

Simulación numérica de una columna de agua oscilante para las condiciones de ola del océano Pacífico colombiano

Numerical Simulation of an Oscillating Water Column for the Wave Conditions of the Colombian Pacific Ocean

 Juan Parra-Quintero ¹;
 Ainhoa Rubio-Clemente ²;
  Edwin Chica ³

¹ Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia,
juan.parra@udea.edu.co

² Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia,
ainhoa.rubioc@udea.edu.co

³ Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia,
edwin.chica@udea.edu.co

ISSN-p: 0123-7799
ISSN-e: 2256-5337

Vol. 26, nro. 57, e2630, 2023

Recibido: 4 enero 2023
Aceptado: 6 junio 2023
Disponible: 27 julio 2023

©Instituto Tecnológico Metropolitano
Este trabajo está licenciado bajo
una Licencia Internacional
Creative Commons Atribución
(CC BY-NC-SA)



Cómo citar / How to cite

J. Parra-Quintero, A. Rubio-Clemente, E. Chica, "Simulación numérica de una columna de agua oscilante para las condiciones de ola del océano Pacífico colombiano," *Tecnológicas*, vol. 26, nro. 57, e2630, 2023. <https://doi.org/10.22430/22565337.2630>

Resumen

La energía de las olas es una de las fuentes menos explotadas en Colombia. La columna de agua oscilante (OWC, por siglas en inglés) puede ser una tecnología sostenible para generar electricidad en zonas de difícil acceso utilizando la energía disponible en el océano Pacífico. En la actualidad, Colombia carece del desarrollo de estos dispositivos; sin embargo, hay esperanzas centradas en la energía de las olas como alternativa factible para proporcionar energía renovable en las zonas no interconectadas (ZNI) del país. En este trabajo, se pretende simular numéricamente una OWC para las condiciones del océano Pacífico colombiano, por lo que se empleó la dinámica de fluidos computacional a través del programa ANSYS Fluent para modelar una OWC ubicada en la orilla. Esta investigación alcanza la etapa de simulación numérica; sin embargo, puede ser llevada a estudios experimentales a pequeña escala. La eficiencia máxima de la cámara resonante simulada y la velocidad media de la superficie libre de la columna de agua para la geometría estudiada fueron 66.81 % y 0.118 m/s, respectivamente. El análisis de sensibilidad de los factores geométricos que describen la cámara resonante del dispositivo frente a diversas condiciones de mar podría ser de crucial interés para mejorar su eficiencia hidrodinámica.

Palabras clave

Columna de agua oscilante, convertidor de energía de las olas, energía de las olas, energía oceánica, modelado computacional.

Abstract

Ocean wave energy is one of the least exploited sources in Colombia. The oscillating water column (OWC) can be a sustainable technology to generate electricity in hard-to-reach areas using the energy available in the Pacific Ocean. Currently, Colombia lacks the development of these devices; however, there are hopes focused on wave energy as a feasible alternative to provide renewable energy in non-interconnected zones (NIZ) in the country. In this work, it is intended to numerically simulate an OWC for the Colombian Pacific Ocean conditions, so computational fluid dynamics was used through ANSYS Fluent program to model an onshore OWC. This research reaches the numerical simulation stage, however, it can be taken to small-scale experimental studies. The maximum chamber efficiency and the media free surface velocity of the water column for the studied geometry were 66.81 % and 0.118 m/s, respectively. Sensitivity analysis of the geometrical factors describing the resonant chamber of the device against various sea conditions could be of crucial interest to improve its hydrodynamic efficiency.

Keywords

Oscillating water column, wave energy converter, wave energy, ocean energy, computational modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayoría de los países a nivel mundial apuntan a abastecer su demanda energética interna a partir de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) [1], [2]. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el 90 % de la meta de reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) que se requiere a nivel global para el año 2050 dependerá de una mayor incorporación de energías renovables, del uso cada vez más eficiente de los recursos y de la electrificación de las sociedades y la economía [3].

Colombia no es ajena a este planteamiento, de ahí que en su plan energético nacional (PEN), entre una de las estrategias para reducir la vulnerabilidad del sector energético, está la búsqueda de diversificar la matriz de generación eléctrica en todas las cadenas de suministro, aumentando su disponibilidad y confiabilidad [4], [5]. La inclusión de FNCER en el mercado eléctrico colombiano permitirá al país reducir significativamente sus emisiones de CO_2 y cumplir con sus compromisos y políticas a mediano y largo plazo [6]. Entre las diferentes opciones de energías renovables, la energía marina tiene un futuro prometedor, considerando que más del 70 % de la superficie terrestre es agua de mar y que existe gran potencial de energía de las olas [7]. Dado que en Colombia se espera que a 2030 el 15 % de la energía provenga de FNCER [5], [8], y con el ánimo de contribuir con una canasta energética competitiva, íntegra, diversa, segura e incluyente en todo el territorio (especialmente en las ZNI), es indispensable avanzar hacia el desarrollo, estudio e inclusión de nuevos sistemas de aprovechamiento de las FNCER que permitan aportar nuevo conocimiento en materia de simulación numérica y desarrollo de prototipos para la diversificación de la canasta energética y generación distribuida en las ZNI de Colombia. Las principales limitaciones actuales, están dadas por los escasos estudios, desarrollos y construcciones de dispositivos (a baja y gran escala) que aprovechen la energía disponible de las FNCER pero, sobre todo, que generen poca afectación al medio ambiente y bajo costo. En ese sentido, en muchas investigaciones se pretende, en primera instancia, estudiar analítica y computacionalmente los dispositivos (a pequeña escala) para comprender en profundidad el principio de operación y contribuir con nuevas formas de diseño, reducción de costos y tiempo de desarrollo.

Para S. S. Prakash et al. [9], las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía. La potencia transportada por la ola depende de la altura y del periodo, y es usualmente dada en unidades de potencia entre unidades de longitud (W/m), que representa la potencia por metro de frente de ola. En el caso específico de Colombia, se ha analizado la variabilidad de las olas y la morfología de los principales deltas a lo largo del Caribe y el Pacífico colombiano [10]. Portilla y colaboradores [11] estudiaron las condiciones del oleaje en cuatro localizaciones para el océano Pacífico colombiano, los investigadores encontraron que la media de altura significativa de ola (H) y la media del periodo (T) fueron 1.01 m y 6.14 s en Tumaco; 1.13 m y 7.53 s en Gorgona; 0.96 m y 8.21 s en Buenaventura; y 1.17 m y 10.61 s en Bahía Solano, respectivamente.

El potencial undimotriz de Colombia es bajo si se compara con otros lugares alrededor del mundo en países como Portugal, Escocia, España, India y China; sin embargo, este gran recurso disponible se podría aprovechar para la complementariedad del sistema energético nacional, en especial en los meses de verano donde hay menos lluvia, ocasionando una menor capacidad de generación de energía hidroeléctrica por los bajos niveles de los ríos y embalses. Cuando esto sucede, las plantas térmicas complementan el sistema de generación, ocasionando alza en los precios de la energía eléctrica y aumento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), los cuales, son compuestos gaseosos como el dióxido de carbono (CO_2), hidrofluorocarbono (HFC), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), entre otros, que

retienen calor en la atmósfera terrestre capturando la radiación emitida por la Tierra [12], [13].

El potencial undimotriz también podría ser usado para el abastecimiento de zonas no interconectadas en el país. En el caso de la complementariedad del sistema energético colombiano con centrales que aprovechen la energía undimotriz, estas se deberían instalar cerca de centros urbanos con disponibilidad de una red de distribución.

En el mundo, se han desarrollado y patentado más de 1000 convertidores de energía de las olas (WEC, por sus siglas en inglés), entre ellos, la columna de agua oscilante (OWC, por sus siglas en inglés), que ha sido considerada como uno de los dispositivos más exitosos y prometedores a nivel mundial, así como uno de los pocos dispositivos que ha alcanzado la etapa de prototipado [14]. De hecho, una de las instalaciones de OWC más relevantes del mundo se encuentra situada en Mutriku, País Vasco (España) [15], la cual fue diseñada por la compañía Wavegen y cuenta con una capacidad máxima de hasta 300 kW [16].

Los dispositivos OWC han sido estudiados extensamente mediante el empleo de modelos físicos, teóricos y numéricos. La geometría de la cámara resonante de una OWC se puede mejorar sin costosas construcciones ni pruebas de fabricación mediante simulaciones computacionales con consideraciones de ingeniería. La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se encarga de simular computacionalmente el comportamiento de los fluidos mediante métodos numéricos y computacionales donde se involucra una serie de etapas de preprocesamiento, formulación matemática, discretización, resolución numérica y postprocesamiento [17]– [19]. Se ha afirmado que usando CFD, a diferencia de métodos como teoría potencial u ondas lineales, es más adecuado para simular la generación de vórtices próximos a la estructura de OWC [20]. El análisis bajo ondas lineales funciona bien para pequeñas amplitudes de ola si la sección transversal de la cámara es constante a lo largo del eje que es igual al que domina la dirección de la gravedad. A diferencia de los softwares de CFD, como OpenFOAM, STAR CCM+, CFX, In house, Flow-3D, entre otros. ANSYS Fluent se ha empleado predominantemente para analizar el comportamiento hidrodinámico de las OWC. Este software tiene algunas ventajas, modelos de turbulencia, esquemas de discretización y funciones definidas por el usuario flexibles y apropiadas para simular un canal de olas [20]– [24]. Algunas investigaciones han usado ANSYS Fluent bajo el método VOF para rastrear la interfaz agua-aire [24]– [26]; otras han implementado la herramienta OpenFOAM para simulaciones de flujo de dos fases [27]– [29]. Se ha encontrado que Fluent es una herramienta computacional bastante completa, lo que justifica su amplio uso [30]– [32].

En este documento, se presenta la etapa de simulación numérica de una OWC adaptada a las condiciones del Océano Pacífico colombiano a escala de laboratorio utilizando un tanque de olas numérico en 2D sobre la base de la dinámica de CFD, empleando el programa ANSYS Fluent para resolver las ecuaciones de Navier Stokes promediadas de Reynolds (RANS).

En este trabajo, en primer lugar, se presentan los materiales y métodos usados para realizar simulación numérica caracterizando el recurso undimotriz en la zona de estudio. En segundo lugar, se describen los resultados obtenidos en cuanto a independencia tanto espacial como temporal y las variables hidrodinámicas propias de la OWC estudiada. Este artículo es una extensión del trabajo presentado originalmente en el Congreso Internacional de Ingeniería – IC EXPOI 2022.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características de las olas

Una ola se puede caracterizar bajo parámetros como la altura, longitud y la amplitud de onda, dados por H , λ y A , respectivamente, así como, la elevación de la superficie libre de agua (η) y profundidad (h) en la cual se propagan las olas. Estas características se pueden ver en la Figura 1 [33].

Adicionalmente, se ha encontrado que la elevación de la superficie libre del agua (η) a cualquier distancia horizontal (x) e instante de tiempo (t) puede ser determinada por la teoría analítica de onda de Airy dada por (1).

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \tag{1}$$

Donde H es la altura de ola, h es la profundidad, t es el tiempo, k y ω representan el número de ola y frecuencia angular que pueden ser calculadas como $2\pi/\lambda$ y $2\pi/T$, respectivamente.

El periodo de ola (T) puede ser calculado mediante la teoría de Stokes dada por (2) [34].

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{\tanh(2\pi h/\lambda)g}} \tag{2}$$

Hasta este punto, es imprescindible caracterizar el recurso undimotriz propio a las condiciones del oleaje del océano Pacífico colombiano. Anteriormente, los estudios marítimos se basaban en observaciones visuales y empíricas realizadas por buques; sin embargo, las boyas han sido introducidas durante las últimas décadas como una buena opción para monitorear las olas del mar [35]. Estas condiciones del oleaje fueron reportadas previamente por boyas ubicadas estratégicamente en Bahía Solano, Tumaco, Gorgona y Buenaventura [11], según se detalla en la Tabla 1. Estos dispositivos flotantes estaban en zonas de 130 m de profundidad, donde permitieron medir y registrar las características de las olas. En Buenaventura se podría encontrar olas mínimo de 0.7 m cerca de la costa y 1.5 m en la región oceánica, pudiendo llegar incluso a los 2.3 m [35].

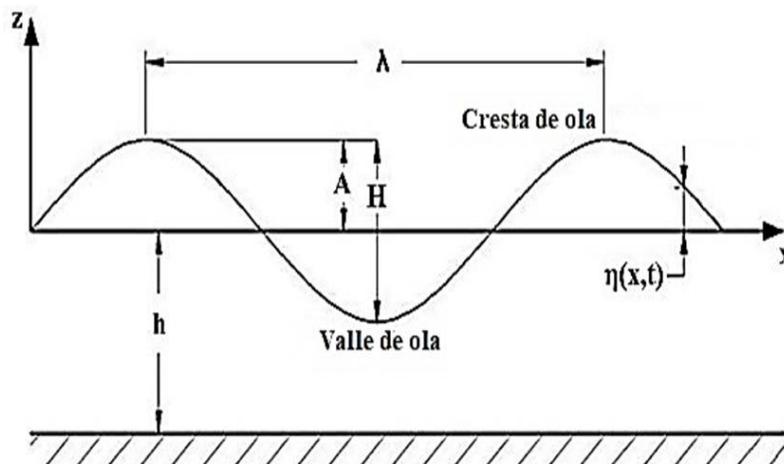


Figura 1. Caracterización de las olas. Fuente: [33].

Tabla 1. Parámetros estadísticos de las olas observadas. Fuente: [11]

	Inicio	Final	Media H_{m0}	Mediana H_{m0}	Max H_{m0}	Media $T_{m-1.0}$	Mediana $T_{m-1.0}$	Max $T_{m-1.0}$
Tumaco	Dic 2009	Dic 2012	1.01	1.00	2.19	6.86	6.14	17.79
Gorgona	May 2011	Oct 2012	1.13	1.12	2.27	7.76	7.53	21.46
Buenaventura	May 2011	Feb 2013	0.96	0.92	2.18	8.21	7.83	17.23
Solano	Jun 2011	Jul 2011	1.17	1.15	1.91	10.61	10.77	24.45

Teniendo en cuenta que para modelar las condiciones de olas reales en un canal debe ser implementado un factor de escala adecuado, se han encontrado buenos resultados considerando el análisis de similitud para las condiciones de estado de mar [36]– [38]. En ese sentido, según lo descrito por Portilla y compañeros [11], la similitud dinámica y cinemática deben existir entre la naturalidad y el prototipado de olas para que los resultados experimentales puedan ser escalados.

Para simular una OWC en un canal de olas numérico (NWT, por sus siglas en inglés), el método de escalado de Froude ha sido ampliamente usado por diversos autores [31], [37], [39], [40]. En este sentido, se utilizó la similitud de Froude porque permite representar un sistema OWC equivalente entre el modelo y la escala completa con las mismas escalas dimensionales, siendo así geoméricamente idénticos [37]. Los factores de escala (S) que fueron tenidos en cuenta en esta investigación fueron los reportados por [41]. La relación de velocidad es, por lo tanto, $S^{1/2}$, y la escala geométrica o razón de distancia es S . La relación de escala de tiempo también es $S^{1/2}$ (ver Tabla 1).

De acuerdo con lo señalado por Elhanafi et al. [42], en esta investigación se seleccionó un factor de escala S equivalente a 50 con miras a simular las características de olas a escala de laboratorio (1:50). Las características del oleaje para el Océano Pacífico colombiano y sus valores para el modelo de canal escalado en esta investigación son presentadas en la Tabla 2.

Teniendo en cuenta: i) el factor de escala (1:50) usado para simular en un canal de olas las condiciones del Océano Pacífico colombiano, ii) el potencial de energía de las olas incidentes dado por (5), iii) la longitud onda a escala reducida, y iv) T dado por la (4), se ha encontrado que el contenido energético de olas incidentes podría ser calculado en función de h , H y T . Teniendo en cuenta lo representado en la Tabla 3, se puede observar la cantidad de potencia disponible a través de las olas para el canal numérico usado en esta investigación. Cabe resaltar que todas las simulaciones numéricas realizadas fueron bajo una altura de ola ($H= 0.02$ m), longitud de onda ($\lambda= 1.47$ m) y profundidad ($h= 0.225$ m), acorde con lo usado por Letzow [43] para la escala definida en este estudio (1:50).

Tabla 2. Escalado de variables mediante el criterio de Froude. Fuente: [41].

Variable	Dimensión	Factor de escala
Longitud	[L]	S
Tiempo	[T]	$S^{1/2}$
Altura de ola	[L]	S
Periodo de ola	[T]	$S^{1/2}$
Presión	[ML ⁻¹ T ⁻²]	S
Velocidad	[LT ⁻¹]	$S^{1/2}$
Flujo volumétrico	[L ² T ⁻¹]	$S^{3/2}$
Energía por metro	[MLT ⁻²]	S^3
Potencia por metro	[MLT ⁻³]	$S^{5/2}$

Tabla 3. Características de onda escaladas dinamicamente. Fuente: [34].

Variable	H (m)	T (s)	λ (m)
Condición de ola del océano (h_{\min} , H_{\min} - T_{\max})	0.96	10.61	175.73
Condición del canal de olas	0.02	1.50	3.52
Condición de ola del océano (h_{\min} , H_{\max} , T_{\max})	1.17	10.61	175.73
Condición del canal de olas	0.02	1.50	3.52
Condición de ola del océano (h_{\max} , H_{\max} - T_{\min})	1.17	6.86	73.47
Condición del canal de olas	0.02	0.97	1.47
Condición de ola del océano (h_{\max} , H_{\min} - T_{\min})	0.96	6.86	73.47
Condición del canal de olas	0.02	0.97	1.47

Tabla 4. Potencia disponible en un canal de olas bajo diferentes combinaciones de H, T y h Fuente: elaboración propia.

P_{inc} (W)	h (m)									
	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.225	0.2	0.1	
0.10	9.415	9.545	9.795	10.251	11.004	12.014	12.622	12.683	11.134	
0.08	6.025	6.109	6.269	6.560	7.042	7.689	8.078	8.117	7.126	
H (m)	0.06	3.389	3.436	3.526	3.690	3.961	4.325	4.544	4.566	4.008
0.04	1.506	1.527	1.567	1.640	1.761	1.922	2.020	2.029	1.781	
0.02	0.377	0.382	0.392	0.410	0.440	0.481	0.505	0.507	0.445	
T (s)	0.971	0.973	0.976	0.984	1.003	1.048	1.124	1.165	1.528	

2.2 Parámetros hidrodinámicos

El rendimiento de OWC (ε) puede ser evaluado mediante (3) en términos de la relación que existe entre la potencia de ola incidente (P_{inc}) y la potencia neumática que se obtiene a la salida (P_{out}) donde se encuentra el PTO, tal como lo define [37].

$$\varepsilon = \frac{P_{out}}{P_{inc}} \tag{3}$$

La potencia disponible durante un periodo de ola está dada por (4), donde E es la energía total por periodo de ola y C_g es la velocidad de grupo dada, respectivamente, por (5) y (6). C_g puede ser calculada tanto para condiciones de agua intermedia como para aguas profundas tal como lo señalaron Elhanafi et al. [44].

$$P_{inc} = EC_g \tag{4}$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 \tag{5}$$

$$C_g \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \text{ para condiciones de agua intermedia } \left(\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2}\right) \\ \frac{1}{2} \frac{\lambda}{T} \text{ para aguas profundas } \left(h > \frac{\lambda}{2}\right) \end{cases} \tag{6}$$

En ese sentido, λ , h y T corresponden a 1.47 m, 0.225 m y 1.12 s, respectivamente, por lo que C_g se encontraba en condiciones de agua intermedia y resultó ser de 0.572. La potencia neumática promedio para olas regulares puede ser calculada mediante (7), entre un periodo de tiempo inicial y final en la región de estado estable de las mediciones multiplicado por el área bajo la curva de la función definida por la multiplicación entre ΔP (caída de presión instantánea dentro de la cámara (Pa)) y $Q(t)$. $Q(t)$ hace referencia al flujo volumétrico, el cual puede ser definido para una geometría 2D como $Q(t) = S_{chamber} * V_{fs}$, donde V_{fs} es la velocidad de la superficie libre del agua en la dirección vertical (m/s) y $S_{chamber}$ es el área del plano de agua de la cámara de OWC, definida por $b * w$; w es el ancho de la cámara de OWC (en la dimensión perpendicular al plano de propagación de olas) y es asumido como 1, puesto que el presente estudio de modelado computacional es 2D.

$$P_{out} = \frac{1}{T_{end} - T_{ini}} \int_{T_{ini}}^{T_{end}} \Delta P S_{chamber} V_{fs} dt \quad (7)$$

Se ha encontrado que V_{fs} puede ser calculada mediante (8) y es estimada a través de la primera derivada temporal de la aproximación de tercer orden de la elevación de la superficie libre (η) dentro de la cámara resonante de la OWC [37], [45].

$$V_{fs} = \frac{2\eta_{j+1} + 3\eta_j - 6\eta_{j-1} + \eta_{j-2}}{6\Delta t} \quad (8)$$

Donde η_j es la elevación de la superficie libre en el tiempo t_j , j es el valor de tiempo actual y Δt es el intervalo de muestra usado en ANSYS Fluent.

2.3 Simulación numérica

En el presente estudio, simulaciones bajo un dominio 2D fueron realizadas para la OWC propuesta. En la Figura 2, se muestran las condiciones de contorno y las principales dimensiones del dominio computacional del NWT. Cinco registradores de olas (WG1-WG5) fueron ubicados a lo largo del canal para monitorear la elevación de la superficie libre de agua durante la generación, transporte e ingreso de la ola a la cámara de OWC. La separación entre cada registrador de ola se ajustó a una longitud de onda, WG5 se usó para registrar la elevación de agua dentro de la cámara resonante de ola.

Dos monitores de presión (SP1 y SP2) fueron ubicados en la parte superior de la zona interna de la cámara de aire de la OWC para registrar la caída de presión, siguiendo lo reportado en [46]. La simulación numérica fue realizada bajo el régimen laminar, estado inestable y flujo incompresible, tal como el usado por Das et al. [47] y Lima et al. [48]. El método del volumen del fluido (VOF, por sus siglas en inglés) fue usado para describir correctamente la interfaz entre el agua y el aire [32], [49]– [51]. Este modelo toma en cuenta la interacción entre éstos, donde dos o más fluidos no ocupan el mismo volumen, de manera que el volumen de una fase se calcula a través de su fracción de volumen [25].

El esquema first-order upwind fue utilizado para el tratamiento de términos advectivos y PRESTO (Pressure Staggering Option) para la discretización espacial de la presión en la ecuación de momento. Para el esquema couple fue seleccionado pressure-velocity como el algoritmo de acoplamiento y fue ajustado a través del algoritmo PISO (Pressure Implicit Split Operator). El time-step se ajustó a 0.001 s con un máximo número de iteraciones de 35.

La geometría fue modelada en Autodesk Inventor 2023 e importada como superficie en formato step dentro de ANSYS Space Claim. La malla fue generada empleando ANSYS Fluent meshing solver y fue refinada principalmente sobre la zona de la superficie libre del agua y la OWC; lugares donde se necesita gran nivel de detalle e información entre celda y celda para el proceso de simulación. En la Figura 3, se presenta un ejemplo de la malla usada en las simulaciones numéricas.

Todas las simulaciones de CFD se llevaron a cabo utilizando un LENOVO Thinkstation P520 Intel W2145 @ 3.7 GHz con 64 GB RAM. Cada simulación tomó alrededor de 10 h.

En esta investigación, fue necesario garantizar una buena concordancia entre el tamaño de la malla y el espacio temporal que permitiera obtener buenos resultados de CFD. En consecuencia, un gran número de simulaciones fueron llevadas a cabo para determinar la influencia de la calidad de la malla bajo la premisa de seleccionar el tamaño de malla más apropiado que garantice resultados favorables a bajos costos computacionales. En este trabajo, se realizó una malla estructurada. Se ha encontrado que al comparar las simulaciones de la superficie libre del agua con respecto a los modelos analíticos se pueden garantizar resultados precisos y confiables tanto en el tiempo como en el espacio [43], [47], [48]. Para monitorear $\eta(x,t)$, se utilizó un medidor de onda (WG).

El primer paso durante la simulación fue validar el frente de ola para las condiciones del Océano Pacífico a una escala 1:50 ($H = 0.02$ m y $\lambda = 1.47$ m), siguiendo lo reportado en la Tabla 3. En la Figura 4, se ilustran tanto numérica como analíticamente los resultados numéricos obtenidos de la elevación de la superficie libre del agua a través del registrador de olas WG1, ubicado a λ metros del generador de olas, y los resultados analíticos obtenidos al usar (1). Asimismo, para estudiar la independencia espacial del dominio computacional, se realizaron tres mallas de tamaños diferentes.

En vista de que las fluctuaciones de la superficie libre de la cámara se miden bajo la excitación de las ondas incidentes [56], en esta investigación $H= 0.02$ m fue usada constante para todos los tratamientos. En la Figura 5 se presenta la curva de la elevación de la superficie libre de agua alrededor de WG5 (medidor de onda dentro de la cámara) obtenida de las simulaciones realizadas para una malla gruesa, media y fina. Parámetros de comparación como la calidad de la malla y el número de nodos y elementos se presentan en la Tabla 5.

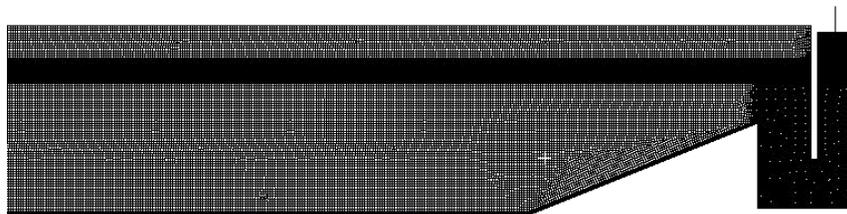


Figura 3. Malla del dominio computacional. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Estudio de independencia de malla. Fuente: elaboración propia.

	Malla gruesa	Malla media	Malla fina
Número de nodos	75,371	159,535	349,554
Número de elementos	74,074	157,551	346,680
Asimetría máxima	0.994	0.996	0.846
Relación de aspecto máximo	30.907	30.103	38.575
Calidad ortogonal máxima	0.067	0.067	0.246

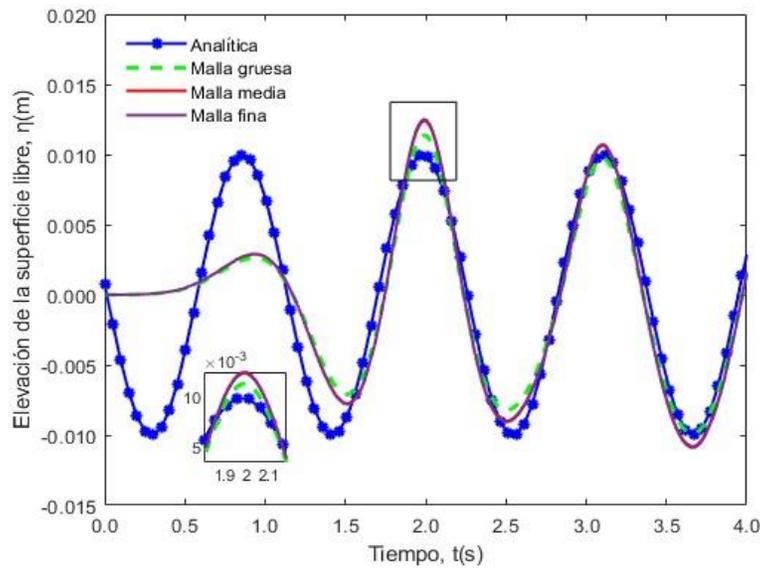


Figura 4. Elevación de la superficie libre a $X= \lambda$. Fuente: elaboración propia.

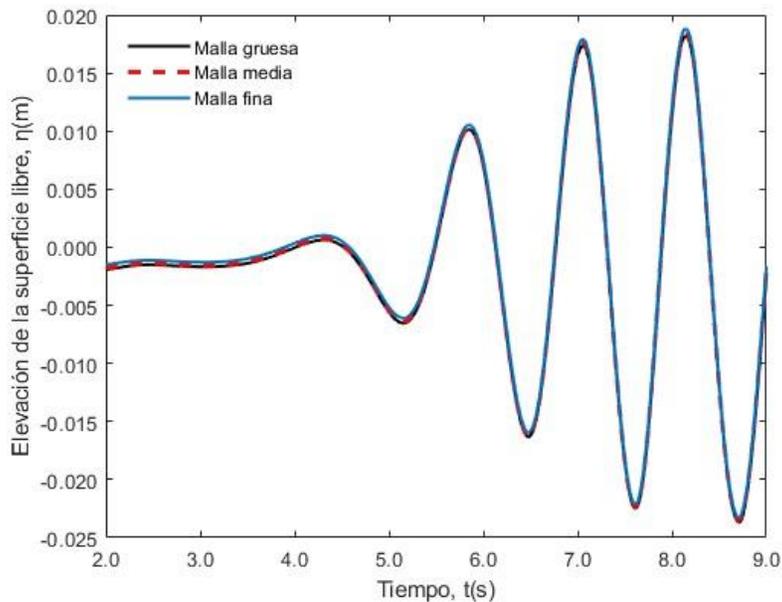


Figura 5. Independencia espacial. Fuente: elaboración propia.

La malla media fue usada para la simulación final debido a su buena relación entre la calidad de los resultados y costos computacionales. Asimismo, el estudio de independencia del tamaño de paso fue llevado a cabo para seleccionar el parámetro temporal más apropiado. Una vez realizado el análisis de independencia espacial de la malla mostrado a través de la Figura 4 y Figura 5, de las curvas obtenidas, se observa una tendencia similar de $\eta(x,t)$ con diferencias generadas en los picos debido a los tres tamaños de malla usados y que se presentaron en la Tabla 5. Para lograr la independencia temporal, en este estudio, 0.001, 0.002 y 0.003 s fueron los tamaños de paso estudiados, cuya elevación de la superficie libre de agua para las tres simulaciones, se presenta en la Figura 6. Con el objetivo de tener

una buena relación en cuanto a costos computacionales y calidad de los resultados, fue elegido un tamaño de paso equivalente a 0.001 s.

A través de la Figura 5 y Figura 6, se llevó a cabo el análisis de independencia de malla para el dominio usado en este trabajo (malla media y 0.001 s como tamaño de paso). Con estas características de mallado y tamaño de paso se continuó el desarrollo de la simulación numérica. Para Çelik y compañía [56], la implementación de un único WG en simulaciones 2D para calcular las oscilaciones de la superficie libre de la columna de agua dentro de la cámara puede causar imprecisiones debido al posible comportamiento de movimiento de chapoteo de la superficie libre. Wang et al.[46] y Çelik et al. [56] han logrado considerar el uso de tres WG dentro de la cámara y usar el valor promedio para continuar con el cálculo de los parámetros de rendimiento. Por otro lado, Alfonso et al. [46], Vyzikas et al. [57] y Barton et al. [58] han optado por usar un WG en la zona central de la cámara.

Por lo tanto, en cuanto a la simulación numérica, en este estudio, se decidió también estudiar la influencia de la ubicación de los tres medidores de olas WG5L, WG5M, WG5R (para la ubicación izquierda, media y derecha) de los medidores dentro de la cámara de resonancia, tal como se observa en la Figura 7. La Figura 8 ilustra la ubicación de los tres medidores de ola ubicados directamente desde CFD-Post del programa ANSYS Fluent. Si bien, existe una diferencia leve entre las mediciones, su valor promedio es bastante cercano al obtenido por los medidores WG5r, WG5m, y WG5l; por esta razón y con el objetivo de disminuir el tiempo computacional en etapa de post- procesamiento, los valores asociados a $\eta(x,t)$ dentro de la cámara de resonancia estuvieron dados por WG5M.

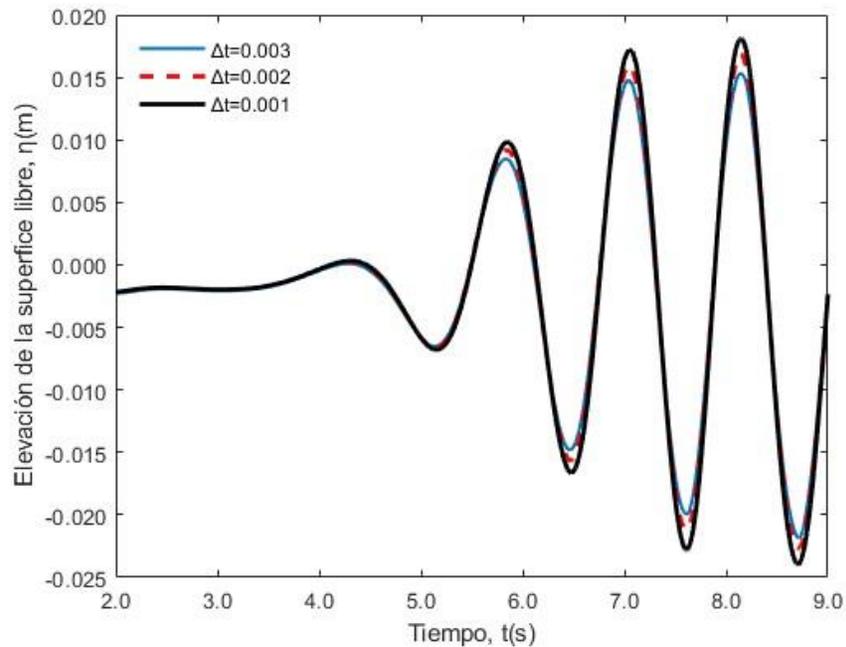


Figura 6. Independencia temporal. Fuente: elaboración propia.

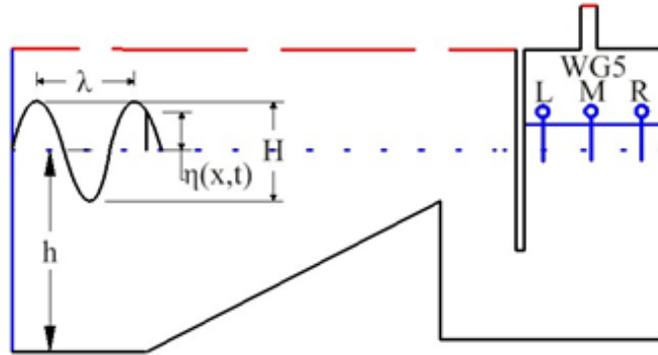


Figura 7. Ubicación de los tres medidores de onda en WG5 (izquierdo, medio y derecho)
Fuente: elaboración propia.

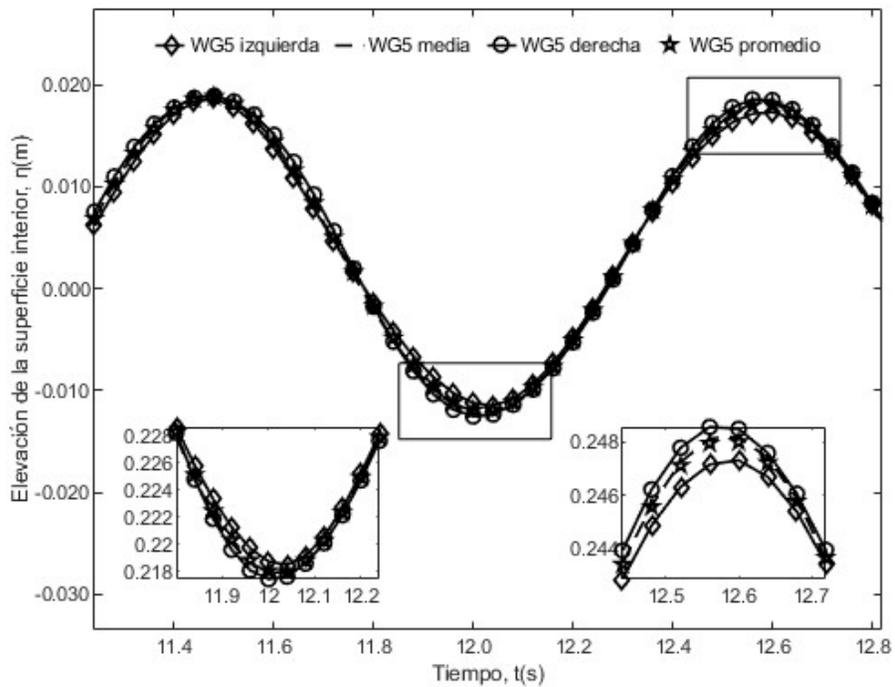


Figura 8. Fluctuaciones de la columna de agua a la derecha, centro e izquierda de la superficie libre bajo el efecto de una ola incidente para las condiciones del océano Pacífico a escala 1:50. Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados numéricos

La comparación de la elevación de la superficie libre de agua entre los resultados numéricos y analíticos para WG1, WG2, WG3 y WG4 se muestran en la Figura 9. La solución analítica fue obtenida usando (1), correspondiente a la teoría de onda de Airy [43]. Asimismo, para verificar la generación y propagación de olas en el canal, la Figura 10 representa los resultados tanto numéricos como analíticos para $\eta(x,t)$ en un instante de tiempo ($t = 5$ s), acorde a lo estudiado por Torresi [25] y empleando (1).

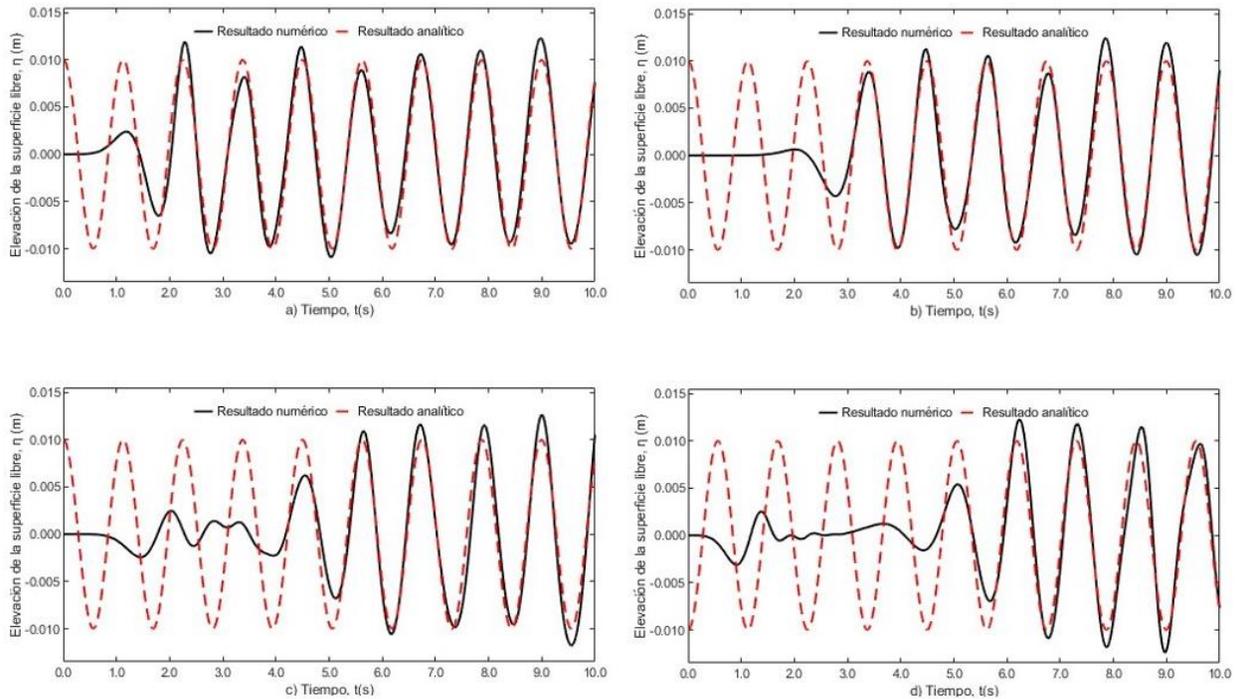


Figura 9. Validación mediante comparación de los resultados numéricos y analíticos obtenidos para una ola de $H=0.02$ m a) WG1 a $X=\lambda$, b) WG2 a $X=1.5\lambda$, c) WG3 a $X=2\lambda$, d) WG4 a $X=3\lambda$
Fuente: elaboración propia.

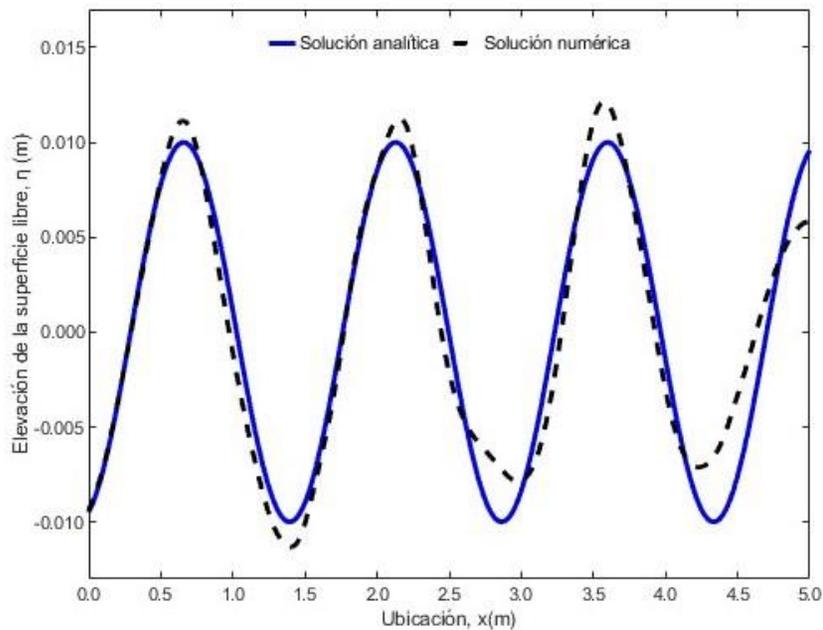


Figura 10. Comparación entre la solución analítica y numérica del frente de ola para las condiciones del Océano Pacífico colombiano. ($H=0.02$ y $\lambda=1.47$ metros). Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, y con el objetivo de validar el comportamiento de las olas adaptadas a las condiciones del océano Pacífico, en la Figura 11 se presentan dos perfiles de velocidad en la dirección x monitoreados debajo de la cresta y el valle de la ola, siguiendo lo descrito por Lotzow [43]. La línea de monitoreo fue ubicada en $x=2\lambda$ desde el generador de olas del canal.

Los resultados obtenidos en la etapa de simulación numérica son comparados con respecto a la solución analítica de Dean and Darlymple, dada por (9) [59], para un flujo potencial. En cuanto a los resultados, se observa una leve diferencia de los resultados numéricos frente a los analíticos. En la región baja alrededor de la profundidad del canal ($z < 0.006$ m), se ha encontrado una leve diferencia en el comportamiento de los perfiles de velocidad en la dirección x obtenidos analítica y numéricamente, la cual puede ser debido a la imposición de la condición de contorno antideslizante en el fondo del canal para las simulaciones numéricas. En cuanto a la zona superficial de agua para el valle ($0.215 \leq z \leq 0.235$) y la cresta ($0.235 \leq z \leq 0.255$), se puede apreciar a partir de la ilustración una leve inclinación de manera cuadrática de los perfiles de velocidad en estas zonas; esto es debido a que la velocidad de la interfaz agua-aire debe variar para evitar la discontinuidad entre las fases garantizando el cumplimiento de la conservación de la masa [43]. Finalmente, en la región faltante ($0.006 < z < 0.215$), los perfiles de velocidad siguen la tendencia respecto a los resultados analíticos demostrando que el método computacional realizado en este trabajo puede adaptarse al proceso numérico a través del software ANSYS Fluent.

$$u = \frac{gHk \cosh[k(h+z)]}{2\sigma \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \tag{9}$$

El valor de rendimiento obtenido por [60] tuvo un comportamiento similar al obtenido en la presente investigación; sin embargo, para este último la escala usada por los autores fue (1:25) bajo parámetros como $H= 0.04$ m y $h= 0.42$ m. En este estudio, se decidió considerar una rampa inclinada en la parte inferior antes del ingreso de agua a la cámara de resonancia debido a que se ha encontrado que ésta podría disminuir la cantidad de sedimento que ingresa al dispositivo, promoviendo la eficiencia de extracción de energía en el dispositivo [58], y adecuando particularmente la U-shaped que ha generado grandes resultados [48], [61]– [63].

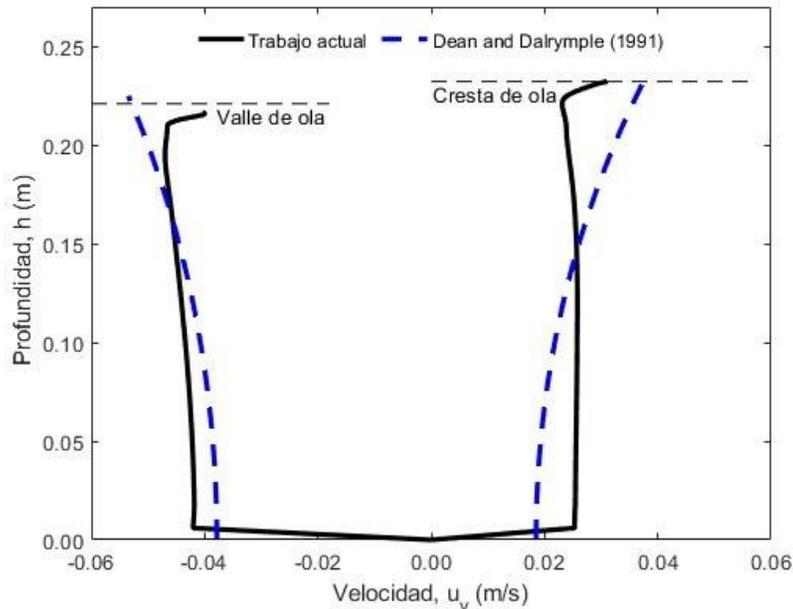


Figura 11. Comparación del perfil de velocidad en la dirección x debajo de la cresta y el valle obtenidos Fuente: elaboración propia.

Se ha encontrado que la amortiguación inducida por la turbina es lo que hace posible la extracción de energía de las olas al generar un diferencial de presión en la cámara de aire y restringir el movimiento de la columna de agua [56]. Un alto amortiguamiento da como resultado alta presión [57] e indica mayor resistencia hidrodinámica a la salida de OWC, como también, involucra el uso de bajos tamaños de diámetro a la salida de aire, emulando el fenómeno inducido por una turbina en la realidad. En investigaciones como la de Çelik et al. [56] y Guedes et al. [60] se ha encontrado que la OWC tiene un mayor rendimiento en condiciones de alta amortiguación que en el caso de baja amortiguación, ya que un mayor nivel de amortiguamiento permite absorber la máxima cantidad de potencia neumática generada por la ola incidente.

3.2 Validación de la geometría en CFD-POST

Teniendo en cuenta lo señalado por Çelik [56], de acuerdo con (7), la potencia neumática máxima puede generarse mediante una combinación apropiada de la velocidad de superficie libre promedio instantánea y el diferencial de presión de aire en la cámara. Cuando existen grandes amortiguaciones impuestas al dispositivo, se genera un gran diferencial de presión, pero limita el movimiento de la superficie libre resonante; por el contrario, los valores de amortiguamiento relativamente bajos permitieron altas velocidades de la columna de agua, pero en paralelo redujeron sustancialmente la presión del aire. Teniendo en cuenta los importantes pasos dados por Pereiras et al. [64], se ha afirmado que existe una amortiguación óptima para cada condición de ola.

Con el fin de examinar este escenario, la Figura 12 ilustra la presión diferencial y la velocidad vertical de la superficie libre dentro de la cámara de resonancia de ola para la simulación realizada. La Figura 12a presenta el cambio de presión dentro de la cámara de resonancia en el tiempo. Por su parte, la Figura 12b representa la velocidad de la columna de agua; es decir, el cambio del desplazamiento de la superficie libre de agua dentro de la cámara resonante a lo largo del tiempo. Como se observa, el máximo cambio de presión fue de alrededor de 104 Pa y la velocidad de la columna de agua máxima (V_{fsmax}) fue de 0.118 m/s.

Se sabe que el borde de la pared frontal es un lugar posible para la generación de vórtices, por lo que pueden disipar parte de la energía de las olas [23]. Por otro lado, las pérdidas por fricción/viscosidad y los bordes afilados de la cámara obligan a las partículas de agua a cambiar su dirección de desplazamiento y luego a acelerar el flujo en esas regiones, lo que induce la separación del flujo y la formación de vórtices [65].

El movimiento de la columna de agua generado por el frente de ola incidente adaptado a las condiciones del Océano Pacífico puede ser descrito por el contorno de fases y líneas de corriente de velocidad de fluido en instantes de tiempo progresivos.

La Figura 13 y la Figura 14 ilustran, respectivamente, la superficie de contorno y líneas de velocidad en los instantes de tiempo donde la ola incidente llega hasta al dispositivo (esto toma cerca de 5 s) para el dispositivo objeto de estudio. La Figura 15 ilustra las líneas de corriente de velocidad donde se puede apreciar el movimiento de vórtices previo al ingreso y descenso de agua a la cámara.

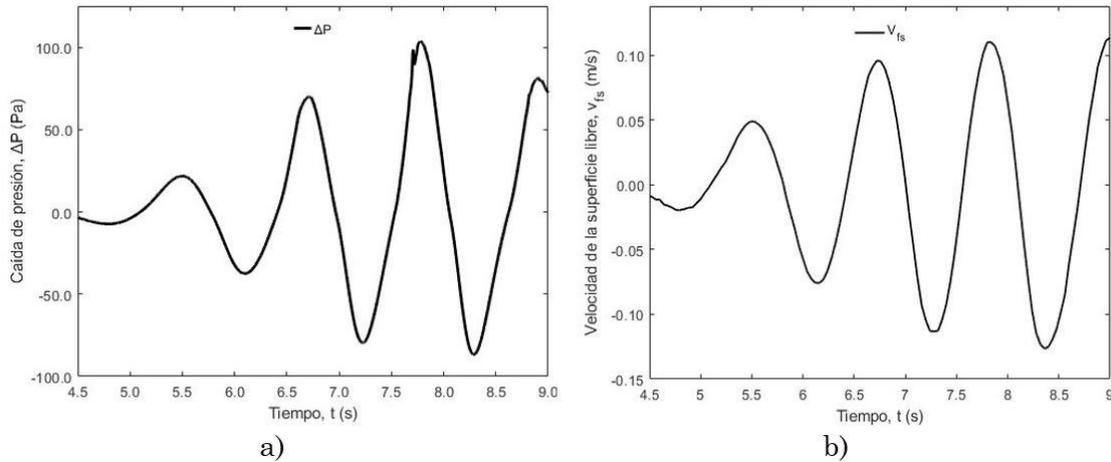


Figura 12. Serie de tiempo de a) presión diferencial, b) velocidad de la columna de agua
Fuente: elaboración propia.

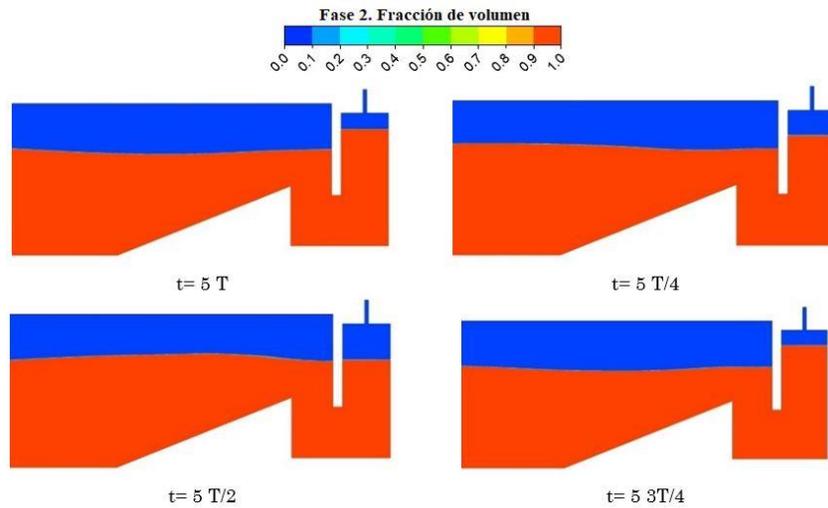


Figura 13. Contorno de fases en instantes de tiempo sucesivos para el tratamiento óptimo. a) el color rojo indica agua, b) el color azul indica aire. Fuente: elaboración propia.

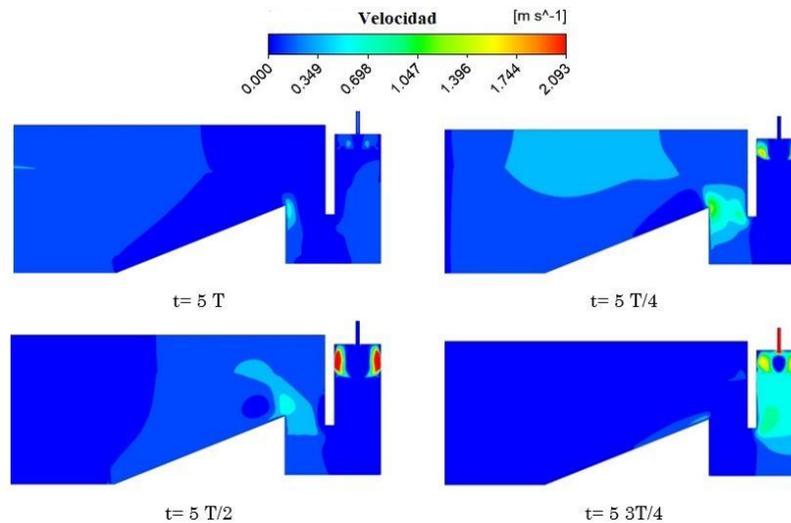


Figura 14. Contorno de líneas de velocidad en instantes de tiempo sucesivos para el tratamiento óptimo
Fuente: elaboración propia.

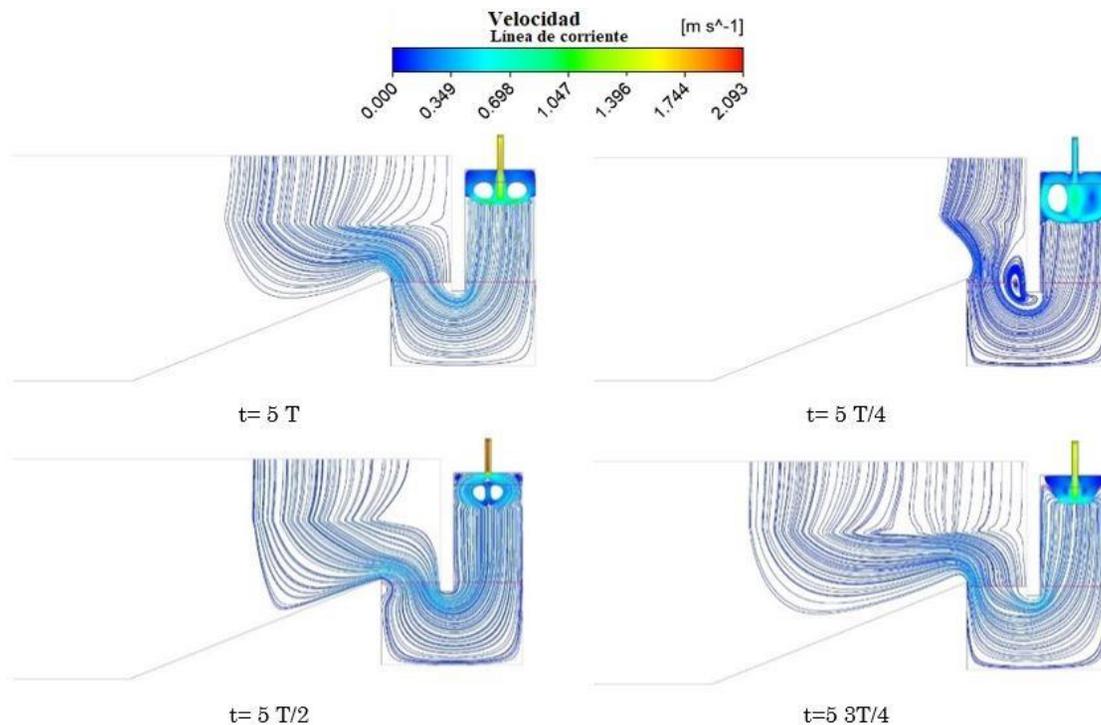


Figura 15. Contorno de líneas de corriente de velocidad en instantes de tiempo sucesivos para el tratamiento óptimo. Fuente: elaboración propia.

El periodo de ola fue de 1.12 s. En cuanto a los contornos de velocidad, se puede inferir que las líneas de corriente de velocidad muestran la formación de vórtices en el dispositivo durante el proceso de ascenso y descenso de la columna de agua en un ciclo, por lo que pueden influir directamente en el funcionamiento de OWC. En aras de comparar el rendimiento de la geometría resultante en esta investigación, el cual debe ser confrontado con respecto al obtenido por otros autores, Rezanejad et al. [60] encontraron eficiencias de hasta el 59.1 % para un periodo y condición de ola ($T = 1.05$ s y $H = 0.02$ m) semejante al usado en esta investigación bajo olas regulares, pero sin considerar la rampa inclinada previo al ingreso de la ola a la cámara de resonancia descrita por Vyzikas [58]. Shahabi y colaboradores [32], por su parte, encontraron una eficiencia máxima de hasta el 67 % para una geometría ajustada a la forma de la cámara estudiada en esta trabajo; sin embargo, el estudio por parte de los autores referidos fue a través de un diseño constructivo observando la sensibilidad de un factor a la vez, diferente al del análisis multifactorial usado aquí. Por otro lado, [58] obtuvieron eficiencias alrededor del 69.1 % bajo ondas incidentes regulares. Asimismo, Chuanli et al. [61] obtuvieron rendimientos cercanos al 68.7 % donde analizaron una OWC cuadrada en tierra pero con orificio de salida lateral para condiciones de oleaje regular. Si bien todos los autores han logrado eficiencias cercanas a las encontradas aquí (67.29), es de resaltar que no todos los dispositivos se comportan de la misma manera en cuanto al rendimiento hidrodinámico, puesto que no solo son dependientes de la morfología de la cámara resonante y la clase de ola (regular e irregular), sino también de sus características durante el proceso de generación (H , λ , T y h), lo que hace que el dispositivo se comporte diferente bajo cada condición de ola.

4. CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones de la investigación

La OWC puede ser una tecnología sostenible para generar electricidad en Colombia utilizando el recurso disponible en el Océano Pacífico. En esta investigación se simuló numéricamente el comportamiento hidrodinámico de una OWC adaptada a las condiciones del Océano Pacífico colombiano a escala de laboratorio empleando CFD. A través de esta herramienta, se pudo modelar la OWC para la condición de ola ($H = 0.02$ m y $\lambda = 1.47$ m), como también validar analíticamente el perfil del frente de ola usando la teoría analítica de onda de Airy. El valor máximo del cambio de presión y de la velocidad de la columna de agua dentro de la cámara fueron de 104 Pa y 0.118 m/s, respectivamente. La eficiencia óptima obtenida de la OWC para las condiciones del Océano Pacífico colombiano fue 67.29 %.

4.2 Líneas de desarrollo futuro

En futuros análisis paramétricos, se podría examinar la sensibilidad del dispositivo respecto a diversas alturas y longitudes de onda usando un menor número de factores y promoviendo la búsqueda del periodo de resonancia (periodo donde el dispositivo alcanza su máxima tasa de transformación de energía de ola incidente) entre este WEC y el movimiento de las olas; no obstante, para [66] la necesidad de resonancia hace que el sistema sea susceptible a efectos no lineales (como la ruptura de olas) que actúan para modular el movimiento de las olas o inducir un amortiguamiento viscoso.

Como trabajo futuro, se pueden realizar investigaciones más detalladas mediante modelos numéricos validados y algoritmos de optimización aplicados a condiciones de olas irregulares de nuestro país, no solo a dispositivos cerca de la costa o en la orilla, sino también a los que se encuentran mar adentro. Asimismo, en cuanto a generación de nuevo conocimiento, se puede considerar el análisis termodinámico y la compresibilidad del aire en las fases de entrada y salida de la cámara de resonancia de ola para configuraciones mono y multicámara, así como la suposición de transformación politrópica de la masa de aire dentro del dispositivo. Finalmente, se podría considerar la salinidad del agua y sus efectos en la etapa de simulación y en la fase experimental.

5. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la convocatoria No. 890 de 2020 Convocatoria para el fortalecimiento de CTeI en Instituciones de Educación de Superior (IES) Públicas 2020 (Contrato nro. 2022-0452).

CONFLICTOS DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran que no tienen intereses financieros, intereses económicos o relaciones personales que pudieran influir en el trabajo presentado en este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

El reconocimiento de la autoría del presente artículo se basa en la contribución de cada uno de los autores, cuyos aportes fueron importantes para el desarrollo del documento. Juan Parra-Quintero: Metodología, Software, Validación, Redacción y borrador original. Ainhoa Rubio-Clemente: Conceptualización, Metodología, Supervisión, Redacción y borrador original. Edwin Chica: Conceptualización, Metodología, Redacción y revisión, Adquisición de fondos, Recursos, Administración del proyecto

6. REFERENCIAS

- [1] O. Pupo-Roncillo, J. Campillo, D. Ingham, K. Hughes, and M. Pourkashanian, “Renewable energy production and demand dataset for the energy system of Colombia,” *Data Br.*, vol. 28, p. 105084, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105084>
- [2] A. Perez and J. J. Garcia-Rendon, “Integration of non-conventional renewable energy and spot price of electricity: A counterfactual analysis for Colombia,” *Renew. Energy*, vol. 167, pp. 146–161, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.067>
- [3] A. M. Rosso-Cerón and V. Kafarov, “Barriers to social acceptance of renewable energy systems in Colombia”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 10, pp. 103-110, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.08.003>
- [4] S. A. Gil Ruiz, J. E. Cañón Barriga, and J. A. Martínez, “Wind power assessment in the Caribbean region of Colombia, using ten-minute wind observations and ERA5 data,” *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 158–176, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.033>
- [5] J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, J. J. Cabello Eras, R. Silva-Casarín, E. Bastidas-Arteaga, and J. Horrillo-Caraballo, “Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology,” *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 529–543, May. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174>
- [6] Unidad de Planeación Minero-Energética, “Plan Energético Nacional 2020-2050”. Colombia, Feb. 2020. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Presentacion_PEN_V48.pdf
- [7] D. Clemente, P. Rosa-Santos, and F. Taveira-Pinto, “On the potential synergies and applications of wave energy converters: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110162, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110162>
- [8] Ministerio de Minas y Energía, “La transición energética de Colombia. Memorias al Congreso,” Colombia, Jun. 2020. https://www.minenergia.gov.co/documents/5744/Memorias_al_Congreso_2019-2020.pdf
- [9] S. S. Prakash, *et al.*, “Wave Energy Converter: A Review of Wave Energy Conversion Technology,” *3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering*, Nadi, Fiji, 2016, pp. 71-77. <https://doi.org/10.1109/APWC-on-CSE.2016.023>
- [10] J. D. Restrepo and S. A. López, “Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–21, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>
- [11] J. Portilla, A. L. Caicedo, R. Padilla-Hernández, and L. Cavaleri, “Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean,” *Ocean Model.*, vol. 92, pp. 149–168, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.005>
- [12] N. Borduas and N. M. Donahue, “The Natural Atmosphere,” *Green Chemistry*, pp. 131-150, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00006-6>
- [13] K. O. Yoro and M. O. Daramola, “CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect,” *Advances in Carbon Capture*, pp. 3-28, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>
- [14] I. Simonetti, L. Cappietti, H. Elsafti, and H. Oumeraci, “Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study,” *Energy*, vol. 139, pp. 1197-1209, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.033>
- [15] J. Lekube, A. J. Garrido, I. Garrido, E. Otaola, and J. Maseda, “Flow Control in Wells Turbines for Harnessing Maximum Wave Power,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 535, Feb. 2018. <https://doi.org/10.3390/s18020535>
- [16] R. Ahamed, K. McKee, and I. Howard, “Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review,” *Ocean Eng.*, vol. 204, p. 107248, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248>
- [17] Y. M. Choi *et al.*, “An efficient methodology for the simulation of nonlinear irregular waves in

- computational fluid dynamics solvers based on the high order spectral method with an application with OpenFOAM,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 15, p. 100510, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.IJNAOE.2022.100510>
- [18] L. Carlo, C. Iuppa, and C. Faraci, “A numerical-experimental study on the hydrodynamic performance of a U-OWC wave energy converter,” *Renew. Energy*, vol. 203, pp. 89–101, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.12.057>
- [19] L. Gurnari, P. G. F. Filianoti, and S. M. Camporeale, “Fluid dynamics inside a U-shaped oscillating water column (OWC): 1D vs. 2D CFD model,” *Renew. Energy*, vol. 193, pp. 687–705, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.05.025>
- [20] J.-M. Zhan, Q. Fan, W.-Q. Hu, and Y.-J. Gong, “Hybrid realizable k- ϵ /laminar method in the application of 3D heaving OWCs,” *Renew. Energy*, vol. 155, pp. 691–702, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.140>
- [21] M. Kharati-koopae and A. Fathi-kelestani, “Assessment of oscillating water column performance: Influence of wave steepness at various chamber lengths and bottom slopes,” *Renew. Energy*, vol. 147, Part. 1, pp. 1595–1608, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.110>
- [22] C. Wang and Y. Zhang, “Hydrodynamic performance of an offshore Oscillating Water Column device mounted over an immersed horizontal plate: A numerical study,” *Energy*, vol. 222, p. 119964, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119964>
- [23] A. T. Haghighi, A. H. Nikseresht, and M. Hayati, “Numerical analysis of hydrodynamic performance of a dual-chamber Oscillating Water Column,” *Energy*, vol. 221, p. 119892, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119892>
- [24] Y. Cui, Z. Liu, X. Zhang, and C. Xu, “Review of CFD studies on axial-flow self-rectifying turbines for OWC wave energy conversion,” *Ocean Eng.*, vol. 175, pp. 80–102, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.040>
- [25] P. G. F. Filianoti, L. Gurnari, M. Torresi, S. M. Camporeale, “CFD analysis the conversion process in a fixed oscillating The of water column (OWC) device with a Wells turbine,” *Energy Procedia*, vol. 148, pp. 1026–1033, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.058>
- [26] S. Dai, S. Day, Z. Yuan, and H. Wang, “Investigation on the hydrodynamic scaling effect of an OWC type wave energy device using experiment and CFD simulation,” *Renew. Energy*, vol. 142, pp. 184–194, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.066>
- [27] M. H. Dao, L. W. Chew, and Y. Zhang, “Modelling physical wave tank with flap paddle and porous beach in OpenFOAM,” *Ocean Eng.*, vol. 154, pp. 204–215, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.024>
- [28] Z. Huang and S. Huang, “Two-phase flow simulations of fixed 3D oscillating water columns using OpenFOAM: A comparison of two methods for modeling quadratic power takeoff,” *Ocean Eng.*, vol. 232, p. 108600, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108600>
- [29] Z. Deng, C. Wang, P. Wang, P. Higuera, and R. Wang, “Hydrodynamic performance of an offshore-stationary OWC device with a horizontal bottom plate: Experimental and numerical study,” *Energy*, vol. 187, p. 115941, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115941>
- [30] L. A. Gaspar, P. R. F. Teixeira, and E. Didier, “Numerical analysis of the performance of two onshore oscillating water column wave energy converters at different chamber wall slopes,” *Ocean Eng.*, vol. 201, p. 107119, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107119>
- [31] M. Hayati, A. H. Nikseresht, and A. T. Haghighi, “Sequential optimization of the geometrical parameters of an OWC device based on the specific wave characteristics,” *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 386–394, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.073>
- [32] M. Shahabi-Nejad and A. H. Nikseresht, “A comprehensive investigation of a hybrid wave energy converter including oscillating water column and horizontal floating cylinder,” *Energy*, vol. 243, p. 122763, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122763>
- [33] Y. T. B. de Lima, M. das Gomes, L. A. Isoldi, E. D. dos Santos, G. Lorenzini, and L. A. O. Rocha, “Geometric Analysis through the Constructal Design of a Sea Wave Energy Converter with Several Coupled Hydropneumatic Chambers Considering the Oscillating Water Column Operating Principle,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 18, p. 8630, Sep. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188630>
- [34] A. Rubio-Clemente, L. Velásquez, and E. Chica, “Design of a water channel to model the wave conditions in the Colombian Pacific Ocean,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, pp. 405–412, Sep. 2022. <https://doi.org/10.24084/repqi20.325>
- [35] Dimar, *Oceanographic Compilation of the Colombian Pacific Basin II*, Colombia, Editorial Dimar, Serie Publicaciones Especiales CCCP. https://cecoldodigital.dimar.mil.co/2687/2/396_DIMAR_en.pdf
- [36] S. Foteinis, “Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 162, p. 112448, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112448>
- [37] A. A. Medina Rodríguez *et al.*, “Experimental Investigation of the Hydrodynamic Performance of Land-

- Fixed Nearshore and Onshore OWC with a Thick Front Wall,” *Energies*, vol.15, no. 7, p. 2364, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072364>
- [38] C.-P. Tsai, C.H. Ko, and Y.-C. Chen, “Investigation on Performance of a Modified Breakwater-Integrated OWC Wave Energy Converter,” *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 643, Feb. 2018. <https://doi.org/10.3390/su10030643>
- [39] C. Xu and Z. Huang, “A dual-functional wave-power plant for wave-energy extraction and shore protection: A wave-flume study,” *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 963–976, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.005>
- [40] B. Guo and J. V. Ringwood, “Geometric optimisation of wave energy conversion devices: A survey,” *Appl. Energy*, vol. 297, p. 117100, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117100>
- [41] I. López, B. Pereiras, F. Castro, and G. Iglesias, “Performance of OWC wave energy converters : influence of turbine damping and tidal variability,” *Energy Research*, vol. 39, no. 4, pp. 472–483, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1002/er.3239>
- [42] A. Elhanafi, G. Macfarlane, A. Fleming, and Z. Leong, “Experimental and numerical investigations on the intact and damage survivability of a floating-moored oscillating water column device,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 68, pp. 276–292, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.007>
- [43] M. Letzow *et al.*, “Numerical analysis of the influence of geometry on a large scale onshore oscillating water column device with associated seabed ramp,” *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, vol. 15, no. 6, pp. 873–884, Dec. 2020. <https://doi.org/10.18280/ij dne.150613>
- [44] A. Elhanafi, G. Macfarlane, A. Fleming, and Z. Leong, “Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter,” *Appl. Energy*, vol. 189, pp. 1–20, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.095>
- [45] M. M. Samak, H. Elgamal, and A. M. N. Elmekawy, “The contribution of L-shaped front wall in the improvement of the oscillating water column wave energy converter performance,” *Energy*, vol. 226, p. 120421, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120421>
- [46] C. Wang and Y. Zhang, “Hydrodynamic performance of an offshore Oscillating Water Column device mounted over an immersed horizontal plate: A numerical study,” *Energy*, vol. 222, p. 119964, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119964>
- [47] M. das N. Gomes, G. Lorenzini, L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos, and L. A. Isoldi, “Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods,” *J. Eng. Thermophys.*, vol. 27, pp. 173–190, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1134/S1810232818020042>
- [48] Y. T. B. de Lima, M. das N. Gomes, L. A. Isoldi, E. D. dos Santos, G. Lorenzini, and L. A. O. Rocha, “Geometric analysis through the constructal design of a sea wave energy converter with several coupled hydropneumatic chambers considering the oscillating water column operating principle,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 18, p. 8630, Sep. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188630>
- [49] M. M. Han and C. M. Wang, “Potential flow theory-based analytical and numerical modelling of porous and perforated breakwaters: A review,” *Ocean Eng.*, vol. 249, p. 110897, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110897>
- [50] M. Rashed Mia, M. Zhao, H. Wu, and A. Munir, “Numerical investigation of offshore oscillating water column devices,” *Renew. Energy*, vol. 191, pp. 380–393, May. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.069>
- [51] P. Mohapatra and T. Sahoo, “Hydrodynamic performance analysis of a shore fixed oscillating water column wave energy converter in the presence of bottom variations,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 234, no. 1, pp. 37–47, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1177/1475090219864833>
- [52] A. H. S. Weerakoon, B.-H. Kim, Y.-J. Cho, D. D. Prasad, M. Rafiuddin Ahmed, and Y.-H. Lee, “Design optimization of a novel vertical augmentation channel housing a cross-flow turbine and performance evaluation as a wave energy converter,” *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 1300–1314, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.092>
- [53] W. C. Chen, Y. L. Zhang, J. Yang, H. F. Yu, and S. D. Liang, “Experiments and CFD modeling of a dual-raft wave energy dissipator,” *Ocean Eng.*, vol. 237, p. 109648, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109648>
- [54] Z. Liu, C. Xu, and K. Kim, “A CFD-based wave-to-wire model for the oscillating water column wave energy Converter,” *Ocean Eng.*, vol. 248, p. 110842, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110842>
- [55] M. Shalby, A. Elhanafi, P. Walker, and D. G. Dorrell, “CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 88, pp. 37–47, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.003>
- [56] A. Çelik and A. Altunkaynak, “Experimental investigations on the performance of a fixed-oscillating water column type wave energy converter,” *Energy*, vol. 188, p. 116071, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116071>
- [57] T. Vyzikas, S. Deshoulières, O. Giroux, M. Barton, and D. Greaves, “Numerical study of fixed Oscillating

- Water Column with RANS-type two-phase CFD model,” *Renew. Energy*, vol.102, Part. B, pp. 294-305, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.044>
- [58] T. Vyzikas, S. Deshoulières, M. Barton, O. Giroux, D. Greaves, and D. Simmonds, “Experimental investigation of different geometries of fixed OWC devices,” *Renew. Energy*, vol. 104, pp. 248–258, Apr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.061>
- [59] R. G. Dean and R. A. Dalrymple, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 2, world scientific publishing company, 1991. <https://doi.org/10.1142/1232>
- [60] K. Rezanejad, C. Guedes Soares, I. López, and R. Carballo, “Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter,” *Renew. Energy*, vol. 106, pp. 1–16, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.003>
- [61] C. Xu, Z. Liu, and G. Tang, “Experimental study of the hydrodynamic performance of a U-oscillating water column wave energy converter,” *Ocean Eng.*, vol. 265, p. 112598, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112598>
- [62] L. Gurnari, P. G. F. Filianoti, and S. M. Camporeale, “Fluid dynamics inside a U-shaped oscillating water column (OWC): 1D vs. 2D CFD model,” *Renew. Energy*, vol. 193, pp. 687–705, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.025>
- [63] D.-zhi Ning, B.-ming Guo, R.-quan Wang, T. Vyzikas, and D. Greaves, “Geometrical investigation of a U-shaped oscillating water column wave energy device,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 97, p. 102105, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102105>
- [64] I. López, B. Pereiras, F. Castro, and G. Iglesias, “Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS–VOF numerical model,” *Appl. Energy*, vol. 127, pp. 105–114, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.020>
- [65] A. Elhanafi, A. Fleming, G. Macfarlane, and Z. Leong, “Numerical hydrodynamic analysis of an offshore stationary–floating oscillating water column e wave energy converter using CFD,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 77-99, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.08.002>
- [66] S. Saincher and J. Banerjee, “Influence of wave breaking on the hydrodynamics of wave energy converters: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 704–717, May. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.301>