinos de mayor tamaño en la base del monopilote.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

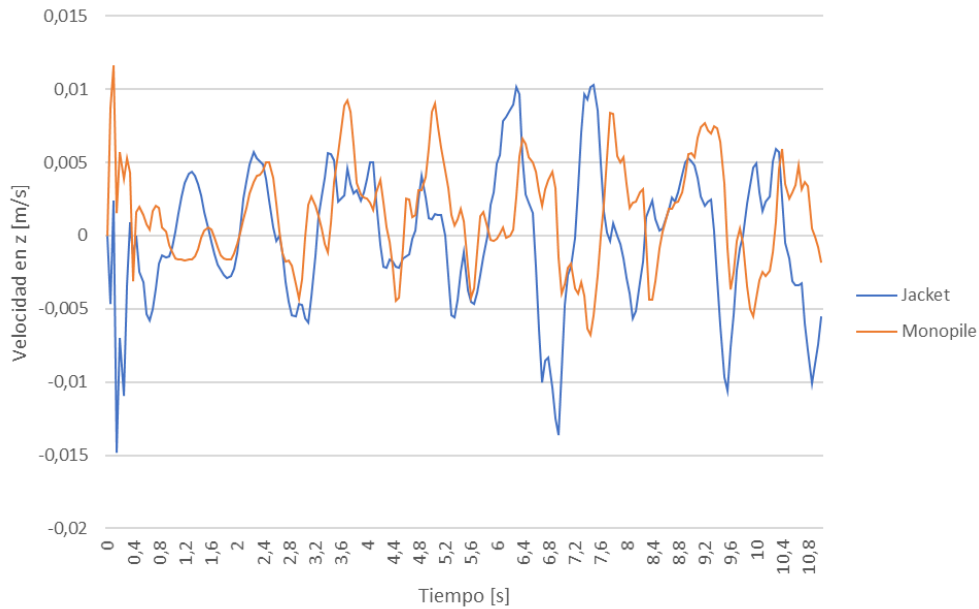
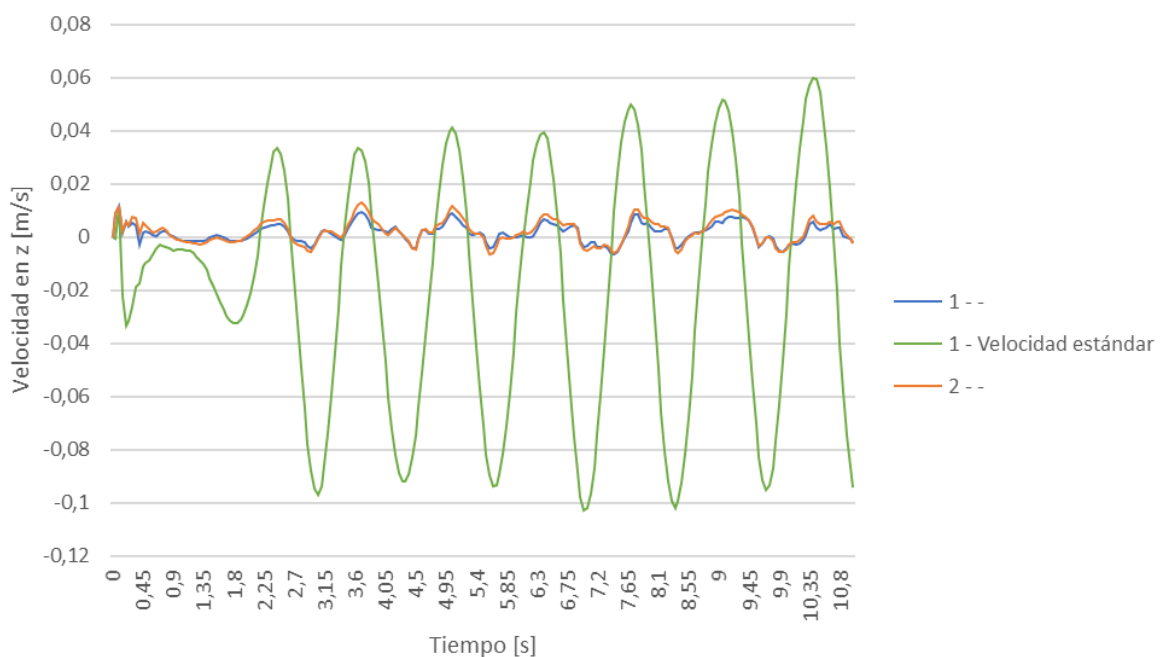


Figura 37: Campo de velocidad en z en el punto 1 del monopilote y en el 3 de la estructura jacket

Analizando los resultados obtenidos a 2,5 metros del suelo, se observan los mismos patrones de velocidad que los documentados anteriormente, pero experimentando un incremento en su amplitud. A continuación, se muestran una comparativa gráfica por estructuras.



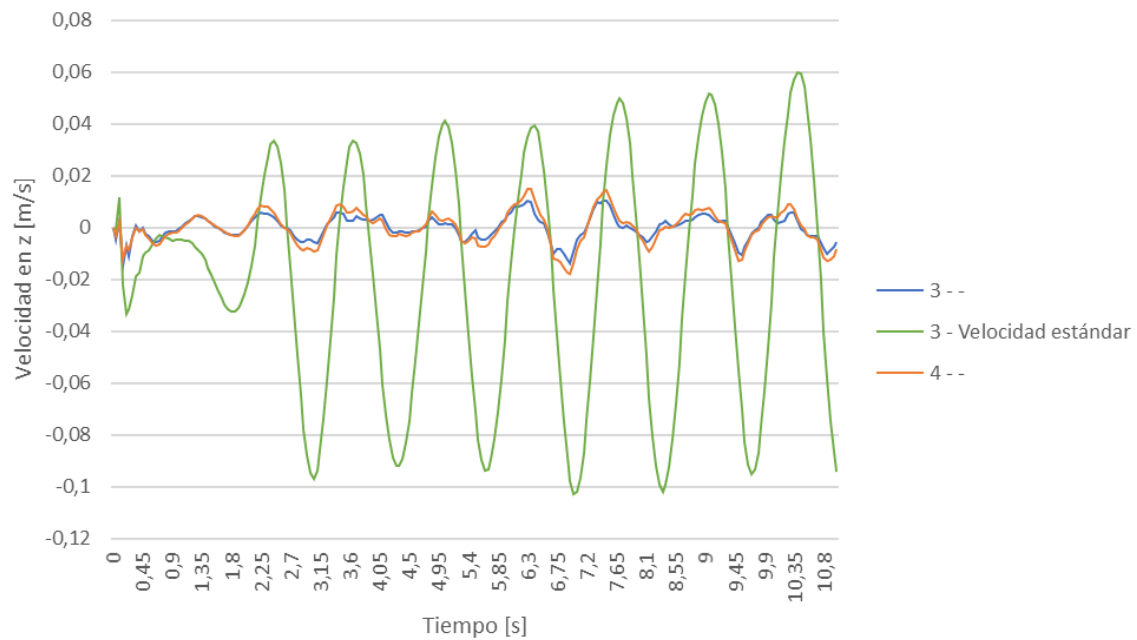


Figura 38: Arriba, comparación de velocidades en z a 1 y 2,5 metros del fondo en el monopilote para los puntos 1 y 2. Abajo, comparación de velocidades en z a 1 y 2,5 metros del fondo en la estructura jacket para los puntos 3 y 4

A medida que el flujo bordea ambas estructuras, se hubiese esperado una disminución de las perturbaciones debido a la descompresión del flujo, así como la obtención de un campo de velocidad de carácter sinusoidal. No obstante, los resultados muestran, por un lado, un aumento de las perturbaciones, y por otro, un aumento en el desfase del flujo entre estructuras. Aunque una de las posibles causas de este último fenómeno se ha explicado en el apartado 8.1, el desfase experimentado en esta ocasión es mucho más significativo que el experimentado en dirección x. Tal y como se puede observar en la Figura 39, el flujo del monopilote experimenta un desfase o retraso de aproximadamente 0,25 segundos. De este modo, se deduce que debe existir otro factor además del anteriormente nombrado que cause dicho desfase, ya que éste no es homogéneo a lo largo de las tres componentes del campo de velocidad.

Por otro lado, en los resultados obtenidos en el punto 9 se observa otro comportamiento remarcable en el flujo del monopilote (ver Figura 39). En esta zona el flujo se caracteriza por tener una descompensación de amplitudes, ya que la componente positiva supera de forma clara en términos de magnitud a la componente negativa del campo de velocidad. Este fenómeno indica una tendencia ascendente del flujo, la cual se ha podido corroborar al observar la simulación en Paraview.

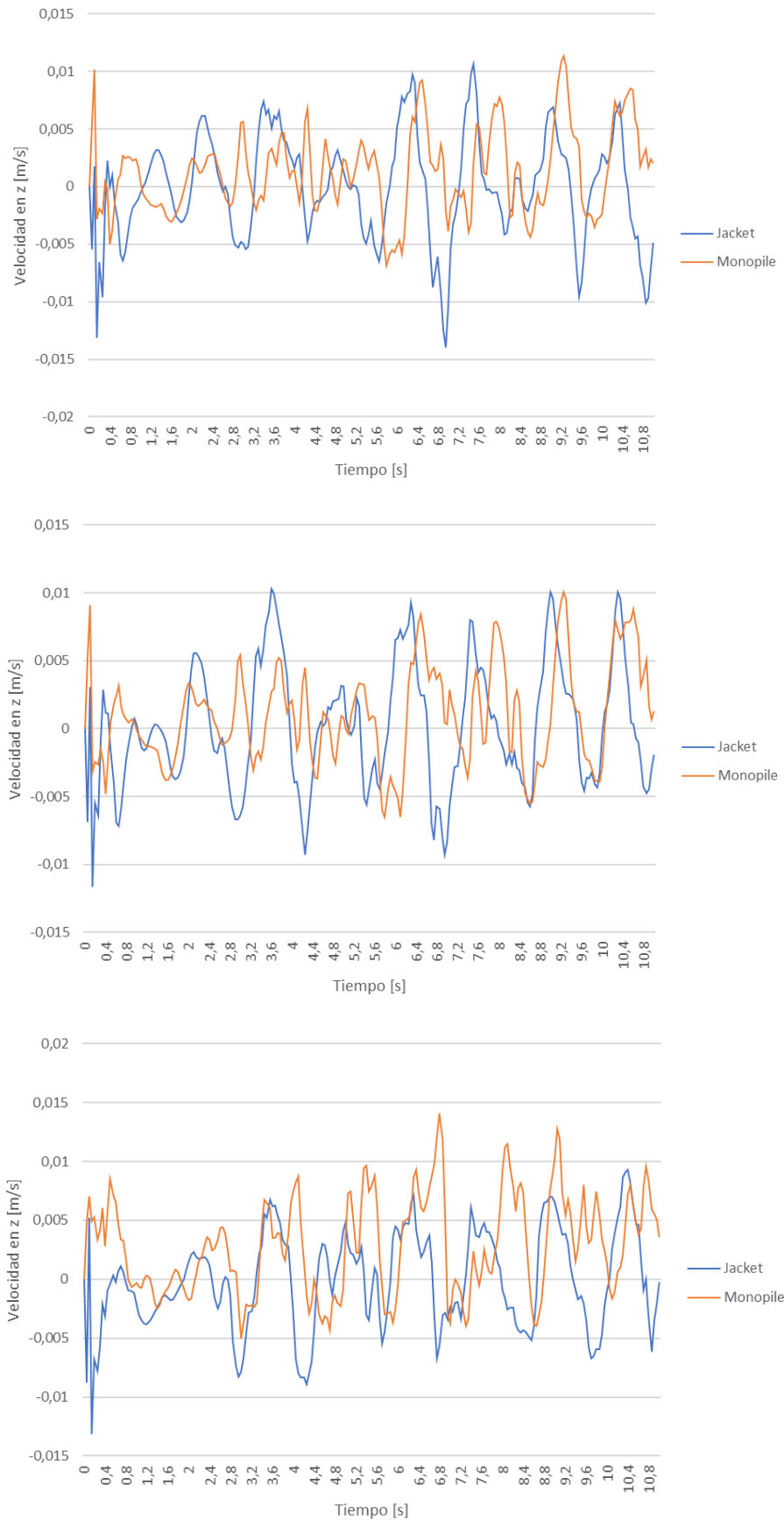


Figura 39: Arriba, campo de velocidades en z en el punto 5 de ambas estructuras. En el centro, campo de velocidades en z en el punto 7 de ambas estructuras. Abajo, campo de velocidades en z en el punto 9 de ambas estructuras

8.3. Estudio en el eje y

En este apartado se discuten los resultados obtenidos tras analizar el campo de velocidades en y. Remarcar que, de las tres componentes, ésta es la que menor influencia presenta en los vórtices de herradura, si bien es cierto que sus efectos no son negligibles y pueden seguir ocasionando socavación.

Analizando la zona central de las estructuras, se observa que, para ambos niveles de profundidad, el flujo que atraviesa la estructura *jacket* y el que choca frontalmente con la estructura monopilote presentan niveles similares de perturbación. Además, se observa un ligero desfase, parecido al mostrado anteriormente en la componente z, pero en esta ocasión dicho fenómeno desaparece conforme avanza la simulación (ver Figura 40). Por otro lado, destacar que los picos de velocidad son menores en magnitud a los obtenidos en la componente x y, en el caso de la estructura *jacket*, también inferiores comparados con los resultados obtenidos en z. Con todo, se deduce que el efecto global en el fenómeno de la socavación que puede traer consigo la componente y debido a esfuerzos cortantes es inferior al efecto del vórtice de herradura, creado conjuntamente por las componentes x y z.

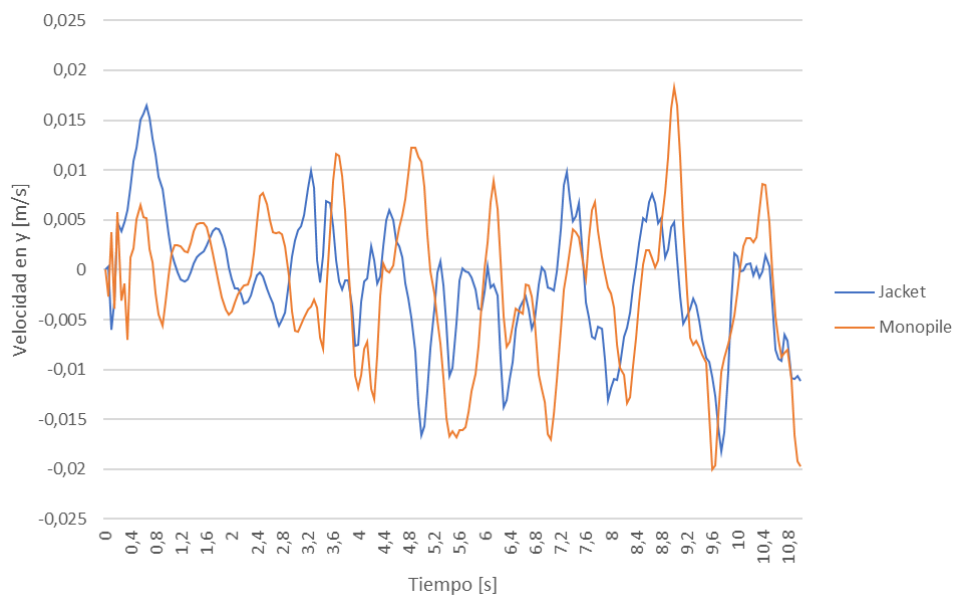


Figura 40: Campo de velocidades en y en ambas estructuras en el punto 1

No obstante, un comportamiento remarcable del flujo se observa tras analizar el punto 3 en la estructura *jacket*. En la Figura 41, se puede observar cómo, al contrario que el flujo que choca contra el monopilote, el que choca contra las patas de la estructura *jacket* apenas sufre perturbaciones y su magnitud es considerablemente mayor. Estos dos efectos combinados podrían, aunque todavía en menor medida que el vórtice de herradura, ocasionar erosión en el suelo marino en dirección transversal si dicho comportamiento se mantiene a escasos centímetros del fondo. Recordar que la máxima profundidad que se ha podido analizar es 1 metro del lecho marino.

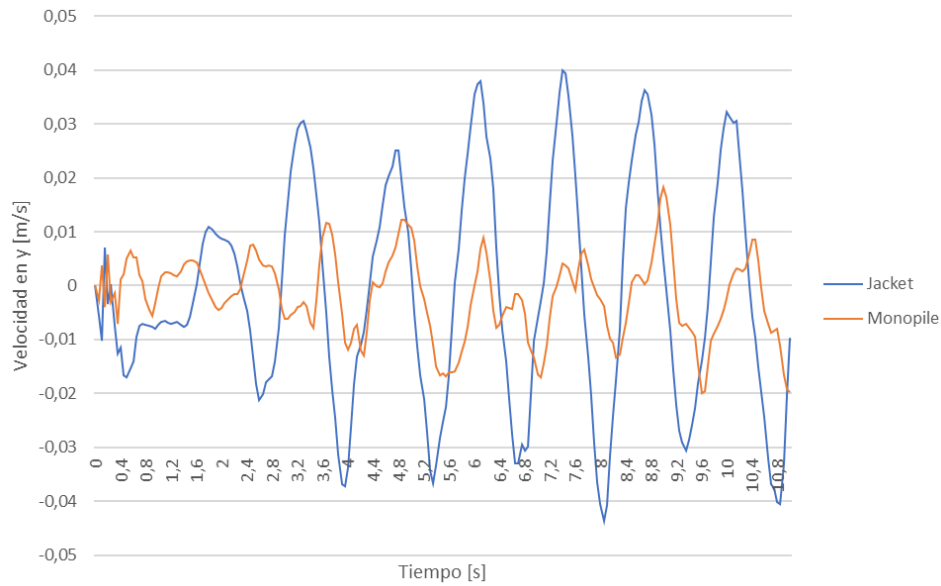


Figura 41: Campo de velocidad en y en el punto 1 del monopilote y en el 3 de la estructura jacket

Recaltar que a medida que se analizan los puntos más exteriores de las estructuras (puntos 5 a 10), las perturbaciones cesan en ambas estructuras y se observa un campo de velocidad de carácter puramente sinusoidal. Este fenómeno se explica debido a la menor densidad de partículas en estas zonas en comparación a los puntos 1 a 4.

Finalmente, se observa una desaceleración del campo de velocidad conforme el flujo rodea las patas de la estructura *jacket* (ver Figura 43). Esta pérdida de energía cinética, si no se traduce en un aumento de presión, escenifica la aparición de mayores remolinos alrededor de las patas de esta estructura.

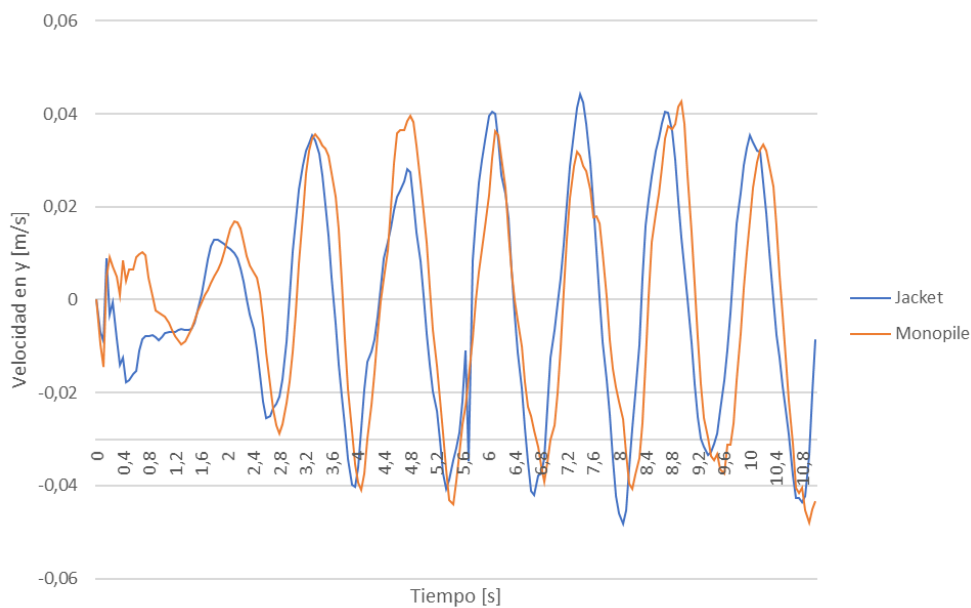


Figura 42: Campo de velocidad en y en el punto 5 en ambas estructuras

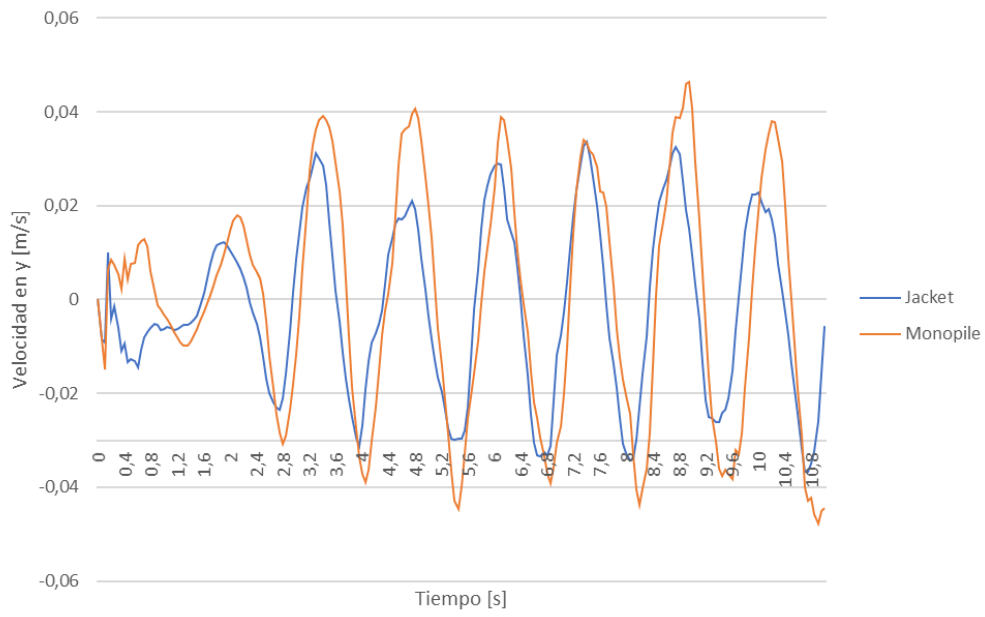


Figura 43: Campo de velocidad en y en el punto 7 en ambas estructuras

9. Impacto ambiental del proyecto

Este proyecto pretende ser de ayuda a la industria eólica marina con tal de fomentar su inversión, mejorando así su crecimiento y eficiencia. A través de miles de proyectos de características similares, los parques eólicos offshore podrán coger fuerza y aumentar su ritmo de instalación caminando así hacia una economía limpia y con cero emisiones.

En cuanto a la construcción de parques eólicos marinos, aún existen ciertas lagunas respecto a la evaluación del impacto ambiental que dichas construcciones conllevan. El principal problema sigue siendo la falta de datos que permitan analizar y comparar emplazamientos similares para así poder extrapolar posibles impactos. Entre los aspectos a considerar destacan la migración de aves, peces y mamíferos marinos, así como el impacto en el propio hábitat de sus especies locales, tanto de la fauna como de la flora. Del mismo modo, el ruido generado durante su construcción es motivo de preocupación. Hay indicios que indican que dicha contaminación acústica puede dañar, causando daños temporales o pérdida de audición permanente, o incluso provocar la muerte a peces y mamíferos marinos [43].

Otro motivo de preocupación es el posible daño ocasionado a las comunidades bentónicas, es decir, a aquellos organismos que viven en relación al lecho marino. Si este es el caso del emplazamiento elegido, las poblaciones de peces pueden sufrir pérdidas a nivel de alimentos que lleven a cambios de densidad de población.

Por otro lado, se han encontrado factores positivos en el ecosistema marino de diversos emplazamientos directamente relacionados con la construcción de un parque eólico. El más significativo es el aumento progresivo de la biodiversidad, tanto en número como en especies. Este fenómeno es causado por las propias estructuras, que en ocasiones acaban funcionando como arrecifes. De este modo, para especies que se encuentren en riesgo de peligro de extinción, este aumento de la diversidad puede suponer una mejora significativa.

Otro aspecto positivo a considerar es aprovechar la sinergia de distintas actividades. En algunos países, como Noruega, se está estudiando fusionar la energía eólica marino con la acuicultura. En otros, existen proyectos ya consolidados como el nombrado *Tuuletraal* o el *Eesti Energia*, ubicados en el golfo de Riga, donde se buscará aprovechar la construcción de parques eólicos *offshore* para el cultivo de mejillones [44]. De este modo el sector de la acuicultura vería mejoradas sus principales dificultades, como las vulnerabilidades costeras, la competencia por el espacio y el acceso a aguas de calidad oceánica mayor. Además, el aumento de la biodiversidad comentado anteriormente favorece al desarrollo de la misma. Con todo, recalcar que la mayoría de los emplazamientos de alta densidad energética no son compatibles con las instalaciones de acuicultura actuales [43].

No obstante, a pesar de los costes ambientales mencionados anteriormente, la reducción de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero que implica generar energía por medios renovables como la eólica *offshore* es extremadamente elevada, decantando sin ningún tipo de duda la balanza a favor de dichas energías. A continuación, se muestra una comparativa de las emisiones de CO₂ por MWh consumido en puntos de consumo de baja tensión (BT) en España,

durante el 4º trimestre del año 2013. Remarcar que los datos presentados escenifican las emisiones durante la operación de las respectivas tecnologías.

TOTAL NACIONAL [Boletín Trimestral 4º Trimestre año 2013]	Producción Bruta	Producción Neta	En punto de consumo BT	tCO ₂ emitido por MWh _e consumido en punto de BT
	GWh/año	GWh/año	GWh/año	tCO ₂ /MWh
Carbón	40.377	38.909	33.536	1,104
Petróleo (Fuel-oil / Gas-oil)	13.853	13.349	11.506	0,724
Gas Natural	52.289	56.170	48.413	0,485
Nuclear	56.731	54.669	47.119	0,000
Hidroeléctrica	41.071	39.578	34.112	0,000
Otros (Biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	74.935	72.211	62.238	0,000

Tabla 3: Valores de producción de energía bruta, neta y en punto de baja tensión por energía, así como sus respectivas emisiones de CO₂/MWh durante su operación [45]

De este modo, se observa que las únicas emisiones de gases de efecto invernadero de la energía eólica *offshore* pueden provenir de su construcción, transporte y consecuente disposición una vez ha llegado al final de su vida útil. En la siguiente tabla, se muestra una comparación con la media de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de distintas fuentes de energía. Dicho estudio fue llevado a cabo por la *World Nuclear Association* (WNA) a partir de una exhausta recolección de datos de diversos estudios por fuente de energía [46].

La fluctuación entre los valores por fuente de energía (ver Tabla 4) se debe, en primer lugar, a la diferencia de alcance de cada uno de los estudios recogidos y analizados por la WNA, donde algunos estudios consideran en sus cálculos la gestión de residuos, mientras que otros no. Por otro lado, la evolución de la tecnología en los últimos años favorece a la reducción de las emisiones, por lo que la fecha del trabajo analizado también cobra relevancia, presentando mayores emisiones aquellos realizados años atrás. Con todo, debido al elevado número de estudios analizados por fuente favorece a que se pueda realizar un análisis verídico.

Tecnología	Media	Mínimo	Máximo
	Toneladas de CO ₂ /GWh		
Lignito	1.054	790	1.372
Carbón	888	756	1.310
Petróleo	733	547	935
Gas Natural	499	362	891
Fotovoltaica	85	13	731
Biomasa	45	10	101
Nuclear	29	2	130
Hidroeléctrica	26	2	237
Eólica	26	6	124

Tabla 4: Valor de las emisiones de gases de efecto invernadero por GWh generado durante el ciclo de vida de distintas energías [46]

Tal y como se puede observar a partir de las dos tablas anteriores, la energía eólica tanto *onshore* como *offshore* son opciones muy beneficiosas para la salud del medio ambiente y, en definitiva, para la nuestra. Además, diversos estudios afirman que los parques eólicos pueden servir como protección costera, al ayudar a romper grandes olas y, por ende, disminuyendo así la erosión generada por su impacto contra la costa [47].

10. Gastos del proyecto

Este apartado contiene el presupuesto estimado del proyecto. Es importante destacar que este estudio económico es simplemente una aproximación del coste que hubiese significado de haber sido un encargo profesional.

Este trabajo se inició el 1 de marzo de 2021 y se finalizó el 23 de septiembre de 2021. Por lo tanto, aplicando un redondeo al alza, se dedicaron 7 meses al proyecto. Además, en cuanto al salario del ingeniero, se computará un total de 300 horas de trabajo, lo que equivale a 12 ECTS.

Gastos	Precio/Unidad	Unidades	Gastos Totales
Salario	25 €/hora	300 horas	7.500 €
Oficina	800 €/mes	7 meses	5.600 €
Ordenador	1.000 €/unidad	1 unidad	1.000 €
Licencia SolidWorks Standard	336 €/mes	1 mes	336 €
Total			14.436 €

Tabla 5: Gastos del proyecto

Analizando el crecimiento del sector, tanto a nivel económico como técnico, y teniendo en cuenta la elevada utilidad de los datos mostrados en el presente proyecto, se consideran adecuados los costes presentados en la Tabla 3. Cabe tener en cuenta que, tal y como se menciona en el apartado 12, este trabajo puede ser utilizado como base de una infinidad de nuevos proyectos de carácter más específico y técnico, por lo que dicho trabajo presenta una elevada versatilidad para el sector de la energía eólica *offshore*.

11. Conclusiones

En resumen, tras estudiar el campo de velocidades del flujo marino alrededor de las bases de ambas estructuras y analizarlos desde una perspectiva cinemática, se deduce la presencia de mayores vórtices de herradura en la base del monopilote. Este fenómeno se explica, entre otros factores, por la desaceleración que experimenta el flujo tanto en dirección x como en z , el cual ha sido mayor para el monopilote que para la estructura *jacket*. Tal y como se ha mencionado anteriormente, estos gradientes de velocidad se transforman en gradientes de presión que empujan el fluido hacia abajo, haciéndolo impactar contra el suelo y causando el consecuente vórtice. Estos resultados concuerdan con los mencionados en el estudio presentado por M. Welzel et al. [4], donde se concluye un avance mayor de la socavación en la base del monopilote. No obstante, destacar que, para los mismos puntos de la zona central, se deduce un mayor efecto de esfuerzos cortantes en dirección y y en las patas de la estructura *jacket*.

Otro factor a tener en cuenta es la diferencia de acumulación de partículas de agua en las zonas centrales de los pilares. En el caso del monopilote, donde la densidad de partículas es mucho mayor, se observa una mayor aceleración de éstas en los instantes iniciales de desalojo de la zona central. Este fenómeno puede ocasionar un mayor arrastre de partículas debido a un esfuerzo cortante superior. En los puntos más periféricos de la estructura, los resultados obtenidos muestran que se pueden esperar comportamientos casi idénticos del flujo marino en ambas estructuras. Por último, remarcar que no se han observado diferencias notables entre las dos profundidades analizadas, hecho que era de esperar al estar ambas ubicadas fuera de la capa límite.

Finalmente, cabe tener en mente que dicho proyecto no pretendía emplear diferentes tipologías de estructura *jacket* en el estudio. Este factor, tal y como se muestra en el trabajo presentado por Rudolp et al. (2004) [31], tiene grandes implicaciones en los resultados obtenidos. En el mencionado trabajo, donde la separación entre postes es menor y por lo tanto la contracción del flujo aumenta, la socavación obtenida fue de 3 a 4 veces superior a la comparable con una estructura monopilote equivalente.

12. Futuros Proyectos

Este proyecto, debido a que podría considerarse una fase *alpha* de uno mucho mayor, llevado a cabo con el principal objetivo de realizar un primer análisis de las implicaciones que conlleva la elección de la estructura en el fenómeno de la socavación, puede encauzarse o profundizarse en múltiples direcciones. Por lo tanto, una vez realizado este proyecto inicial, se cree oportuno proceder con un segundo estudio más profundo, principalmente teniendo en mente acortar la distancia entre partículas y por lo tanto aumentar la resolución de las simulaciones. Para ello, se sugiere disponer de un ordenador con una tarjeta gráfica potente y compatible con DualSPHysics. De este modo, se buscaría poder visualizar en Paraview los distintos vórtices, entre los que destaca el de herradura, y obtener valores numéricos del campo de velocidades a escasos centímetros del fondo. Además, con la ayuda de DualSPHysics, se pueden realizar todo tipo de comparaciones entre estructuras, destacando la obtención de las fuerzas recibidas y los desplazamientos lineales experimentados, así como el cálculo de la presión en determinados puntos del sistema. También se puede realizar un análisis dinámico con *Solidworks*, ya que dicho programa permite integrar las cargas del oleaje en el diseño de la estructura.

Por otro lado, se puede desarrollar un estudio similar al realizado, pero con el objetivo de cuantificar el impacto de la distancia entre las patas de la estructura *jacket*. Tal y como se menciona en el apartado anterior, existen variables geométricas con una gran influencia en el campo de velocidades y en el fenómeno de la socavación, por lo que su estudio no debe ser menospreciado.

Finalmente, este proyecto puede evolucionar con la integración de distintas topologías de suelo marino, abarcando de este modo todo tipo de escenarios y situaciones. Con esta aportación, se gana en variabilidad y también en riqueza de resultados, por lo que se considera una última dirección acertada en la que encauzar el proyecto presente.

Bibliografía

- [1] “Descubra SOLIDWORKS® - SOLIDWORKS®.”
https://discover.solidworks.com/es/solidworks-products-v2?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=202001_glo_ps_sea_es_XOP6872_labl_brand_ewe_es_exact&mktid=&gclid=Cj0KCCQjwvaeJBhCvARIsABgTDM7byZfVSAALIBve8aKZ8HdUuKGGkRALRuZs9tnZ4-Oa4yxcZmZMcw4aAuTYEALw_wcB
(accessed Aug. 28, 2021).
- [2] A. J. C. Crespo *et al.*, “DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH),” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 187, pp. 204–216, 2015, doi: 10.1016/j.cpc.2014.10.004.
- [3] “ParaView.” <https://www.paraview.org/> (accessed Aug. 28, 2021).
- [4] M. Welzel, A. Schendel, A. Hildebrandt, and T. Schlurmann, “Scour development around a jacket structure in combined waves and current conditions compared to monopile foundations,” *Coast. Eng.*, vol. 152, no. March, p. 103515, 2019, doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103515.
- [5] C. Clouser and M. Ewert, “The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy – Review and case study,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 3683–3693, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.095.
- [6] “What are the most used renewable energy sources in the world?”
<https://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-most-used-renewable-power-sources-4160168/> (accessed Jun. 06, 2021).
- [7] “Eólica Onshore – Greenalia,” *Greenalia*. <https://www.greenalia.es/lineas-de-negocio/eolica-onshore/> (accessed Jun. 06, 2021).
- [8] “Rugosidad y cizallamiento del viento,” *Danish Wind Industry Association*.
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/wres/shear.htm> (accessed Jun. 06, 2021).
- [9] BVG, “Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics,” *Trends Stat.*, p. 32, 2019.
- [10] WindEurope, “Offshore wind in Europe - Key trends and statistics 2020,” *WindEurope*, vol. 3, no. 2, pp. 14–17, 2021.
- [11] “Green Deal: El camino para una Europa neutra climáticamente. | España.”
https://ec.europa.eu/spain/news/20191212_Europe-climate-neutral-2050_es
(accessed Jun. 06, 2021).
- [12] Prontubeam, “DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES,” *Prontubeam*.
- [13] “Offshore support structures.” <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html> (accessed Jun. 06, 2021).
- [14] V. Negro, J. S. López-Gutiérrez, M. D. Esteban, P. Alberdi, M. Imaz, and J. M. Serraclará, “Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions,” *Ocean Eng.*, vol. 133, pp. 253–261, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.011.
- [15] “Design limitations for large monopiles | TNO.” <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/renewable-electricity/wind-energy/support-structure-wind-turbine/design-large-monopiles/> (accessed Jun. 06, 2021).
- [16] “Estructuras offshore sometidas a la acción del oleaje,” pp. 9–25, 1991, [Online]. Available:

- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4791/fichero/2.Estructuras+Offshore.pdf>.
- [17] L. Bernieri, "Diseño Y Cálculo Del Soporte De Un Aerogenerador Marino Del Tipo Jacket," pp. 1–184, 2017, [Online]. Available: upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/107566/129834_TFG-FINAL.pdf.
- [18] Owectower, "OWEC Tower - Power Technology | Energy News and Market Analysis." <https://www.power-technology.com/contractors/renewable/owec-tower/> (accessed Sep. 20, 2021).
- [19] L. B. Kossmann, "DISEÑO Y CÁLCULO DEL SOPORTE DE UN AEROGENERADOR MARINO DEL TIPO JACKET," 2017.
- [20] Wind Energy Technologies Office, "Demonstration Projects Feature Innovative Offshore Wind Technologies | Department of Energy." <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/demonstration-projects-feature-innovative-offshore-wind-technologies> (accessed Sep. 20, 2021).
- [21] A. C. Bermejo, A. S. Grado, and T. Mar, "Curso 2014-2015 SISTEMAS DE ANCLAJE" 2015.
- [22] IRENA, *Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. 2019.
- [23] M. Georesources, M. Arshad, and B. C. O. Kelly, "Offshore wind-turbine structures : a review," no. December 2018, 2015.
- [24] Y. C. Shieh, R. P. Ma, W. Hsu, Y. H. Lin, and Y. H. Tang, "Offshore Hydrodynamics," *Delft Univ.*, no. January, 2001, doi: 10.1109/ICSENS.2012.6411159.
- [25] C. Matutano, V. Negro, J. S. López-Gutiérrez, and M. D. Esteban, "Scour prediction and scour protections in offshore wind farms," *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 358–365, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.01.048.
- [26] P. Ruano *et al.*, "Local Scour around a Monopile Foundation for Offshore Wind Turbines and Scour Effects on Structural Responses," *Intech*, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- [27] M. Fernández, "Estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puente a largo plazo," no. 2002, pp. 4–25, 2004, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2099.1/3343>.
- [28] "Número de Keulegan-Carpenter - es.LinkFang.org." https://es.linkfang.org/wiki/Número_de_Keulegan-Carpenter (accessed Jun. 07, 2021).
- [29] C. Matutano, V. Negro, J. S. López-Gutiérrez, and M. D. Esteban, "Scour prediction and scour protections in offshore wind farms," *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 358–365, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.01.048.
- [30] A. Schendel, A. Hildebrandt, N. Goseberg, and T. Schlurmann, "Processes and evolution of scour around a monopile induced by tidal currents," *Coast. Eng.*, vol. 139, no. May, pp. 65–84, 2018, doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.05.004.
- [31] D. Rudolph, K. J. Bos, A. P. Luijendijk, K. Rietema, and J. M. M. Out, "Scour Around Offshore Structures, Analysis of Field Measurements," *Proc 2nd Int Conf Scour Eros.*, no. 1981, pp. 400–407., 2004, [Online]. Available: https://izw.baw.de/publikationen/tc213/0/CAS_21.pdf.
- [32] R. A. G. and J. J. Monaghan, "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars," p. 15, 1977.

- [33] C. A. J. Carballo, "Mecánica de fluidos: Dinámica de fluidos."
- [34] "DualSPHysics :: GPU Computing." <https://dual.sphysics.org/old-site/index.php/gpu/> (accessed Aug. 28, 2021).
- [35] J. P. Zachariah, J. P. Sahoo, and S. Ghosh, *Influence of length to diameter ratio on strength parameters of offshore monopiles*, vol. 31, no. January. Springer Singapore, 2019.
- [36] L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald, and S. J. Hogan, "Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 92, no. November 2015, pp. 126–152, 2017, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.09.024.
- [37] B. Frias and J. Maciá, "Análisis Estructural de una Plataforma Jacket con aplicación al Caribe Colombiano," 2015.
- [38] R. Q. Reina, "Diseño de una estructura Jacket multipilotada para soporte de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria," 2019.
- [39] "blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software." <https://www.blender.org/> (accessed Aug. 28, 2021).
- [40] C. Serrano Morán, "Diseño de una estructura flotante para un aerogenerador offshore," 2015, [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23441>.
- [41] C. Altomare, "DualSPHysics in Coastal Engineering [?] DualSPHysics in coastal protection," no. December, pp. 6–7, 2016.
- [42] "Notepad++." <https://notepad-plus-plus.org/> (accessed Sep. 07, 2021).
- [43] E. Draget, "Environmental Impacts of Offshore Wind Power Production in the North Sea," *WWF- Norw.*, p. 48, 2014.
- [44] I. C.B., "Las eólicas marinas ya son rentables en Europa. Estos parques tienen la potencialidad de ser usados para acuicultura." <https://www.mispecies.com/noticias/Las-eolicas-marinas-ya-son-rentables-en-Europa.-Estos-parques-tienen-la-potencialidad-de-ser-usados-para-acuicultura/#.YTTZ5J0zZPY> (accessed Sep. 05, 2021).
- [45] E. y T. Ministerio de Industria, "Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España," *Doc. Reconocido del Reglam. Instal. Térmicas en los Edif.*, pp. 16, 17, 18, 2016, [Online]. Available: http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros documentos/Factores_emision_CO2.pdf.
- [46] W. N. A. Report, "Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources," *World Nucl. Assoc.*, p. 10, 2011.
- [47] C. Rodríguez-Delgado, R. J. Bergillos, M. Ortega-Sánchez, and G. Iglesias, "Wave farm effects on the coast: The alongshore position," *Sci. Total Environ.*, vol. 640–641, pp. 1176–1186, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.281.