

GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A PARTIR DE LA ENERGIA UNDIMOTRIZ DISPONIBLE EN LAS ZONAS COSTERAS DE COLOMBIA MEDIANTE EL USO DE UNA COLUMNA OSCILANTE DE AGUA

GENERATION OF ELECTRIC POWER FROM WAVE ENERGY AVAILABLE IN THE COASTAL AREAS OF COLOMBIA USING AN OSCILLANTING WATER COLUMN.

Juan Diego Peña Bedoya¹, José Alejandro Posada Montoya² Iván David Patiño Arcila³, Jhon Fredy Hincapié Montoya⁴

¹ Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín-Colombia
Juan.pena@pascualbravo.edu.co

² Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín-Colombia
alejandro.posada@pascualbravo.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-5836-0680>

³ Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín-Colombia
i.patinoar@pascualbravo.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-2876-8930>

⁴ Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín-Colombia
j.hincapie697@pascualbravo.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-0841-8941>

Resumen

Este estudio evalúa la viabilidad de implementar tecnologías de generación de energía a partir de la energía undimotriz en las regiones costeras de Colombia, enfocándose en las geometrías más eficientes según los tipos de olas presentes en el territorio. Esta investigación explora el uso de columnas oscilantes de agua como una opción sostenible para aprovechar el movimiento de las olas del mar para la generación de electricidad. La tecnología de columna oscilante de agua, convierte el movimiento de las olas en energía mecánica y posteriormente en electricidad. A pesar de los avances tecnológicos, existen desafíos como la variabilidad en la producción energética y la alta inversión inicial requerida; sin embargo, el avance continuo de la ciencia y la tecnología puede ayudar a superar estas barreras. Respecto a la metodología, se usó el software Ansys Fluent 2024 R2 y 2025 R1, con el que se realizaron una serie de simulaciones en estado transitorio de una cámara de una Columna Oscilante de Agua. Por otra parte, se propuso realizar simulaciones computacionales para evaluar el rendimiento de los sistemas propuestos. Este enfoque busca no solo aportar soluciones energéticas innovadoras para Colombia, sino también contribuir al desarrollo sostenible y a la resiliencia de las zonas costeras, Para el modelado se empleó el modelo de turbulencia k-ε (dos ecuaciones) y se consideraron distintos factores como el tipo de ola (laminar o no laminar, hiperbólica o dispersiva) y variaciones en las condiciones de frontera (D, L y H modificadas), como resultados se obtuvieron las gráficas de comportamientos de las olas según la variación de condiciones, se espera que este tipo de proyectos fortalezca la capacidad de investigación e innovación y contribuya al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad del Plan Energético Nacional hacia 2050.

Palabras clave

Energía undimotriz, Columnas oscilante de agua (OWC), Turbina Wells, Simulaciones computacionales.

Abstract

This study evaluates the feasibility of implementing wave energy power generation technologies in the coastal regions of Colombia, focusing on the most efficient geometries according to the types of waves present in the territory. This research explores the use of oscillating water columns as a sustainable option to take advantage of the movement of sea waves for electricity generation. The oscillating water column technology converts wave motion into mechanical energy and subsequently into electricity. Despite technological advances, there are challenges such as variability in energy production and the high initial investment required; however, the continuous advancement of science and technology can help overcome these barriers. Regarding the methodology, ASYS FLUENT 2024 R2 software was used, with which a series of transient state simulations of a chamber of an Oscillating Water Column were performed. On the other hand, it is proposed to perform computational simulations to evaluate the performance of the proposed systems. This approach seeks not only to provide innovative energy solutions for Colombia, but also to contribute to the sustainable development and resilience of coastal areas in the face of climate change. The implementation of this technology is expected to boost the growth of the national energy sector, strengthen research and innovation capacity and contribute to meeting the sustainability objectives of the National Energy Plan towards 2050.

Keywords

Wave energy, Oscillating Water Columns (OWC), Wells turbine, Computational simulations.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de fuentes de energía renovable y la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para la generación sostenible de electricidad. En este contexto, la energía undimotriz, derivada del movimiento de las olas del mar se presenta como una alternativa viable y prometedora para diversificar la matriz energética global [1]. Entre las diversas tecnologías disponibles para la conversión de esta energía, las Columnas Oscilantes de Agua (Oscillating Water Columns, OWC) han demostrado ser una de las opciones más eficientes debido a su

capacidad para transformar la energía mecánica de las olas en energía eléctrica mediante el uso de turbinas de aire, como la turbina Wells [2].

Colombia, con su ubicación geográfica privilegiada y acceso a extensas costas en el océano Pacífico y el mar Caribe, posee un alto potencial para la explotación de energía undimotriz. Sin embargo, a pesar de su abundante recurso marino, la implementación de esta tecnología en el país aún es limitada, en parte debido a la falta de estudios específicos sobre la viabilidad técnica y económica en el contexto local [3]. Para abordar esta brecha, es fundamental evaluar las condiciones hidrodinámicas del territorio colombiano y determinar las configuraciones óptimas de las OWC para maximizar la eficiencia de la conversión energética.

Este estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad de la implementación de tecnologías basadas en OWC en las costas de Colombia, considerando los patrones de oleaje predominantes y la eficiencia de diferentes geometrías. Para ello, se empleará el software ANSYS Fluent para realizar simulaciones computacionales que permitan analizar el comportamiento de la cámara de aire. Este análisis busca identificar cuál de las dos geometrías ofrece un mejor rendimiento en la conversión de la energía de las olas en electricidad, considerando factores como la presión del aire dentro de la cámara, la velocidad del flujo y la eficiencia en la transmisión de energía a la turbina Wells.

Además, se tendrá en cuenta la caracterización del oleaje en las zonas costeras de Colombia para asegurar que las simulaciones reflejen las condiciones reales del entorno marino. La combinación de modelado numérico y análisis de datos experimentales permitirá evaluar la factibilidad técnica de la implementación de esta tecnología en el país. De esta manera, esta investigación busca contribuir al desarrollo de soluciones energéticas innovadoras y sostenibles, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, particularmente en lo relacionado con la energía asequible y no contaminante [4].

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan los fundamentos teóricos de la energía undimotriz y las OWC, en la sección 3 se describe la metodología empleada para el diseño y simulación de los sistemas propuestos, en la sección 4 se analizan los resultados obtenidos y, finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ Y LAS COLUMNAS OSCILANTES DE AGUA (OWC)

2.1. Principios de Funcionamiento de las OWC

Una OWC consiste en una cámara parcialmente sumergida y abierta al mar en su parte inferior. A medida que las olas ingresan y salen de la cámara, el nivel del agua dentro de esta oscila, permitiendo que ingrese y salga de la cámara el aire atrapado en su interior. Estas variaciones de presión impulsan una turbina conectada a un generador eléctrico, convirtiendo la energía mecánica en electricidad. Un aspecto distintivo de las OWC es el uso de turbinas bidireccionales, como la turbina Wells, que giran en la misma dirección independientemente del flujo de aire, optimizando así la generación de energía [5].

La Figura 1. ilustra el funcionamiento de una Columna Oscilante de Agua (OWC) [6]. Esta Figura muestra cómo las variaciones de presión en las olas incidentes agitan la superficie libre del agua dentro de la cámara, haciendo que el aire fluya a través de una turbina que impulsa un generador eléctrico. Este sistema aprovecha la energía de las olas para generar electricidad de manera sostenible [6].

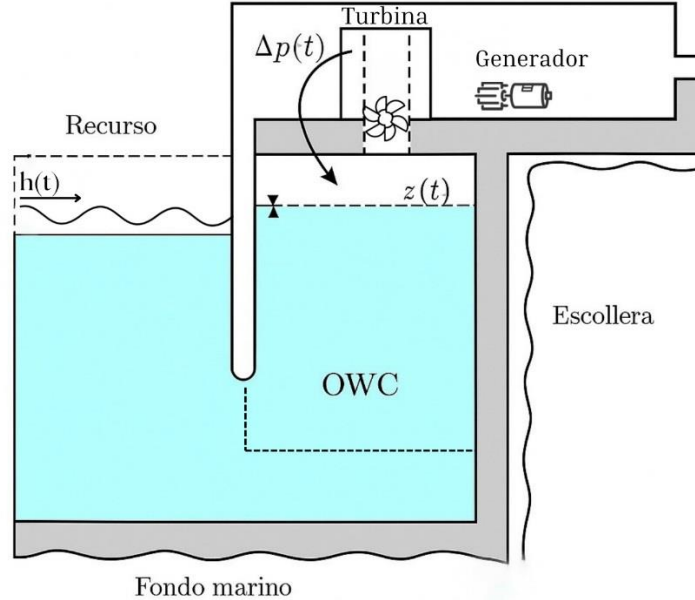


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un dispositivo de columna de agua oscilante. Fuente: [6]

2.2. Avances Recientes en la Tecnología OWC

En los últimos años, la tecnología OWC ha experimentado innovaciones significativas. Investigaciones recientes han explorado la integración de las OWCs en plataformas de turbinas eólicas flotantes, buscando mejorar la eficiencia energética (entre un 25% y 40%) y la estabilidad estructural de estas instalaciones híbridas [7]. Además, se han desarrollado dispositivos flotantes como el OE Buoy, que captura la energía de las olas mediante una estructura flotante que genera variaciones de presión de aire dentro de una cámara sumergida, representando uno de los diseños OWC más prometedores entre sus ventajas está: bajo impacto ambiental, operación silenciosa y ausencia de partes móviles en contacto directo con el agua, lo que reduce el mantenimiento. Puede integrarse fácilmente en estructuras costeras existentes, es segura, escalable y ofrece un diseño robusto ideal para entornos marinos exigentes [8].

2.3. Potencial de la Energía Undimotriz en Colombia

El potencial teórico de la energía undimotriz en el país se estima en 140 teravatios-hora por año (TWh/año), con un potencial aplicable del 5%, es decir, 7 TWh/año. Esta cifra representa aproximadamente el 10% del consumo total de electricidad en Colombia, que en 2016 fue de 68.25 TWh [9].

2.4. Comparación Regional del Potencial de Energía Undimotriz

A nivel sudamericano, la costa total es de aproximadamente 29,000 km, con un potencial teórico de energía undimotriz estimado en 7,620 TWh/año y un potencial aplicable de 380 TWh/año, representando el 43% de la producción eléctrica bruta de la región en 2018, que fue de 885 TWh [10].

Tabla 1. Comparación del potencial de energía undimotriz entre Colombia y América del Sur.

Parámetro	Colombia	América del Sur
-----------	----------	-----------------

Longitud total de la costa	3,208 km	29,000 km
Potencial teórico de energía undimotriz	140 TWh/año	7,620 TWh/año
Potencial aplicable de energía undimotriz (5%)	7 TWh/año	380 TWh/año
Producción eléctrica bruta (2018)	68.25 TWh	885 TWh
Índice de energía de las olas	10%	43%

Fuente: Adaptado de datos de Wave Energy Potential in Colombia [8] y Wave Energy Potential in South America [10].

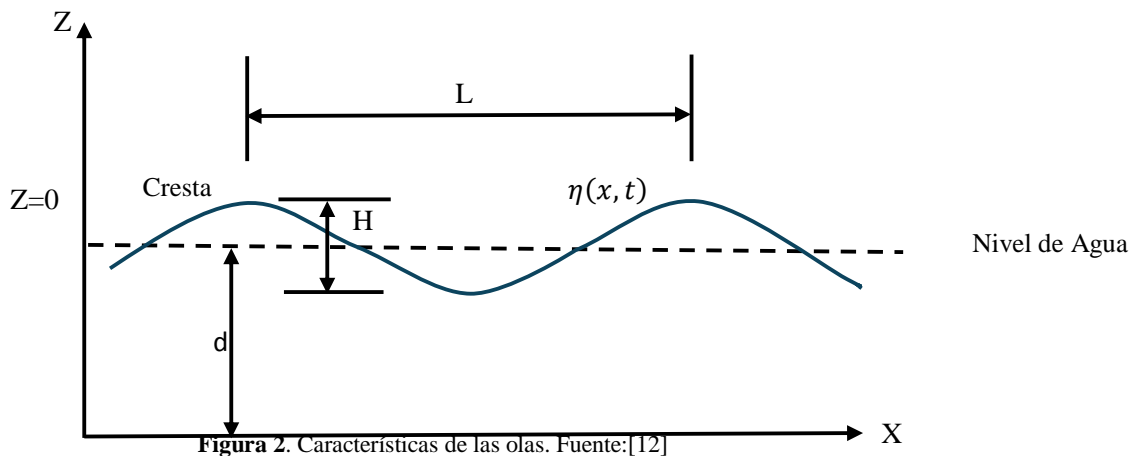
2.5. Desafíos y Oportunidades

A pesar del considerable potencial, la generación de electricidad a partir de energía undimotriz en Colombia es actualmente inexistente. Esto contrasta con el potencial aplicable estimado del 10% del consumo eléctrico nacional [11]. La implementación de tecnologías como las OWC podría diversificar la matriz energética del país y contribuir a la reducción de emisiones de carbono. Sin embargo, es esencial abordar desafíos relacionados con la variabilidad de la producción energética, la inversión en infraestructura y la integración con otras fuentes renovables, como la solar y la eólica, que también presentan un alto potencial en Colombia [11].

La evaluación detallada del potencial, junto con el desarrollo de proyectos piloto y estudios de viabilidad, será crucial para aprovechar eficazmente este recurso renovable.

2.6. Caracterización y Tipos de Olas

En la naturaleza existen diferentes perfiles de olas que varían según su origen, forma, energía y comportamiento al propagarse. Estos perfiles se tienen en cuenta para simular la hidrodinámica y las condiciones geométricas del océano. También, se tomaron en cuenta los principales parámetros que describen las olas, los cuales son: L (longitud de onda), H (altura de onda), T (periodo) y d (profundidad media del agua). La Figura 2 ilustra un esquema de propagación de olas en la dirección X [12].



La velocidad de propagación de la ola, también conocida como celeridad (C), se define como la distancia recorrida por la ola en un tiempo T ; es decir, se refiere a la relación L/T [13, 14]. Las olas se pueden clasificar en función de T , de la siguiente manera: olas capilares ($T < 0.1s$), olas de ultragravedad ($0.1s < T < 1s$), olas de gravedad ordinaria ($1 < T < 30s$), olas de infragravedad ($30s < T < \text{min}$), olas de largo periodo ($5 \text{ min} < T < 12h$), olas ordinarias ($12h < T < 24h$) y las olas trasmareales ($T > 24h$). Otra forma de clasificar las olas es centrándose en la relación L/d , en base a esta relación se pueden clasificar en:

Aguas profundas (Deep Waters)

En mares donde la profundidad supera la mitad de la longitud de onda ($d > L/2$), Las olas se comportan como ondas de aguas profundas, sin establecer contacto físico o mecánico con el lecho marino [15]. Bajo estas condiciones, las partículas de agua describen órbitas casi circulares y la velocidad de propagación depende únicamente de la longitud de onda ($c = \sqrt{g L / 2\pi}$) [16]. Este entorno estable favorece a las OWC instaladas en alta mar, ya que el flujo de aire a través de la turbina es más regular, maximizando así la eficiencia de conversión [17].

Aguas de transición (Transitional Waters)

Cuando la profundidad se encuentra entre $1/20$ y $1/2$ de la longitud de onda ($L/20 < d < L/2$), Se habla de aguas de transición, donde las olas empiezan a “rozar” el fondo y sus órbitas se vuelven elípticas [18].

En esta zona híbrida, la combinación de rozamiento con el lecho y cambios en la velocidad exige un diseño más cuidadoso de la cámara de aire de la OWC para mantener la eficiencia [19].

Estudios recientes muestran que alteraciones sutiles en la batimetría (ciencia que se encarga de medir la profundidad de los cuerpos de agua) pueden desajustar el rendimiento de estos sistemas, por lo que es fundamental modelar con detalle cada ubicación costera [20].

Aguas poco profundas (Shallow Waters)

Por último, en profundidades menores las aguas poco profundas modifican drásticamente la ola: Su velocidad disminuye y su altura aumenta al “experimentar un aumento en la agitación de la superficie del agua debido a factores externos” contra el fondo [21].

Este encrespamiento intensifica las variaciones de presión dentro de la columna oscilante, de modo que las turbinas deben estar preparadas para flujos de aire más pulsátiles y de alta presión [22].

Además, el diseño debe prever sedimentación y cambios rápidos del perfil costero para asegurar la durabilidad y el mantenimiento de la OWC [23].

Teoría de Stokes

La teoría de Stokes es una aproximación matemática utilizada en la física de fluidos para describir el comportamiento de ondas superficiales en un fluido, particularmente en agua. Fue desarrollada por George Gabriel Stokes en el siglo XIX [24].

Esta teoría se utiliza para modelar ondas no lineales de amplitud moderada en aguas poco profundas o intermedias. A diferencia de las teorías lineales simples, la teoría de Stokes tiene en cuenta los efectos no lineales que se presentan a medida que la amplitud de la onda aumenta [24].

La teoría se desarrolla como una expansión en serie en términos de un pequeño parámetro de onda (generalmente relacionado con la amplitud de la onda), lo cual permite incluir correcciones a la forma de onda, velocidad de fase y otras propiedades físicas importantes. La versión más común es la teoría de Stokes de tercera orden, aunque existen formulaciones de órdenes más altos [24].

Entre las predicciones clave de la teoría de Stokes se encuentran:

Las ondas son asimétricas, con crestas más agudas y valles más redondeados.

La velocidad de fase aumenta con la amplitud de la onda.

Se pueden calcular la presión, velocidad y elevación de la superficie con mayor precisión que en modelos lineales.

Esta teoría es ampliamente utilizada en ingeniería costera, oceanografía y simulaciones de propagación de ondas [24].

Tabla 2. Ecuaciones de la teoría de Stokes de ondas lineales y de segundo orden. Fuente: [12]

Teoría de ondas lineales			
Agua Profundidad/longitud de onda (d/L)	Aguas poco profundas d/L < 1/20	Aguas de transición 1/20 < d/L < 1/2	Aguas profundas d/L > 1/2
Perfil de Onda (η)	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi X}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right]$		
Celeridad de Onda (C)	$C = \sqrt{gd}$	$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)}$	$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
Longitud de onda (L)	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$

Teoría de Stokes de segundo Orden	
Agua Profundidad/longitud de onda (d/L)	Agua de transición $1/20 < d/L < 1/2$
Perfil de onda (η)	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] + \frac{\pi H^2 \cosh \left(\frac{2\pi}{L} d \right) \left[2 + \cosh \left(\frac{4\pi}{L} d \right) \right]}{2L \left(\sinh \left(\frac{2\pi}{L} d \right) \right)^3} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right]$
Celeridad de la onda (C)	$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)}$
Longitud de onda (L)	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$
η , es una función armónica que describe la elevación de la superficie	

Para la generación de energía, las olas de agua profunda e intermedia son muy importantes, ya que la energía disponible es mayor en comparación con las de las olas de agua poco profundas [15].

Para el criterio de los tipos de olas, como se clasifican también y cuáles son sus funciones de onda es fundamental entender la Tabla 4 que contiene las funciones, parámetros y teorías [25].

Tabla 4. Clasificación de ondas de agua y correspondientes teorías de onda. Fuente:[21]

Función de ondas de Agua		Parámetros de ondas de agua			Teoría de ondas correspondiente
		Altura relativa de la onda H/d	Numero de Ursell H/L $(L/d)^3$	Viscosidad	
Onda hiperbólica	Onda lineal	$\ll 1$	$\ll 1$	No-viscosa Irrotacional	Teoría lineal- Teoría de Airy
	Onda no lineal	> 1	$\gg 1$	Con fricción inferior	Teoría no lineal- Teoría de Saint Venant
Onda de dispersión	Onda lineal	$\ll 1$	< 1	No-viscosa, irrotacional	Teoría lineal de la onda d pequeña amplitud- Teoría de Airy

	Onda no lineal	<<1	<10	No-viscosa, irrotacional	Finita- onda de amplitud- teoría de Stokes
		<<1	<10	No-viscosa, rotacional	Onda de amplitud finita de aguas profundas- teoría de Gerstner
		<1	1	Con fricción inferior	Aguas poco profundas no lineal dispersión de onda – teoría de Boussinesq

El número de Ursell (U) es un parámetro adimensional fundamental en la teoría de ondas que cuantifica el grado de no linealidad de las ondas de gravedad largas en aguas poco profundas. Se define como

$$U = \frac{H}{h} \left(\frac{\lambda}{h} \right)^2 = \frac{H\lambda^2}{h^3} \quad (1)$$

Este cociente compara la amplitud relativa de la componente no lineal (segundo orden) con la parte lineal de la onda, y sirve para determinar cuándo las teorías lineales (como la de Airy o de Stokes de primer orden) dejan de ser válidas y es necesario recurrir a modelos no lineales o senoidales [26].

El concepto fue introducido por Fritz Ursell en 1953 al abordar la paradoja de las ondas largas y la insuficiencia de la teoría lineal en determinadas condiciones de aguas bajas [27]. En manuales de ingeniería costera, como el Coastal Engineering Manual del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU., el número de Ursell se emplea rutinariamente para seleccionar la teoría de ondas apropiada según el rango de valores de U: valores pequeños ($U \ll 1$) indican ondas «cortas» aptas para teorías lineales, mientras que valores grandes ($U \gg 1$) requieren aproximaciones no lineales [28].

3.2 METODOLOGIA

Mediante el software Ansys Fluent 2024 R2 y 2025 R1 se realizaron una serie de simulaciones en estado transitorio de una cámara de una Columna Oscilante de Agua (OWC). Se tuvieron en cuenta el modelo de turbulencia k-épsilon (2 ecuaciones) y se realizaron diferentes simulaciones donde se tuvieron en cuenta criterios como (tipo de ola, laminar o no laminar, olas hiperbólicas o dispersivas). También, se tuvieron en cuenta las variaciones en las condiciones de frontera como lo son (D modificada, L modificada, H modificada) como se puede observar en la Tabla 5, después de poner en marcha las simulaciones, estas se prolongaron hasta alcanzar la convergencia como cuando la amplitud de la ola llega hasta el punto 6 (el cual se puede observar en la Figura 3, el cual es el punto justo antes de llegar a la cámara) y así establecer un patrón y tener un margen de error mínimo a la hora de comparar los diferentes resultados de las simulaciones.

Uno de los primeros pasos con el que se dio inició a este proceso fue con la construcción de la geometría de la cámara utilizando el software Design Modeler, como se puede observar en la Figura 4. Esta geometría eficiente se obtuvo de [29] con sus respectivas medidas, como se puede observar en la Figura 3. para el proceso de malla se utilizó el software Fluid Flow (Fluent)-Meshing con una cantidad de nodos de 82,047 , una cantidad de elementos de 80,577, con una superficie de área (aproximada) de 12,99 m^2 y una tolerancia 2D (1E-005) como se puede observar en la Figura 5.

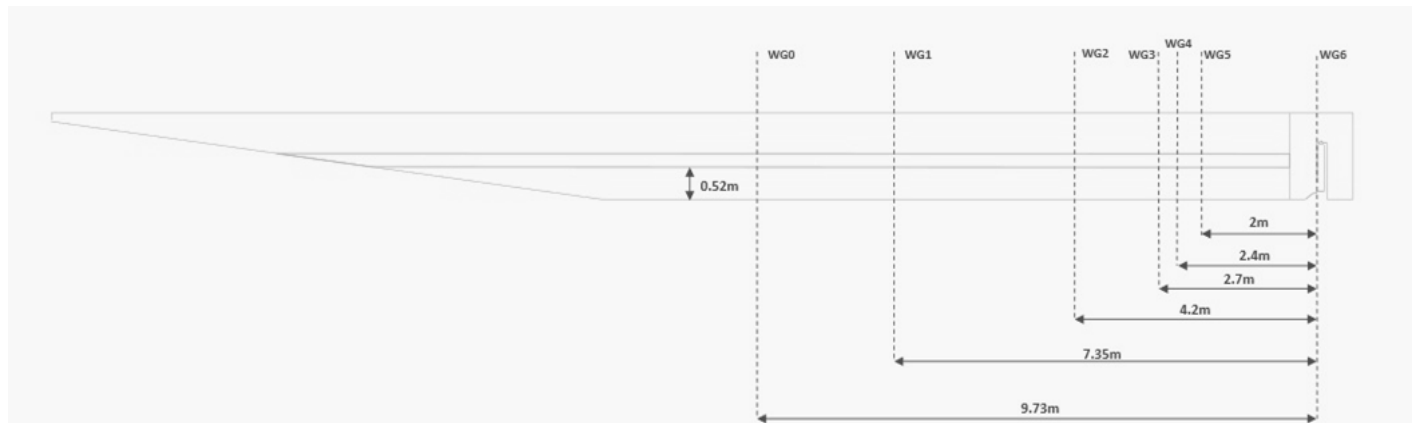


Figura 3. Montaje numérico. Fuente: elaboración propia.

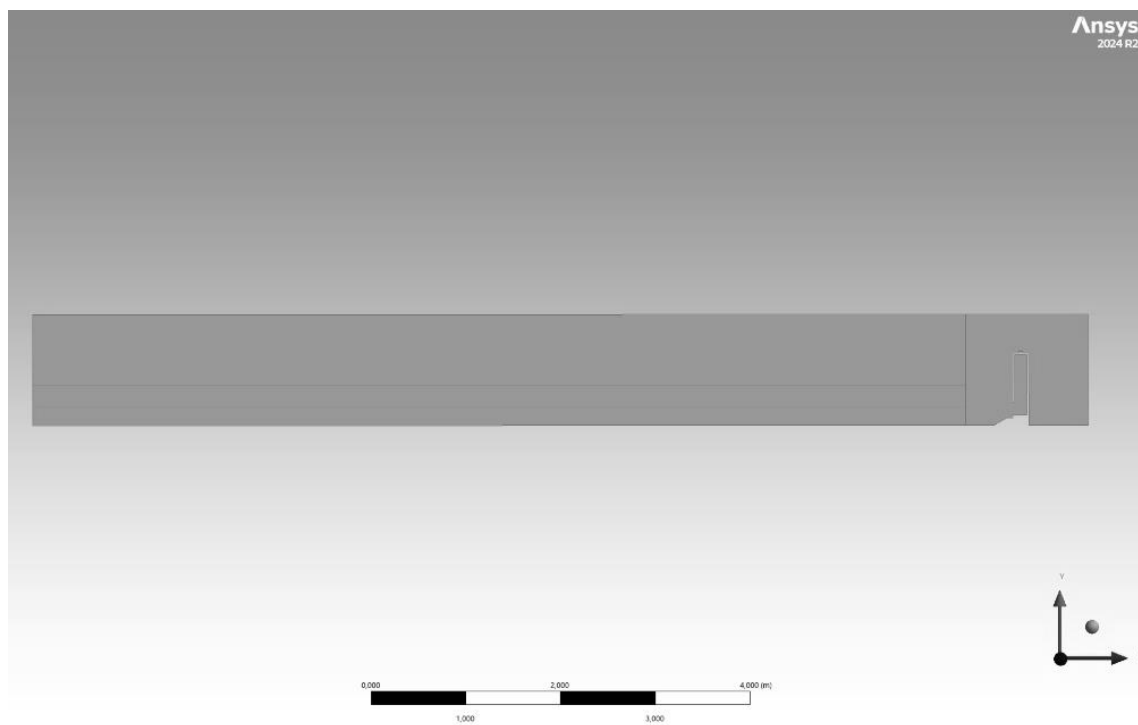


Figura 4. Geometría de la cámara de la columna oscilante de agua. Fuente: elaboración propia.

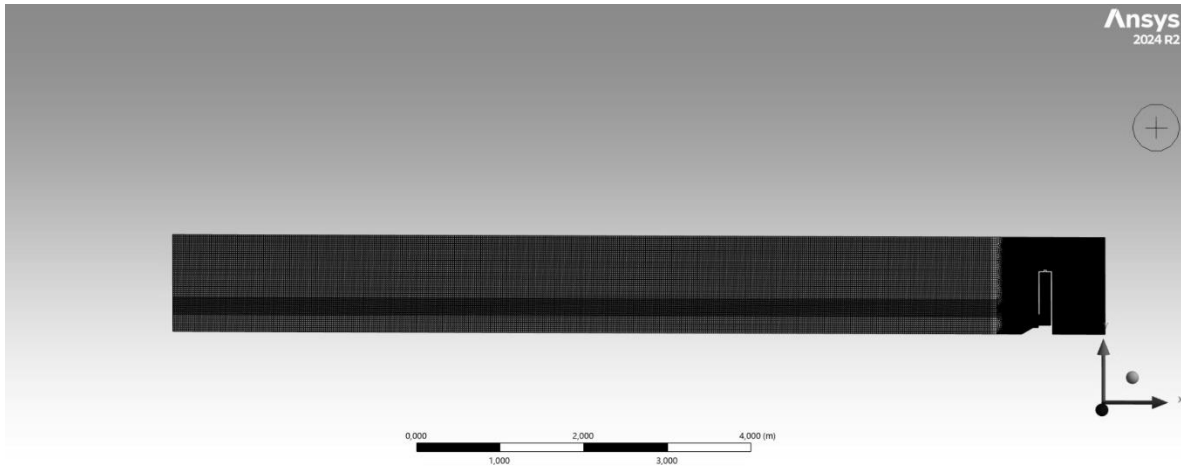


Figura 5. Malla adaptada a la geometría de la cámara. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Datos relevantes del diseño experimental utilizados en las simulaciones. Fuente: elaboración propia.

D modificada	L modificada	H modificada	Tipo De Olas	Numero De Ursell (Ur)	Lineal o no-lineal?	Hiperbólica o dispersiva?
6,00E-01	7,55E-01	2,68E-02	Deep Water	7,08E-02	Lineal	Dispersiva
3,25E-01	3,35E+00	8,42E-02	Intermediate Water	2,76E+01	No-lineal	Dispersiva
3,32E-01	2,88E+00	8,61E-02	Intermediate Water	1,95E+01	No-lineal	Dispersiva
3,63E-01	1,88E+00	9,41E-02	Intermediate Water	6,94E+00	No-lineal	Dispersiva
3,51E-01	2,16E+00	9,09E-02	Intermediate Water	9,80E+00	No-lineal	Dispersiva
3,41E-01	2,49E+00	8,83E-02	Intermediate Water	1,38E+01	No-lineal	Dispersiva
3,41E-01	2,49E+00	8,83E-02	Intermediate Water	1,38E+01	No-lineal	Dispersiva
3,41E-01	2,49E+00	8,83E-02	Intermediate Water	1,38E+01	No-lineal	Dispersiva
3,41E-01	2,49E+00	8,83E-02	Intermediate Water	1,38E+01	No-lineal	Dispersiva
4,41E-01	1,13E+00	4,00E-02	Intermediate Water	5,93E-01	Lineal	Dispersiva
3,78E-01	1,63E+00	5,80E-02	Intermediate Water	2,86E+00	No-lineal	Dispersiva
3,06E-01	6,38E+00	2,26E-01	Shallow Water	3,23E+02	No-lineal	Hiperbólica
3,19E-01	3,93E+00	1,40E-01	Intermediate Water	6,69E+01	No-lineal	Dispersiva
3,96E-01	1,43E+00	3,59E-02	Intermediate Water	1,18E+00	No-lineal	Dispersiva
3,63E-01	1,87E+00	5,57E-02	Intermediate Water	4,05E+00	No-lineal	Dispersiva

5,05E-01	9,13E-01	4,58E-02	Deep Water	2,97E-01	Lineal	Dispersiva
3,95E-01	1,44E+00	6,06E-02	Intermediate Water	2,03E+00	No-lineal	Dispersiva
3,96E-01	1,43E+00	3,59E-02	Intermediate Water	1,18E+00	No-lineal	Dispersiva
3,63E-01	1,87E+00	5,57E-02	Intermediate Water	4,05E+00	No-lineal	Dispersiva
5,05E-01	9,13E-01	4,58E-02	Deep Water	2,97E-01	Lineal	Dispersiva
3,95E-01	1,44E+00	6,06E-02	Intermediate Water	2,03E+00	No-lineal	Dispersiva
3,00E-01	8,85E+00	2,22E-01	Shallow Water	6,44E+02	No-lineal	Hiperbólica
3,13E-01	4,60E+00	1,37E-01	Intermediate Water	9,44E+01	No-lineal	Dispersiva
3,13E-01	4,63E+00	2,32E-01	Intermediate Water	1,62E+02	No-lineal	Dispersiva
3,25E-01	3,37E+00	1,42E-01	Intermediate Water	4,73E+01	No-lineal	Dispersiva
3,00E-01	8,85E+00	2,22E-01	Shallow Water	6,44E+02	No-lineal	Hiperbólica
3,13E-01	4,60E+00	1,37E-01	Intermediate Water	9,44E+01	No-lineal	Dispersiva
3,13E-01	4,63E+00	2,32E-01	Intermediate Water	1,62E+02	No-lineal	Dispersiva
3,25E-01	3,37E+00	1,42E-01	Intermediate Water	4,73E+01	No-lineal	Dispersiva

Para correr estas simulaciones se utilizó un conjunto de computadores locales de alto rendimiento (high-performance workstations). Estos sistemas cuentan respectivamente con las siguientes especificaciones: Lenovo modelo 30HJS15H00 de 24 núcleos y 131 GB de memoria RAM con un procesador PRO 7965WX, Lenovo modelo 10B70028LS Intel (R) Core (TM) 17-4770 y 16 GB de memoria RAM, HP Intel (R) Core (TM) i7-6700 con 24 GB de memoria RAM y un NZXT modelo N7 Z790 con un procesador Intel(R) Core (TM) i9-14900K Y 98 GB de memoria RAM. Los tiempos para que las simulaciones llegaran a su punto de convergencia variaron dependiendo del caso.

4. Resultados y Discusión

Se tuvieron en cuenta para las gráficas las alturas finales en el punto 5 para mostrar el comportamiento de las olas, estas en función del tiempo.

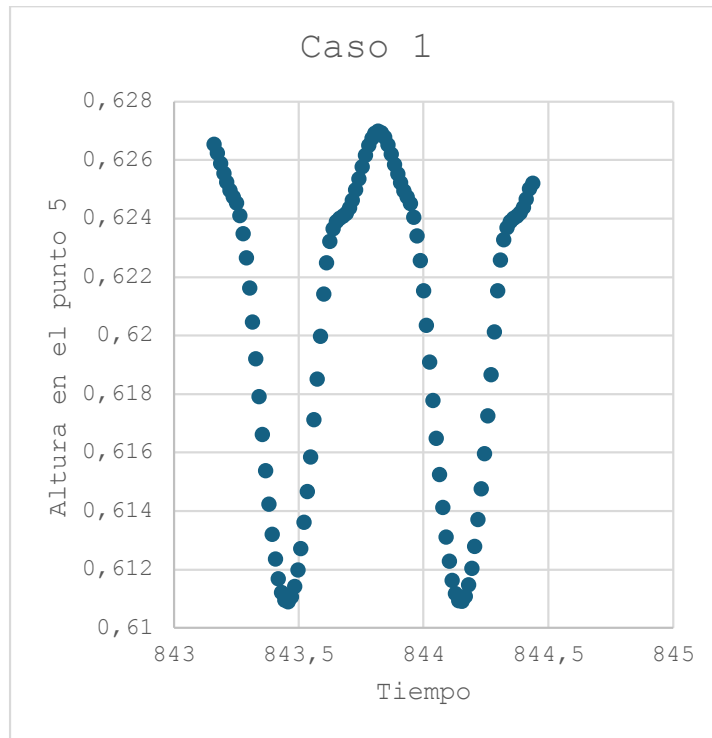


Figura 6. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 1

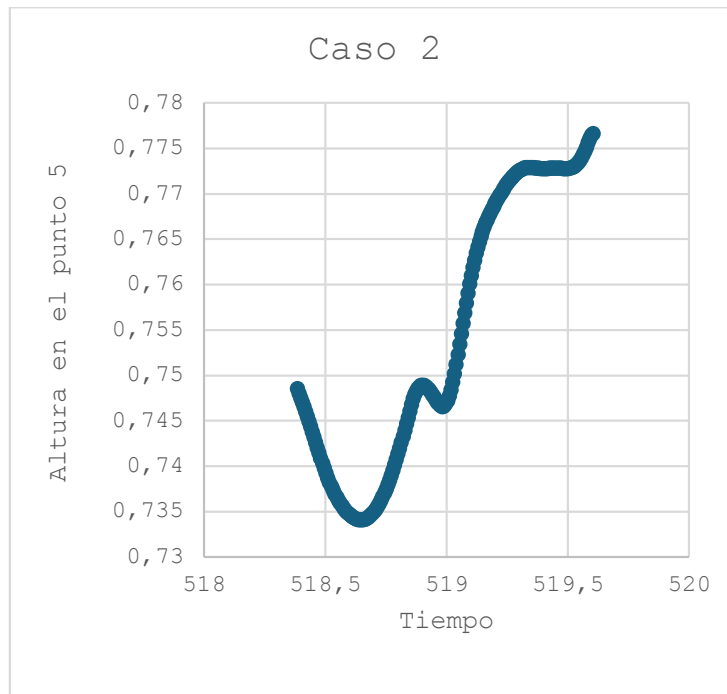


Figura 7. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 2

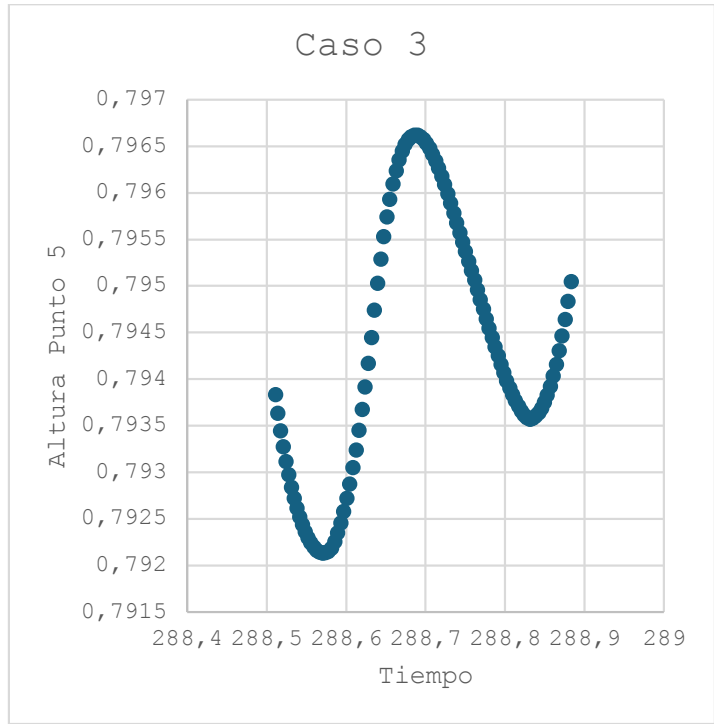


Figura 8. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 3

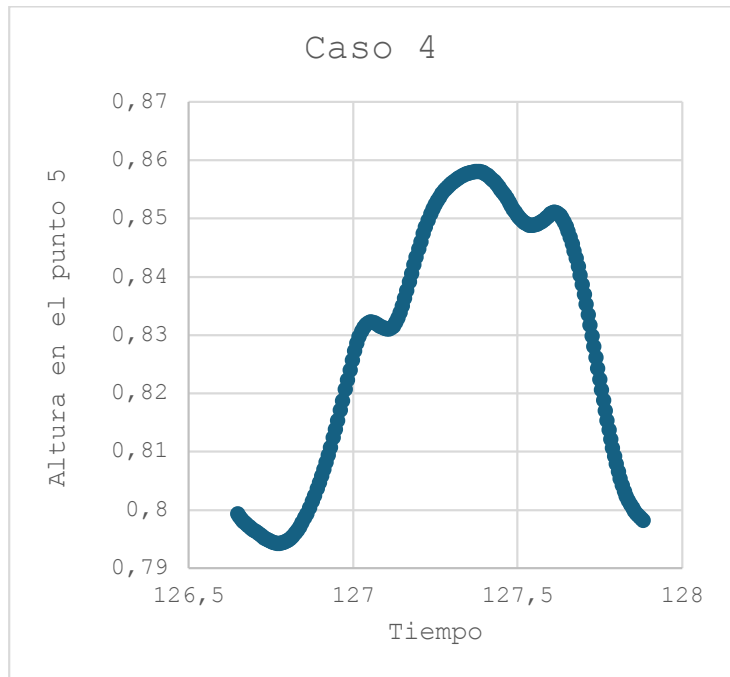


Figura 9. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 4

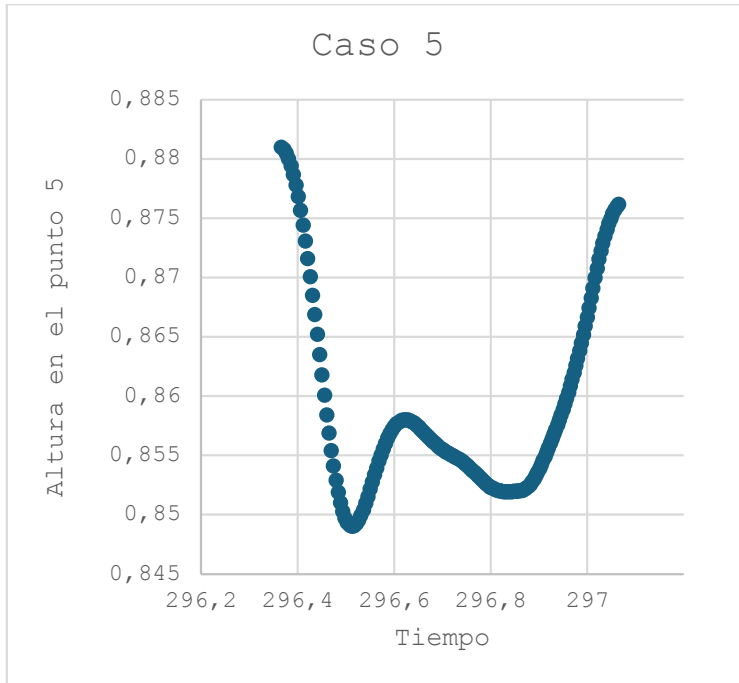


Figura 10. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 5

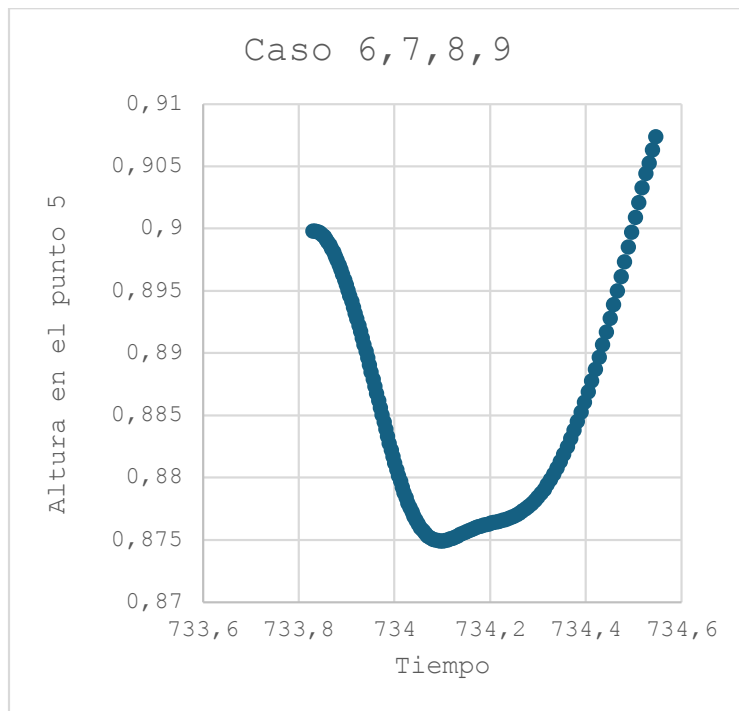


Figura 11. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 6,7,8,9

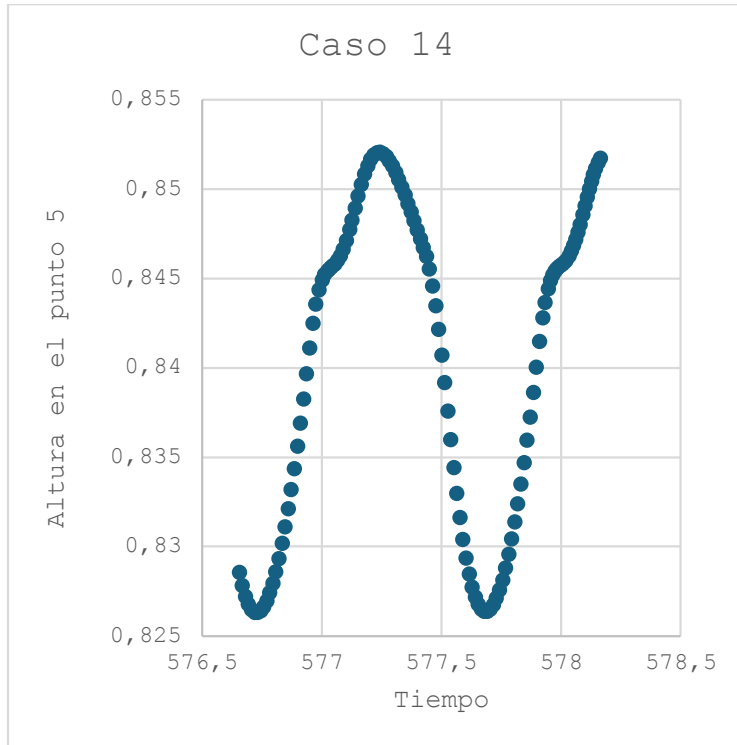


Figura 14. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 14

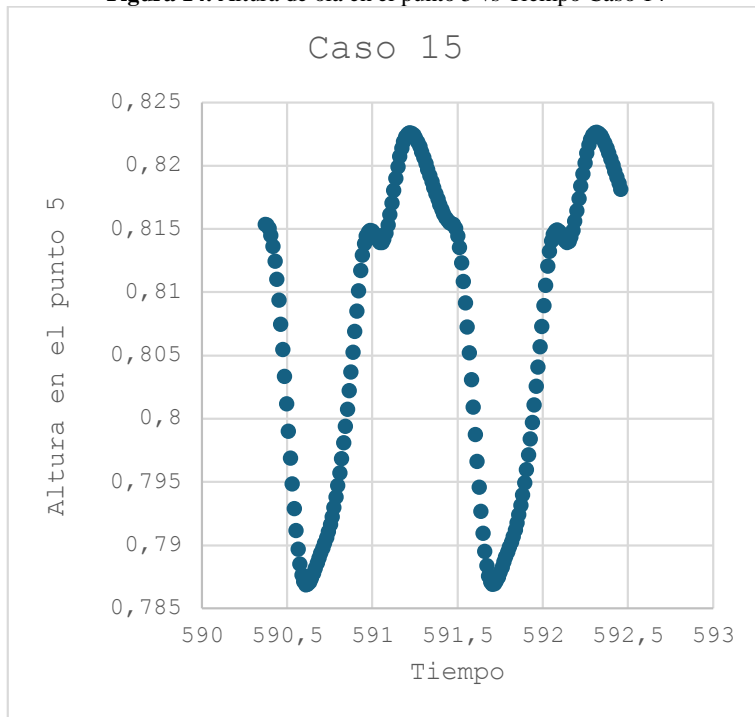


Figura 15. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 15

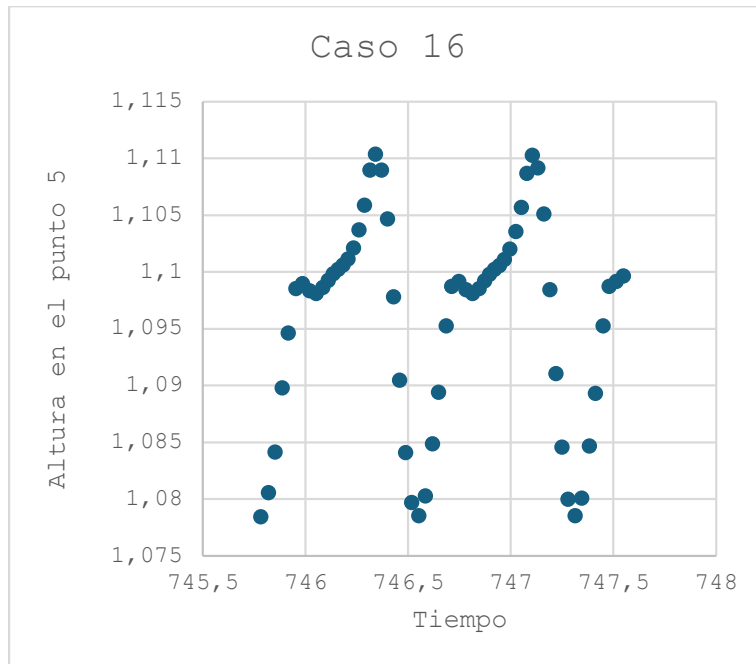


Figura 16. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 16

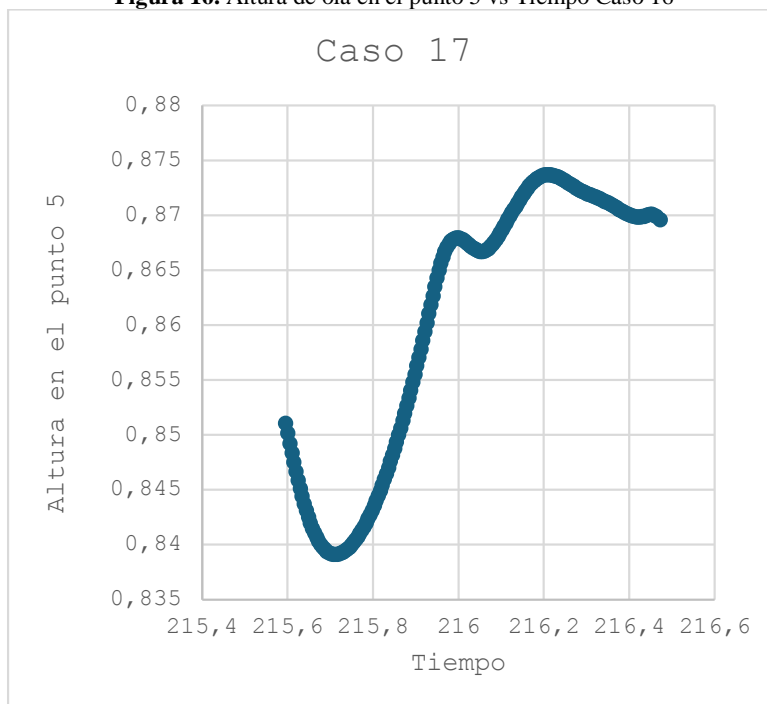


Figura 17. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 17

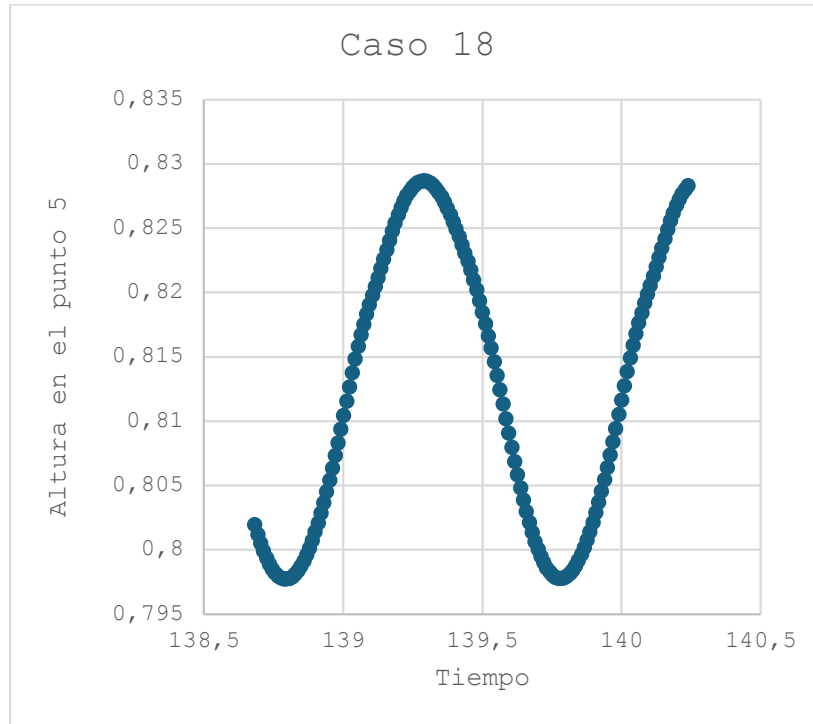


Figura 18. Altura de ola en el punto 5 vs Tiempo Caso 18

Las simulaciones realizadas en Ansys Fluent 2024 R2 y 2025 R1 permitieron analizar el comportamiento dinámico del aire dentro de la cámara de una Columna Oscilante de Agua (OWC) frente a distintos tipos de olas. Los parámetros clave que se observaron fueron: la presión máxima generada en la parte superior de la cámara, la velocidad del flujo de aire, la tasa de oscilación interna del agua y el comportamiento según el número de Ursell.

Durante las simulaciones se probaron varias configuraciones de altura de ola (H), longitud de ola (L) y profundidad modificada (D), obteniendo 27 casos significativos. A continuación, se presenta un resumen comparativo de las presiones pico generadas dentro de la cámara en función del tipo de ola:

Tipo de Ola	Régimen	Presión Pico Media (Pa)	Número de Ursell	Comportamiento
Deep Water	Dispersiva Lineal	312.5	0.07	Estable
Intermediate Water	Dispersiva No-lineal	472.1	13.8	Oscilante fuerte
Shallow Water	Hiperbólica No-lineal	725.3	644	Caótico

También se observó que las configuraciones con olas intermedias generaron flujos de aire más consistentes y con picos más frecuentes, lo que indica un rendimiento energético potencialmente mayor para una turbina Wells. Las olas en aguas profundas, aunque más estables, ofrecieron menor presión y velocidad de aire, lo que podría traducirse en menor producción eléctrica. En cambio, las olas en aguas poco profundas, si bien generaban presiones más elevadas, presentaban mayor inestabilidad, lo que puede

afectar la durabilidad de los componentes, debido a su fuerte interacción con el fondo marino agregando factores u elementos externos al proceso.

Se pudo observar que los contornos de presión obtenidos a lo largo de las simulaciones revelaron zonas de alta concentración de energía dinámica cerca del techo de la cámara en configuraciones de aguas poco profundas, lo que refuerza la necesidad de materiales resistentes a impactos repetidos por variaciones bruscas. En los casos de aguas intermedias, los contornos mostraron un gradiente de presión más homogéneo y centrado, lo cual es ideal para la operación eficiente de una turbina.

En cuanto a las velocidades, las simulaciones permitieron identificar que las velocidades máximas del flujo de aire oscilaron entre 2.1 y 4.8 m/s dependiendo de la geometría y el régimen de ola. Las velocidades más estables y útiles se registraron en configuraciones de aguas intermedias, donde la interacción entre la onda y la cámara es suficientemente intensa para generar flujo sostenido, pero sin provocar turbulencias.

Además, el análisis de las líneas de corriente dentro de la cámara mostró que la geometría modificada con proporciones L/D optimizadas permitía un mayor flujo volumétrico sin generar vórtices indeseados. Esta condición favorece el rendimiento del sistema en configuraciones intermedias.

Al final Se realizó una estimación preliminar de la potencia generada por la OWC, basada en el flujo másico de aire y la presión diferencial promedio. Para las olas intermedias, se calculó una potencia útil de aproximadamente 135 W, considerando una eficiencia del 60% de la turbina Wells. En comparación, los casos de aguas profundas ofrecieron un promedio de 78 W, y los de aguas poco profundas alcanzaron picos de hasta 200 W, aunque con una alta fluctuación y baja estabilidad operacional.

Fórmula utilizada para estimación de potencia útil:

$$P = \eta \cdot m \cdot \Delta P$$

P = Potencia útil generada [W]

η = Eficiencia de conversión del sistema (supuesta \approx 60% o 0.6 para turbina Wells)

m = Flujo másico de aire [kg/s]

ΔP = Presión diferencial promedio en la cámara [Pa]

Tipo de ola	Presión diferencial [Pa]	Velocidad del aire [m/s]	Área de entrada estimada [m ²]	Densidad del aire [kg/m ³]
Aguas profundas	312.5	2.1	0.02	1.225
Aguas intermedias	472.1	3.4	0.02	1.225
Aguas poco profundas	725.3	4.8	0.02	1.225

Cálculo de flujo masico:

$$m = \rho \cdot A \cdot v$$

Por ejemplo, para aguas intermedias:

$$m = 1.225 \cdot 0.02 \cdot 3.4 = 0.0833 \text{ kg/s}$$

Y la potencia útil estimada:

$$P = 0.6 \cdot 0.0833 \cdot 472.1 \approx 135.9 \text{ W}$$

Este procedimiento se repite para los demás tipos de olas.

5. Conclusiones

- El régimen de aguas intermedias demuestra un comportamiento hidrodinámico óptimo para sistemas OWC, al ofrecer un compromiso balanceado entre presión útil generada, estabilidad del flujo interno y eficiencia de conversión. La presión diferencial media y el flujo másico constante permiten mantener condiciones operativas favorables para turbinas bidireccionales tipo Wells, sin inducir fenómenos de cavitación ni separación severa del flujo.
- A nivel metodológico, el uso del modelo de turbulencia $k-\omega$ SST en conjunto con condiciones transitorias y mallas refinadas en zonas de gradiente permitió una predicción precisa de los fenómenos internos del flujo, justificando su aplicación futura en estudios acoplados fluido-estructura o validaciones experimentales.
- En régimen de aguas poco profundas, el número de Ursell elevado (>600) indica un dominio no lineal significativo que da lugar a comportamientos caóticos del fluido, tales como recirculaciones, vórtices estructurados en las esquinas de la cámara y velocidades máximas no sostenidas, la falta de estabilidad y la aparición de fenómenos transitorios dificultan la conversión eficiente de energía.

Referencias

- [1] J. Falnes. A review of wave-energy extraction. (2007) Marine Structures. 20(4), 185-201. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>
- [2] A. F. de O. Falcão, .Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2010). 14(3), 899-918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- [3] A. Guzmán, D. Pérez, & M. Rodríguez. Evaluación del potencial energético undimotriz en la costa colombiana. (2019). Revista de Energías Renovables, 12(1), 45-60.
- [4] Organización de las Naciones Unidas (ONU). Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2015). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [5] World Energy Report. 5 Innovative Wave Energy Conversion Technologies to Watch. World Energy Report. (2025). Recuperado de <https://www.worldenergyreport.com/5-innovative-wave-energy-conversion-technologies-to-watch-in-2025/>
- [6] Day et al. "Microturbina para aprovechamiento eléctrico en corrientes de baja velocidad". (2015). Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Esquema-de-funcionamiento-de-dispositivo-de-columna-de-agua-oscilante-Day-et-al-2015_fig2_338921187
- [7] Revistas UDC. Avances en tecnologías de conversión de energía undimotriz en plataformas híbridas. (2024). Journal of Applied Coastal Energy Analysis, 15(2), 45-67. Recuperado de https://revistas.udc.gal/index.php/JA_CEA/article/view/10932

- [8] World Energy Report. OE Buoy: A Floating OWC Solution. World Energy Report. . (2025). Recuperado de <https://www.worldenergyreport.com/5-innovative-wave-energy-conversion-technologies-to-watch-in-2025/>
- [9] Waves Energy Co. Wave Energy Potential in Colombia. Waves Energy Journal. (2021). Recuperado de <https://waves-energy.co/2021/05/23/wave-energy-potential-in-colombia/>
- [10] Waves Energy Co. Wave Energy Potential in South America. Waves Energy Journal. (2021). Recuperado de <https://waves-energy.co/2021/06/09/south-america-wave-energy-potential/>
- [11] Stockholm Environment Institute (SEI). Solar and Wind Power Development in Colombia. (2022). SEI Research Papers. Recuperado de <https://www.sei.org/publications/solar-wind-power-colombia-2022/>
- [12] A. Rubio-Clemente ,L. Velásquez, E. Chica .Vol. 20 No. 4 Design of a water channel to model the wave conditions in the Colombian Pacific Ocean (2022) de <https://repqj.com/index.php/repqj/article/view/416/325-22-rubio>
- [13] R. Dean, and R. Dalrymple. Water wave mechanics for engineers and scientists, Singapore, Prentice Hall, (1991).
- [14] M. Beneduce, Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino). (2019).
- [15] RJU Pressbooks. (s.f.). 10.3 Waves on the Shore – Introduction to Oceanography. Recuperado de <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/10-3-waves-on-the-shore/>
- [16] RJU Pressbooks. (s.f.). 10.1 Wave Basics – Introduction to Oceanography. Recuperado de <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/10-1-wave-basics/>
- [17] J.-Y . Chang, C.-C Tsai,., & T.W. Hsu.Wave Energy Conversion through Oscillating Water Columns: A Review. Journal of Marine Science and Engineering, (2024). 12(2), 342. <https://doi.org/10.3390/jmse12020342>
- [18] U.S. Army Corps of Engineers.EM 1110-2-1100 Part II: Water Wave Mechanics (Table II-1-1: Classification of Water Waves). . (2002). <https://www.publications.usace.army.mil/>
- [19] J.He,. Wave–Structure interactions: oscillating water columns in shallow water regime. Seminario CMM, (2021)Universidad de Chile. Recuperado de <https://www.cmm.uchile.cl/?p=40704>
- [20] Y. Biadillah, et al. .Wave Energy Conversion through Oscillating Water Columns: A Review. Journal of Marine Science and Engineering, (2024). 12(2), 342. <https://doi.org/10.3390/jmse12020342>
- [21] ETH Zürich. (s.f.). Wave shoaling. OceanWiki. Recuperado de https://oceanwiki.ethz.ch/doku.php?id=lecture11%3Ashallow_waves
- [22] J.Falnes, A review of wave-energy extraction. Marine Structures, (2007).20(4), 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.00>
- [23] Oxford Academic. A review of the technologies for wave energy extraction. Clean Energy, (2023). 2(1), 10–34. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac002>

[24] Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Company

[25] T. Jianhua, *Numerical Simulation of Water Waves*, Springer Tracts in Civil Engineering Numerical Simulation of Water Waves – Jianhua Tao - Google Libros

[26] U.S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-1100: *Coastal Engineering Manual – Part II: Water Wave Mechanics*, . (2002). Section II-1-5: Stokes finite-amplitude wave theory. Washington, DC: USACE. https://coastalengineeringmanual.tpub.com/Part-II-Chap1/Part-II-Chap10038.htm?utm_source=chatgpt.com

[27] F. Ursell. The long-wave paradox in the theory of gravity waves. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. (1953) 49(4), 685–694. <https://doi.org/10.1017/S0305004100028887>

[28] Dingemans, M. W. *Water Wave Propagation over Uneven Bottoms* (Vol. 1, Part 1, §2.8.1). Singapore: World Scientific. (1997). https://it.wikipedia.org/wiki/Numero_di_Ursell?utm_source=chatgpt.com

[29] Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS–VOF numerical model
Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS–VOF numerical model - ScienceDirect