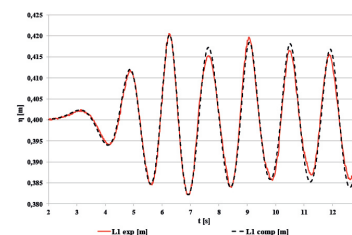


Caracterización experimental y numérica de un tanque de olas en 2D

Experimental and numerical characterisation of a 2D wave flume



Urko Izquierdo, Lander Galera-Calero, Iñigo Albaina, Gustavo-Adolfo Esteban, Ander Aristondo y Jesús-María Blanco

Escuela de Ingeniería de Bilbao. UPV/EHU. Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9244> | Recibido: 13/05/2019 • Inicio Evaluación: 16/05/2019 • Aceptado: 06/09/2019

ABSTRACT

• A wave flume of 12.5 x 0.6 x 0.7 m (length x width x height) able to reproduce the ocean conditions of the most representative research facilities in the Basque Country (BiMEP-Biscay Marine Energy Platform and Mutriku Wave Energy Plant) has been recently installed at the laboratory of Fluid Mechanics of the Faculty of Engineering in Bilbao. This new facility has the capacity of producing a wide range of monochromatic and panchromatic waves by a piston-type wavemaker. Several ultrasonic wave probes measure the surface elevation, and the wave energy is dissipated in a passive parabolic beach in order to diminish significantly the reflection along the flume. A numerical model based on Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations has been developed to represent the turbulence and Eulerian Volume of Fluid (VOF) unsteady approach in STAR-CCM+ CFD code to track the evolution of the free surface.

This numerical model has been validated with the corresponding experimental campaign covering a wide range of depths, wave heights, wavelengths and periods. Tests focused on the description of the basic hydrodynamic processes of wave generation and propagation, giving as a result the definition of the wavemaker to produce the required wave. Results were analysed together with the analytical solution based on potential flow theory. The experiments carried out in the present study establish the operational limits of the wave flume in terms of wave generation, propagation and extinction, defining the operational range of future experimental campaigns where wave interaction with floating structures, wave energy converters and mooring systems will be studied.

• **Keywords:** experimental wave flume, numerical wave flume validation, wave characterisation, BiMEP, renewable marine energy, CFD models.

RESUMEN

El laboratorio de mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao dispone recientemente de un tanque de olas de 12.5 x 0.6 x 0.7 m (largo x ancho x alto) capaz de reproducir las condiciones de mar que se dan en la infraestructura de investigación en energías renovables marinas más representativa del País Vasco (BiMEP-Biscay Marine Energy Platform y la Planta de Olas de Mutriku). Este nuevo equipo tiene la capacidad de generar un rango amplio de olas monocromáticas y pancromáticas a través de un generador de tipo pistón. La oscilación de la superficie libre

se mide a través de sondas de ultrasonido y la energía de la ola es disipada en la zona de extinción, con forma parabólica para disminuir de forma significativa la reflexión a lo largo del tanque.

Se ha desarrollado un modelo CFD en STAR CCM+ basado en las ecuaciones de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) para representar la turbulencia, y en la aproximación en estado no estacionario de Eulerian Volume of Fluid (VOF) para medir la elevación de la superficie libre.

Este modelo numérico ha sido validado mediante ensayos experimentales en un amplio rango de profundidades, alturas de ola, longitudes de onda y periodos. Los ensayos se basan en la descripción de procesos hidrodinámicos de generación y propagación de olas, y los resultados definen el generador para obtener la ola deseada. Los resultados fueron analizados junto con las soluciones analíticas obtenidas mediante la teoría de flujo potencial. Los experimentos llevados a cabo en el presente trabajo establecen los límites de operación del tanque de olas en lo que hace referencia a la generación, propagación y extinción, definiendo así los rangos de operación para futuros ensayos en los que se estudiará la interacción fluido-estructura con elementos flotantes, convertidores de energía de olas y sistemas de fondeo.

Palabras clave: tanque de olas experimental, validación de tanque de olas numérico, caracterización de oleaje, BiMEP, Energías renovables marinas, modelos CFD.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe una gran preocupación con respecto a la utilización de fuentes de energía renovables y sostenibles. Entre las posibilidades de producción de energía existentes, pocas de ellas realmente cumplen ambos significados, *renovable* – que puede ser renovado– y *duradero* – que puede mantenerse a lo largo del tiempo sin agotar los recursos o causar graves daños al medio ambiente–, que es el caso de la energía de las olas del mar. El enorme potencial de las olas del mar para la producción de energía limpia, segura y garantizada ha aumentado notablemente el interés de los países, los políticos, la industria y, por supuesto, la comunidad investigadora, que ahora se centra en el desarrollo tecnológico de convertidores de energía de las olas más eficientes (WECs) [1]. Aunque existen dispositivos basados en diferentes principios de trabajo que se están poniendo a prueba a escala real en mar abierto [2] y a escala reducida, es necesario seguir investigando en esta línea para mejorar la eficiencia del sistema completo. [3–6].

La investigación en *technology readiness level* (TRL) bajos, entre 1 y 4, normalmente se lleva a cabo haciendo uso de dos herramientas de investigación: por un lado, las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), permitiendo el análisis de numerosas situaciones de condiciones de funcionamiento / mar / dispositivos... a un coste relativamente bajo. Por otro lado, los canales y tanques de olas, que se utilizan para llevar a cabo pruebas experimentales a una escala reducida. Para esta tarea, se establece normalmente la semejanza reducida basada en el número de Keulegan-Carpenter (equivalente a la aplicación simultánea del número adimensional de Froude basado en la semejanza de efectos gravitacionales y la semejanza de Strouhal para fenómenos oscilatorios) para reproducir el efecto de las olas sobre modelos representativos de las tecnologías usadas para la extracción de energía offshore. Siendo uno de los objetivos conocer el comportamiento hidrodinámico a TRL superiores, ambas herramientas son usadas conjuntamente en las primeras etapas, permitiendo ahorrar costes e incertidumbres de diseño. Así, los modelos definidos numéricamente son validados con pruebas experimentales a una escala reducida (más rentable) y una vez que el modelo es validado, se considera apto para ser escalado según las leyes de semejanza correspondientes [7].

Las simulaciones CFD anteriormente mencionadas se basan en la construcción de lo que se denomina *numerical wave flume* o canal de olas numérico (CON) porque permite ejecutar experimentos virtuales. Varios investigadores han basado sus CONs en las ecuaciones de Boussinesq. Whittaker et al. y Orszaghova et al. [8,9] utilizaron ese enfoque para el estudio de desbordamiento en rompeolas inclinados. Aunque la mayoría de los tanques numéricos se diseñan con condiciones de frontera definidas como pared para simular las regiones de generación o extinción como Ren et al. [10], algunos otros, como Ni et al. [11] han utilizado fronteras abiertas. Ambos estudios se centran en un enfoque que prescindir del mallado, conocido como *Smoothed Particles Hydrodynamics* (SPH), siendo apropiada esta teoría para simular la interacción entre el fluido y la estructura. Zhang et al. [12] desarrollaron un método de diferencias finitas generalizadas, y López et al. [13] estudiaron un dispositivo OWC en un CON basado en las ecuaciones de *Reynolds averaged Navier-Stokes* (RANS).

Con respecto a los sistemas de generación de olas, existen diferentes generadores de olas numéricos en la literatura, y vienen resumidos en Windt C et al. [14]. La absorción activa puede ser considerada como una perturbación lineal en la generación de olas no lineales, según Schäffer y Jokobsen [15]. Lamentablemente, nuestro nuevo canal de olas no dispone de control activo todavía, pero esto no afecta al estudio de la generación de olas porque hemos considerado un intervalo reducido de tiempo, evitando la reflexión de onda, como se discutirá más adelante en la Sección 2.2. En cualquier caso, se está trabajando en ello para así poder hacer uso de ello en futuros trabajos.

Hay varias universidades e instituciones de investigación equipados con canales de olas de similares características, lo que refleja verdaderamente el enorme potencial de estas instalaciones para impulsar la investigación sobre las energías renovables. En la Universidad de Southampton existe un WEC para la distribución de agua conocido como columna de agua oscilante (OWC) bomba de ola, que fue probada en un canal de olas de 12 m de longitud [16]. En el Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa fue diseñado el generador de turbina de aire bi-radial que recientemente ha sido probado en el *Biscay Marine Energy Platform* (BiMEP) [17]. Además, se han llevado a cabo otros estudios relacionados con WECs [18-21] basados en experimentos llevados a cabo en canales de ola similares. A escala nacional, la Universidad de Santiago de

Compostela (España) ha publicado recientemente un estudio sobre la sensibilidad del rendimiento de un OWC respecto a la compresibilidad del aire [22]. Otros estudios previamente publicados se centran en el acoplamiento entre la turbina y la cámara de un OWC [23]. La Universidad Politécnica de Madrid (España) tiene un canal de olas en el que han sido llevados a cabo varios estudios relativos a esta cuestión. Uno de los recientemente publicados se basa en el rendimiento hidrodinámico de un OWC en forma de L [24]. Además de las instalaciones de investigación mencionadas anteriormente, el Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria), centro de investigación de referencia, tiene además de un canal de olas de 20.60 m de largo, 0.75 m de alto y 0.68 m de ancho, un tanque de olas de 28 m de largo, 8.6 m de ancho y 1.2 m de altura.

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización del canal de olas instalado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería en Bilbao. Esta caracterización engloba el determinar la capacidad del canal para la generación de olas de mar según los límites descritos por el diagrama de Le Méhauté [25], la validación del modelo computacional con respecto a la campaña experimental en el laboratorio, y una triple comparación de los resultados computacionales, experimentales y teóricos, según la teoría de olas. Por tanto, este estudio demuestra la capacidad para simular las olas que pueden ser producidas en el canal de olas, así como su adecuación con respecto a la teoría de olas.

2. APROXIMACIONES EXPERIMENTALES Y NUMÉRICAS

2.1. CANAL DE OLAS EXPERIMENTAL

Las olas del canal de olas experimental (COE) se generan utilizando el software comercial Delta-ASDA (V5). Este software controla el servo de accionamiento y el servomotor Delta AC (ASDA-A2 series). El servomotor está conectado a un actuador lineal de la serie K (tornillo sin fin modelo KM60-10), y éste a su vez, está conectado a la pala que está parcialmente sumergida en el agua. Por lo tanto, el movimiento rotatorio del servomotor comandado por el software, se transforma en un desplazamiento lineal de la pala, que es la responsable de la generación de olas. El software permite que la pala pueda generar un movimiento sinusoidal para la generación de olas, que se corresponde con un movimiento de aceleración-deceleración progresivo. La información correspondiente a la oscilación de la superficie libre se lleva a cabo mediante dos medidores de ultrasonidos (Pepperl+Fuchs, modelo UC500-L2-I-V15) que son controlados mediante un programa específico generado en LABVIEW [26]. Este software recoge los valores experimentales del desplazamiento de la superficie libre (η [m]) en función del tiempo (t [s]), con intervalos de tiempo de muestreo de $\Delta t = 10$ ms). Las principales propiedades de los equipos mencionados se detallan en una tabla disponible a través del enlace QR de la sección *material complementario*.

El software Delta ASDA ofrece la posibilidad de especificar la amplitud (A_p [m]) y periodo (T [s]) deseados de la pala como variables de entrada para establecer el movimiento oscilante lineal. Por lo tanto, la ola generada para una cierta profundidad de agua (h [m]) puede caracterizarse en términos de la velocidad de propagación (c [m/s]), la longitud (λ [m]), el periodo (T [s]) y la altura (H [m]). Los experimentos de laboratorio y las simulaciones fueron realizadas a varias profundidades (h [m] de 0.3, 0.4 y 0.5, respectivamente), utilizando diferentes amplitudes ($1.0 < A_p$ [mm] < 54.0) y periodos ($0.87 < T$ [s] < 2.02) con un generador de olas de tipo pistón.

El COE mide 12.5 m de largo, 0.60 m de ancho y 0.7 m de alto). La estructura consta de una plataforma de acero inoxidable rodeada

por paredes de vidrio templado y laminado. La posición del primer sensor de ultrasonidos está a 6.0 m de la pared situada detrás de la pala de generación, consiguiendo así un oleaje completamente desarrollado al llegar a ese punto de medida. La distancia entre los dos sensores de ultrasonidos es de 30 cm, según los criterios descritos en [27]. La longitud total del canal se puede dividir en tres secciones principales (véase la Fig. 1): la sección de generación de las olas, la de propagación, y la sección de extinción de oleaje. Esta última sección se trata de un sistema de absorción pasivo de diseño propio, con una superficie sólida con forma parabólica de 1.5 m de longitud y con altura y ángulo de inclinación ajustables.

2.2. CANAL DE OLAS NUMÉRICO

Los efectos físicos son modelados numéricamente mediante un modelo computacional 2D (STAR CCM+ v12.06) con una malla

computacional de diferentes tamaños en función de la profundidad. Sin embargo, la malla usada tiene menos de un millón de celdas con el fin de mantener el tiempo total de cada simulación por debajo de 15 horas utilizando una estación de trabajo IBM de 16 núcleos. Cada malla se compone de diferentes volúmenes de estudio; los volúmenes alrededor del generador de olas y la superficie libre tienen las celdas de menor tamaño a fin de obtener una mejor definición de estas zonas. Las funciones definidas por el usuario [28,29] son usadas para simular el movimiento de la pala y estudiar la elevación de la superficie libre en las secciones requeridas.

La geometría del CON se corresponde exactamente con la del COE, haciendo posible su simulación y por lo tanto, la validación del CON (Véase Fig. 2). El modelo numérico se define utilizando diferentes métodos: i) el modelo de turbulencia k- ϵ de dos ecuaciones resuelve las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y

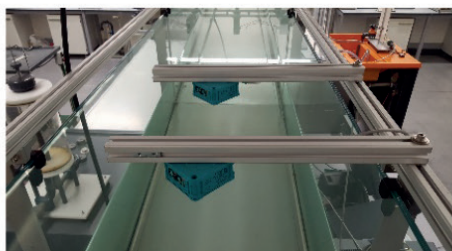
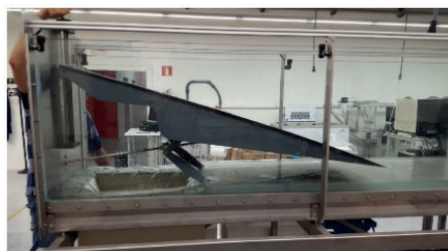
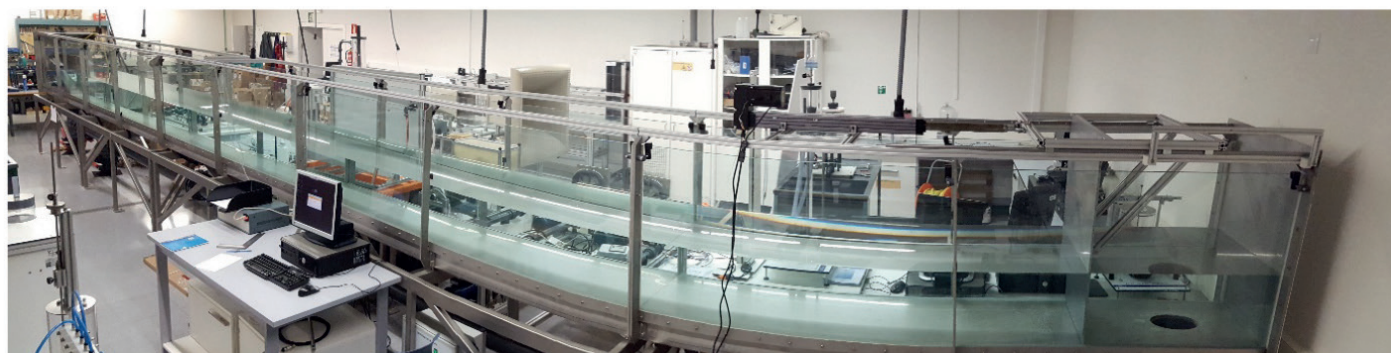
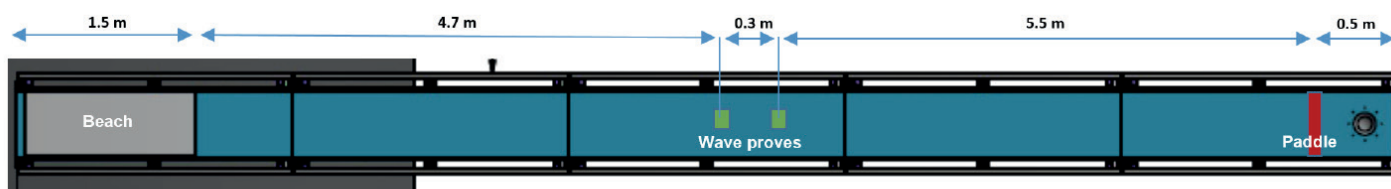


Fig. 1: Parte superior: Vista general del COE. Parte inferior (de izquierda a derecha): sistema de extinción de perfil parabólico, sensores de ultrasonido y sistema de generación de ola de tipo pistón

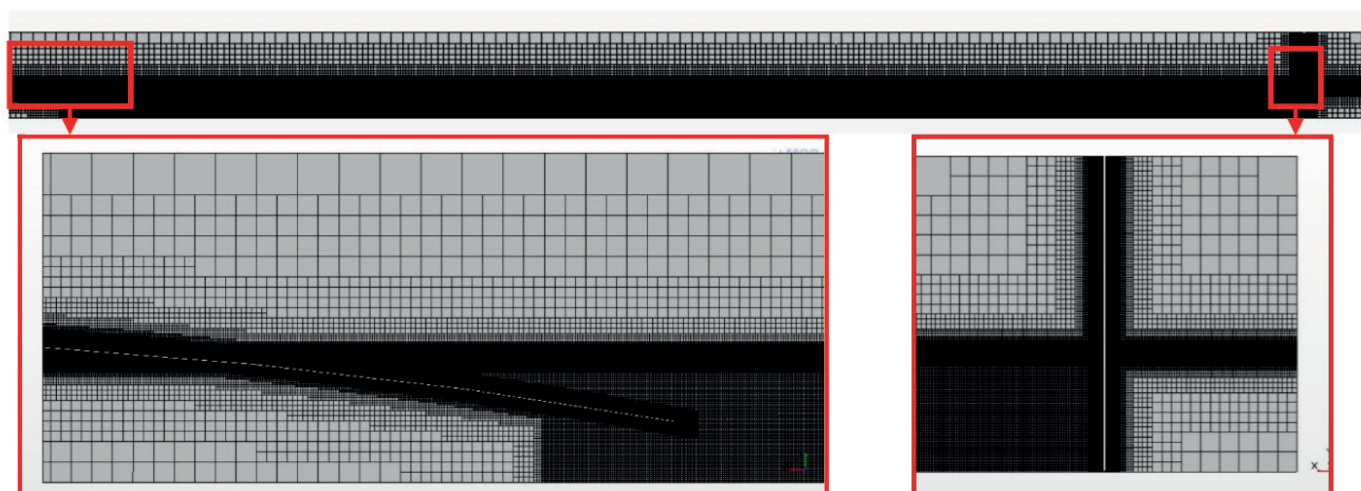


Fig. 2: Parte superior: Visión general de la malla computacional en el CON para $h=0.3$ m, con un tamaño base de celda de 0.1 m y un menor tamaño, de 2.7 mm, en las áreas de interés. Inferior: Detalle de las áreas de interés: playa parabólica en la zona de extinción (izquierda) y la pala de generación de olas (derecha)

Rango de valores de la wall y*	
Relación de aspecto de celda	0.78-0.95
Wall y* (en contacto con el aire)	0.05-1.00
Wall y* (en contacto con el agua)	0.7-4.0
Wall y* (superficie libre contacto)	4-18
Los modelos físicos y propiedades de la CON	
Modelo de turbulencia	El modelo de turbulencia k-ε
Definición del líquido	Eulerian multiphase
Interacción de fase	Volumen de líquido
Convección	2º orden
Límite del número de Courant	1-2.2
Intervalo de tiempo	0.002 (s)
Discretización temporal	Primer orden

Tabla I: Rango de valores de la wall y* y propiedades más importantes del modelo físico del CON

su tasa de disipación (ϵ) [14]. Este modelo se ajusta adecuadamente a los problemas que se tratan en la simulación, debido a su tratamiento de pared y su enfoque de dos capas para valores bajos ($y^+ < 1$), altos ($y^+ > 30$) e intermedios de la distancia a la pared. ii) El modelo implícito no-estacionario permite la simulación del comportamiento no-estacionario de flujo segregado. iii) El modelo físico *volumen of fluid* (VOF) es adecuado para simulaciones de flujos donde cada fase consta de una gran estructura con un área total de contacto relativamente pequeña entre fases [30]. Estos modelos permiten una simulación adecuada de la interacción entre dos grandes volúmenes de aire y agua en contacto [31]. La malla fue perfeccionada y refinada en las áreas de interés y se creó teniendo en cuenta la profundidad de cada estudio. Estas áreas son la de la pala que genera las olas, el área que ocupa la superficie libre y la de la playa parabólica. Estas áreas contienen las celdas de menor tamaño de toda la malla, 2.7, 3.3 y 1.5 mm para las profundidades de 0.3, 0.4 y 0.5 m, respectivamente. El área de la malla que estudia el volumen de agua que no está en contacto con el aire, tiene celdas con el doble de tamaño que las de las áreas críticas. Sin embargo, el área que estudia el aire tiene las celdas más grandes, con un tamaño de hasta 0.1 m. El número total de celdas varía en función de la profundidad del estudio, con el objetivo de optimizar el coste computacional de cada malla. Para 30 cm de profundidad la malla tiene 328297 celdas, para 40 cm 389292 celdas y para 50 cm 788005 celdas.

El valor de la wall y* fue estudiado a lo largo de la superficie de la pala para garantizar el estudio de los efectos viscosos en las zonas bajas e intermedias de la pala. Este valor varía según el volumen de líquido que está en contacto con la pala. Cuando la pala está en contacto con el aire, el valor de la wall y* es siempre inferior a 1.0. Este valor aumenta ligeramente cuando la pala está

en contacto con el agua. Sin embargo, alcanza el valor máximo cuando la pala está en contacto con la superficie libre y/o en el punto más cercano de la parte inferior del tanque, ya que son las zonas de mayor flujo turbulento. En todos los casos estudiados los valores de la wall y* están por debajo de 20, indicativo de que el mallado alrededor de la pala es adecuado.

Con el fin de definir la profundidad de cada simulación, la superficie libre fue definida mediante la coordenada y de las celdas que tienen agua en el momento inicial de la simulación. Además, se crearon dos planos de secciones verticales a 6.0 y 6.3 m del comienzo del CON, con el fin de reproducir los sensores de ultrasonidos instalados a la misma distancia en el COE. El movimiento de la pala fue simulado de acuerdo a una ecuación cosenoidal determinada mediante la relación entre la amplitud y el período de la pala:

$$U(t) = \frac{S}{T} \pi \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \tag{1}$$

En la Tabla I se definen los valores de la wall y* en función del fluido en contacto con la pala, junto con los modelos físicos más importantes y propiedades del CON.

3. RESULTADOS

La campaña experimental se determinó usando el gráfico adimensional de Le Méhauté. Según el informe publicado por BiMEP e IH Cantabria [32], las condiciones de mar en BiMEP se definen a través de la teoría de Airy [33] y la teoría no-lineal de Stokes [34], tanto en la región de aguas profundas como en la de aguas intermedias. Sin embargo, los resultados que se muestran en este trabajo no representan únicamente ciertas condiciones de BiMEP, también se llevan a cabo otras condiciones de mar correspondientes a la región de oleaje lineal y no lineal. Una vez especificada la profundidad de cada ensayo, se calculó el T y la A_p, siendo éstas las variables necesarias para cada experimento. Los resultados computacionales y experimentales fueron obtenidos en términos de elevación de la superficie libre (η [m]) en función del tiempo. En la Fig. 4, se puede observar la comparación de la elevación de la superficie libre en el COE y el CON.

Los resultados de la Fig. 4 muestran que la elevación de superficie libre en el COE y el CON son prácticamente iguales. Entre ellas no hay ninguna diferencia de fase importante, obteniendo como resultado un periodo y una velocidad de propagación de olas constantes. La coincidencia entre crestas y valles también es muy buena. Por lo tanto, se puede concluir afirmando que las simulaciones computacionales de la elevación de la superficie libre fueron satisfactorias. Todos los datos fueron procesados con Matlab R2019a. Las señales de los perfiles de elevación de la superficie libre fueron comparadas con la solución analítica de la teoría de olas correspondiente, Airy (lineal) o Stokes de 2º orden (no lineal), con el fin de obtener la ve-

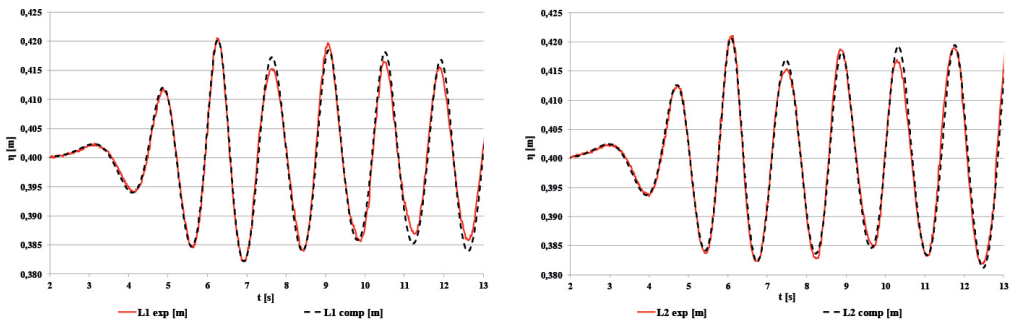


Fig. 4: Comparación de la elevación de la superficie libre entre las señales experimentales y computacionales en la posición del primer sensor (L1, izquierda) y el segundo (L2, derecha). Condiciones experimentales: h=0.40 m, A_p=39.9 mm y T=1.43 s

lidad de propagación de las olas (c [m/s]), la longitud (λ [m]), el periodo (T [s]) y la altura de ola (H [m]). Estas teorías se definen de la siguiente manera:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + k \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{1}{\tanh(kh)} \left(1 + \frac{3}{2 \sinh^2(kh)} \right) \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3)$$

Los parámetros que definen cada perfil de ola se recogen en una tabla disponible a través del enlace de QR en la sección *material complementario*, donde se exponen los errores relativos entre las señales experimentales y computacionales, y la relación teórica para H , T , λ y c . Estos errores se definen de la siguiente manera:

$$x_{error} = \frac{X_{exp} - X_{comp}}{X_{exp}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$x_{error} = \frac{X_{theor} - X_{comp/exp}}{X_{theor}} \cdot 100 \quad (5)$$

Los resultados representados en dicha tabla confirman nuevamente la buena aproximación computacional y la precisión de las

medidas en el COE. En la validación (comparación entre los valores del CON y los de referencia del COE), fueron medidos errores relativos por debajo del 5% para H , T , λ y c . Sin embargo, se obtuvieron errores significativos en la altura de la ola cuando se comparaban estas señales con los resultados teóricos, algo que también fue observado en estudios previos de los autores [35]. En general, esto ocurre cuando el periodo es bajo, la altura de la ola es pequeña o las condiciones de operación se encuentran cerca de la región de ondas de aguas profundas ($h/\lambda > 0.5$).

Una vez se obtuvieron todos los parámetros, fue posible obtener la señal teórica según las ecuaciones descritas en (2) y (3). Estas se comparan con las señales experimentales y computacionales como puede verse en la Fig. 5.

La Fig. 5 muestra únicamente los primeros nueve segundos de simulación; este hecho es debido a que después de este intervalo de tiempo la primera ola generada alcanza nuevamente la posición de los sensores de ultrasonidos, ya que son parcialmente reflejadas en la playa, imposibilitando la comparación entre las señales experimentales/computacionales con las teóricas. Durante el periodo de tiempo analizado, la señal teórica basada en la teoría de Stokes de orden 2 muestra una buena correlación cuando se compara con las señales obtenidas experimental y computacionalmente.

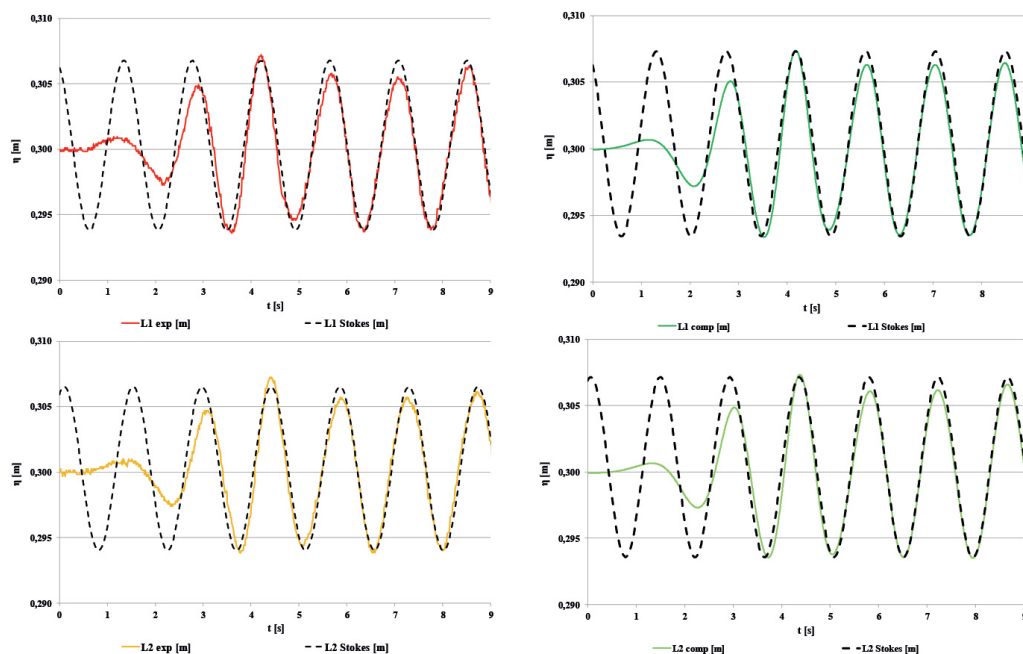


Fig. 5: Evolución de la superficie libre experimental (izquierda) y numérica (derecha) medida por L1 (superior) y L2 (inferior) y comparadas con la teoría de Stokes de segundo orden (línea continua). Condiciones experimentales: $h=0.30$ m, $A_p=17.7$ mm y $T=1.43$ s

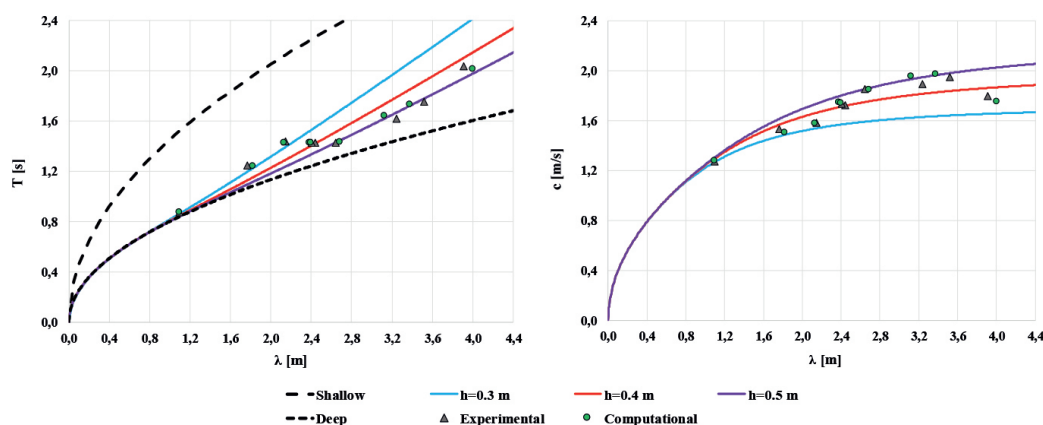
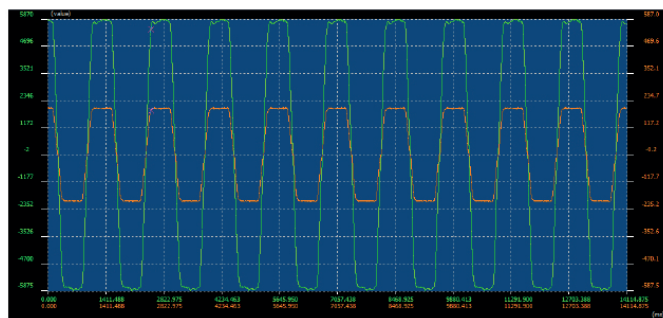


Fig. 6: Los resultados experimentales y computacionales representados en función de la longitud de onda (λ) según el periodo (a la izquierda) y la velocidad de propagación de la ola (derecha)

La Fig. 6 muestra los resultados experimentales y computacionales para T y c en función de λ para el COE y el CON. Las teorías de Airy y Stokes generalmente predicen mejor el comportamiento de las olas en aguas intermedias (aguas no muy profundas con respecto a la longitud de ola). Por tanto, pueden esperarse resultados similares para ambas teorías con respecto a la longitud de onda, el periodo y la profundidad del agua:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (6)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) = \frac{\lambda}{T} \quad (7)$$



la amplitud y el periodo especificados. Además, permite programar los experimentos según el periodo de la pala, es decir, el periodo de la ola, siendo así más eficaz porque la ola deseada se genera directamente. Con respecto al CON, la especificación del movimiento en un perfil cosenoidal de la pala se consigue simular de una forma totalmente realista. Los resultados presentados en este estudio han sido obtenidos mediante este método.

Además, es importante resaltar la mejora continua de la malla. Hasta la fecha, se ha creado una malla centrándose en el movimiento de la pala y las áreas de interés, teniendo en cuenta la geometría del canal y el área de propagación de las olas en función de la altura de ola. Esto permite la reducción del tamaño de las celdas

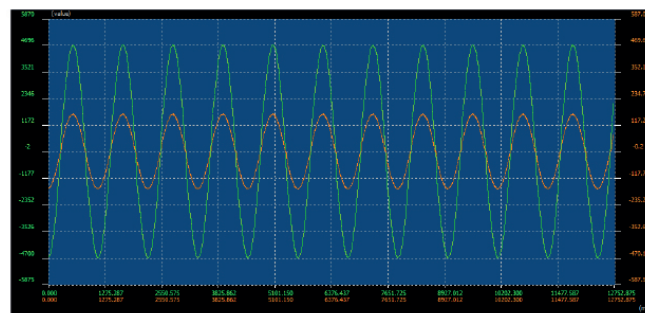


Fig. 7: Izquierda: Movimiento de la pala según perfil de pulsos. Derecha: Movimiento de la pala según perfil cosenoidal. En ambos casos se muestra la posición (en verde) y velocidad (en naranja) de la pala en función del tiempo

Además, el COE y el CON muestran resultados acordes con la solución teórica de la teoría del *wavemaker* [36] para los generadores de tipo pistón y de tipo *flap*.

Los gráficos en la Fig. 6. muestran muy buenos resultados para el COE y el CON en comparación con la solución teórica, estando éstos muy próximos los unos de otros para todos los experimentos realizados a distintas profundidades.

4. DISCUSIÓN

Como se ha observado, los resultados experimentales y computacionales muestran una buena aproximación entre sí en términos de desplazamiento de superficie libre. Centrándose en los parámetros c , λ y T , se podría concluir afirmando que la validación del modelo computacional ha sido satisfactoria para todos los experimentos llevados a cabo, así como también si se comparan con la solución teórica.

El periodo que define el movimiento de la pala es una cuestión clave, y por dicho motivo se ha ido progresivamente mejorando. Inicialmente la pala seguía un movimiento similar al de un perfil de pulsos, que podría definirse perfectamente a través de una función escalón: un intervalo de tiempo breve acelerando hasta alcanzar la velocidad deseada, el tiempo definido a la velocidad especificada y la deceleración correspondiente hasta llegar a la velocidad negativa máxima, para repetir nuevamente el proceso (véase la Fig. 7 - izquierda). Numéricamente, este movimiento fue simulado sin considerar los intervalos de tiempo de aceleración-deceleración de la pala y, por lo tanto, suponiendo que la pala sólo se mueve a la velocidad máxima especificada. Este enfoque era válido en términos de periodo y se obtuvieron mejores resultados a la hora de simular la altura de ola.

Sin embargo, se sabe que el periodo de la pala debe ser el mismo que el de la ola, y que las olas regulares se definen a través de una función de tipo coseno. Por lo tanto, utilizando el software Delta-ASDA [37], se ha especificado un perfil cosenoidal para programar el movimiento de la pala (véase Fig. 7 - derecha). Este perfil hace que la pala acelere o desacelere progresivamente, de acuerdo con

por debajo de 1.0 mm, con la consiguiente mejora de la precisión del CON. Esta cuestión es importante porque la resolución de los sensores de ultrasonidos es 1.25 mm.

5. CONCLUSIONES

El canal de olas instalado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería en Bilbao, reproduce las condiciones oceánicas más representativas de las instalaciones de investigación en energías renovables offshore del País Vasco, a escala de laboratorio. Las características de esta instalación la hacen única en la Comunidad Autónoma del País Vasco para el diseño, la prueba y la mejora de prototipos a escala de laboratorio y bajos TRLs.

Los resultados presentados en este trabajo muestran la capacidad de adaptar el canal y las mediciones que se llevan a cabo en él a los tipos de experimentos y condiciones experimentales deseadas. Además, la capacidad de reproducir los experimentos numéricamente hace que el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao esté perfectamente equipado para llevar a cabo cualquier tipo de estudio relacionado con las energías renovables offshore a bajos TRLs. Asimismo, para simulaciones en las cuales se requiera una resolución/coste computacional mucho mayor, la Universidad del País Vasco dispone del Cluster *Arina* que posee 3,728 núcleos.

Próximamente se acondicionará el tanque de olas para poder generar oleaje irregular, ya que este tipo de oleaje representa fielmente las condiciones del mar. Además, también se estudiará el efecto de reflexión mediante la caracterización de la playa a través de los correspondientes coeficientes de reflexión, siguiendo el estudio realizado por M. Isaacson et al. [27]. Este estudio permitiría la comparación entre las señales del COE y el CON durante intervalos de tiempo más largos y el cálculo de los coeficientes de reflexión de cada posición de playa utilizada. El estudio de la reflexión puede considerarse como un punto de partida para posteriormente poder llevar a cabo otros experimentos relacionados con el estudio de la hidrodinámica de estructuras flotantes, junto con sus sistemas de amarre correspondientes.

REFERENCIAS

- [1] Faines J. "A Review of Wave-Energy Extraction". *Marine Structures*. Vol.20 (2007) p.185–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>.
- [2] Falcão AFO. "Wave Energy Utilization : A Review of the Technologies". *International Journal of Marine Energy*. Vol.14 (2010) p.899–918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>.
- [3] Rusu L, Onea F. "Assessment of the performances of various wave energy converters along the European continental coasts". *Energy*. Vol.82 (2015) p.889–904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.099>.
- [4] Rusu L, Onea F. "The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power". *Renewable Sustainable Energy Reviews*. Vol.75 (2016) p.1348–1362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.123>.
- [5] Rusu L. "The wave and wind power potential in the western Black Sea". *Renewable Energy*. Vol.139 (2019) p.1146–1158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.017>.
- [6] Rusu E, Onea F. "Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands". *Renewable Energy*. Vol.85 (2016) p.687–703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.042>.
- [7] Falcão AFO and Henriques JCC. "Model-Prototype Similarity of Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters". *International Journal of Marine Energy*. Vol.6 p.18–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2014.05.002>.
- [8] Whittaker CN, Fitzgerald CJ, Raby AC, et al. "Extreme coastal responses using focused wave groups: Overtopping and horizontal forces exerted on an inclined seawall". *Coastal Engineering*. Vol.140 (2018) p.292–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.08.004>.
- [9] Orszaghova J, Taylor PH, Borthwick AGL, et al. "Importance of second-order wave generation for focused wave group run-up and overtopping". *Coastal Engineering*. Vol.94 (2014) p.63–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.08.007>.
- [10] Ren B, He M, Li Y, et al. "Application of smoothed particle hydrodynamics for modeling the wave-moored floating breakwater interaction". *Physics Procedia*. Vol.67 (2017) p.277–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.011>.
- [11] Ni X. "A SPH numerical wave flume with non-reflective open boundary conditions". *Ocean Engineering*. Vol.163 (2018) p.483–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.034>.
- [12] Zhang T, Ren YF, Yang ZQ, et al. "Application of generalized finite difference method to propagation of nonlinear water waves in numerical wave flume". *Ocean Engineering*. Vol.123 (2016) p.278–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.038>.
- [13] López I, Pereiras B, Castro F, et al. "Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS – VOF numerical model". *Applied Energy*. Vol.127 (2014) p.105–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.020>.
- [14] Windt C, Davidson J, Ringwood JV. "High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems : A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks". *Renewable Sustainable Energy Reviews*. Vol.93 (2018) p.610–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.020>.
- [15] Schäffer HA, Jakobsen KP. "Non-linear wave generation and active absorption in wave flumes." in: *Long Waves Symposium*. Thessaloniki (2018) p. 69–77.
- [16] Magagna D. "Oscillating Water Column Wave Pump: A Wave Energy Converter for Water Delivery". University of Southampton, 2011.
- [17] Carrelhas AAD, Gato LMC, Henriques JCC et al. "Test Results of a 30 kW Self-Rectifying Biradial Air Turbine-Generator Prototype". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.109 (2019) p.187–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.008>.
- [18] Ribeiro S, Silva E, Gomes RPF, et al. "Hydrodynamic Optimization of the UGEN: Wave Energy Converter with U-Shaped Interior Oscillating Water Column". *International Journal of Marine Energy*. Vol.15 (2016) p.112–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2016.04.013>.
- [19] Henriques JCC, Lopes MFP, Gomes RPF, et al. "On the Annual Wave Energy Absorption by Two-Body Heaving WECs with Latching Control". *Renewable Energy*. Vol.45 (2012) p.31–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.102>.
- [20] Lopes BS, Gato LMC, Falcão AFO, et al. "Test Results of a Novel Twin-Rotor Radial Inflow Self-Rectifying Air Turbine for OWC Wave Energy Converters". *Energy*. Vol.170 (2019) p.869–879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.078>.
- [21] Henriques JCC, Gato LMC, Gomes RPF, et al. "Latching Control of a Floating Oscillating-Water-Column Wave Energy Converter". *Renewable Energy*. Vol.90 (2016) p.229–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.065>.
- [22] López I, Carballo R, Taveira-pinto F, et al. "Sensitivity of OWC performance to air compressibility". *Renewable Energy*. Vol.145 (2020) p.1334–1347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.076>.
- [23] López I, Iglesias G. "Efficiency of OWC wave energy converters: A virtual laboratory". *Applied Ocean Research*. Vol.44 (2014) p.63–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.11.001>.
- [24] Rezanejad K, Souto-iglesias A, Soares CG. "Experimental investigation on the hydrodynamic performance of an L-shaped duct oscillating water column wave energy converter". *Ocean Engineering*. Vol.173 (2019) p.388–398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.009>.
- [25] Le Méhauté, B. "An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves". New York: Springer-Verlag, 1976. ISBN: 978-3-642-85567-2.
- [26] National Instruments. LabVIEW 2016 (64-Bit). <http://www.ni.com/download/labview-development-system-2016/6055/en/>.
- [27] Isaacson M. "Measurement of Regular Wave Reflection". *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*. Vol.117 (1991) p.553–569. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:6\(553\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(553)).
- [28] Anbarsooz M, Passandideh-Fard M, Moghiman M. "Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks". *Ocean Engineering*. Vol.59 (2013) p.73–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.11.011>.
- [29] Saincher S, Banerjee J. "Design of a numerical wave tank and wave flume for low steepness waves in deep and intermediate water". *Procedia Engineering*. Vol.116 (2015) p.221–228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.394>.
- [30] User guide. STAR-CCM + ® Documentation. 2015.
- [31] Garcia N, Lara JL, Losada I. "2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters". *Coastal Engineering*. Vol.51 (2004) p.991–1020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.017>.
- [32] BIMEP and IH Cantabria. Metocean Analysis of BiMEP for Offshore Design. March, 2017.
- [33] Airy GB. Tides and Waves. Vol. 5. In Hugh James Rose et al. *Enciclopedia Metropolitana*. London. Mixed Sciences. 1845.
- [34] Stokes, G. On the Theory of Oscillatory Waves. *Transaction of the Cambridge Philosophical Society*, vol.8, p.441. 1847.
- [35] Izquierdo U, Esteban GA, Blanco JM, et al. "Experimental Validation of a CFD Model Using a Narrow Wave Flume". *Applied Ocean Research*. Vol.86 (2019) p.1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.02.012>.
- [36] Robert GD and Robert AD. "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists Advanced Series on Ocean Engineering". Cornell University, USA. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1984. ISBN: 9810204205.
- [37] Electronics, Delta. Delta Electronics. 2019, <http://www.deltaww.com/>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y humano proporcionado por IZO-SGI SGiker de la UPV/EHU, por David (Mecánica Moderna S.A.) y por los Fondos Europeos (FEDER y FSE). Los autores agradecen también la financiación recibida por el Gobierno Vasco a través del proyecto KK-2016/00031 y del grupo de investigación IT1314-19 y a la UPV/EHU a través por el proyecto PES17/25.

MATERIAL COMPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9244-1.pdf



NOMENCLATURA

A_p	La amplitud de la pala [L]
BIMEP	Biscay Marine Energy Platform
c	Velocidad de propagación de la ola [L/T]
CFD	Dinámica de fluidos computacional
COE	Canal de olas experimental
H	Altura de ola [L]
h	Profundidad [L]
IST	Instituto Superior Técnico
k	Número de onda [L ⁻¹].
L_1	Posición de la primera sonda [L]
L_2	Posición de la segunda sonda [L]
CON	Canal de olas numérico
OWC	Columna de agua oscilante

RANS	Reynolds averaged Navier-Stokes
SPH	Smoothed Particles Hydrodynamics
T	Período [T]
t	Tiempo [T]
TRL	Technology readiness level
VOF	Volume of fluids
ω	Velocidad angular [T ⁻¹]
WECs	Wave energy converters
x	Posición de la pala [L]
Δt	Intervalo de tiempo [T]
η	Desplazamiento de la superficie libre [L]
λ	Longitud de onda [L]