

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelización de captadores flotantes de energía de las olas



Iván García Valiño
Grado en Ciencias Ambientales
Junio 2018

Tutores: Alejandro J. Cabrera Crespo y Corrado Altomare
Departamento de Física Aplicada

Facultade de Ciencias

Universidade de Vigo

Facultade de Ciencias

Universidade de Vigo

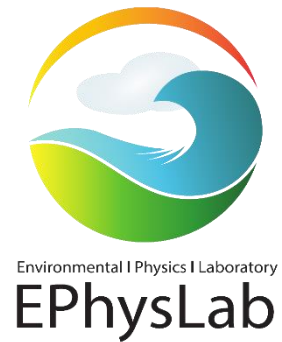
Modelización de captadores flotantes de energía de las olas

**Trabajo Fin de Grado de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias de Ourense**

Iván García Valiño

Junio 2018

*La figura de la portada pertenece a la web de OCEAN ENERGY,
<http://www.oceanenergy.ie/gallery>.*



Dr. Alejandro Jacobo Cabrera Crespo, investigador del programa “Ramón y Cajal” del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y **Dr. Corrado Altomare**, investigador del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Gante (Bélgica).

INFORMAN:

Que el trabajo titulado " **Modelización de captadores flotantes de energía de las olas**" presentado por **D. Iván García Valiño, con D.N.I.: 76736251 V**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como **Trabajo Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 5 de junio de 2018.

Alejandro Jacobo Cabrera Crespo

Corrado Altomare

*“La Tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las
necesidades de cada hombre, pero no la codicia de cada hombre”*

Mahatma Gandhi.

Índice

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2: ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	7
2.1 El cambio climático y las energías renovables.....	9
2.2 Energía marina.....	12
2.3 Energía undimotriz.....	13
2.4 <i>Oscillating Water Column (OWC)</i>	16
2.5 Impactos ambientales de los OWC.....	19
Capítulo 3: MODELO NUMÉRICO DUALSPHYSICS.....	21
3.1 Modelado numérico.....	23
3.2 Método SPH.....	24
3.3 Código DualSPHysics.....	27
3.4 Condiciones iniciales y de contorno.....	30
3.5 Acoplamiento con la librería MoorDyn.....	33
Capítulo 4: VALIDACIÓN.....	35
4.1 Experimento de OWC fijo en Cantabria.....	37
4.2 Experimento de caja flotante en Gante.....	40
4.2.1 <i>Propagación del oleaje</i>	40
4.2.2 <i>Caja sólida flotante con y sin amarres</i>	43
4.2.3 <i>Caja sólida flotante con amarres (3D)</i>	47

Capítulo 5: APLICACIÓN.....	53
Capítulo 6: CONCLUSIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	65

Capítulo 1:

INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la colaboración con el grupo de investigación EPHYSLAB, de la Facultad de Ciencias de Ourense, perteneciente al departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo.

El objetivo general de este trabajo es utilizar el modelado numérico para diseñar un dispositivo de aprovechamiento de la energía de las olas, en concreto un generador de tipo OWC flotante y amarrado al fondo.

Motivación

El modelado numérico es muy útil a la hora de simular experimentos en los campos de la ciencia y la ingeniería. El conocimiento de este tipo de herramientas permite avanzar más deprisa y a bajos costes en una gran variedad de investigaciones.

Una de las líneas de investigación del grupo EPHYSLAB es la dinámica computacional de fluidos. En concreto, se ha desarrollado el código DualSPHysics que se aplica en el campo de las Energías Renovables, concretamente en diseñar numéricamente captadores de la energía proveniente de las olas, conocida como energía undimotriz.

Objetivos

Podrían diferenciarse dos objetivos principales en este trabajo. Por un lado, se intenta demostrar la capacidad del modelo numérico DualSPHysics para simular la propagación de olas y su interacción con estructuras flotantes y amarradas al fondo, y así comprobar su validez en el estudio de la tecnología undimotriz. Una vez alcanzado este propósito el estudio se centra en la simulación de dispositivos de columna de agua oscilante (OWC). La dinámica de las olas y el movimiento dentro de la cámara nos permite conocer la eficiencia de estos aparatos. Una nueva funcionalidad de DualSPHysics para simular los amarres también permite estudiar la supervivencia de los dispositivos flotantes en estados de mar muy energéticos.

Planificación de las tareas

El trabajo de investigación durante el periodo de colaboración se ha basado en el aprendizaje del software DualSPHysics, así como su validación y su uso para diseñar y analizar dispositivos de energía undimotriz de tipo OWC flotante.

Tarea 0. Aprendizaje y manejo de la herramienta:

Inicialmente nos hemos centrado en el aprendizaje de la física relativa a la dinámica de fluidos descrita en el código DualSPHysics y, sobre todo, en el manejo de las diferentes herramientas de pre-procesado y post-procesado necesarias para crear los casos y analizar los resultados.

Tarea 1. Calibrado de los diferentes parámetros libres del modelo:

Se ha prestado especial atención a la resolución del modelo para propagar olas correctamente, a los parámetros para definir los objetos flotantes y a los parámetros que definen los amarres. Las simulaciones realizadas durante esta fase fueron sencillas incluyendo experimentos con OWC fijo (en 2D) y tests con una caja flotante con amarres (en 2D y 3D). En este tiempo se llevaron a cabo los casos de validación del código comparando los datos numéricos con experimentales.

Tarea 2. Aplicación en el diseño de OWC flotante

Dentro de esta fase se diseñó un OWC con una estructura flotante a la que se enganchan los amarres. Se calculó la elevación de la superficie del agua dentro de la cámara para estudiar su eficiencia y se calcularon los movimientos del aparato y la tensión en los amarres para analizar su supervivencia. Todo este análisis se realizó para diferentes condiciones de ola.

Tarea 3: Divulgación

3.1. Escritura de todo el trabajo desarrollado en estos meses, así como la recolección de información para la revisión bibliográfica sobre energía undimotriz.

3.2 Preparación de la exposición ante el tribunal.

3.3 Preparación de un artículo para la revista “Avances en Ciencias de la Tierra” (ACT)

Organización de este documento

Este trabajo se divide en seis capítulos:

- Primero se procede a introducir el tema del proyecto, así como la motivación y los objetivos que se han llevado a cabo durante los meses de trabajo (Capítulo 1).
- A continuación, se expone una revisión bibliográfica sobre la energía del mar, centrándose en la proveniente de las olas y en los aparatos de tipo OWC (Capítulo 2).
- El siguiente capítulo explica las ventajas del modelado numérico, introduce el método SPH y el código DualSPHysics (Capítulo 3).
- Después, se presentan varios casos de validación llevados a cabo para comprobar la eficiencia y eficacia del código para determinar su validez para el caso de aplicación. Para validar el modelo, se comparan datos experimentales con resultados obtenidos con DualSPHysics (Capítulo 4).
- En el siguiente capítulo se muestran los resultados del caso de aplicación, en donde se simula un dispositivo flotante con amarres (Capítulo 5).
- Por último, se presentan las conclusiones alcanzadas a partir de este trabajo y las diferentes líneas que quedan abiertas para posibles investigaciones futuras (Capítulo 6).

Capítulo 2:

ENERGÍA UNDIMOTRIZ

2.1 El cambio climático y las energías renovables

La demanda de energía debida al desarrollo social y económico va en aumento. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que genera la prestación de servicios energéticos han contribuido considerablemente al aumento de las concentraciones de esos gases en la atmósfera. La obtención de energía a partir de combustible fósiles es la principal responsable de las emisiones de carbono a la atmósfera y, por consiguiente, es la principal responsable del calentamiento global. Además, los combustibles fósiles son finitos, ya que se está produciendo un consumo muy por encima del nivel de generación de los mismos, por lo cual son necesarias alternativas para la obtención de energía. Una de estas alternativas son las energías renovables.

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales teóricamente inagotables, ya sea porque son capaces de regenerarse por medios naturales o porque tienen gran cantidad de energía. Hay una gran variedad de energías renovables (Figura 2-1), entre las que destacan:

- Energía solar. Se utiliza la energía irradiada por el Sol para producir electricidad mediante procesos fotovoltaicos o mediante la energía por concentración solar, generando energía térmica (con fines de calefacción o refrigeración, y por medios pasivos o activos) para usos de iluminación y para producir combustibles para el transporte. La energía solar es variable y, en cierta medida, impredecible.
- Energía eólica. Es la tecnología que explota la energía cinética del aire en movimiento (viento). La aplicación de mayor interés para la mitigación del cambio climático consiste en producir electricidad a partir de grandes turbinas eólicas instaladas en tierra firme, en el mar o agua dulce. La energía eólica también es, en cierta medida, variable e impredecible.
- Energía hidroeléctrica. En este caso se explota la energía del agua en su caída, principalmente para generar electricidad. Los proyectos de energía hidroeléctrica pueden consistir en presas con embalses, proyectos a lo largo de un río o en mitad de la corriente, y pueden abarcar todo tipo de escalas. Esta diversidad confiere a la energía hidroeléctrica capacidad para responder a necesidades urbanas centralizadas y en gran escala, pero también a las necesidades rurales descentralizadas. Los proyectos de energía hidroeléctrica explotan un recurso que varía a lo largo del tiempo. Sin embargo, la producción controlable generada en embalses por las centrales hidroeléctricas permite cubrir los picos de la demanda eléctrica, y ayuda a equilibrar otros sistemas de electricidad cuya producción de energía renovable es muy variable.
- Energía geotérmica. Es la tecnología que explota la energía térmica accesible del interior de la Tierra. El calor es extraído de reservorios geotérmicos mediante pozos, o por otros medios. Los reservorios se hallan suficientemente calientes y permeables en estado natural y se denominan "reservorios hidrotérmicos".

- Energía de la biomasa. Puede obtenerse mediante diversas fuentes, entre ellas; residuos forestales, agrarios o pecuarios, una rotación rápida de plantaciones forestales, cultivos energéticos, componentes orgánicos de residuos sólidos urbanos, y otras fuentes de desechos orgánicos. Mediante diversos procesos, esos materiales pueden ser utilizados para producir de forma directa electricidad o calor, o para generar combustibles gaseosos, líquidos o sólidos.
- Energía marina. Es el tipo de energía en la que se centra este trabajo. Se obtiene a partir de la energía potencial, cinética, térmica o química del agua de mar, que puede ser transformada para generar electricidad, energía térmica o agua potable. Es posible utilizar tecnologías muy diversas: muros de contención de la amplitud de la marea, turbinas submarinas para las corrientes de marea y oceánicas, intercambiadores de calor para la conversión de energía térmica oceánica, y una gran variedad de dispositivos que permiten controlar la energía del oleaje y los gradientes de salinidad. Si se exceptúan los muros de contención de la marea, las tecnologías oceánicas se encuentran en un estado inicial, muchas aún en procesos de I+D. Algunas presentan pautas de producción de energía con diferentes grados de predictibilidad (las basadas en la energía de las olas o las corrientes) mientras que otras pueden ser utilizadas en un régimen prácticamente constante, o incluso controlable (las basadas en gradiente térmico o de salinidad del océano).
- Energía del hidrógeno. Es una fuente de energía alternativa que utiliza una tecnología similar a la de fabricación de pilas. El hidrógeno es el combustible perfecto, ya que es muy abundante, el más eficiente y no produce emisiones cuando se utiliza en una pila de combustible. Se han logrado avances en el uso del hidrógeno como combustible para transporte y para generación de energía.

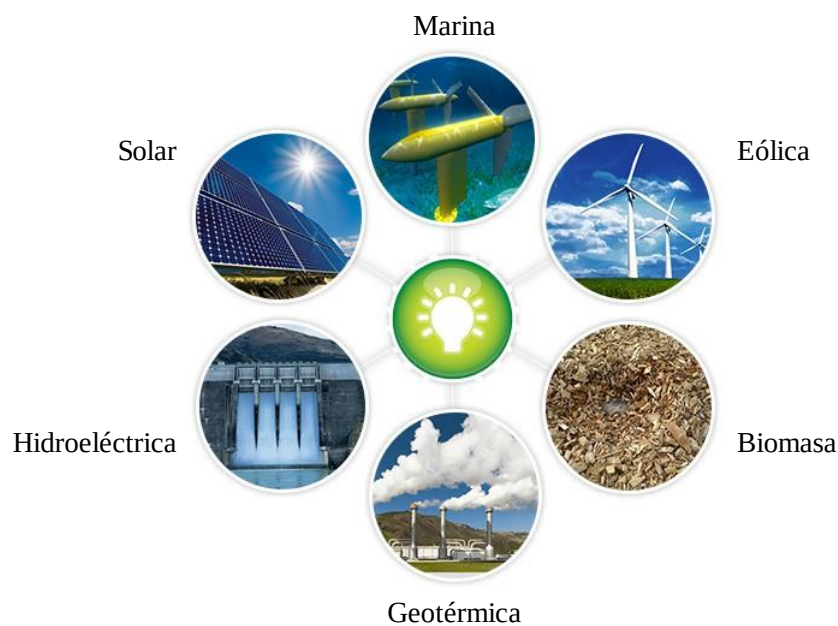


Figura 2-1: Diferentes energías renovables.

Fuente: www.myvolos.net.

El informe en relación con la cumplimentación del artículo 4.3 de la directiva 2009/28/CE, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso energía procedente de las energías renovables pone de manifiesto la gran influencia positiva que tiene para el medio ambiente el uso de las energías renovables. Se estima que la aportación de las energías renovables al consumo final bruto de energía alcanzará el 22,7% en 2020.

El cambio climático afectará, tanto en su extensión como en su distribución geográfica, al potencial técnico de las fuentes de energías renovables, aunque las investigaciones sobre la magnitud de esos posibles efectos apenas han comenzado. Dado que las fuentes de energía renovables son en muchos casos dependientes del clima, el cambio climático mundial afectará a los recursos de las energías renovables, aunque la naturaleza y magnitud exactas de esos efectos según el IPCC (2011) son inciertas. A nivel mundial, se espera que el impacto general de un cambio de la temperatura media inferior a 2° C sea relativamente pequeño para la obtención de energía mediante fuentes renovables. Sin embargo, cabe esperar diferencias regionales considerables y mayores márgenes de incertidumbre. Con respecto a la energía solar, pese a que el cambio climático influirá previsiblemente en la distribución y variabilidad de la cubierta de nubes, se espera que el efecto de estos cambios sobre el potencial técnico sea, en conjunto, pequeño. En el caso de la energía hidroeléctrica, se espera que el impacto general sea ligeramente positivo en términos del potencial técnico mundial. Sin embargo, los resultados indican también que son posibles las variaciones sustanciales entre unas y otras regiones, e incluso entre países. Las investigaciones realizadas hasta la fecha parecen indicar que no es previsible que el cambio climático afecte en gran medida al potencial técnico mundial del desarrollo de la energía eólica, aunque sí son de esperar cambios en la distribución regional de los recursos de esa forma de energía. En relación a la energía geotérmica y a la marina, no se prevé que el cambio climático afecte considerablemente al tamaño o a la distribución geográfica de sus recursos.

El coste de las tecnologías de las energías renovables ha disminuido, y los adelantos técnicos esperados podrían reducir aún más ese coste. Históricamente, el desarrollo económico estaba estrechamente relacionado con un mayor consumo de energía y un aumento de las emisiones GEI, es ahí donde radica la importancia de las energías renovables, en romper esa correlación, contribuyendo al desarrollo sostenible según recoge el IPCC (2011). Aunque la contribución de las energías renovables al desarrollo sostenible varía en cada país, las energías renovables ofrecen la oportunidad de contribuir al desarrollo social y económico, a un mayor acceso a las fuentes de energía, a un suministro de energía seguro, a la mitigación del cambio climático y a la reducción de los impactos medioambientales.

2.2 Energía marina

Los mares y océanos constituyen el mayor colector solar y el sistema de almacenamiento de energía más grande del mundo, lo que supone un enorme potencial energético que, mediante diferentes tecnologías, puede ser transformado en electricidad y contribuir a satisfacer las necesidades energéticas actuales según se indica en el PER, IDAE (2011-2020). El recurso energético existente en el mar se manifiesta de distintas formas: oleaje, corrientes marinas, mareas, gradientes térmicos y diferencias de salinidad, lo que da lugar a las diferentes tecnologías claramente diferenciadas para el aprovechamiento de la energía del mar:

- Energía de las mareas o mareomotriz.
- Energía de las corrientes.
- Energía de las olas o undimotriz.
- Energía de gradiente térmico.
- Energía de gradiente salino.

El potencial mundial estimado de producción anual de energía eléctrica procedente de las energías del mar es de próximo a los 100.000 TWh/año. La Figura 2-2 muestra el potencial productivo de cada energía marina y el tipo de tecnología que usa.

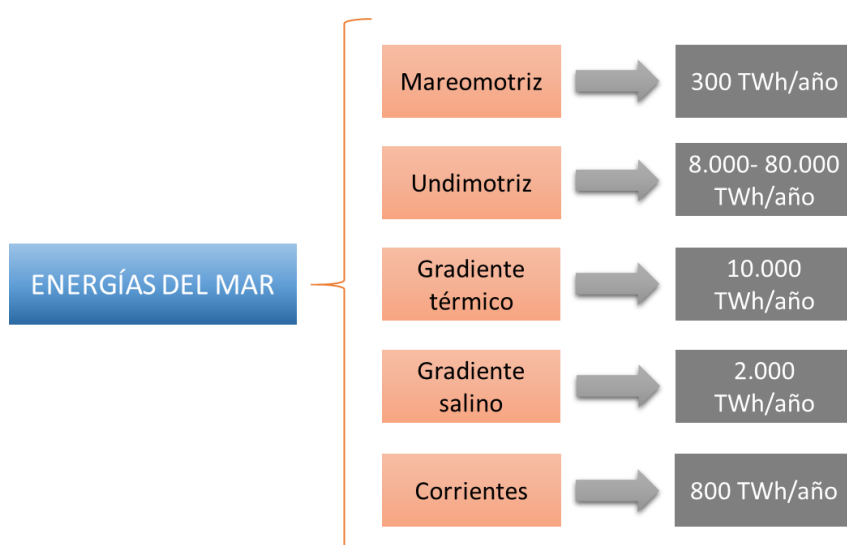


Figura 2-2: Potencial de producción anual según las distintas tipologías de aprovechamientos de energías del mar.

Fuente: PER, IDAE, 2011-2020.

El interés internacional y la actividad de desarrollo ha crecido rápidamente en los últimos años, y más de una docena de países tienen ahora políticas de apoyo específico para el sector de la energía del mar. Además, según indica el PER, IDAE (2011-2020), centros de pruebas a escala real se han establecido en el Reino Unido, España y Europa continental, y nuevos centros de pruebas están en construcción en los EE.UU. y Canadá. Además, este interés internacional y su crecimiento han conducido a la elaboración de normas internacionales específicas para las energías del mar.

2.3 Energía undimotriz.

Según se recoge en el trabajo de Falcão (2010), la posibilidad de obtener energía de las olas ha inspirado a un gran número de inventores, y más de mil patentes han sido registradas desde 1980. Yoshio Masuda se puede considerar el padre de la obtención de energía mediante olas, con sus estudios en Japón desde 1940. Masuda (1979) desarrolló una boya para la obtención de energía de las olas, equipada con una turbina de aire, objeto que posteriormente fue llamado OWC (*Oscillating Water Column* en inglés). Estas boyas fueron comercializadas en Japón a partir de 1965.

Las olas tienen el potencial de proporcionar una fuente de energía completamente sostenible, que puede ser capturada y convertida en electricidad por conversores de energía de las olas. Los principales tipos de conversores son (Figura 2-3):

- a) Atenuador. Es un dispositivo flotante que opera en paralelo a la dirección de las olas. Estos dispositivos producen energía debido al movimiento relativo de sus dos brazos cuando la ola incide sobre ellos.
- b) Punto absorbente. Es una estructura flotante que absorbe energía de todas las direcciones a través de sus movimientos cerca de la superficie del agua. Produce energía eléctrica mediante la diferencia de movimiento de su parte superior flotante en relación a su base.
- c) Conversor de oscilación de olas. Extraen energía de la fuerza de las olas y del movimiento del volumen de agua en su interior. El brazo oscila como un péndulo montado en una articulación pivotante debido a la incidencia de las olas.
- d) Columna de agua oscilante (OWC). Este tipo de conversor de energía es sobre el que se centra este trabajo. Consiste en una estructura hueca parcialmente sumergida y abierta al mar por debajo de la línea de flotación, encerrando una columna de aire sobre una columna de agua. Las olas hacen que la columna de agua suba y baje, lo que a su vez comprime y descomprime la columna de aire. Este aire fluye hacia el exterior a través de una turbina, que generalmente tiene la capacidad de girar en ambas direcciones maximizando su rendimiento.
- e) Dispositivo de rebase: Son aparatos que cuentan con un depósito, el cual se llena cuando una ola rebasa por encima de la cota de coronación de la misma estructura. Entonces esa agua está dirigida hacia un agujero y pasa a través de unas turbinas generando energía eléctrica debido a la energía cinética. Actúa de manera muy similar a la energía hidroeléctrica. El agua posteriormente se devuelve al mar por la parte inferior.
- f) Dispositivo de diferencia de presión: Son dispositivos que normalmente se ubican cerca de la costa y se unen al lecho marino. El movimiento de las olas hace que el nivel del mar ascienda y descienda por encima del dispositivo, lo que provoca una presión diferencial en el dispositivo. La presión bombea un fluido que lleva el dispositivo a través de un sistema para generar electricidad.
- g) Dispositivo serpenteante: Consiste en un tubo de goma lleno de agua, amarrado al lecho marino y orientado en la dirección de las olas. El agua entra por uno de los extremos atravesando todo el tubo y provocando variaciones de presión. A medida que el agua viaja a través del tubo va acumulando energía que impulsa una turbina ubicada en el otro extremo, donde el agua vuelve al mar.

- h) Caja giratoria: El movimiento oscilante de la caja debido a la incidencia de las olas provoca que un peso excéntrico o un giroscopio, que se encuentra dentro de ella, gire. Este giroscopio está conectado a un generador eléctrico.

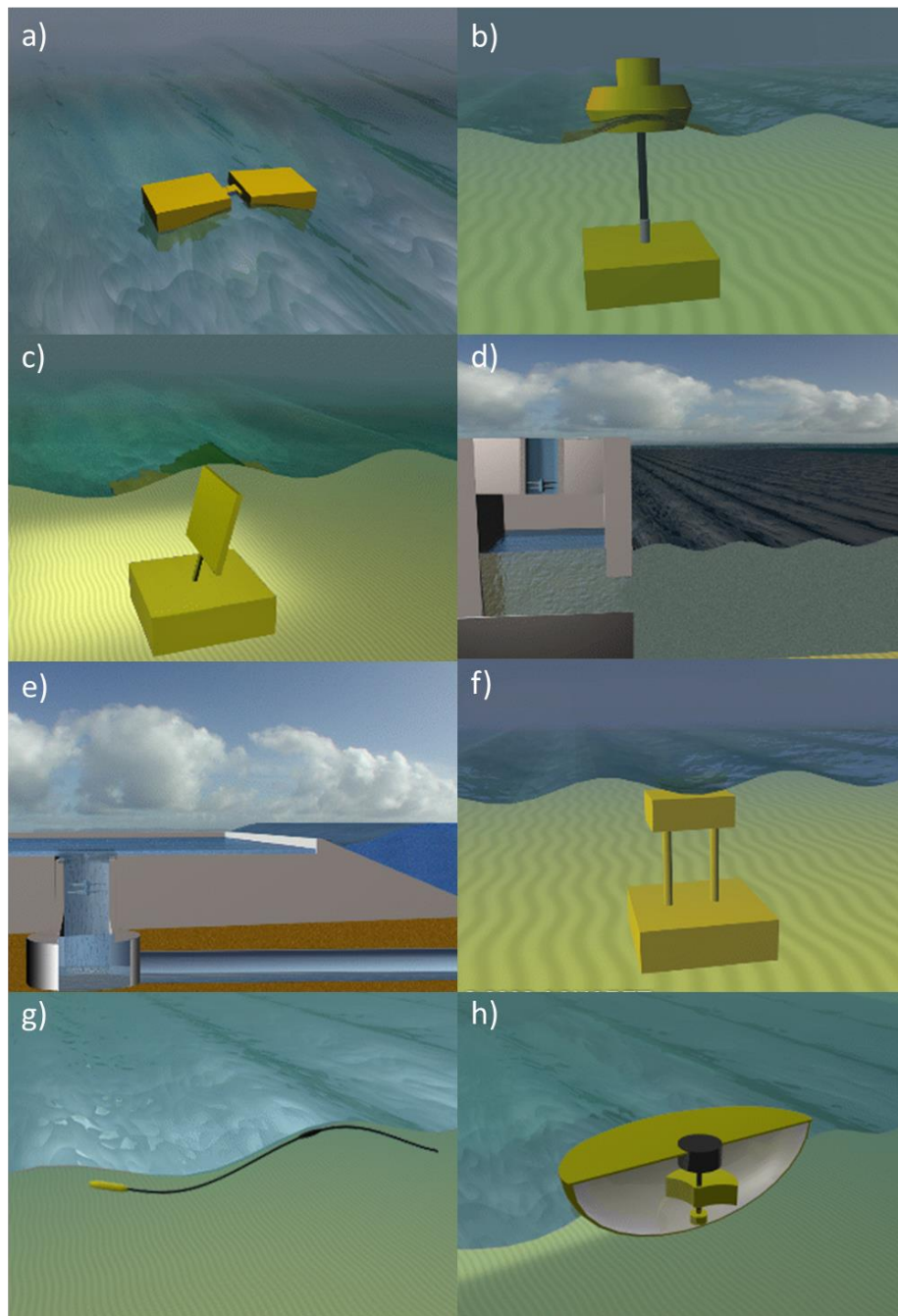


Figura 2-3: Diferentes tipos de conversores de energía de las olas.

Fuente: www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/

La situación en Europa cambió dramáticamente con la decisión de la Comisión Europea de incluir la energía de las olas en su programa de energías renovables. El primer proyecto comenzó en 1992. Desde entonces, se han llevado a cabo muchos proyectos por la Comisión Europea involucrando a un gran número de empresas y centros de investigación de toda Europa.

En cuanto a Europa, como se puede apreciar en la Figura 2-4, el potencial energético de sus costas es muy variado, desde los 76 kW/m en las costas de Irlanda hasta los apenas 8 kW/m en zonas del mediterráneo.

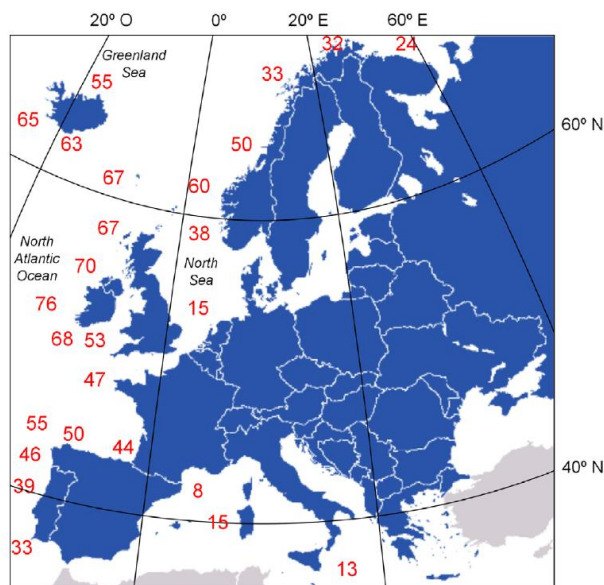


Figura 2-4: Distribución media anual de la energía de las olas en Europa (kW/m)

Fuente: www.campushuesca.unizar.es

En cuanto a la energía undimotriz en España según se informa en el estudio técnico del IDAE (2011-2020), las zonas del litoral con mayor potencial energético (tal y como se puede ver en la Figura 2-5) son la costa de Galicia, la cual posee un potencial energético con valores medios de 40-50 kW/m, en segundo lugar, la costa cantábrica con una potencia media de unos 40 kW/m, en tercer lugar, la fachada norte de las Islas Canarias con 20 kW/m, en menor medida la fachada sur de las Islas Canarias, la costa mediterránea y el Golfo de Cádiz.

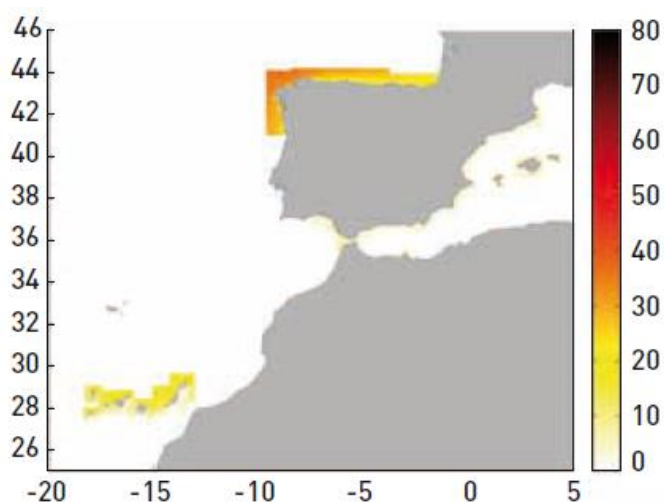


Figura 2-5: Potencial medio (kW/m) anual en el litoral español.

Fuente: *Evaluación potencial de la energía de olas. IDAE*

2.4 Oscillating Water Column (OWC)

El dispositivo de columna de agua oscilante (OWC - *Oscillating Water Column* en inglés), como ya definimos en los diferentes tipos de energía undimotriz, es un dispositivo formado por una cámara en la cual el aire se comprime debido a la oscilación del agua provocada por el oleaje, esta compresión y descompresión provoca el movimiento de una turbina la cual genera energía eléctrica. La Figura 2-6 muestra las partes de los dispositivos OWC.

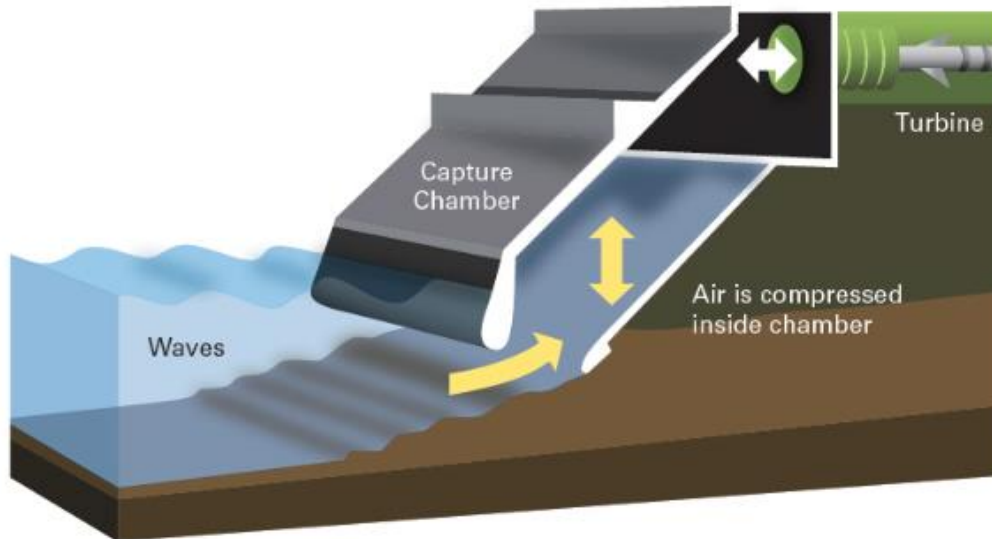


Figura 2-6: Partes de un dispositivo OWC.

Fuente: www.esru.strath.ac.uk/

El diseño y construcción es la parte más crítica de la tecnología OWC y la parte que más influencia tiene en la rentabilidad de la energía producida por las olas. En la actualidad, la construcción de OWC dentro de los diques y rompeolas de los puertos es la opción más avanzada ya que tiene grandes ventajas. Los costes de construcción son compartidos y el acceso a la construcción, operación y mantenimiento de la planta resulta mucho más fácil que lejos de costa. Además, no necesitan amarres al fondo del mar ni grandes cables subacuáticos. La menor energía de la ola en la línea de costa es en parte compensada con una concentración de energía de ola natural provocada por la refracción y la difracción. En aguas abiertas, se han propuesto una gran variedad de sistemas, pero solo se construyeron y desarrollaron unos pocos prototipos.

Los dispositivos OWC se pueden clasificar en:

- Estructura fija: aislados (Pico y LIMPET) o en rompeolas (Sakata y Mutriku)
- Estructuras flotantes: Mighty Whale, Sperboy, Oceanlinx y Ocean Energy Buoy

La Figura 2-7 muestra diferentes tipos de OWC:

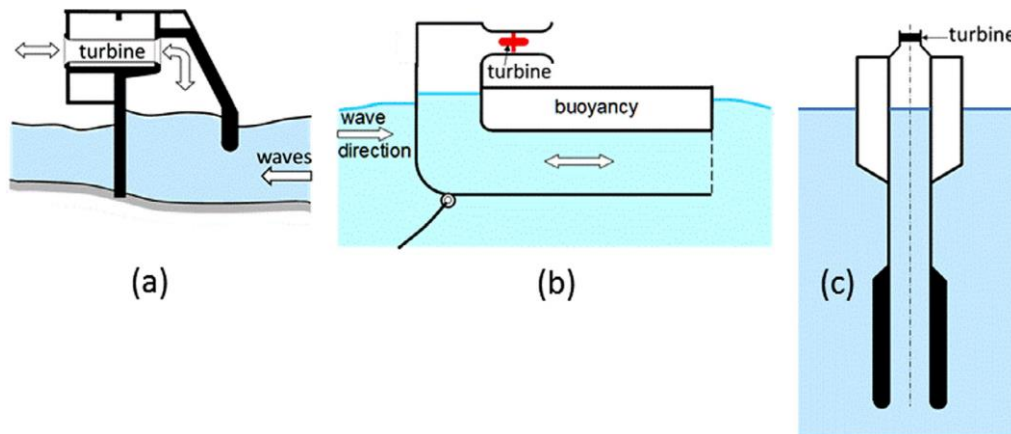


Figura 2-7: Diferentes tipos de OWC: (a) Estructura fija; (b) Boya de conducto inverso flotante; (c) Absorbedor de punto sumergible y flotante.

Fuente: Falcão (2010).

Uno de los principales proyectos a nivel europeo es el Ocean Energy Buoy (OE Buoy) en la bahía de Galway, Irlanda. Este dispositivo OWC (Figura 2-8) funciona a la inversa que otros muchos dispositivos, ya que las olas inciden por el lado opuesto a la abertura del OWC. Pero el principio es el mismo, ya que consiste en la compresión de aire hacia una turbina; esta compresión en lugar de producirse por las olas incidentes se produce por el bamboleo del agua de su interior. El OE Buoy es un OWC de tipo “Boya de conducto inverso flotante” (Figura 2-7b). Este proyecto aún está en fase de desarrollo ya que el dispositivo que tienen actualmente en el océano es un dispositivo a una escala de 1:4. El dispositivo estuvo, en total, 3 años en los mares próximos a Cork (Irlanda) y en Nantes (Francia) con el fin de comprobar su buen funcionamiento. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios ya que se comprobó que es un dispositivo que puede operar de manera segura y estable en las condiciones reales del océano.



Figura 2-8: Dispositivo OE Buoy de la compañía Ocean Energy.

Fuente: www.oceanenergy.ie

Durante los test del OE Buoy se observó una mejora en la eficiencia promedio sobre diseños convencionales que conducen a un menor coste por kWh. En este proyecto se consiguieron las mayores eficiencias promedio hasta la fecha alcanzando el 65% cuando se probó tanto con modelo numérico como en el océano en condiciones reales. Otro de los hitos que se consiguieron en este estudio es un suavizado de la potencia utilizando una serie de algoritmos que pueden permitir que los dispositivos se conecten a redes débiles que aumentará en gran medida el potencial de mercado para estos dispositivos. Este dispositivo tiene una capacidad de 500 kW.

En España, existe un mecanismo de obtención de energía del tipo OWC en Mutriku (País Vasco). Se trata de un OWC fijo (ver Figura 2-9) alojado en el rompeolas del puerto del pueblo y cuenta con 16 cámaras y 16 turbinas (de 1.2 T) las cuales producen una energía de 18.5 kW cada una generando una energía de unos 300 kW y abasteciendo a unas 100 viviendas (Falcão y Henriques, 2016). La inversión para realizar esta obra fue de unos 6.4 millones de euros y se estima que gracias a este sistema se han reducido en unas 600 toneladas las emisiones de carbono anuales.

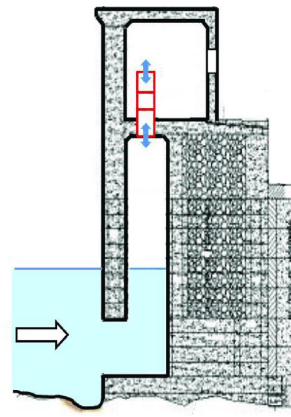


Figura 2-9: Vista aérea (izquierda) y sección (derecha) de la planta de Mutriku.
Fuente: Falcão y Henriques (2016).

A diferencia de los dispositivos OWC fijos como el instalado en Mutriku, los dispositivos ubicados lejos de la costa pueden aprovechar una mayor disponibilidad de la energía de las olas. Sin embargo, los OWC flotantes tienen que hacer frente a ciertos problemas. Uno es la variabilidad en la altura y el periodo de ola; el dispositivo tiene que ser diseñado de tal manera que pueda absorber la energía de las olas el mayor tiempo posible para el mayor rango posible de olas incidentes. Otro problema son las condiciones extremas en mares muy energéticos, por lo que el sistema de flotación y la disposición de los amarres tienen que garantizar, no sólo una alta eficiencia, sino también la estabilidad y supervivencia del aparato. Este trabajo tiene como objetivo utilizar el modelado numérico para estudiar dispositivos OWC flotantes y amarrados al fondo.

2.5 Impactos ambientales de los OWC

Para la colocación de una planta OWC flotante hay que tener en cuenta una serie de posibles impactos además de los aspectos en la conservación de la naturaleza y de los ambientales específicos del sitio en cuestión. En el compendio de Wave Hub (2006) se describen una serie de recomendaciones para posibles ubicaciones de generadores de energía de las olas. Estas recomendaciones incluyen evitar zonas de tráfico marino, áreas de importancia militar y zonas arqueológicas marinas.

Posteriormente, en el trabajo de Langhamer et al. (2010), se informa de otros posibles impactos de los OWC flotantes, entre los que destacan:

Arrecifes artificiales. Los OWC necesitan abarcar considerables superficies, por ejemplo 1000 convertidores requieren un área de 1 km². Esta área no puede ser ocupada por la pesca por lo que para la conservación de la naturaleza se considera un impacto positivo. Por lo tanto, el desarrollo de parques de olas y mareas, evitarán la pesca en estas áreas, pudiendo mejorar las poblaciones de peces, su tamaño y la riqueza de especies.

Los dispositivos de obtención de energía marina pueden actuar como arrecifes artificiales, estas estructuras colocadas en el agua del mar pueden convertirse en atractivas para los organismos marinos. También los cambios físicos pueden provocar alteraciones en las corrientes y en las olas, esto puede alterar distribución de los sedimentos favoreciendo la acumulación de materia orgánica en esta área. Estos aumentos de la materia orgánica pueden provocar un aumento de la biodiversidad, abundancia de especies y biomasa. Se cree que esta mayor abundancia de especies es debida a que estos arrecifes artificiales actúan como protectores ante la depredación, crean nuevas fuentes de alimentos, aumentan la eficiencia de la alimentación y mejoran el reclutamiento de larvas.

Sedimentación. Dado que el crecimiento en las boyas puede ser seguido por altas tasas de sedimentación en el sitio de investigación, la sedimentación puede convertirse en un problema en los proyectos de energía de mareas y olas. Un aumento en la tasa de sedimentación de la fracción mineral y orgánica se espera que influya de manera directa e indirecta en la biomasa. Estos sedimentos y las transformaciones ecológicas pueden inducir la eutrofización del ecosistema bentónico y puede conducir a una menor biodiversidad y reducción en los niveles tróficos. Sin embargo, los OWC se suelen colocar en aguas profundas, incluso con corrientes leves, por lo que es poco probable que estos problemas de eutrofización ocurran.

Electromagnetismo. El electromagnetismo es un elemento que aparece en casi cualquier proyecto de obtención de energía. Algunos animales marinos como peces migratorios, quelonios, crustáceos y mamíferos marinos usan el campo magnético de la Tierra para la navegación. En un estudio elaborado por Bochart y Zettler (2004) se analizó la exposición a largo plazo de diferentes especies de organismos bentónicos a los campos magnéticos estáticos sin encontrar ningún efecto sobre la supervivencia y la reproductividad. Los peces parecen no verse afectados en gran medida por los cables de mar y su campo electromagnético. Pero, aun así, se desconoce si las especies son atraídas o repelidas por campos magnéticos y eléctricos, y si sus patrones de comportamiento pueden ser cambiados. Con el enterramiento de los cables en el fondo marino, este posible problema podría desaparecer.

Migración. Es poco probable que las aves se vean perturbadas por los OWC. Probablemente obtenga más ganancias de los OWC que daños, ya que pueden actuar como sitios de descanso y también pueden servir como hábitats de alimentación. Por otra parte, grandes áreas cubiertas por boyas pueden funcionar como barreras de movimiento. Esto puede ser perjudicial para las especies marinas migratorias o especies que cubren grandes áreas durante la búsqueda de alimento, la mayoría mamíferos. Las áreas para desove, descanso y lactancia pueden ser destruidas. Desafortunadamente, poco se sabe acerca de los corredores migratorios de peces y mamíferos marinos.

Ruido subacuático. Otra área importante en los dispositivos acuáticos es el ruido submarino, conocido no solo por afectar a las focas, delfines y ballenas, sino también a varias especies de peces debido a que usan sonidos submarinos para la comunicación, encontrar presas, encontrar parejas y evitar depredadores. Aunque el ruido en el caso de los OWC solo se produce en la fase de construcción, durante la colocación del OWC debido a la perforación del lecho marino para situar los amarres.

Bioincrustación. Consiste en la adhesión de seres vivos a los OWC. Desde una perspectiva biológica esto puede ser positivo, pero podría perjudicar al rendimiento del OWC provocando impactos técnicos negativos en el material de la boya, el peso, la forma y, por lo tanto, en la eficiencia de absorción de olas. El uso de pinturas anti-incrustantes debe ser evitado ya que las pinturas contienen metales como plomo y cobre. Se realizó una cuantificación de bioincrustación en el trabajo de Leijon et al. (2008) dentro del proyecto Lysekil (Figura 2-10) estimando una cantidad de 150 kg por cada boya de 3 m de diámetro y el resultado indicó que la bioincrustación no tiene ningún impacto negativo en la fuerza de elevación de una boya. Por lo tanto, la solución más simple y barata sería dejar que la bioincrustación crezca en la boya.

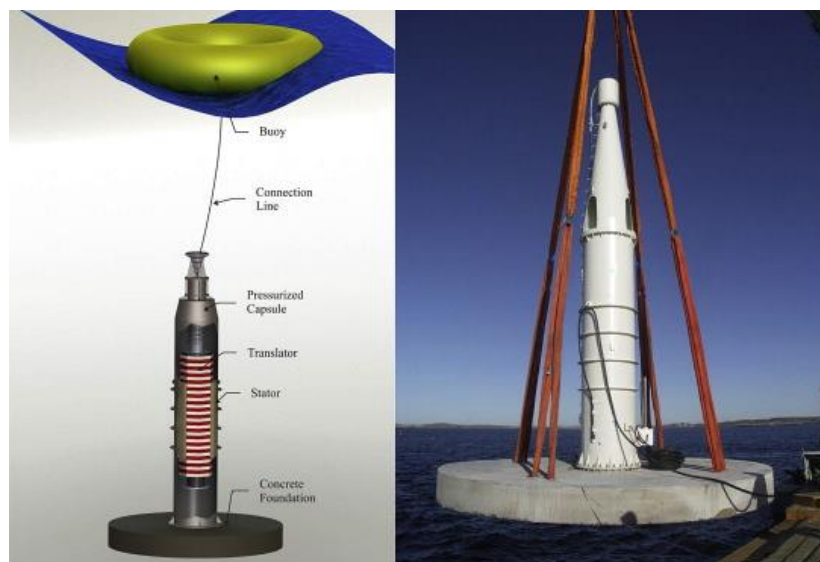


Figura 2-10: Dispositivo de obtención de energía de olas Lykesil.

Fuente: Langhamer et al. 2010.

Capítulo 3:

MODELO NUMÉRICO

DUALSPHYSICS

3.1 Modelado numérico

El modelado numérico es una herramienta muy útil en el campo de la ingeniería y de la ciencia para resolver problemas complejos. Por un lado, permite simular experimentos numéricos en lugar de reproducir experiencias reales que son caras y en algunas ocasiones imposibles de llevarse a cabo con modelos a escala. Por otro lado, proporciona información adicional que no se puede obtener de la observación experimental, lo cual es especialmente valioso cuando el objeto de estudio no es solo descubrir alguna variable del flujo (como velocidad, presión, etc.) sino también entender los procesos físicos envueltos en el fenómeno.

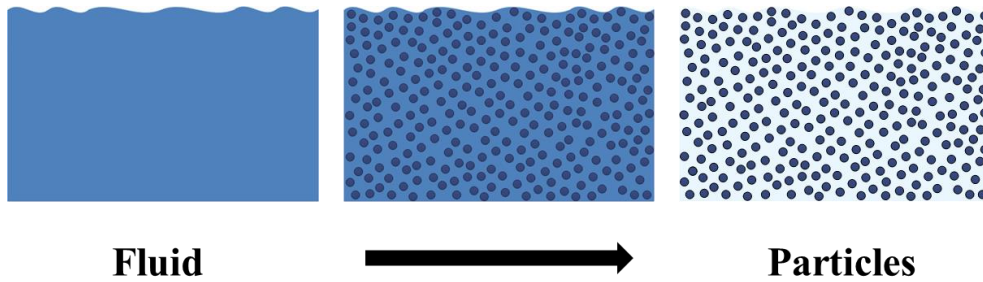
Las ecuaciones físicas que rigen un método numérico se pueden resolver con la ayuda de una malla usando una descripción Euleriana o se pueden resolver sin el uso de la malla con una descripción Lagrangiana. Los métodos basados en una malla (elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos) son actualmente muy robustos, están bien desarrollados y han sido aplicados a un amplio abanico de aplicaciones en las que proporcionan resultados muy precisos. Estos métodos de malla son ideales para sistemas con dominios perfectamente delimitados y para simulaciones donde los contornos permanecen fijos. Sin embargo, la creación de la malla puede resultar muy ineficiente si el sistema es complejo o si los contornos se mueven a gran velocidad.

Este trabajo se centra en métodos sin malla (y Lagrangianos), los cuales se usan tanto en mecánica de sólidos como en dinámica de fluidos. Históricamente, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha centrado en métodos que se basan en una malla (volúmenes finitos). En los métodos sin malla se sustituye la misma por un conjunto de nodos distribuidos de manera arbitraria. Se espera así que el modelo sea más flexible y versátil que los métodos convencionales, especialmente para aplicaciones en las que se estudien geometrías muy complejas, grandes deformaciones y discontinuidades en el flujo del fluido.

3.2 Método SPH

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) es un método numérico Lagrangiano, que en los últimos años se ha aplicado en numerosos campos de la dinámica de fluidos. El método SPH fue desarrollado en los años 70 aplicado a la astrofísica y cosmología (Gingold y Monaghan, 1977; Lucy, 1977). Desde entonces, el método se ha aplicado a diversos problemas y ha demostrado su robustez en diferentes campos de la astrofísica, magneto-hidrodinámica y mecánica de sólidos. En los últimos años el método se ha aplicado con éxito para estudiar la interacción entre olas y estructuras costeras, objetos flotantes, propagación de oleaje y también se están llevando a cabo aplicaciones industriales en diferentes campos.

SPH discretiza el fluido como un conjunto de puntos o nodos llamados partículas. En SPH se resuelven las ecuaciones de la dinámica de fluidos, calculando los valores de las variables físicas representativas (velocidad, posición, densidad y presión) para una partícula como interpolación de los valores de las partículas más próximas. Las ecuaciones que se resuelven en cada par de interacción entre partículas son las ecuaciones de Navier-Stokes: la ecuación de momento (para calcular la tasa de variación temporal de la velocidad o aceleración) y la ecuación de continuidad (para calcular la tasa de variación temporal de la densidad).



El método SPH se basa en la teoría de los interpolandos integrales. El principio fundamental es aproximar cualquier función $A(\mathbf{r})$ por:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (3.1)$$

donde $\mathbf{r}$ es el vector de posición, W es la función *kernel*, h es la distancia de interacción llamada distancia de suavizado.

La aproximación de la Ec. 3.1, que es una integral, se puede escribir en notación discreta usando sumatorios:

$$A(\mathbf{r}) \approx \sum_{j=1}^N A(\mathbf{r}_j) W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (3.2)$$

donde el sumatorio se realiza sobre las partículas vecinas j que se encuentran en la región definida por la función *kernel*. La masa y la densidad de las partículas vecinas se denotan como m_j y ρ_j respectivamente.

De este modo, en el formalismo SPH pasamos de la notación continua (Ec. 3.1) a la notación discreta (Ec. 3.2), es decir, pasamos de integrales a sumatorios.

Para este paso de un medio continuo, como lo es un fluido, a un medio discreto, partículas, se emplea la función *kernel* (W). Esta función cumple varias propiedades:

- Positividad: $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) \geq 0$ dentro del dominio
- Soporte compacto: $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) = 0$ fuera del dominio
- Normalización: $\int W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' = 1$
- Comportamiento tipo función delta: $\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$
- Comportamiento monótono decreciente de $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)$

La Figura 3-1 muestra el dominio de interacción definido por la función *kernel* (W). Las partículas que se encuentran a una distancia menor de $2h$ (dos veces la longitud de suavizado h) son las partículas vecinas que interactúan con la partícula de interés. Cuanto más cerca, mayor será su contribución.

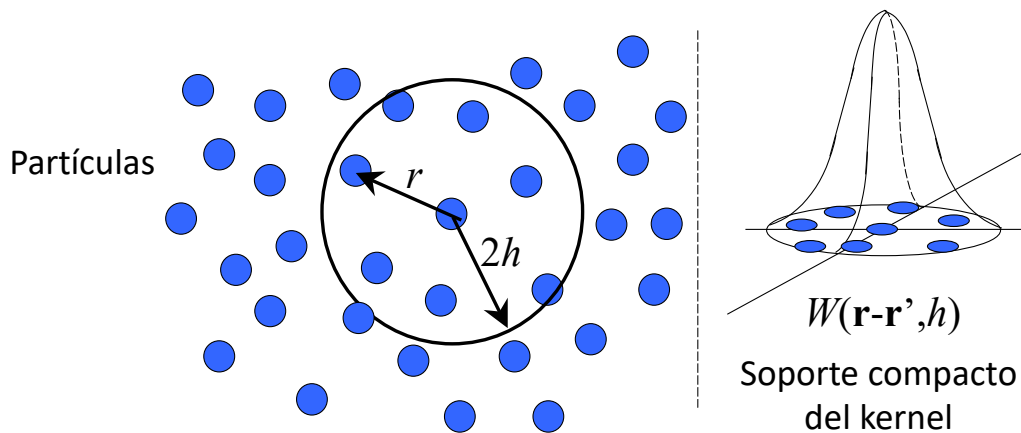


Figura 3-1: Esquema del dominio de influencia y soporte compacto del *kernel*.

La ecuación de conservación de momento de Navier-Stokes permite calcular la velocidad a la que se mueve el fluido:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla \frac{P}{\rho} + \mathbf{g} + \nu_0 \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3.3)$$

donde P es presión, ρ es densidad, $\mathbf{v}$ es la velocidad, $\mathbf{g}$ la gravedad, y $\nu_0 \nabla^2 \mathbf{v}$ el término viscoso. Esta expresión traducida a formalismo SPH será:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} - \mathbf{g} \quad (3.4)$$

y se utiliza para calcular la velocidad de la partícula a ($\mathbf{v}_a$) a partir de la suma de las interacciones con todas las partículas vecinas b usando la función *kernel* W_{ab} (que se calcula a partir de la distancia entre las partículas a y b). En este caso Π_{ab} es el término viscoso.

La ecuación de continuidad de Navier-Stokes (o ecuación de conservación de la masa) que se utiliza para el medio continuo se escribe de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.5)$$

y su conversión en formalismo discreto o de SPH usando la función *kernel* quedaría:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3.6)$$

donde $\mathbf{v}_{ab}$ es $\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$ y ρ_a es la densidad de la partícula a que se calcula también como sumatorio de las interacciones con todas las vecinas b .

Es decir, los valores de $d\mathbf{v}/dt$ y $d\rho/dt$ se calculan a partir de las Ec. 3.4 y 3.6. Con esos valores y el valor del siguiente paso de tiempo (Δt) se calculan las velocidades y densidades de todas las partículas en el paso siguiente. Con la velocidad se puede calcular la posición nueva de las partículas y con la densidad se calcula la presión (usando una ecuación de estado en la aproximación débilmente compresible). De esta manera tan sencilla se obtiene el estado de las partículas (posición, velocidad, densidad y presión) en cada instante de la simulación.

La formulación básica del método SPH se describe en detalle en los artículos de Monaghan (1992), Liu (2003) y Monaghan (2005).

3.3 Código DualSPHysics

El grupo EPHYSLAB ha desarrollado el código SPH llamado *DualSPHysics* en colaboración con investigadores (ver Figura 3-2) de University of Manchester (Reino Unido), Università degli studi di Parma (Italia), Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal) y la Universiteit Gent (Bélgica), y ha centrado su investigación en la propagación de las olas y en su interacción con estructuras costeras (Crespo et al., 2011, Altomare et al., 2015 y Altomare et al., 2017).



Figura 3-2: Investigadores que colaboran en el desarrollo de DualSPHysics.

DualSPHysics es código libre y puede descargarse gratuitamente desde la web www.dual.sphysics.org (Figura 3-3). Uno de los propósitos de este código libre es fomentar el uso del método SPH entre los investigadores e invitarlos a contribuir al proyecto enviando sus mejoras.

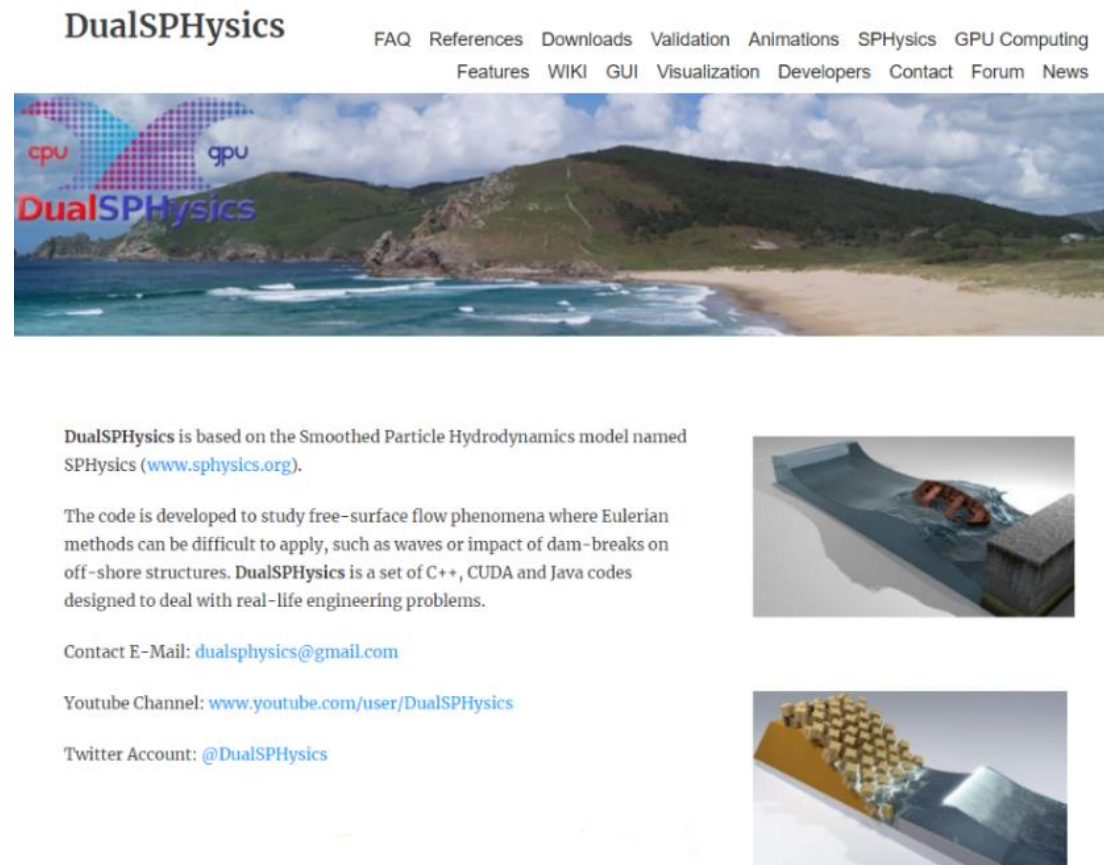


Figura 3-3: Página web de DualSPHysics.

Los códigos SPH pueden proporcionar una descripción precisa del fluido, pero su mayor limitación es el alto coste computacional, lo cual puede hacer imposible su uso de manera eficiente para estudiar problemas reales de ingeniería. El tiempo computacional se incrementa con el número de partículas que componen los sistemas, por lo que muchos problemas son inviables por la complejidad de los mismos. Además de existir un límite temporal en las simulaciones, también hay un límite en el número de partículas que los procesadores pueden administrar. Por este motivo, HPC (o la computación de altas prestaciones) es la herramienta necesaria para alcanzar nuevas cotas en el modelado de problemas de ingeniería, más concretamente, en este caso se emplean GPU (las unidades de proceso gráficas). Las GPU aparecen como una alternativa accesible para acelerar los métodos SPH usando un gran potencial de programación en paralelo donde las tarjetas gráficas se usan como dispositivo de ejecución. Ésta es una tecnología nueva desarrollada por la industria de los videojuegos y que proporciona un alto rendimiento con un gasto económico razonable en muchos campos, no sólo en CFD.

De este modo el código DualSPHysics se desarrolló para ser un código SPH robusto, eficiente y altamente paralelizable y para poder ser usado en problemas de ingeniería real. DualSPHysics está escrito en los lenguajes de programación C++ y CUDA que es un lenguaje de programación para las GPU (Domínguez et al., 2013). El código DualSPHysics usando GPU puede llegar a ser hasta 100 veces más rápido que usando una versión secuencial en CPU (Crespo et al., 2011). Esto permite simular millones de partículas, cuando la geometría compleja del caso requiere una alta resolución, en un tiempo de cómputo razonable. Así, DualSPHysics se ha aplicado a problemas de ingeniería real como es el estudio del rebase en un rompeolas de Bélgica (Altomare et al., 2014). La formulación SPH implementada en DualSPHysics se puede consultar en Crespo et al. (2015).

NOTA: Todas las simulaciones realizadas en este trabajo se han llevado a cabo en un ordenador personal (PC) con una GPU GeForce GTX1080.

3.4 Condiciones iniciales y condiciones de contorno

Generar la condición inicial en DualSPHysics significa crear las partículas con los valores iniciales de posición, velocidad, densidad... Como ya se explicó, SPH es un modelo libre de malla, es decir, no se utiliza una malla para realizar las interacciones y resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Sin embargo, en el primer instante hay que crear las partículas en unas determinadas posiciones y para ello sí se usa una malla, pero sólo para generarlas inicialmente, después éstas se moverán libremente por el dominio.

Para determinar las posiciones iniciales donde se crean las partículas se usa una malla tridimensional cartesiana y las partículas se crean en los nodos de esa malla. Los nodos de la malla estarán separados una distancia (que denominaremos “ dp ”). Para representar objetos 3D en la malla sólo hay que marcar los nodos que se ajusten a la forma del objeto. En la Figura 3-4 se muestra cómo para discretizar un triángulo en partículas, se marcan los nodos de la malla que pertenecen al plano del triángulo y que al mismo tiempo estén comprendidos entre los tres planos que lo delimitan. Por lo tanto, en los nodos marcados se crearán las partículas.

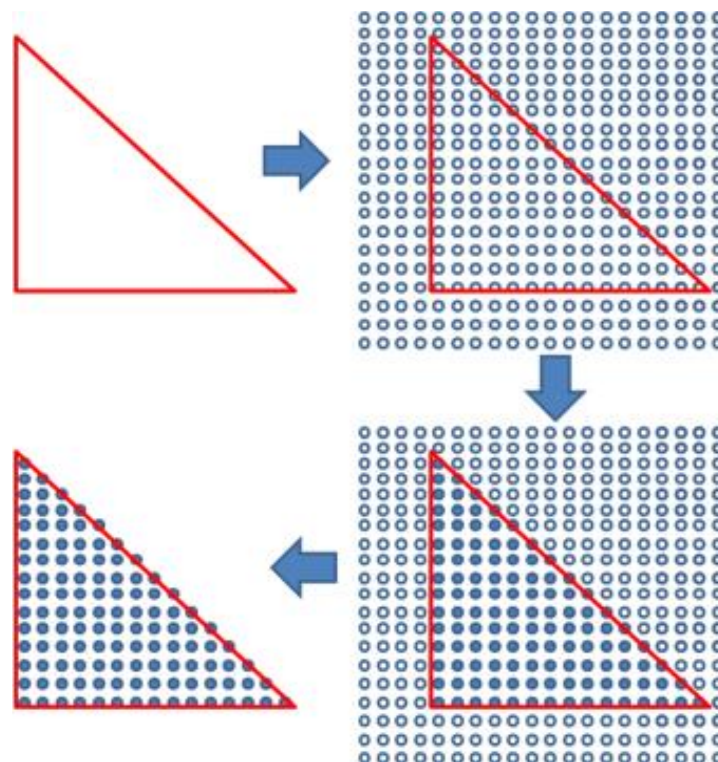


Figura 3-4: Creación de un triángulo usando partículas.

La mayoría de los modelos 3D están formados por polígonos que se pueden descomponer en triángulos, y por lo tanto estos triángulos se pueden dibujar como partículas repitiendo este proceso. La Figura 3-5 muestra un ejemplo de conversión de modelo 3D complejo en partículas.

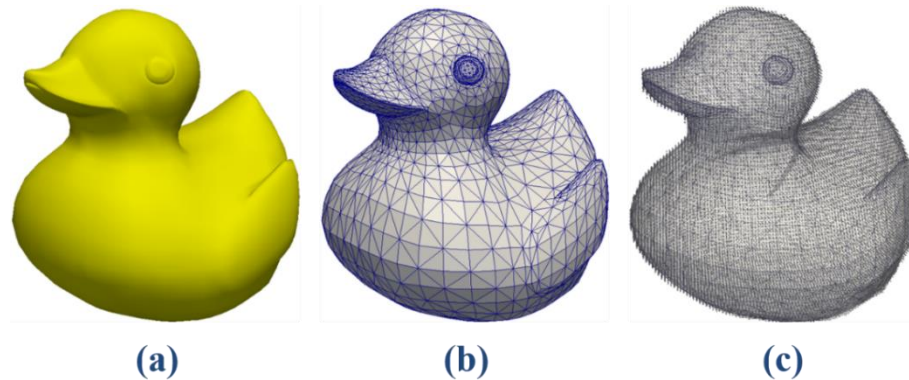


Figura 3-5: a) Modelo 3D, b) triángulos, c) puntos.

Al definir un objeto complejo mediante partículas siempre se produce una pérdida de precisión que depende de lo fina que sea la malla (“ dp ”) y por tanto del número de partículas utilizadas. En la Figura 3-6 se muestra como a partir del modelo 3D (con dimensiones globales 0.39 m x 0.46 m x 0.42 m) se obtiene su representación en partículas (para una mejor visualización en la figura se usan cubos), con más o menos detalle dependiendo de la distancia entre partículas. Es decir, la resolución y el número de partículas creadas inicialmente depende del valor de “ dp ” (para un mismo objeto o volumen definido en dimensiones globales).

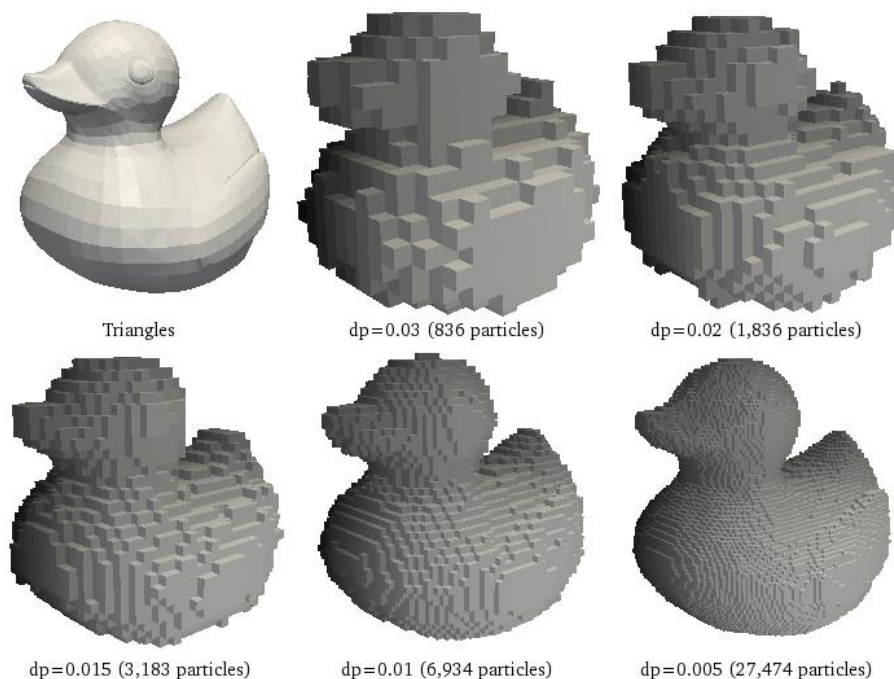


Figura 3-6: Discretización de una geometría compleja usando diferentes resoluciones.

En SPH, los sólidos (muros, suelo, estructuras costeras, pistones, objetos flotantes...) son descritos por un conjunto de partículas de contorno las cuales ejercen una fuerza repulsiva sobre las partículas fluidas cuando se acercan.

En DualSPHysics se ha implementado una condición de contorno dinámica en donde las partículas de los contornos satisfacen las mismas ecuaciones que las partículas fluidas permitiendo así que su densidad y presión evolucionen. Sin embargo, existe una diferencia y es que el movimiento de las partículas contorno no vendrá definido por las fuerzas entre partículas; se mantendrán fijas en una posición (contornos fijos) o se moverán de acuerdo a algún tipo de movimiento impuesto externamente (puertas, pistones...). En el caso de los objetos flotantes, sus partículas se moverán juntas como parte de un sólido rígido que se mueve considerando el peso del objeto más la fuerza de empuje del fluido de alrededor.

Usando esta condición, cuando una partícula fluida se acerca a un contorno y la distancia entre ellas se hace menor que el rango del *kernel*, la densidad de las partículas contorno aumentan dando como resultado un incremento de la presión. La fuerza ejercida sobre la partícula fluida también se incrementa debido al término de presión en la ecuación del momento (Ec. 3.4) creándose así un mecanismo de repulsión entre el contorno y el fluido. Para una descripción completa de estas condiciones de contorno se puede consultar Crespo et al. (2007).

Una de las funcionalidades más interesantes de DualSPHysics es la generación de oleaje. Para ello un pistón se mueve empujando al fluido. Este pistón consiste en una columna de partículas contorno que interaccionan con las partículas fluido de su alrededor. Por lo que lo único que se necesita es definir correctamente el movimiento del pistón:

- leyendo serie temporal de movimiento de un fichero externo, o
- calculando automáticamente el movimiento necesario para generar las olas deseadas.

3.5 Acoplamiento con la librería MoorDyn

En este trabajo DualSPHysics se va a utilizar para simular objetos flotantes que están amarrados al fondo por lo que esos amarres y la tensión en ellos tiene que ser también simulada de una manera precisa. Para resolver el comportamiento de los amarres, DualSPHysics se ha acoplado a una librería externa ya existente y desarrollada con ese objetivo. Esta librería externa se llama *MoorDyn*, es código abierto y se puede descargar desde www.matt-hall.ca/moordyn.html.

MoorDyn resuelve la dinámica de un sistema de amarres y se ha desarrollado para ser acoplado con otros modelos (Hall, 2018). Las líneas de amarre se discretizan como masas puntuales conectadas por modelos lineales de amortiguación para proporcionar elasticidad en la dirección axial. La amortiguación hidrodinámica y la masa añadida se representan utilizando la ecuación de Morison. El modelo también resuelve la fricción del amarre con el fondo y permite conectar múltiples estructuras flotantes y múltiples líneas de amarre. La Figura 3-7 muestra todas las funcionalidades de *MoorDyn*.

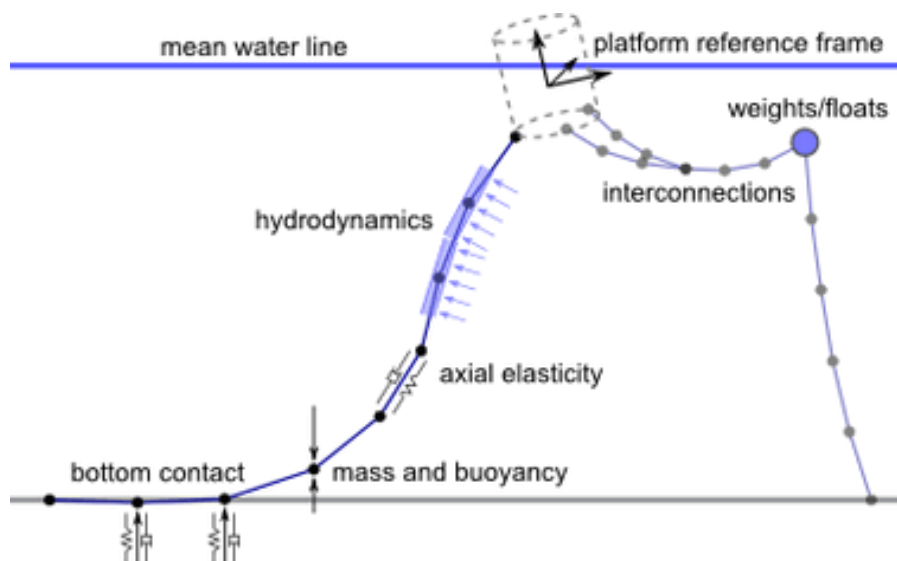


Figura 3-7: Funcionalidades del modelo MoorDyn.

Con una formulación muy simple, *MoorDyn* ha demostrado ser computacionalmente eficiente y exacto para simular captadores de energía de olas que usan amarres (Hall y Goupee, 2015; Vissio et al., 2015).

Capítulo 4:

VALIDACIÓN

La validación del modelo DualSPHysics en este trabajo se hizo en base a dos experimentos; i) un OWC fijo realizado en Cantabria y, ii) una caja flotante con amarres realizado en Gante (Bélgica). Ambos experimentos han sido realizados a escala en un tanque de olas. Estos experimentos se reproducirán con el modelo numérico y se obtendrán magnitudes de interés que se pueden comparar con los datos de los ensayos experimentales.

4.1 Experimento de OWC fijo en Cantabria

El primero de los experimentos utilizados para la validación de DualSPHysics fue realizado en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria "IHCantabria" (Figura 4-1).

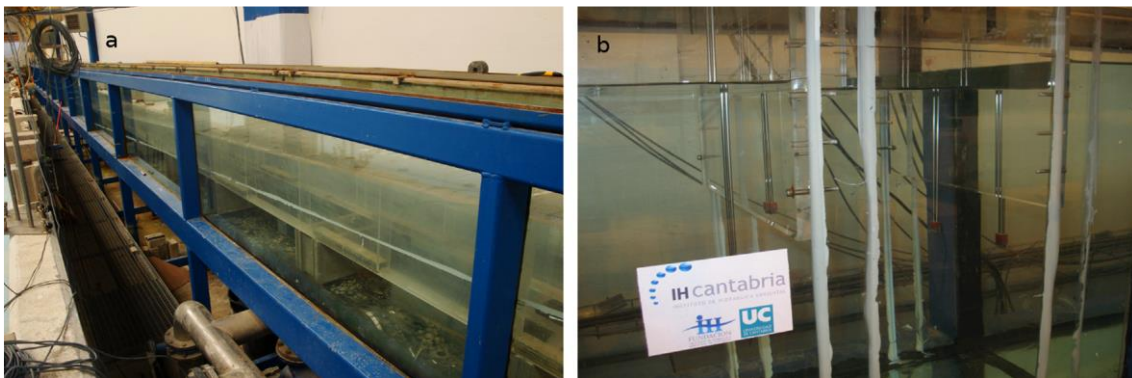


Figura 4-1: Tanque de olas en IHCantabria.

Fuente: Iturrioz et al., 2015.

El primer paso es diseñar el tanque numérico imitando el tanque de olas de IHCantabria. De este modo, el tanque generado en DualSPHysics es de 20.60 m de largo y 0.75 m de alto, tal y como se muestra en la Figura 4-2. Para evitar la reflexión de las olas, y así tener sólo olas incidentes, se creó una playa al final del tanque. La cámara interna del OWC fijo tiene un tamaño de 0.3 m de largo y se colocó a una distancia de 5.4 m del pistón. El calado es inicialmente de 0.6 m, con la intención de que cubriera parte del OWC, en concreto unos 0.2 m para evitar así la entrada de aire por la parte inferior del OWC y maximizar su rendimiento. El tanque numérico se crea en dos dimensiones (2D) porque el ensayo tiene naturaleza bidimensional.

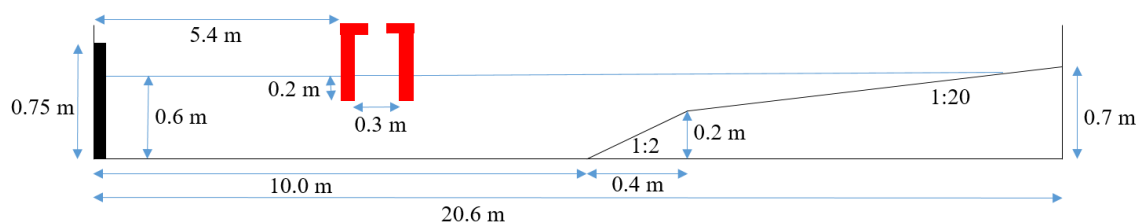


Figura 4-2: Configuración del tanque numérico con el OWC fijo de Cantabria.

En el trabajo experimental de Iturrioz et al. (2015) hay varios ensayos físicos distintos. Aquí vamos a usar el caso de olas regulares de altura $H=0.08$ m y periodo $T=3.2$ s y con una abertura en la parte superior del OWC lo suficientemente grande para que no haya compresión del aire en la cámara y la presión del aire dentro del OWC sea igual a la atmosférica. Este caso es ideal puesto que DualSPHysics sólo simula una fase, el agua, y por ahora no tiene en cuenta el efecto del aire.

Para generar el tanque numérico hay que decidir la distancia inicial a la que se crean las partículas (dp). Altomare et al. (2017) sugieren usar una resolución en la que haya 8-10 partículas por altura de ola puesto que con esos valores se consigue una alta precisión sin elevar mucho los tiempos de ejecución. Por lo tanto, en este caso del IHCantabria, se usa $dp=0.01$ m, esto es $H/dp=8$. Con ese dp se crean 78,984 partículas en el dominio numérico. Se simularon 30 s de tiempo físico y la simulación tardó 52 minutos en ejecutarse con una tarjeta GPU (en CPU tarda 3 días y 15 horas).

En las Figuras 4-3 y 4-4 se representa la velocidad horizontal (componente en la dirección de propagación de las olas) del fluido para distintos instantes. La Figura 4-3 muestra todo el tanque y la Figura 4-4 se centra en la zona del dispositivo OWC.

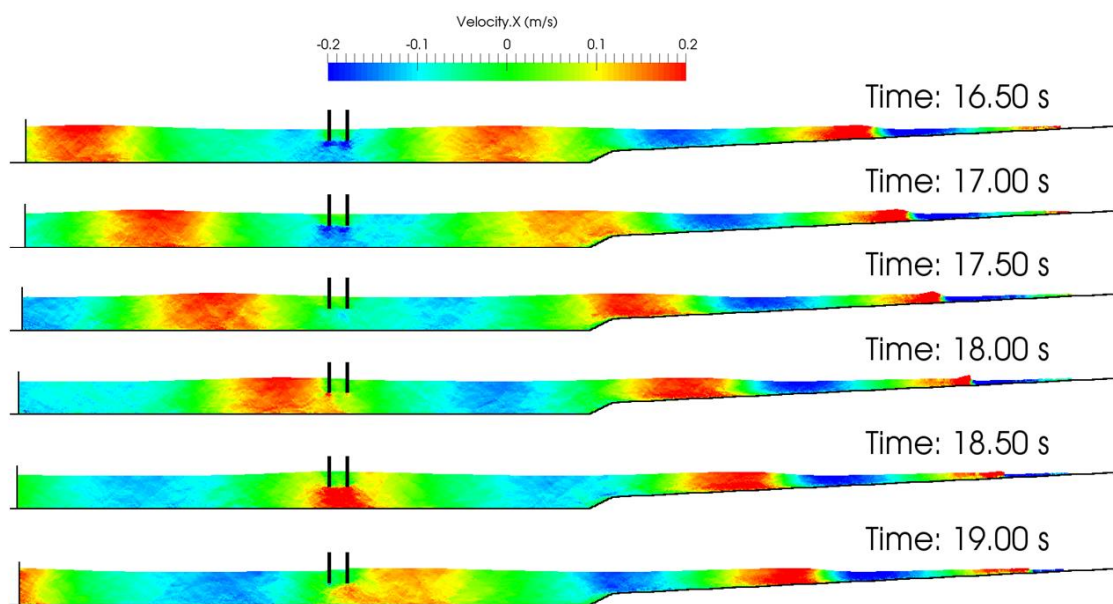


Figura 4-3: Diferentes instantes de la simulación del OWC fijo.

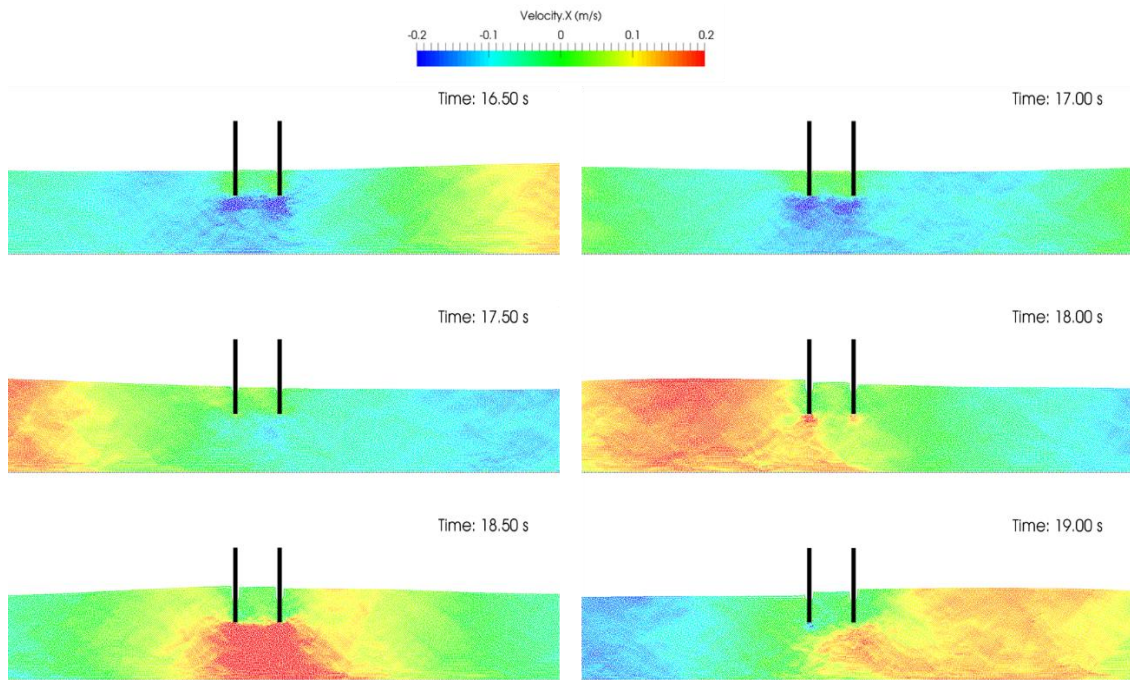


Figura 4-4: Diferentes instantes de la simulación del OWC fijo con detalle en la zona.

Durante el experimento se grabó la elevación de la superficie de agua (η) dentro de la cámara del OWC. La Figura 4-5 compara este valor experimental con el calculado numéricamente en DualSPHysics a lo largo de los 30 segundos de simulación. Se puede observar que las dos series temporales son similares, lo cual pone de manifiesto la precisión de los resultados usando DualSPHysics para este caso.

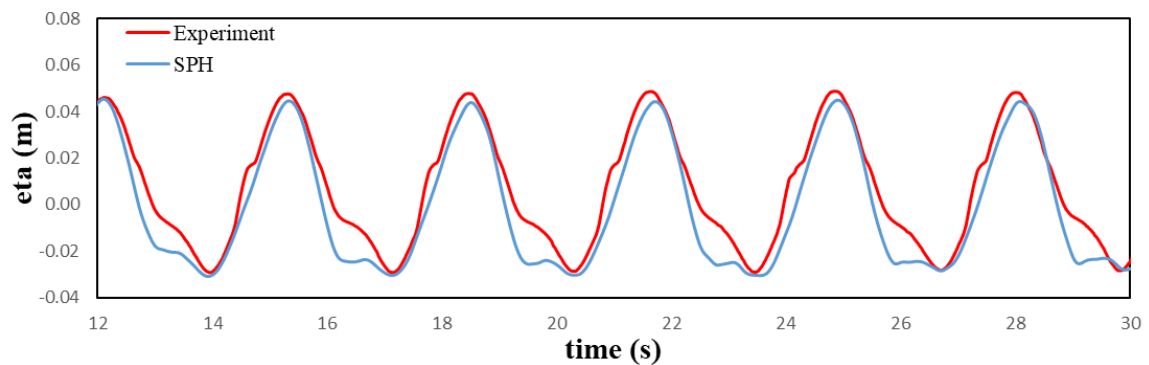


Figura 4-5: Serie temporal experimental y numérica de la elevación de la superficie del agua dentro de la cámara del OWC fijo

4.2 Experimento de caja flotante en Gante (Bélgica)

En esta segunda sección se van a utilizar experimentos de ensayos realizados en la Universidad de Gante (Bélgica). Estos ensayos consisten en olas regulares interaccionando con una caja sólida flotante con amarres. Los datos experimentales incluyen elevaciones de superficie libre en diferentes puntos del tanque, serie temporal de los movimientos de los objetos (de traslación y de rotación) y tensiones registradas en los amarres. El modelo DualSPHysics será utilizado para ejecutar simulaciones que reproduzcan todos esos ensayos. Se obtendrán numéricamente las mismas magnitudes que se midieron en el tanque experimental, y así se compararán los datos para validar DualSPHysics y demostrar sus capacidades.

4.2.1 Propagación del oleaje

Todos los ensayos de Gante se realizaron en el mismo tanque experimental. El tanque numérico, mostrado en la Figura 4-6, tiene unas dimensiones que imitan al experimental; 12 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de alto. A 6.5 metros del pistón hay una playa con una pendiente 1:10 de inclinación cuya finalidad es disipar la energía de las olas y reducir la reflexión.

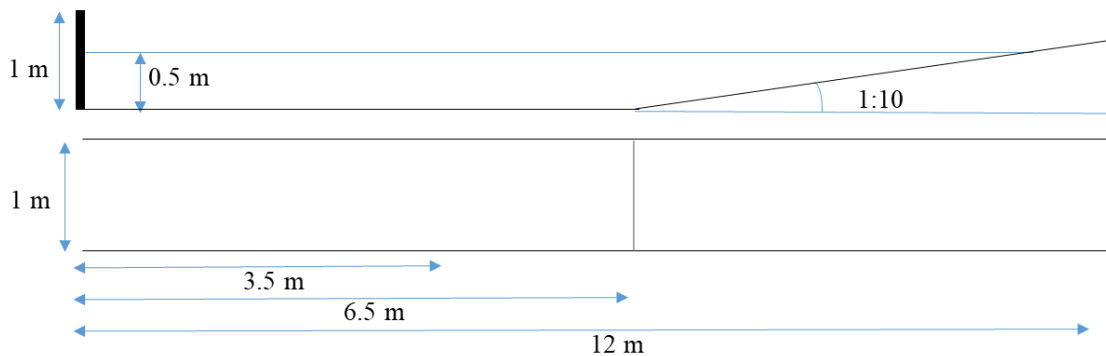


Figura 4-6: Configuración del tanque numérico para reproducir los experimentos en Gante.

Los experimentos se realizaron con olas regulares; altura de ola $H=0.12$ m, periodo de ola $T=1.6$ s y profundidad $d=0.5$ m por lo cual la longitud de ola resultante es $L=3$ m.

La distancia inicial de partículas, dp , es de 0.01 m en este caso, por lo que discretizamos una altura de ola usando 12 partículas ($H/dp=12$). Esta resolución da lugar a la creación, en el instante inicial, de un total de 45,848 partículas (en un tanque 2D).

En DualSPHysics, las olas se generan mediante el movimiento de un pistón que consiste en una columna de partículas y que se mueve: i) leyendo serie temporal de movimiento de un fichero externo, o ii) calculando automáticamente el movimiento necesario para generar las olas incidentes deseadas. En los experimentos de Gante, tenemos el movimiento exacto del pistón durante los ensayos por lo que podemos usar la primera opción (que llamaremos *Piston-Experiment*).

Pero también, se realizan simulaciones con la segunda opción (que llamaremos *Piston-Auto*) y compararemos las dos opciones con datos teóricos usando la teoría de segundo orden de Stokes (*Theory*).

En la Figura 4-7 se han representado diferentes instantes de la simulación usando movimiento de pistón experimental (*Piston-Experiment*) y movimiento de pistón automático (*Piston-Auto*). Los colores de las partículas corresponden a la velocidad horizontal y se puede ver como los campos de velocidades son similares.

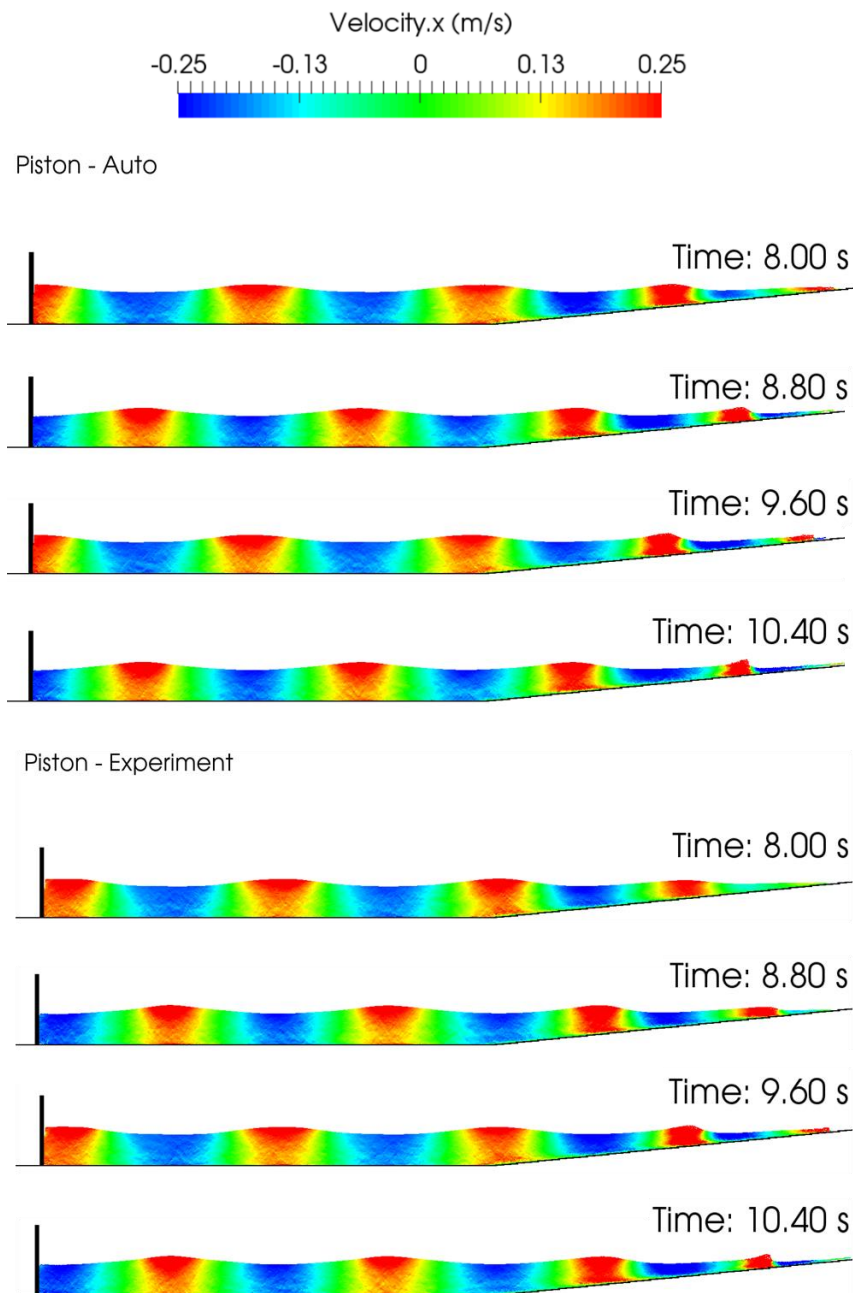


Figura 4-7: Diferentes instantes de la propagación de las olas usando el movimiento automático (arriba) y el movimiento experimental (abajo) del pistón.

En la Figura 4-8, se muestran las series temporales de la elevación de superficie libre de agua medida a 3.5 metros del pistón durante la simulación *Piston-Experiment*, la simulación *Piston-Auto* y ambas se comparan también con datos teóricos (*Theory*). Aunque el valor teórico tiene valores en la cresta ligeramente superiores a los numéricos, se puede ver como los resultados de las dos simulaciones son similares.

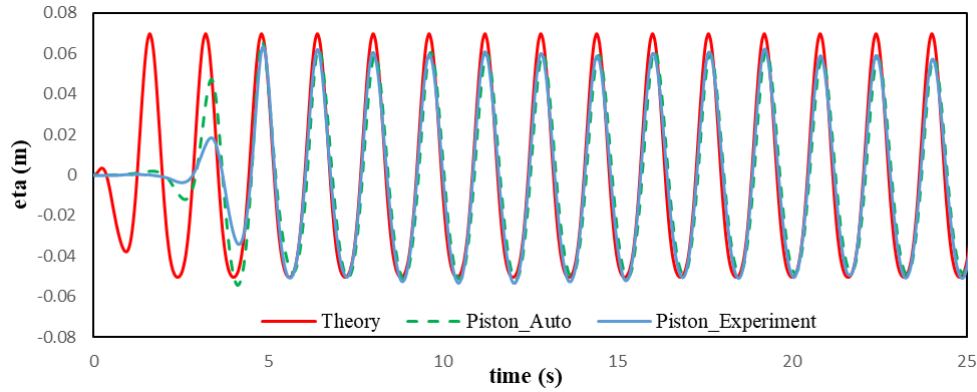


Figura 4-8: Comparación de la serie temporal teórica y numéricas de la elevación de la superficie libre medidas a 3.5 m del pistón.

En lo que se refiere a las velocidades orbitales, se observa el mismo comportamiento. La Figura 4-9 muestra las velocidades horizontales (en X) y vertical (en Z) medidas en un punto situado a 3.5 m del pistón y a 0.2 m de la superficie inicial. Los valores de las simulaciones con DualSPHysics son también muy parejos.

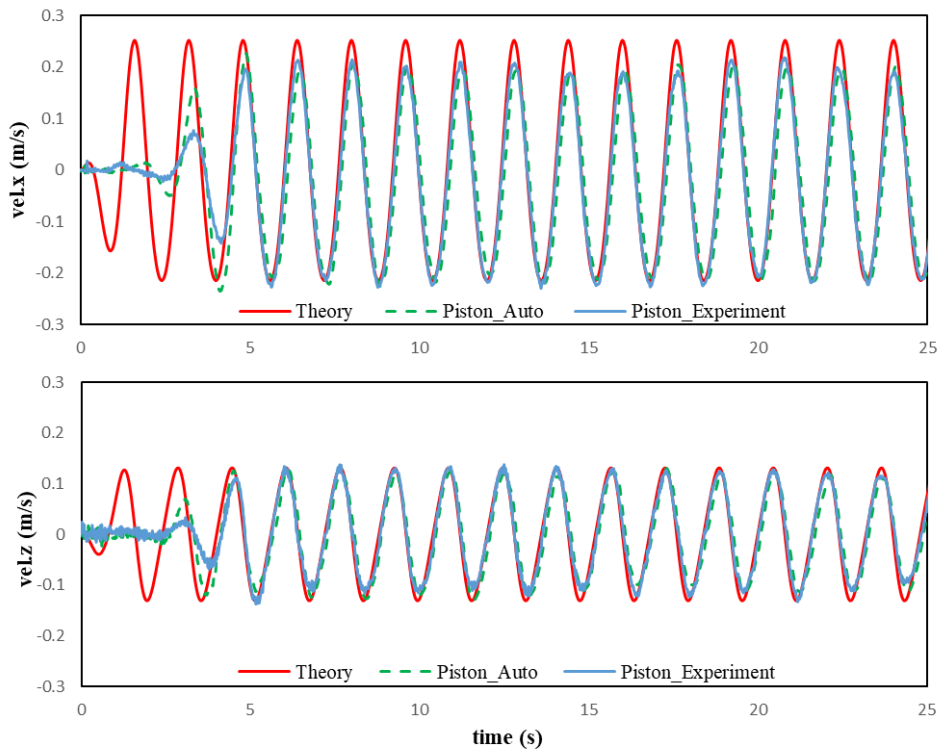


Figura 4-9: Comparación de la serie temporal teórica y numéricas de las velocidades orbitales medidas a 3.5 m del pistón y a 0.2 m de la superficie.

4.2.2 Caja sólida flotante con y sin amarres

Recordemos que DualSPHysics está acoplado a la librería *MoorDyn*, la cual se usa para calcular la tensión ejercida por lo amarres. Utilizar amarres para objetos flotantes en el mar (boyas, pantanales, captadores de energías marinas, OWC, etc.) es importante para que no queden a la deriva en el mar evitando así cualquier tipo de accidente, ya sea por colisión con una embarcación u otro objeto.

Para validar no solo la interacción entre las olas y objetos flotantes sino también el buen funcionamiento de los amarres en DualSPHysics (acoplado con *MoorDyn*), se usan los experimentos de Gante con una caja sólida flotante amarrada al fondo. La Figura 4-10 muestra las dimensiones del tanque numérico, la ubicación de la caja sólida flotante y la configuración de los amarres utilizados en las simulaciones. El tanque de olas numérico tiene el mismo ancho que el tanque experimental, pero la longitud se reduce para ahorrar tiempo de cálculo. El pistón en el tanque experimental se encuentra a una distancia de 12.5 m del centro del objeto flotante, mientras que en el tanque numérico se encuentra a 3.5 m. La distancia entre ambos debe ser mayor que una longitud de ola ($L=3$ m) para generar y propagar correctamente las olas. La caja tiene unas dimensiones de 0.2 m x 0.2 m x 0.132 m y una densidad de 600 kg/m³. La caja está amarrada al fondo utilizando 4 cadenas (las propiedades de los amarres que usa *MoorDyn* se muestran en la Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Propiedades de los amarres de los experimentos en Gante.

Propiedad	Valor
Longitud	145.5 cm
Peso	0.607 g/cm
Volumen	$10.5 \cdot 10^{-6}$ m ³ /m
Diámetro	3.656 mm

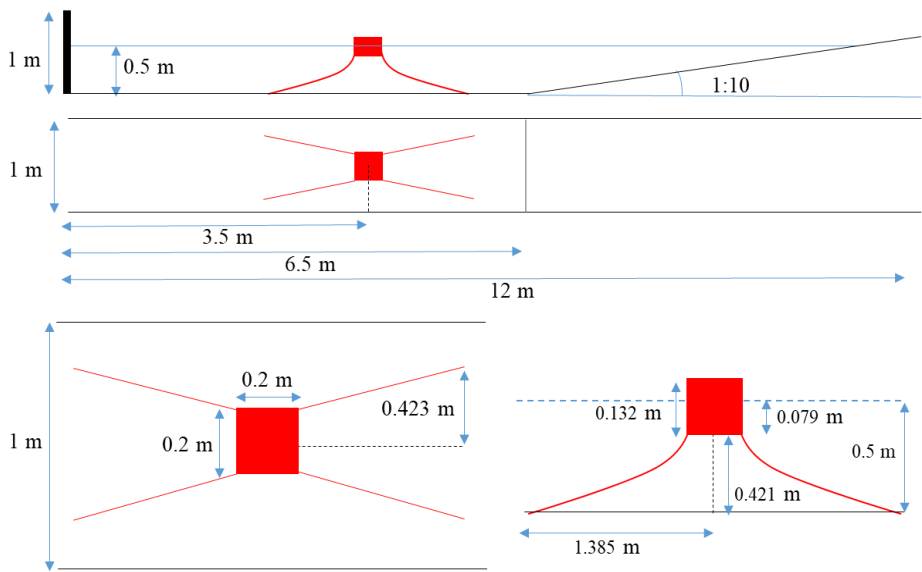


Figura 4-10: Configuración del tanque numérico de los experimentos en Gante incluyendo la caja flotante y amarres.

Con las mismas olas incidentes del apartado anterior ($H=0.12$ m, $T=1.6$ s, $d=0.5$ m) se realizaron primero simulaciones 2D de la caja flotante con y sin amarres. La Figura 4-11 muestra diferentes instantes de las dos simulaciones con DualSPHysics.

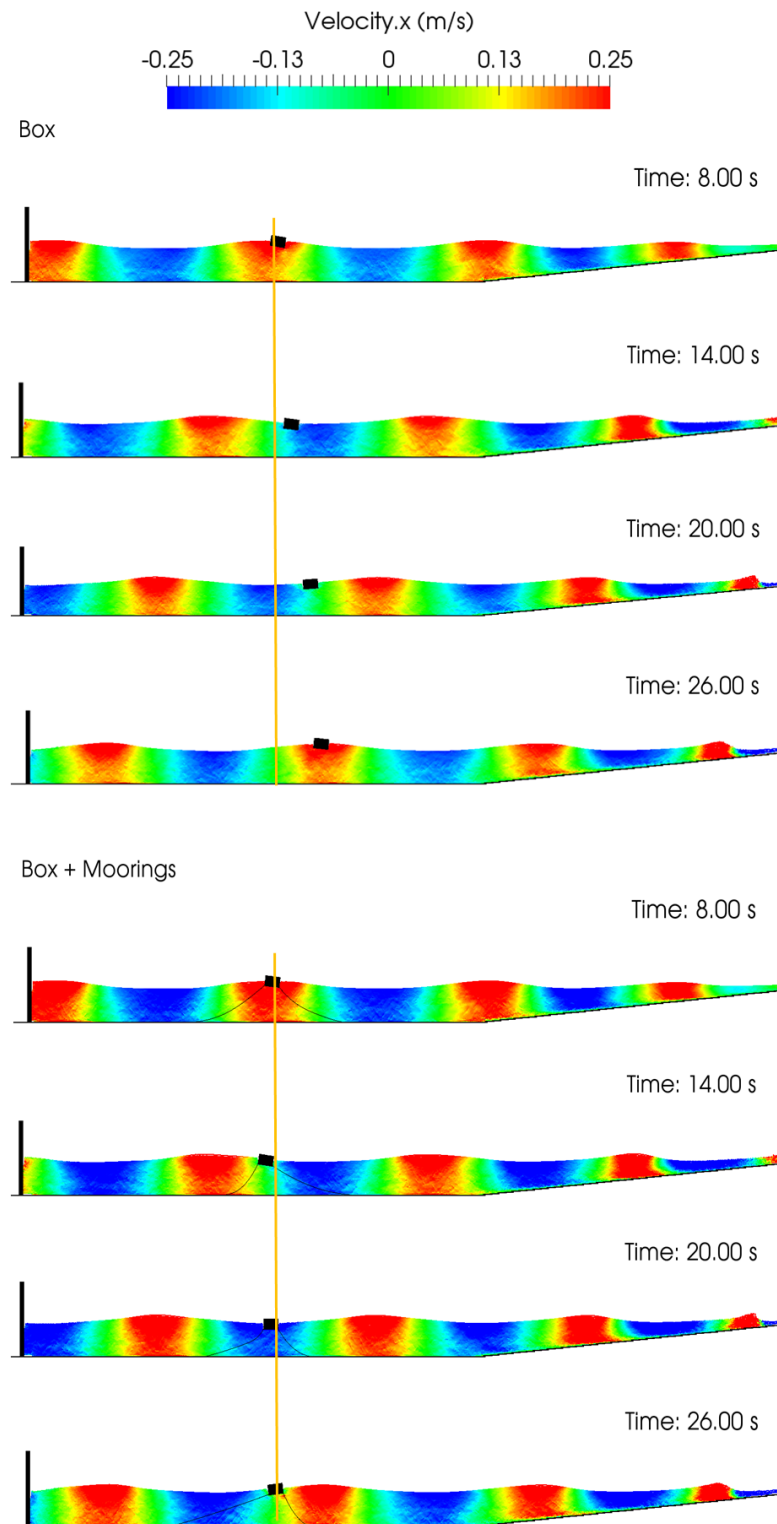


Figura 4-11: Diferentes instantes de la simulación incluyendo la caja flotante sin (arriba) y con (abajo) amarres.

En la Figura 4-11 se añadió una línea naranja para poner de manifiesto el desplazamiento de la caja con y sin amarres. En la simulación sin amarres, si ésta se ejecutara durante un tiempo muy grande el objeto acabaría varado en la playa o muy próximo a ella. Mientras que el uso de amarres permite que el objeto se mantenga en su emplazamiento.

Usando la herramienta de post-procesado de DualSPHysics se pueden calcular los distintos movimientos que sufre el objeto flotante debido a la interacción con las olas. En particular, podemos obtener su traslación longitudinal (*surge*), traslación vertical (*heave*) y cabeceo (*pitch*). La Figura 4-12 muestra estos movimientos comparando la simulación con y sin amarres. En el caso de la traslación vertical, inicialmente se parecen, pero al cabo de un tiempo el caso sin amarres pierde la periodicidad, mientras que el caso con amarres sigue un ciclo regular que se repita con la misma amplitud y frecuencia. Fijándose en la traslación horizontal se ve claramente como en el caso sin amarres, la caja avanza con el tiempo en la dirección de las olas incidentes, mientras que la caja amarrada describe ciclos regulares. Por último, el cabeceo de la caja amarrada es mucho más regular que la caja sin amarres.

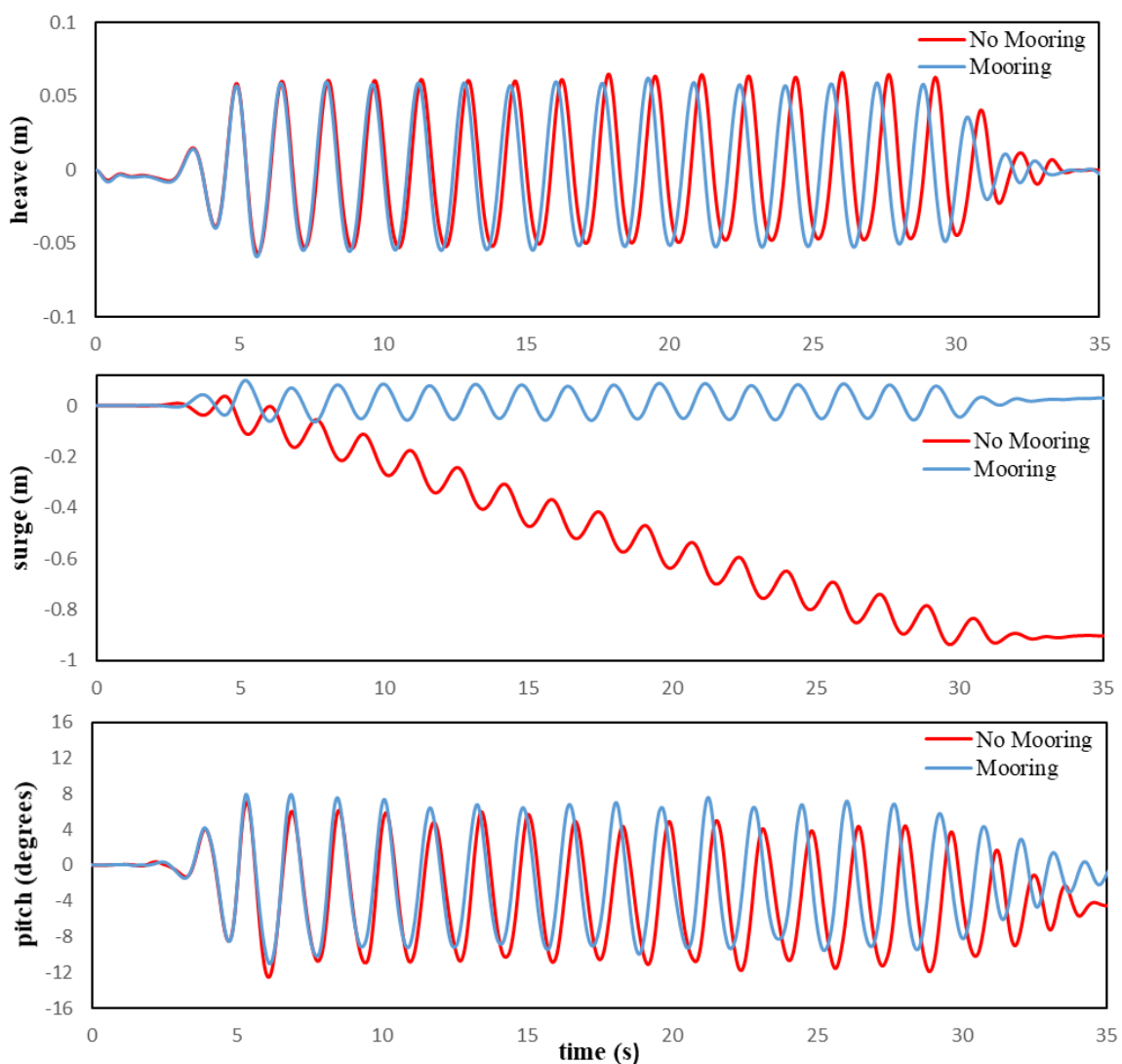


Figura 4-12: Comparación de la serie temporal de los movimientos de la caja con y sin amarres.

Después de estos análisis previos, recordemos que el objetivo de esta sección era validar el modelo DualSPHysics simulando la caja flotante con los amarres al fondo bajo la acción de olas regulares. Para ello se comparan los datos numéricos de la simulación con datos experimentales de los ensayos de Gante. La Figura 4-13 compara los datos experimentales de los movimientos de la caja con una simulación 2D usando DualSPHysics. Los datos obtenidos son muy similares a los experimentales; solo varía levemente la amplitud de la traslación horizontal, siendo algo inferior en DualSPHysics y hay alguna pequeña diferencia en la amplitud del cabeceo, siendo un poco superior en DualSPHysics respecto al experimento. Pero la precisión de los resultados es aceptable.

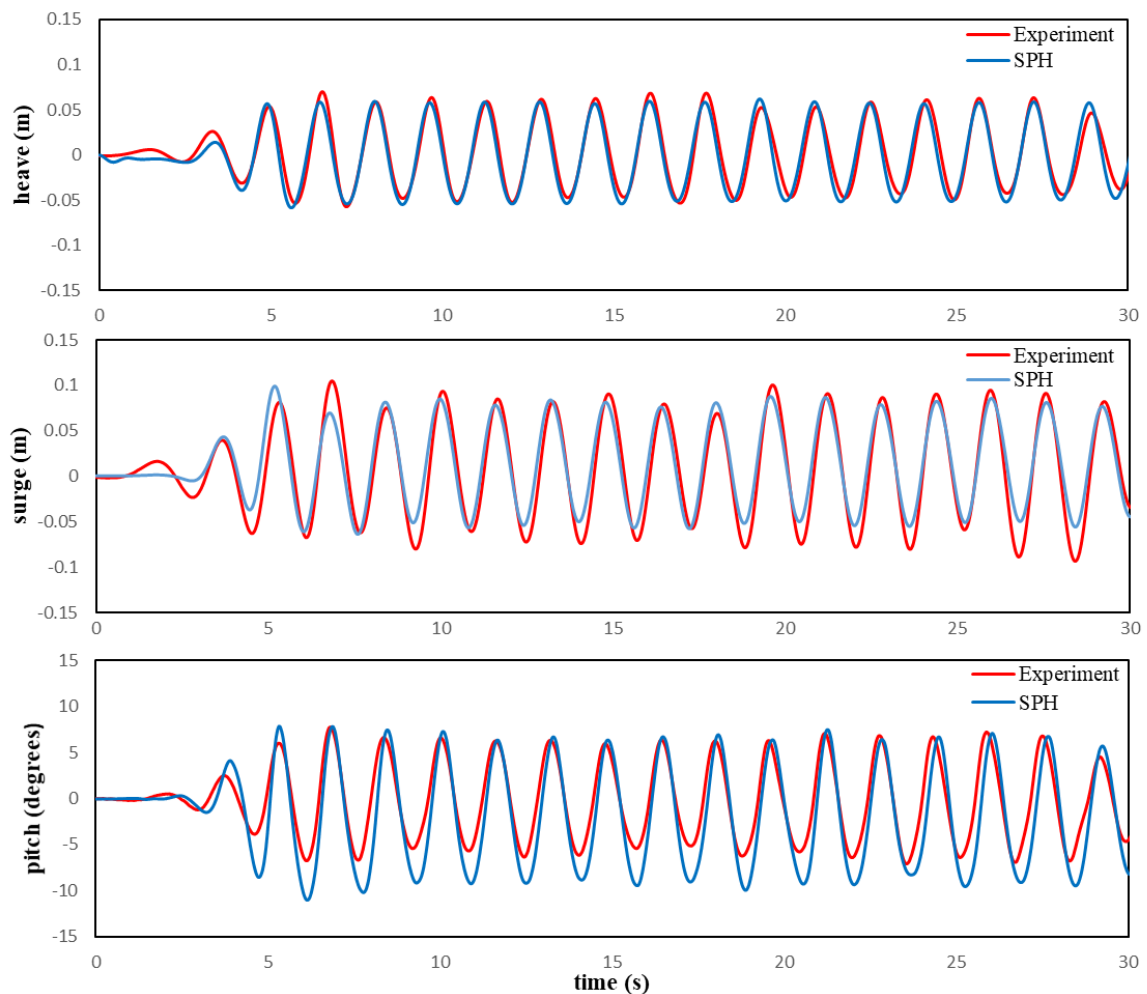


Figura 4-13: Comparación de la serie temporal experimental y numérica (en simulación 2D) de los movimientos del objeto flotante con amarres.

4.2.3 Caja sólida flotante con amarres (3D)

Posteriormente se realizó la simulación en 3D y se volvieron a comparar los datos experimentales y los obtenidos numéricamente.

Usando la misma distancia inicial para crear las partículas, $dp=0.01$ m, el tanque numérico en 3D (Figura 4-10) tiene 4,833,204 partículas. La ejecución de 40 segundos de tiempo físico llevó unas 133 horas (5 días y medio) en la GPU.

La Figura 4-14 muestra diferentes instantes de la simulación con DualSPHysics. Estos instantes (desde 10 a 11.5 segundos) son representativos de un periodo de ola ($T=1.6$ s) por lo que recogen un ciclo completo de desplazamiento horizontal, vertical y de cabeceo. En este caso, en lugar de representar las partículas, se pinta la superficie y los colores indican el valor de la velocidad.

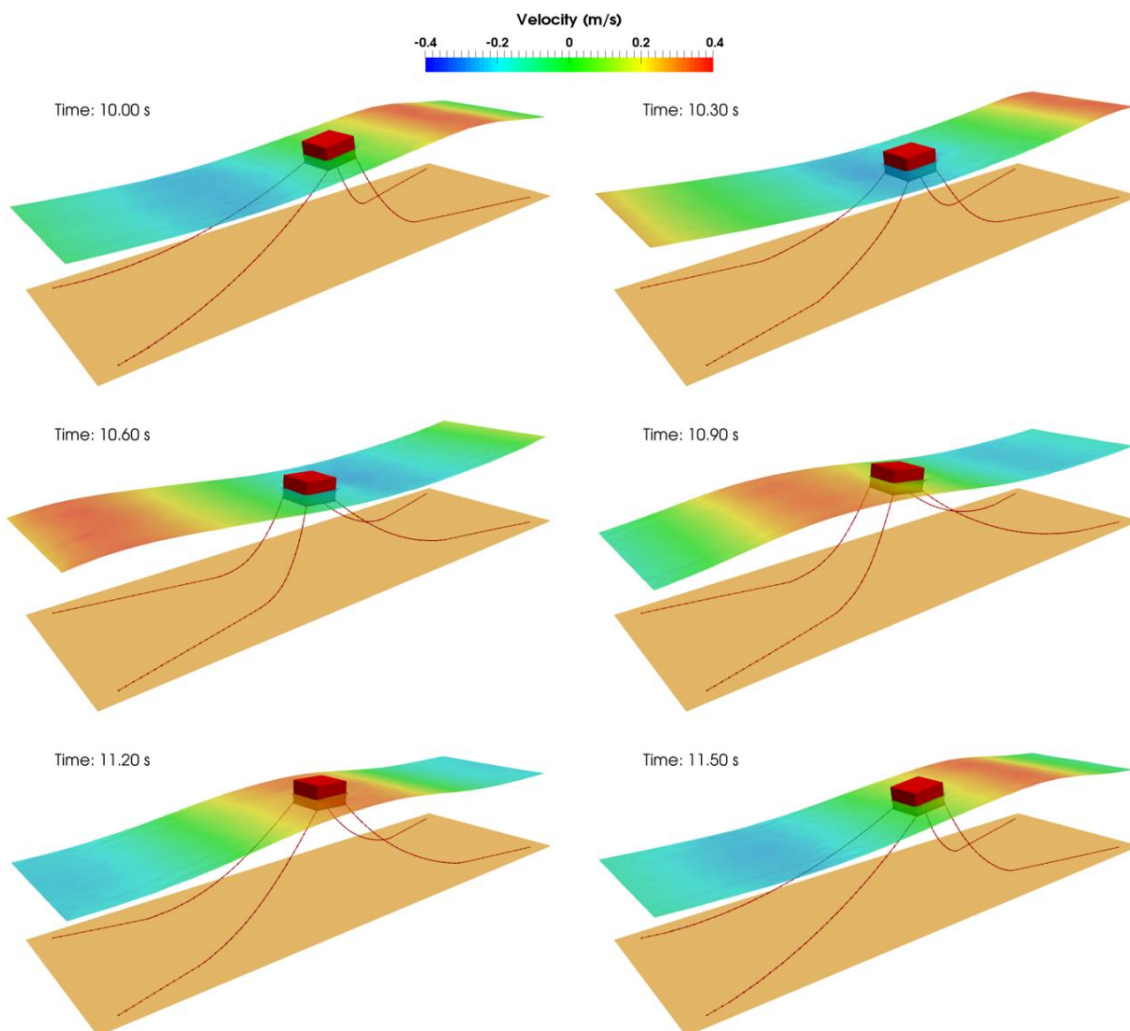


Figura 4-14: Diferentes instantes de la simulación 3D con caja flotante y amarres.

En el experimento de Gante se colocaron siete sensores de elevación de superficie libre del agua. La Figura 4-15 muestra la posición de los sensores y la Tabla 4-2 las coordenadas X e Y. El sensor WG1 se encuentra fuera del tanque numérico. WG3 y WG7 se encuentran en los laterales de la caja flotante. WG2 está ubicado entre el pistón y la caja flotante, y WG6, WG4 y WG5 se encuentran situados consecutivamente entre la caja flotante y la playa.

Tabla 4-2: Posiciones de los sensores de elevación de superficie libre del agua.

Sensor	X (m)	Y (m)
WG1	-5.55	0.00
WG2	-2.74	0.00
WG3	0.07	0.36
WG4	1.90	0.00
WG5	2.90	0.00
WG6	0.55	0.00
WG7	-0.05	-0.26

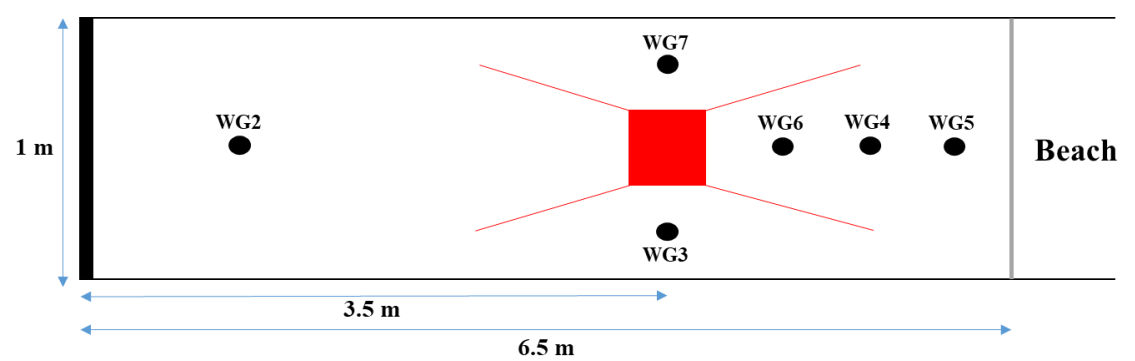


Figura 4-15: Disposición de los sensores en el tanque.

Como se puede apreciar en la Figura 4-16 la serie temporal de elevaciones de superficie libre numéricas y experimentales son muy similares. Las pequeñas diferencias entre ambas señales son menores que la resolución numérica ($dp=0.01$ m) por lo que las olas regulares se propagan en el tanque numérico igual que lo hicieron en el experimental.

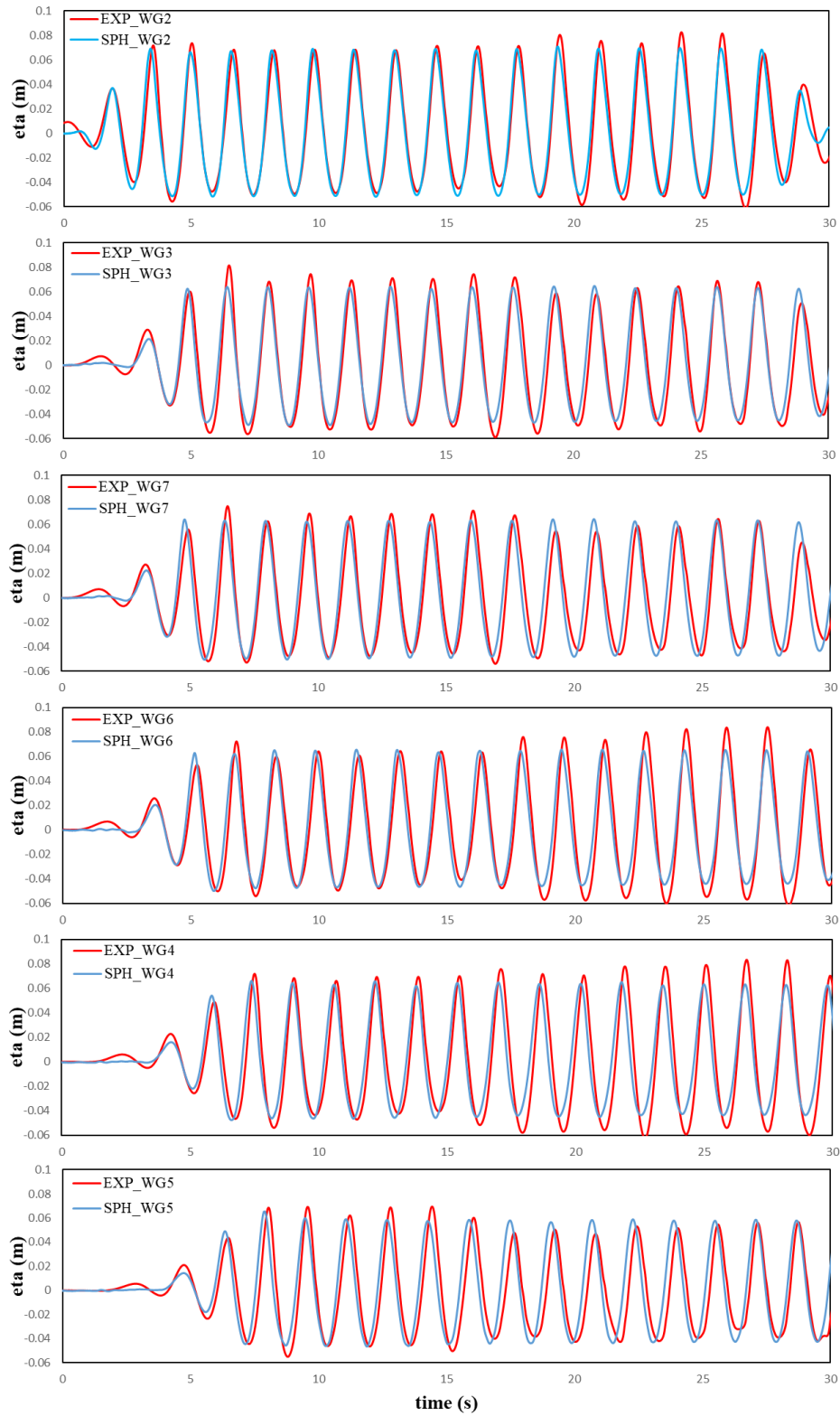


Figura 4-16: Comparación de la serie temporal experimental y numérica de la elevación de la superficie en diferentes posiciones del tanque.

La Figura 4-17 compara los valores experimentales y numéricos de los movimientos de la caja amarrada (pero ahora con la simulación 3D). Los resultados son ahora mejores que en el caso 2D (Figura 4-13).

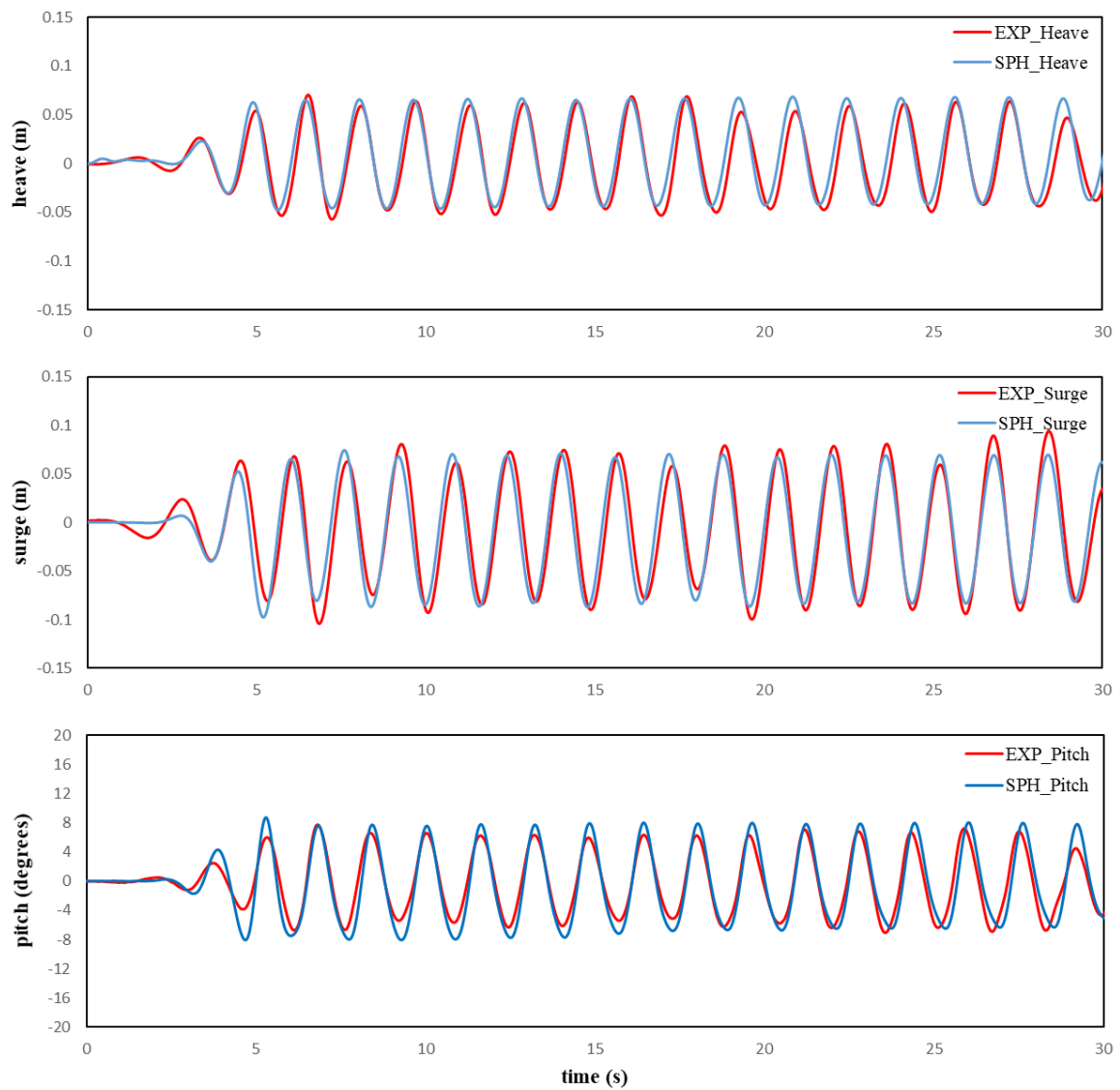


Figura 4-17: Comparación de la serie temporal experimental y numérica (en simulación 3D) de los movimientos del objeto flotante con amarres.

Ahora que el caso se simula en 3D con DualSPHysics sí tiene sentido calcular los valores numéricos de las tensiones en los cuatro amarres y compararlos con los valores experimentales. La Figura 4-18 incluye las tensiones en uno de los amarres frontales (cadena C) y en uno de los amarres de atrás (cadena A). Los datos obtenidos son muy similares a los experimentales (los cuales tienen mucho ruido por lo difícil que es medir esta magnitud con los aparatos en el modelo físico).

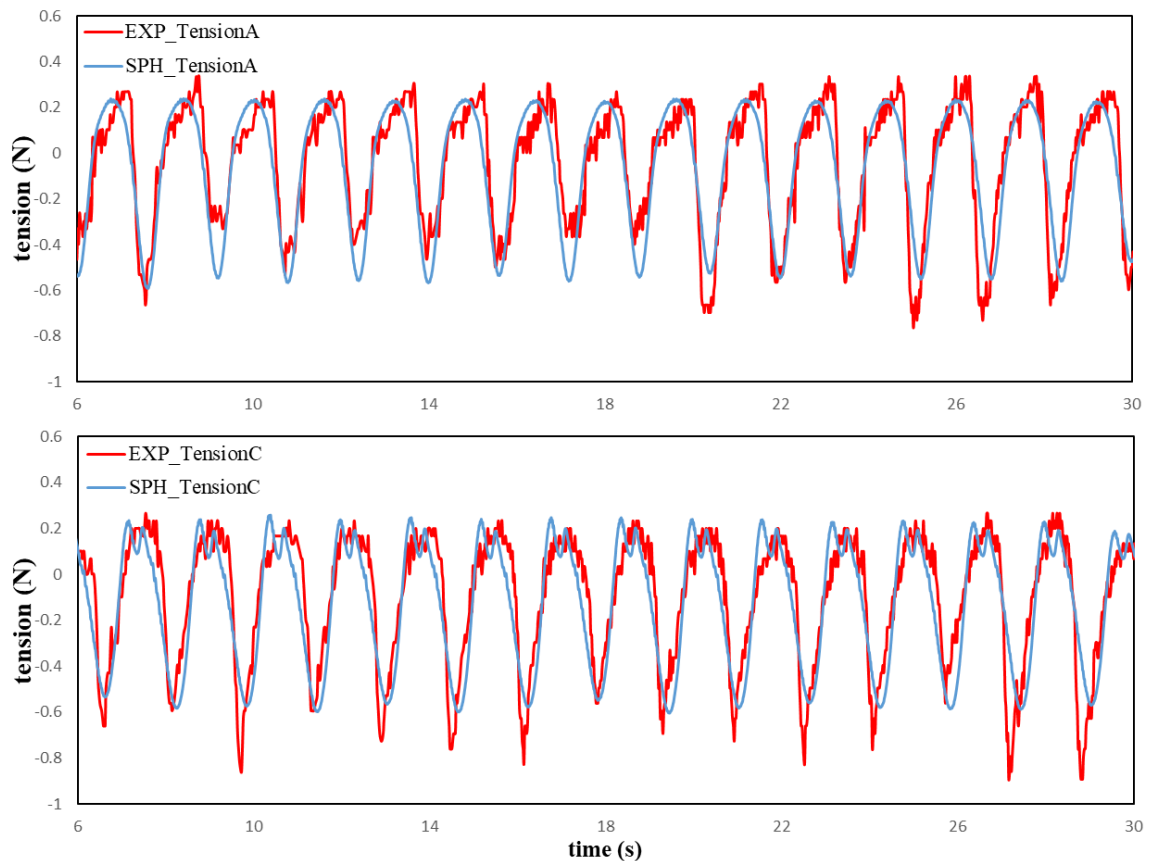


Figura 4-18: Comparación de la serie temporal experimental y numérica (en simulación 3D) de las tensiones en los amarres.

Los resultados de estas últimas comparativas entre datos numéricos y experimentales (Fig. 4-16, 4-17, 4-18) ponen de manifiesto la capacidad de DualSPHysics para simular objetos flotantes amarrados al fondo bajo la acción de oleaje regular.

Capítulo 5: **APLICACIÓN**



DualSPHysics permite no solo leer el movimiento del pistón durante el experimento (casos del Capítulo 4), sino también generar olas de manera automática. En este caso estudiaremos el comportamiento del OWC descrito anteriormente bajo la acción de diferentes olas regulares. Las características de estas olas pueden verse en la Tabla 5-1; diferentes alturas de ola (H), diferentes periodos de ola (T), la profundidad de la columna de agua d es constante siendo de 0.5 m.

Tabla 5-1: Diferentes condiciones de oleaje.

Caso	H (m)	T (s)
OWC11	0.08	1.6
OWC12	0.12	1.6
OWC13	0.16	1.6
OWC21	0.08	2.0
OWC22	0.12	2.0
OWC23	0.16	2.0

La Figura 5-3 muestra diferentes instantes del caso OWC12. El color de la superficie representa la velocidad horizontal del fluido.

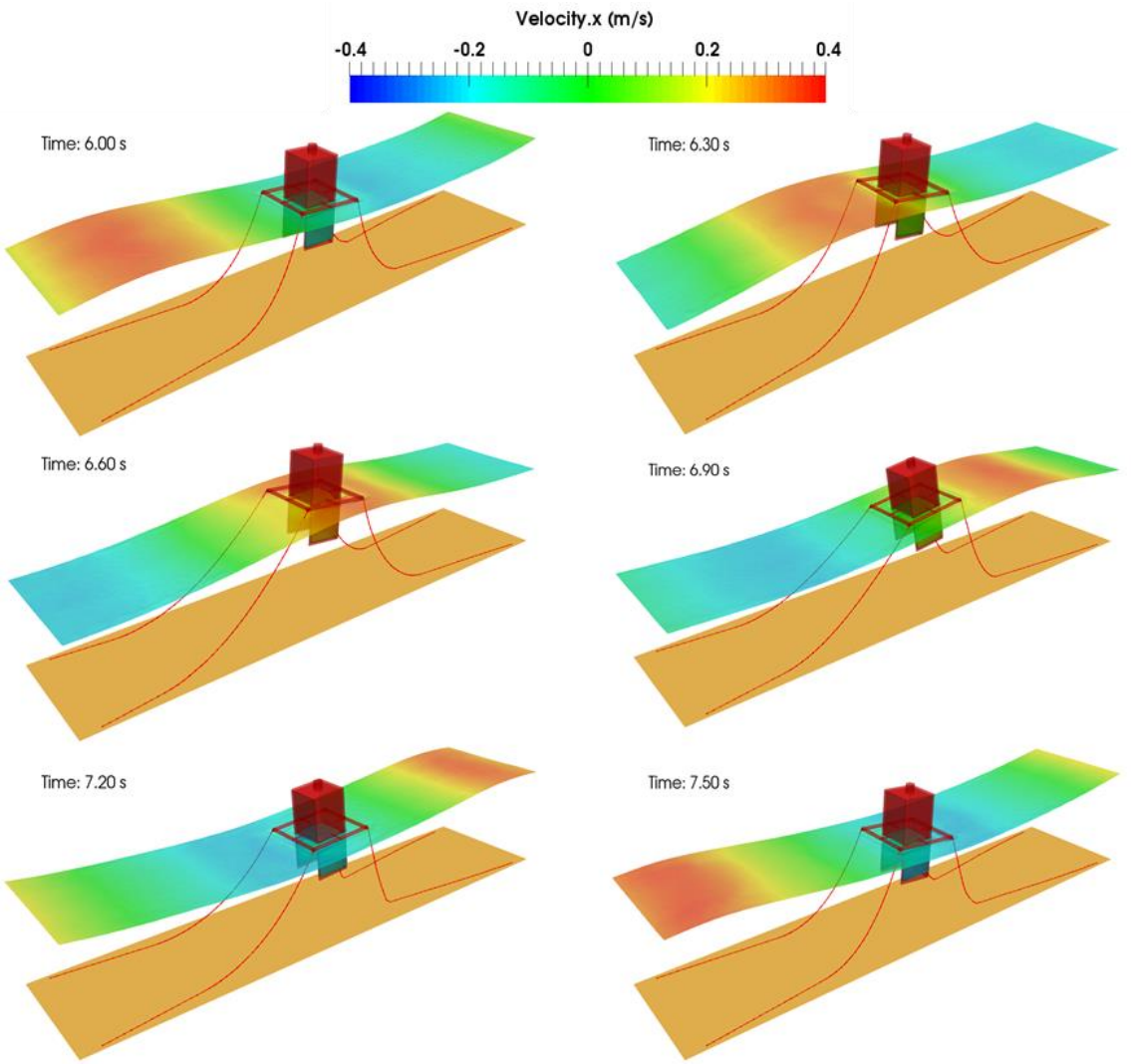


Figura 5-3: Diferentes instantes de la simulación del OWC flotante con amarres (OWC12).

Para evaluar la estabilidad del dispositivo flotante se analizan sus movimientos; traslación longitudinal (*surge*), traslación vertical (*heave*) y cabeceo (*pitch*). Estas magnitudes se obtienen usando las herramientas de post-procesado de DualSPHysics y sus series temporales se pueden ver en la Figura 5-4 y 5-5 para las olas con $T=1.6$ s y 2.0 s.

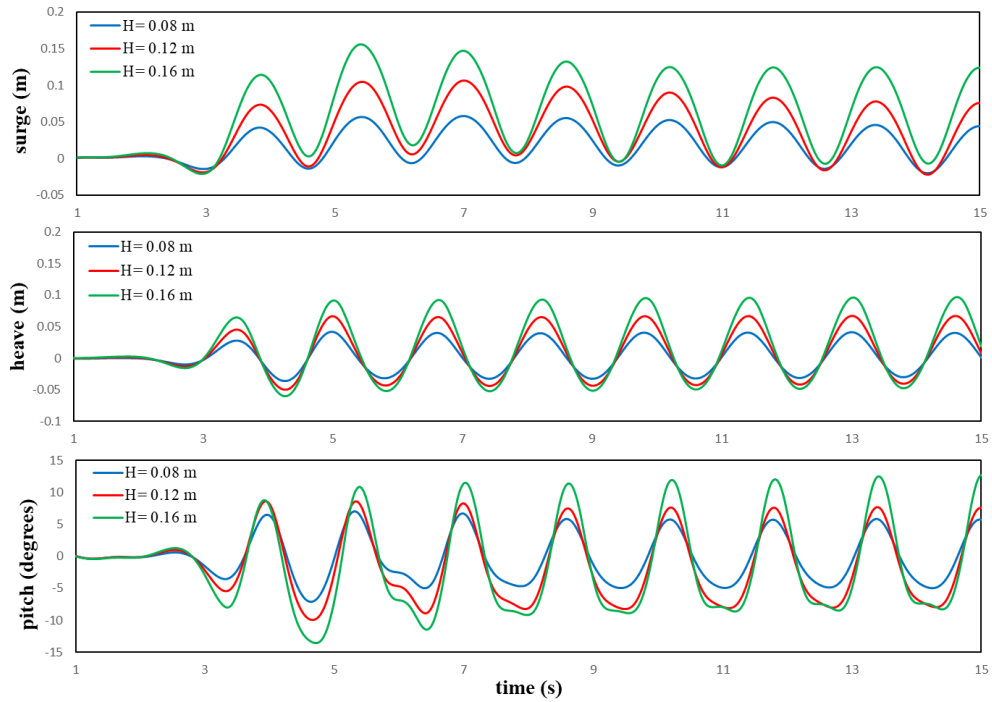


Figura 5-4: Serie temporal numérica de los movimientos del OWC flotante con amarres para diferentes alturas de ola (H) y mismo periodo $T=1.6$ s (OWC11, OWC12, OWC13).

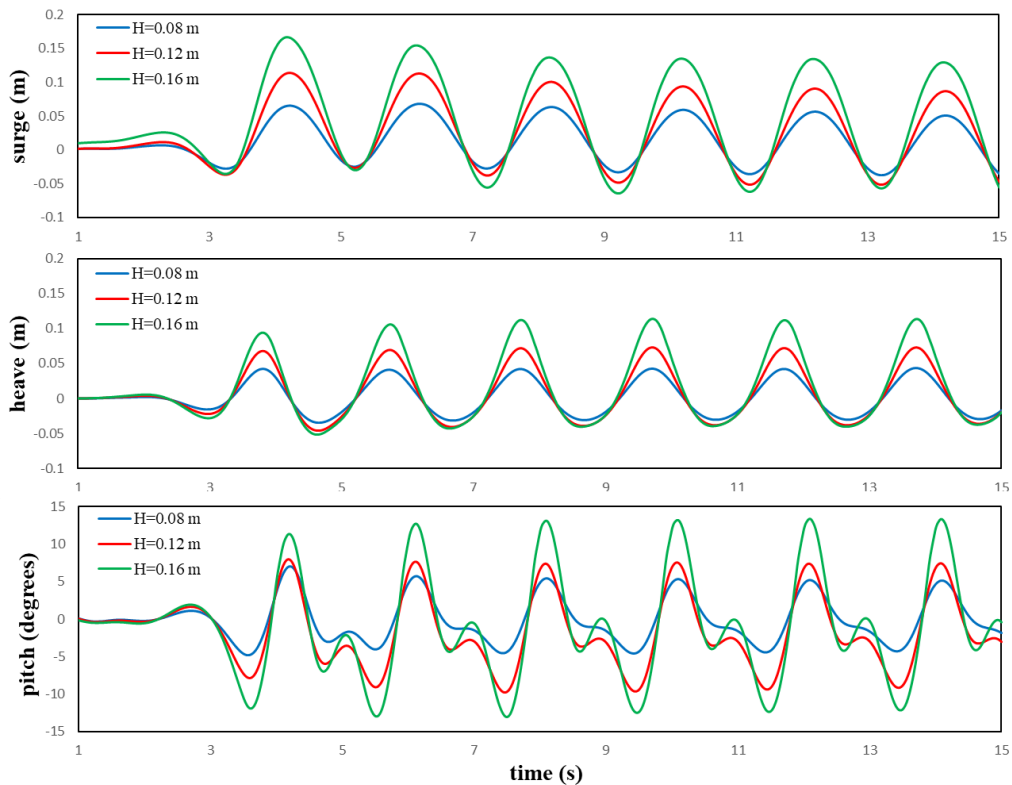


Figura 5-5 Serie temporal numérica de los movimientos del OWC flotante con amarres para diferentes alturas de ola (H) y mismo periodo $T=2.0$ s (OWC21, OWC22, OWC23).

Como se puede observar en esas dos últimas figuras, a medida que aumenta la altura de ola también aumentan las amplitudes de los movimientos de traslación y de rotación del OWC. Otro dato importante para analizar la estabilidad del OWC flotante son las tensiones en los amarres. Las Figuras 5-6 y 5-7 muestran los valores de tensión en uno de los dos amarres frontales (línea 3) y en uno de los de atrás (línea 1).

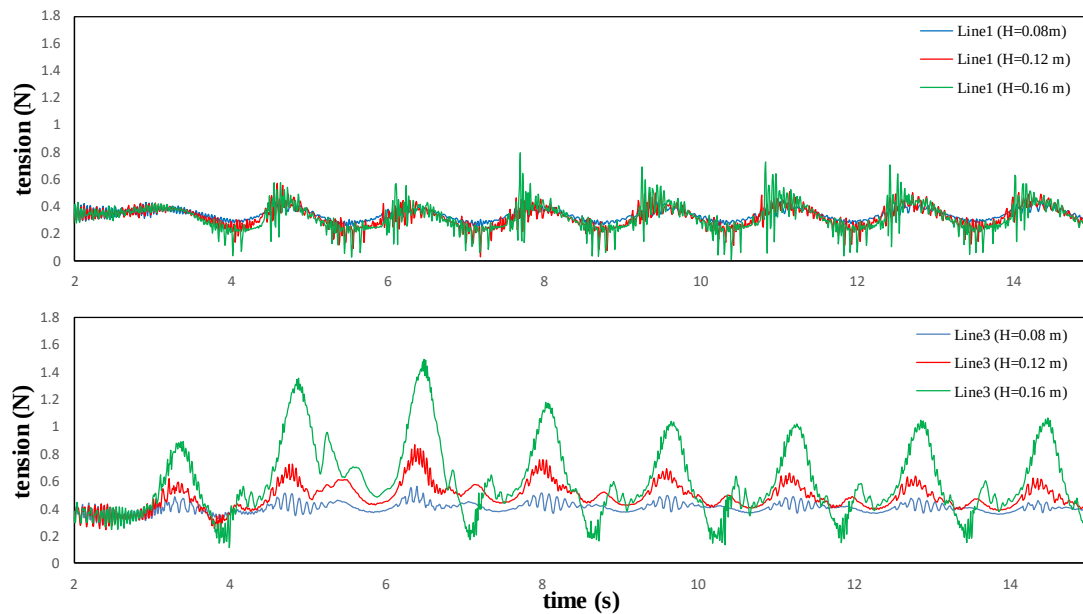


Figura 5-6: Serie temporal numérica de las tensiones en los amarres para diferentes alturas de ola (H) y mismo periodo $T=1.6$ s (OWC11, OWC12, OWC13).

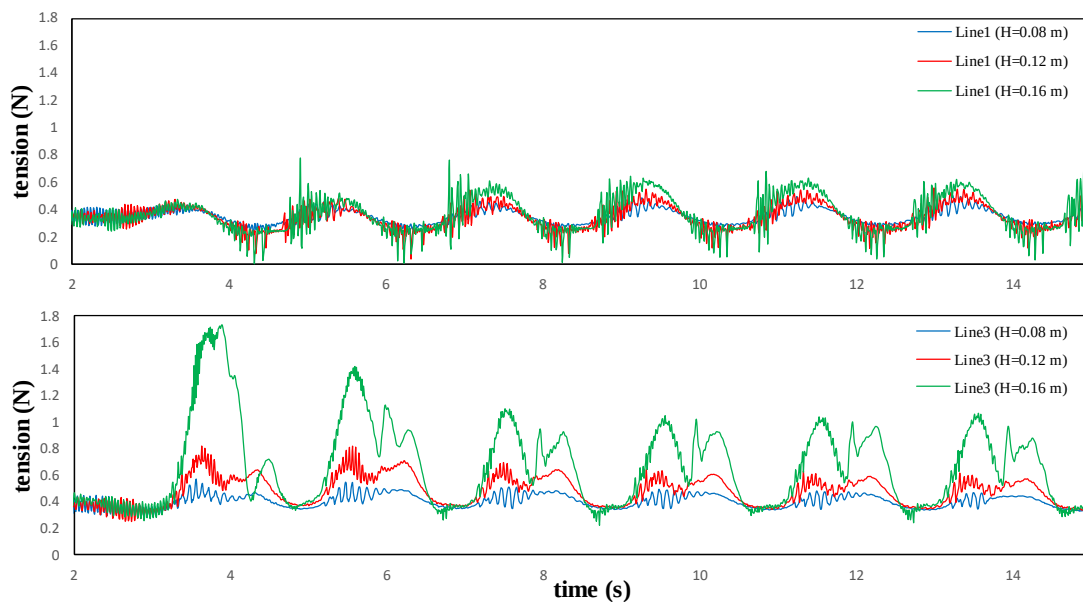


Figura 5-7: Serie temporal numérica de las tensiones en los amarres para diferentes alturas de ola (H) y mismo periodo $T=2.0$ s (OWC21, OWC22, OWC23).

En lo que se refiere a las tensiones, éstas aumentan según aumenta la altura de ola, puesto que los movimientos (Figuras 5-4 y 5-5) también aumentan con H . De hecho, los amarres tienen la función de limitar estos movimientos, pero valores muy grandes de las tensiones en casos extremos podría provocar la rotura de éstos poniendo en peligro al OWC.

Los movimientos del dispositivo flotante y las tensiones en los amarres nos permiten evaluar su estabilidad y supervivencia para diferentes condiciones de oleaje. Sin embargo, la eficiencia del dispositivo OWC vendrá determinada por la capacidad de comprimir (y descomprimir) el aire que hay en la cámara OWC. La variación de volumen del aire dependerá de la oscilación de la superficie del agua dentro de la cámara (WG8). En realidad, lo importante no es la oscilación del agua, sino el movimiento relativo entre la capa de agua dentro del OWC y el movimiento vertical del aparato.

En la Figura 5-8 se muestra la elevación de la superficie libre dentro de la cámara del OWC (WG8) y la traslación vertical (*heave*) para todas las olas simuladas. Los casos con una mayor diferencia entre estas dos magnitudes tendrán un mayor movimiento relativo y por lo tanto se comprimirá y descomprimirá mayor volumen de aire lo que generará más energía en la salida del aire por el orificio (turbina en modelo real).

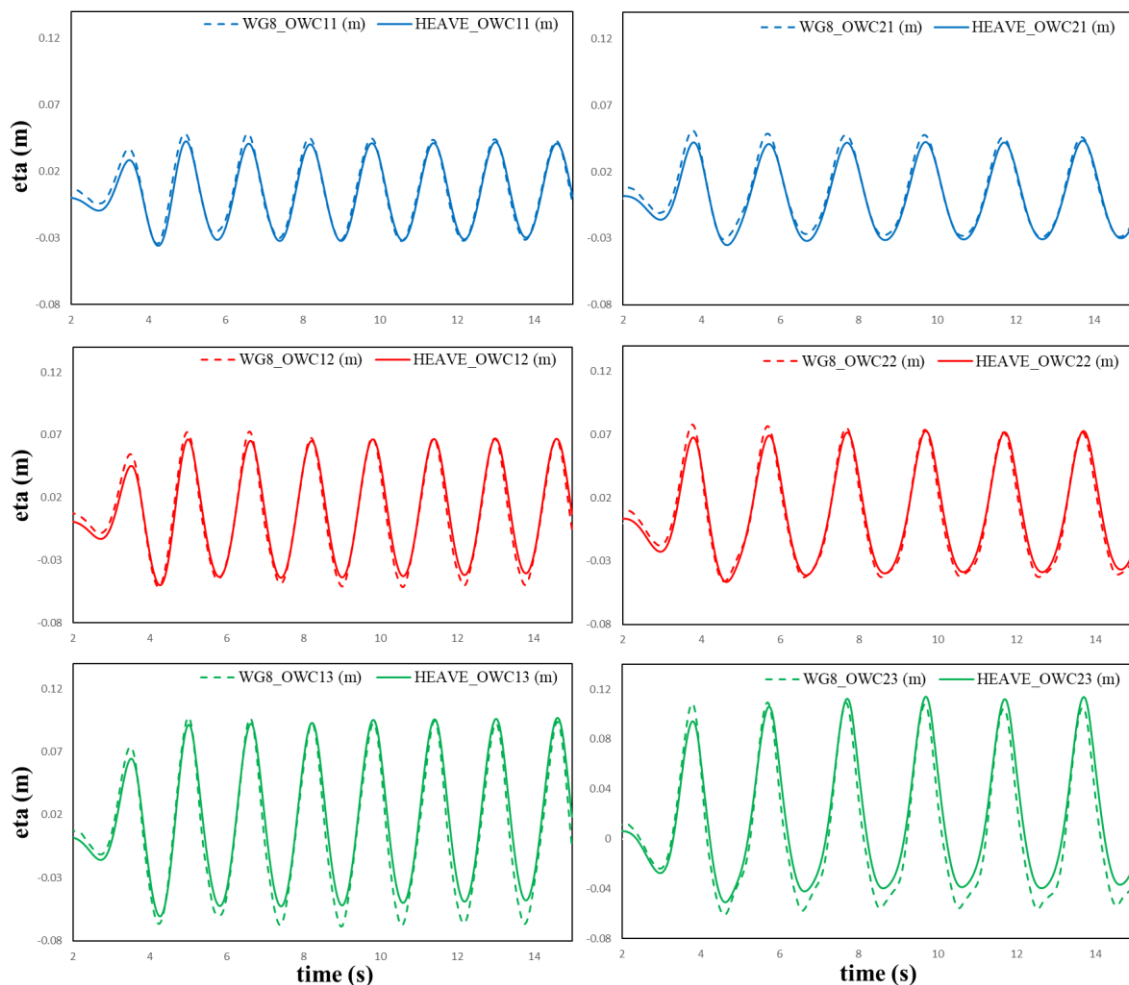


Figura 5-8: Comparativa entre la traslación vertical (*heave*) del OWC y la elevación de la superficie el agua dentro de la cámara (WG8).

Para visualizar mejor la diferencia entre la traslación vertical del OWC y la elevación de la superficie libre dentro de la cámara, ésta se calculó (*heave*-WG8) y representó en la Figura 5-9. En ambos casos las diferencias son mayores cuanto mayor es la altura de la ola. Además, en el caso de periodo mayor las diferencias se registran durante más tiempo.

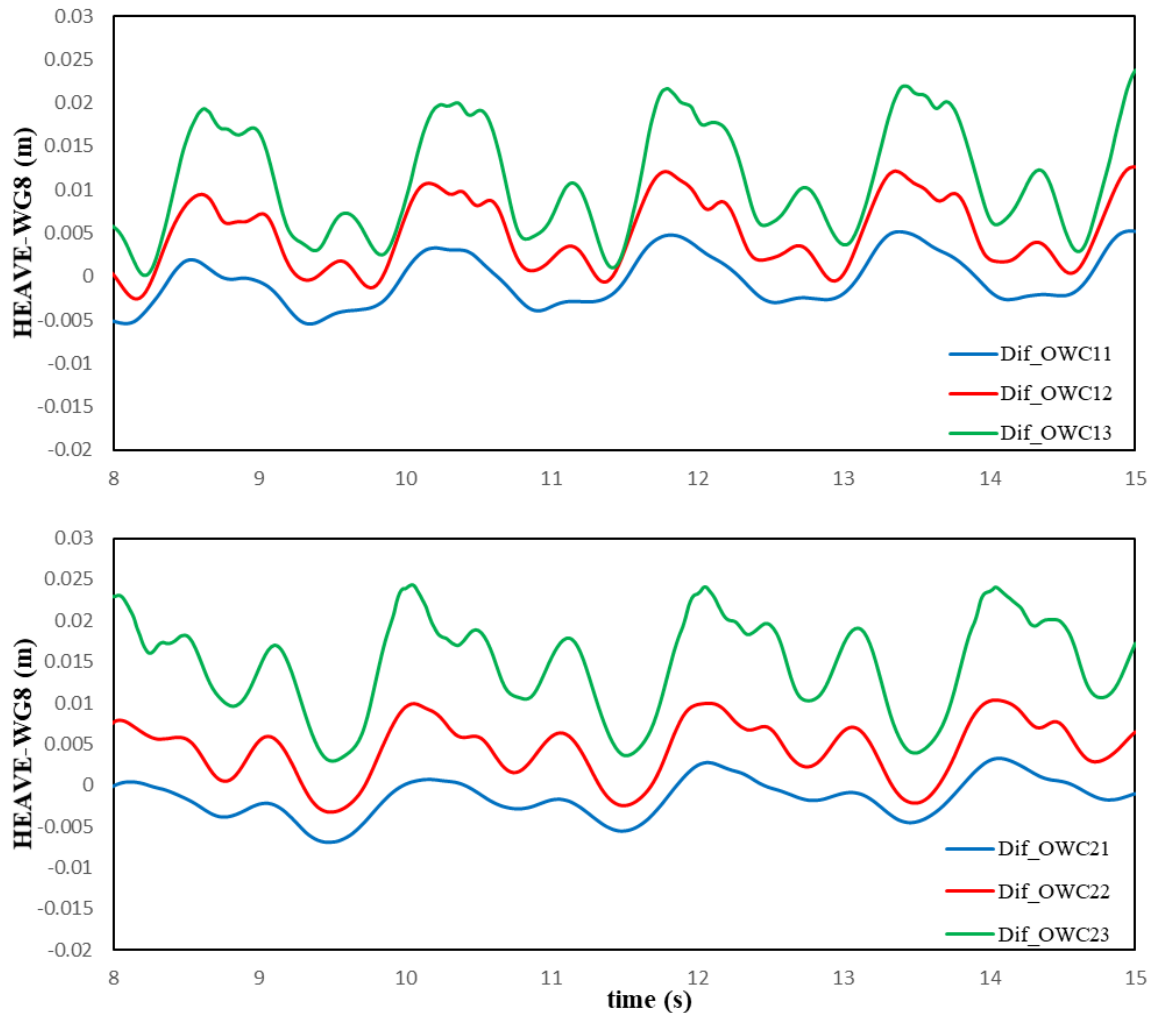


Figura 5-9: Diferencia entre traslación vertical (*heave*) y elevación de superficie de agua dentro del OWC (WG8) para diferentes alturas de ola y periodo.

La simulación de distintas condiciones de oleaje es muy útil para estudiar la respuesta del OWC. En este caso sólo se han simulado olas regulares, pero se podría extender el estudio a oleaje irregular, más representativo de las condiciones reales del mar. Además, lo más interesante sería simular olas extremas para analizar la supervivencia de los aparatos, donde es importante analizar los valores máximos de las tensiones en los amarres.

Capítulo 6:

CONCLUSIONES

El modelado numérico DualSPHysics permite analizar el rendimiento y optimizar los diseños actuales de generadores de energía undimotriz, así como ayudar en el diseño de nuevos prototipos minimizando costes.

Este tipo de sistema de software ha demostrado ser muy preciso para el estudio de la propagación de las olas y su interacción con estructuras flotantes con amarres, como el OWC de este trabajo. En los casos de validación, se han comparado datos experimentales (de IHCantabria y de la Universidad de Gante) y numéricos obteniéndose una gran concordancia entre ellos demostrando que la herramienta DualSPHysics es fiable para reproducir este tipo de casos.

Una vez que el modelo numérico ha sido validado y que se ha demostrado su capacidad para propagar olas y estudiar interacciones con estructuras flotantes amarradas al fondo, éste se aplica en el estudio y diseño de dispositivos de aprovechamiento de energía de las olas basadas en la tecnología marina OWC. En este caso en el estudio de uno OWC flotante diseñado por nosotros. De este modo, usamos DualSPHysics para diseñar un tanque numérico (con las mismas dimensiones que el de Gante y en su interior colocamos un OWC flotante con amarres a su fondo. Se realizaron simulaciones con distintas alturas y periodos de las olas regulares incidentes con el fin de estudiar el comportamiento del OWC para distintas condiciones. Se ha podido observar como a medida que aumentábamos la altura de ola se producía un aumento de los movimientos de traslación y rotación del OWC y también un aumento de la tensión en los amarres que lo sujetan.

DualSPHysics permite por lo tanto diseñar dispositivos OWC flotantes más eficientes. En este trabajo sólo se simularon diferentes condiciones de oleaje regular, pero se puede extender el estudio a oleaje irregular (más próximo al estado del mar real). Además, hay muchas otras variables que se pueden tener en cuenta para mejorar la eficiencia y supervivencia de los aparatos como son la geometría del aparato y diferentes disposiciones de los amarres. La herramienta numérica permite estudiar muchas variantes y analizar un montón de posibilidades que en un tanque físico sería más complicado por el tiempo y los costes. Sin embargo, hay que recordar que para simular el funcionamiento completo de un OWC es necesario simular también la compresión (y descompresión del aire) y en este caso la fase del aire no se está resolviendo. Es decir, la versión usada de DualSPHysics sólo simula la interacción del oleaje con la estructura y no está teniendo en cuenta el efecto del aire, el cual debería ir acoplado a las oscilaciones de la capa de agua dentro de la cámara. Todas estas tareas forman parte de una investigación futura.

El diseño numérico de dispositivos de captación de energía de las olas es una de las líneas de investigación que está emergiendo en el grupo EPHYSLAB de la Universidad de Vigo en colaboración con otros centros de investigación. Este tipo de energía marina cuenta con mucha financiación para su desarrollo y se considera un tipo de energía renovable con grandes perspectivas de futuro.

BIBLIOGRAFÍA

Altomare C., Crespo A.J.C., Rogers B.D., Domínguez J.M., Gironella X., Gómez-Gesteira M. (2014). Numerical modelling of armour block sea breakwater with Smoothed Particle Hydrodynamics. *Computers and Structures* 130, 34-45. doi:10.1016/j.compstruc.2013.10.011.

Altomare C., Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Gómez-Gesteira M., Suzuki T., Verwaest T. (2015). Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering* 96, 1-12.

Altomare C., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., González-Cao J., Suzuki T., Gómez-Gesteira M., Troch P. (2017). Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering* 127, 37-54 doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.06.004.

Bochert R., Zettler M.L. (2004). Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetismo* 25, 498-502.

Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Dalrymple R.A. (2007). Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods. *CMC: Computers, Materials, & Continua*, 5(3), 173-184.

Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Barreiro A., Gómez-Gesteira M. and Rogers B.D. (2011). GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods. *PLoS ONE* 6 (6), e20685, doi:10.1371/journal.pone.0020685.

Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Rogers B.D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R.B., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications* 187, 204-216.

Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M. (2013). Optimization strategies for CPU and GPU implementations of a smoothed particle hydrodynamics method. *Computer Physics Communications* 184(3), 617-627. doi:10.1016/j.cpc.2012.10.015.

Falcao, A.F. de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 899–918.

Falcao A.F. de O., Henriques J.C.C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy* 85, 1391-1424.

Gingold, R.A., Monaghan, J.J. (1977). Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 181, 375-389.

Hall M. (2018). MoorDyn User's Guide. [Online]: www.matt-hall.ca/moordyn.

Hall M., Goupee A. (2015). Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data, *Ocean Engineering* 104, 590–603.

IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). Evaluación potencial de la energía de olas. Estudio técnico (2011-2020).

IPCC (Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2011). Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático.

Iturrioz A., Guanche R., Lara J.L., Vidal C., Losada I.J. (2015). Validation of OpenFOAM for Oscillating Water Column three-dimensional modeling. *Ocean Engineering* 107, 222–236.

Langhamer O., Haikonen K., Sundberg J. (2010). Wave power, sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1329–1335.

Leijon M., Bostrom C., Danielsson O., Gustafsson S., Haikonen K., Langhamer O., et al. (2008) Wave energy from the North Sea: experiences from the Lysekil research site. *Surveys in Geophysics* 29, 221–40.

Liu G.R. (2003). *Mesh Free methods: Moving beyond the finite element method*, CRC Press.

Lucy L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal* 82, 1013-1024.

Masuda Y. (1979). Experimental full-scale results of wave power machine Kaimei in 1978. In: *Proceedings First Symposium Wave Energy Utilization*, Gothenburg (Sweden). 349–63.

Monaghan J.J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 30, 543- 574.

Monaghan J.J. (2005). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Rep. Prog. Phys* 68, 1703-1759.

Simonetti I., Cappietti L., Elsafti H., Oumeraci H. (2017). Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study. *Energy* 139, 1197-1209.

Vissio G., Passione B., and Hall M. (2015). Expanding ISWEC Modelling with a Lumped-Mass Mooring Line Model. *European Wave and Tidal Energy Conference*, Nantes (France).

Wace Hub. (2006). *Environmental Statement*. South West of England Development Agency.



Environmental | Physics | Laboratory

EPHysLab