

ANÁLISIS CFD DE UN CONVERTIDOR UNDIMOTRIZ DE BOYA OSCILANTE  
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS OLAS EN LA BAHÍA  
SOLANO

EMERSON FABIAN BUITRAGO SUAREZ  
ANDRES FERNANDO CARREÑO SANTIAGO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2025

ANÁLISIS CFD DE UN CONVERTIDOR UNDIMOTRIZ DE BOYA OSCILANTE  
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS OLAS EN LA BAHÍA  
SOLANO

EMERSON FABIAN BUITRAGO SUAREZ  
ANDRÉS FERNANDO CARREÑO SANTIAGO

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero mecánico

Director

Ph.D. Julian Ernesto Jaramillo Ibarra

Co-Directores

Ph.D. Carlos Fidel Amaris Castilla

Ph.D. Juan Pablo Florez Mera

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2025

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1. TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE	13
2.1.1. Descripción física del oleaje	15
2.1.2. Dispersión del oleaje	15
2.2. TEORÍA NO LINEAL DEL OLEAJE	16
2.2.1. Teoría de stokes	17
2.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OLEAJE	18
2.4. CONVERTIDORES DE ENERGÍA DE LAS OLAS	20
2.5. TIPO DE UNDIMOTRIZ QUE SE VA A EMPLEAR	27
2.6. ESPECIFICACIONES DEL WEC TIPO BOYA OSCILANTE	29
2.7. DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS	30
2.7.1. Ecuación del movimiento de oscilación	30
2.7.2. Vorticidad	31
2.7.3. Ecuaciones de gobierno	32
2.7.4. Modelo laminar	34
2.7.5. Velocity Inlet (velocidad de entrada)	35
2.7.6. Pressure outlet (Salida de presión)	35
2.7.7. Wall (Pared)	36
<b>3. WEC TIPO BOYA OSCILANTE</b>	<b>37</b>
3.1. POTENCIA PROMEDIO DEL WEC	38

<b>4. ANÁLISIS DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA COSTA DEL PACIFICO</b>	<b>40</b>
4.1. SELECCIÓN DE LA BAHÍA SOLANO	42
<b>5. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO EN ANSYS FLUENT</b>	<b>43</b>
5.1. GEOMETRÍA DEL DISPOSITIVO PARA LA VALIDACIÓN	43
5.2. GEOMETRÍA DEL DISPOSITIVO WEC EN LA BAHIA SOLANO	44
5.3. GEOMETRÍA TANQUE DE OLAS PARA LA VALIDACIÓN	46
5.4. GEOMETRÍA TANQUE DE OLAS EN LA BAHÍA SOLANO	47
5.5. MALLADO PARA LA VALIDACIÓN	48
5.6. MALLADO DEL TANQUE DE OLAS EN LA BAHÍA SOLANO	50
5.7. CONFIGURACIÓN DEL FLUENT	52
<b>6. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMATICO EN ANSYS FLUENT</b>	<b>60</b>
6.1. INDEPENDENCIA DEL MALLADO	60
6.2. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO	63
6.3. VALIDACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL WEC	64
<b>7. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL WEC TIPO BOYA OSCILANTE EN LA BAHÍA SOLANO</b>	<b>68</b>
7.1. AJUSTE DE GEOMETRÍA	71
7.2. ANÁLISIS DE VORTICIDAD	73
7.3. COMPARACIÓN DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS	78
7.4. ANÁLISIS DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN) Y LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	82
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>84</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Representación de una onda de Airy .	14
Figura 2. Formación de una onda de Stokes de segundo orden mediante la combinación de dos componentes senoidales.	17
Figura 3. Categorización de dispositivos WEC basada en su posición.	22
Figura 4. Categorización de los dispositivos WEC según su principio de captación.	24
Figura 5. Categorización basada en el tamaño y orientación al frente de ola.	26
Figura 6. Sistema wave star C5	29
Figura 7. Esquema y modelo experimental del dispositivo WEC tipo boya oscilante	30
Figura 8. cuerpo flotante	37
Figura 9. $L=\lambda$	38
Figura 10. Gráfica de altura significativa y periodo significativo de oleaje	41
Figura 11. Potencia de oleaje en el Pacifico colombiano (W/m)	41
Figura 12. Dimensiones del dispositivo (Sin escalado)	44
Figura 13. Esquema del dispositivo (Escalado 10:1)	45
Figura 14. Dimensiones del dispositivo WEC unidades en (m)	46
Figura 15. Dimensiones del tanque de olas (sin escalado)	47
Figura 16. Dimensiones del tanque de olas (Escalado 10:1)	48
Figura 17. Mesh del canal de oleaje	49
Figura 18. Detalles de la generación de malla del modelo de tanque de olas.	50
Figura 19. Mallado para la Bahía Solano.	51
Figura 20. Calidad del mallado en base al Orthogonal Quality	51

Figura 21.	Modelo Físico	53
Figura 22.	Materiales	54
Figura 23.	Multiphase	55
Figura 24.	Inlet y Outlet	56
Figura 25.	Numerical Beach	56
Figura 26.	Dynamic Mesh	57
Figura 27.	Métodos	58
Figura 28.	Comparación de los diferentes mallados sin el WEC	61
Figura 29.	Comparación de los diferentes mallados sin el WEC de Reabroy	62
Figura 30.	Viscosidad turbulenta	63
Figura 31.	Viscosidad turbulenta cerca al WEC	64
Figura 32.	Desplazamiento del wec en Ansys Fluent con Te:1,4 y Hs:0,08	65
Figura 33.	Desplazamiento del wec experimental y cFD de Reabroy con Te:1,4 y Hs:0,08	66
Figura 34.	Desplazamiento del wec en la Bahía Solano(Zo) Te:5,4s y Hs:0,9m	68
Figura 35.	Potencial del dispositivo WEC en la Bahía Solano Te:5,4s y Hs:0,9m	70
Figura 36.	Potencia con WEC 2 Toneladas Te:5,4s y Hs:0,9m	72
Figura 37.	Potencia con WEC 1,8 Toneladas Te:5,4s y Hs:0,9m	72
Figura 38.	Vorticidad del WEC)	74
Figura 39.	Rediseño del dispositivo WEC en metros	75
Figura 40.	Potencial del dispositivo WEC mejorado	75
Figura 41.	Desplazamiento del dispositivo WEC mejorado	76
Figura 42.	Vorticidad del WEC mejorado en el borde inferior	76
Figura 43.	Desplazamiento del WEC mejorado con tiempo más prolongado	77
Figura 44.	Potencial del WEC mejorado con tiempo más prolongado	77
Figura 45.	Ubicación boya y longitud de utilización para el WEC	78
Figura 46.	Energía en MWh por cada mes del 2015 para 10 WEC	79

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Categorización de dispositivos WEC basada en su posición.	21
Tabla 2. Categorización de los dispositivos WEC según su principio de captación.	23
Tabla 3. Categorización basada en el tamaño al frente de ola.	25
Tabla 4. Categorización basada en el método de instalación.	27
Tabla 5. Configuración del Fluent	52
Tabla 6. Parámetros de los 3 mallados	61
Tabla 7. Parámetros del mallado con el WEC	65
Tabla 8. Parámetros del mallado del WEC en la Bahía solano	68
Tabla 9. KWh para los diferentes pesos del WEC	73
Tabla 10. Producción y costos de diferentes fuentes de energía renovable en Colombia	79
Tabla 11. Producción, costos e ingresos de diferentes fuentes de energía renovable en Colombia	81
Tabla 12. Calculo VAN y TIR	83

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS CFD DE UN CONVERTIDOR UNDIMOTRIZ DE BOYA OSCILANTE PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS OLAS EN LA BAHÍA SOLANO \*

**AUTOR:** EMERSON FABIAN BUITRAGO SUAREZ, ANDRES FERNANDO CARREÑO SANTIAGO \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Energía Undimotriz, CFD, ANSYS Fluent, Boya Oscilante, Bahía Solano, Vorticidad, Independencia del Mallado, Potencia, Eficiencia.

### DESCRIPCIÓN:

Colombia enfrenta una creciente necesidad de fuentes de energía renovable, especialmente en las zonas no interconectadas del Pacífico, como la Bahía Solano. Con el aumento de las tarifas de energía y la falta de soluciones adecuadas para estas regiones, se ha propuesto el aprovechamiento de la energía undimotriz, que utiliza el movimiento de las olas para generar electricidad. Este proyecto tiene como objetivo evaluar el rendimiento de un convertidor undimotriz tipo boya oscilante mediante simulaciones CFD en ANSYS Fluent, explorando cómo interactúa con las olas para optimizar su diseño y maximizar su eficiencia energética.

Las simulaciones mostraron que el dispositivo puede alcanzar una potencia máxima de 8 kW y un promedio de 3,9 kW, con una eficiencia teórica del 60,5%. Además, se realizaron ajustes en la geometría del dispositivo para reducir la vorticidad, lo que mejoró la potencia promedio a 4 kW y la eficiencia a 62%. El análisis comparativo con datos experimentales confirmó que el modelo CFD es efectivo para predecir el comportamiento del WEC. Se concluye que la energía undimotriz es una opción viable para la Bahía Solano, y se sugiere realizar estudios adicionales para optimizar el diseño y enfrentar posibles desafíos en su implementación

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: PhD Julian Ernesto Jaramillo Ibarra. Co-directores: Ph.D. Juan Pablo Florez Mera y Ph.D. Carlos Fidel Amaris Castilla.

## ABSTRACT

**TÍTULO:** CFD ANALYSIS OF AN OSCILLATING BUOY WAVE POWER CONVERTER FOR WAVE ENERGY PRODUCTION IN SOLANO BAY \*

**AUTHOR:** EMERSON FABIAN BUITRAGO SUAREZ, ANDRES FERNANDO CARREÑO SANTIAGO \*\*

**KEY WORDS:** Wave Energy, CFD, ANSYS Fluent, Oscillating Buoy, Bahía Solano, Vorticity, Mesh Independence, Power, Efficiency.

### DESCRIPTION:

Colombia faces a growing need for renewable energy sources, especially in non-interconnected areas of the Pacific region, such as Bahía Solano. With rising energy costs and the lack of suitable solutions for these regions, wave energy, which harnesses the movement of ocean waves to generate electricity, has been proposed. This project aims to evaluate the performance of an oscillating buoy-type wave energy converter (WEC) through CFD simulations in ANSYS Fluent, exploring its interaction with waves to optimize the design and maximize energy efficiency.

The simulations showed that the device could reach a maximum power output of 8 kW and an average of 3,9 kW, with a theoretical efficiency of 60,5%. Furthermore, adjustments to the device's geometry to reduce vorticity improved the average power to 4 kW and the efficiency to 62%. Comparative analysis with experimental data confirmed that the CFD model is effective in predicting the WEC's behavior. In conclusion, wave energy is a viable option for Bahía Solano, and further studies are recommended to optimize the design and address potential challenges in its implementation.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: PhD Julian Ernesto Jaramillo Ibarra. Co-directores: Ph.D. Juan Pablo Florez Mera y Ph.D. Carlos Fidel Amaris Castilla.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de innovar soluciones para generar más fuentes de energía renovable en Colombia es cada vez mayor, debido a la gran cantidad de zonas no interconectadas, especialmente en la región del Pacífico, y al constante aumento de las tarifas de energía. Por esta razón, en este proyecto se ha decidido realizar un análisis en CFD de un dispositivo undimotriz de boya oscilante para el aprovechamiento de la energía undimotriz. Esta fuente de energía ha sido poco estudiada en Colombia, pero tiene un gran potencial para el futuro.

En lo que va del 2022, el valor de la energía ha aumentado, según el DANE, que indicó que entre los meses de julio y agosto los servicios se encarecieron un 6,74 %. Sin embargo, el aumento en el costo de la energía eléctrica es aún más preocupante, ya que entre agosto de 2021 y agosto de 2022 fue del 25,9 %.

Por lo tanto, se requiere una nueva fuente de energía renovable, como la energía undimotriz, que ofrece amplias ventajas. Una de las ventajas es la consistencia de su potencial energético, que se concentra en regiones específicas, lo que la convierte en una energía predecible. En comparación con otras fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica o eólica<sup>1</sup>.

Al contar con diferentes tipos de dispositivos que permiten aprovechar el potencial energético de las olas del mar para convertirlo en electricidad, como absorbedores de energía puntual, captadores atenuadores, dispositivos oscilantes, columnas de

---

<sup>1</sup> Camilo Andrés Figueredo Guerrón y Fidel Esteban Quevedo Orjuela. "Evaluación de la energía undimotriz como una alternativa sustentable para alimentación de un sistema de levantamiento artificial en una plataforma semisumergible." thesis. Fundación Universidad de América, 2022.

agua oscilantes, colectores de olas y masas giratorias, se ha decidido utilizar el absorbedor de energía puntual para este proyecto de investigación. Se explicará con mayor detalle el criterio de selección que se tuvo en cuenta, teniendo en cuenta las ventajas y el funcionamiento que ofrece cada dispositivo.

También la implementación de la energía undimotriz brinda una perspectiva prometedora al evaluar el ratio de Potencia por unidad de superficie ( $W/m^2$ ) con otras fuentes de energía renovables, tales como; la Biomasa con  $0,6 W/m^2$ , La solar con  $200 W/m^2$ , la eólica entre  $60$  a  $400 W/m^2$  y la undimotriz entre  $2000$  a  $3000 W/m^2$ . La energía undimotriz tiene una ventaja significativa en potencia por unidad de área en contraste con otras fuentes de energía renovable, pero en Colombia ha sido poco aprovechada debido a la falta de estudios y tecnología en esta área.

En Colombia, existe una problemática importante en relación a las zonas no interconectadas, las cuales abarcan alrededor de 1.710 localidades rurales, principalmente ubicadas en la costa del Pacífico, según datos del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (Ipse). Se ha considerado que la energía undimotriz podría ser la solución a esta problemática, debido a un estudio realizado por el Grupo de Investigación en Conversión de Energía (Convergía), que reveló que en el año 2015 se generó una potencia total promedio de ola de  $9,6 KW/m$  en la costa del Pacífico. Dado que la longitud de la costa del Pacífico es de  $1.300 km$ , se cree que esta alternativa podría ser una solución rentable para resolver dicha problemática<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Mario Pelissero et al. "Aprovechamiento de la energía undimotriz". En: (2018).

<sup>3</sup> Aris Idárraga y Harol Diaz. "Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del pacifico colombiano". En: *Avances: Investigacion en Ingenieria* 15.1 (2018), págs. 286-301.

## **1. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar el desempeño en la generación de energía de un convertidor undimotriz de boya oscilante en la costa del Pacífico colombiano (Bahía Solano), en términos de la amplitud de movimiento de la boya y la vorticidad generada, mediante CFD usando ANSYS FLuent.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir la geometría de la boya oscilante y parámetros de operación del modelo matemático en base a modelos encontrados en la literatura.
- Determinar la energía potencial del dispositivo undimotriz, a partir de los diferentes parámetros físicos como la amplitud de movimiento de la boya obtenidas en la simulación CFD con FLUENT ANSYS.
- Validar el modelo matemático a través de la comparación de los resultados obtenidos en la simulación CFD con datos encontrados en la literatura.
- Evaluar los parámetros de rendimiento del WEC al modificar la geometría de la boya oscilante y comparar los resultados con otros sistemas de generación de energía renovable disponibles. Considerando las condiciones del oleaje en la Bahía de Solano.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE

Las teorías que describen el oleaje son aproximaciones a la realidad. La teoría lineal del oleaje es un enfoque matemático que simplifica el análisis de las olas en la superficie del agua. Se basa en la idea de que las olas pueden describirse como ondas sinusoidales y se enfoca en predecir parámetros clave, como la altura, longitud, velocidad y frecuencia de las olas. Esta teoría asume amplitudes pequeñas y pendientes moderadas. Considera la influencia de la profundidad del agua en la velocidad de propagación, pero no aborda fenómenos más complejos como la dispersión de energía. Aunque útil para análisis preliminares, la teoría lineal tiene limitaciones en situaciones del mundo real, donde se recurre a modelos más complejos<sup>4</sup>.

Las hipótesis de partida son:

El agua se caracteriza por ser homogénea e incompresible, lo cual conlleva a que su densidad, representada por el símbolo  $\rho$ , se mantenga constante.

El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser asimismo despreciado.

La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.

Se asume y se define la viscosidad y densidad del mar.

No se considera interacción del oleaje con otros movimientos marinos para facilitar el análisis y el comportamiento del dispositivo WEC.

El lecho marino representa un límite horizontal inmutable e impermeable.

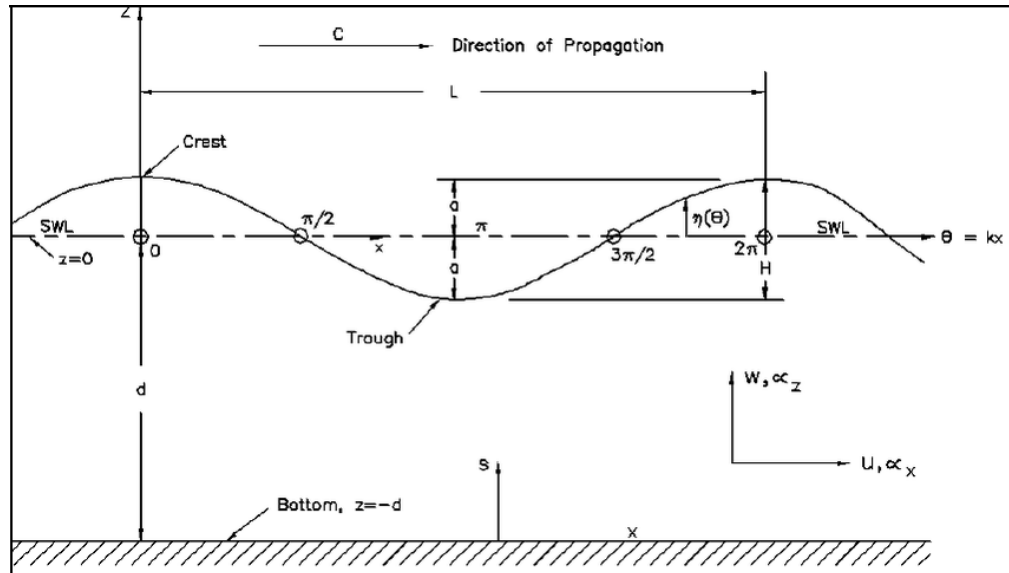
La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio.

Las ondas se presentan de forma plana, limitada a dos dimensiones.

---

<sup>4</sup> Y Cataño, JP Smith y J Naranjo. "Ondas Airy de gravedad y teoría de primer orden aplicadas a la atenuación de ondas estacionarias". En: *Avances en Recursos Hidráulicos* 08 (2001), págs. 17-26.

Figura 1. Representación de una onda de Airy .



**Fuente:** Sabatier, F. (2007). US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 2002.

En el campo de las investigaciones sobre ondas, se emplean diversos términos para describir fenómenos relacionados con la propagación y el comportamiento del agua, como se muestra en la Figura 1<sup>5</sup>. Algunos de estos términos clave son:"

- $d$  o  $h$ : Representa la profundidad del agua.
- $\eta$ : Indica la elevación de la superficie libre a partir de  $z = 0$
- $H$ : Denota la altura de la ola, siendo igual a  $2a$  para olas sinusoidales.
- $L$  o  $\lambda$ : Se hace referencia a la longitud de onda.
- $T$ : Representa la duración del periodo de onda.
- $c$ : Es la velocidad de propagación de la ola, calculada como  $\frac{L}{T}$
- $k$ : Número de onda asociado a la onda.
- $\omega$ : Frecuencia angular de onda.
- $u, w$ : Son las componentes horizontal y vertical del vector velocidad.
- $g$ : Indica la aceleración debida a la gravedad.
- $\rho$ : Representa la densidad del agua.
- $a$ : Corresponde a la amplitud.

<sup>5</sup> François Sabatier. "US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100. US Army Corps of Engineers, Washington, DC (6 volumes)." En: *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography* 108 (2007), pág. 146.

**2.1.1. Descripción física del oleaje** La consideración debe centrarse en la configuración de la superficie del agua, contemplando su altura (la distancia vertical desde la cresta hasta el seno) y su longitud (la distancia horizontal entre dos crestas).

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

$$T = 2\pi \left[ \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

La ecuación 1 y 2 describe una onda sinusoidal periódica y progresiva que se propaga en la dirección  $x$ . En esta ecuación,  $\eta$  representa la forma de la superficie libre,  $k$  es el número de onda,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $L$  es la longitud de onda,  $T$  es el periodo.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3)$$

La ecuación 3 está a ambos lados del signo de igualdad y no puede aislarse. Por lo tanto, la ecuación 3 debe resolverse mediante técnicas gráficas o numéricas.

**2.1.2. Dispersión del oleaje** El concepto de dispersión es esencial para comprender la agrupación de olas y sus efectos, especialmente fenómenos como la resonancia en los puertos.

La celeridad es representada mediante la ecuacion 4 de la forma:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (4)$$

La relación entre la celeridad, la longitud y la profundidad se expresa en la ecuacion 5 como:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (5)$$

Donde  $k$  es el número de onda definido y se muestra en la ecuación 6:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

## 2.2. TEORÍA NO LINEAL DEL OLEAJE

Los avances en teoría no lineal han avanzado de gran manera la demostración de fenómenos ondulatorios gravitacionales a nivel del mar, especialmente en aguas poco profundas donde las suposiciones de la teoría lineal ya no son aplicables. En este contexto, se destacan 4 teorías principales no lineales, destacando que la teoría de Fenton es la recomendada por el Coastal Engineering Manual <sup>5</sup>, especialmente para la modelación de ondas regulares en aplicaciones costeras.

Estas teorías incluyen la teoría de Stokes <sup>6</sup>, la teoría senoidal <sup>7</sup>, la teoría de la onda solitaria <sup>8</sup> y el método de aproximación de Fourier, también conocido como teoría de Fenton <sup>9</sup>. Mientras que las soluciones matemáticas de las teorías de primer orden se basan en soluciones exactas de la ecuación de Laplace <sup>10</sup>, las teorías no lineales, en cambio, parten de la teoría lineal y requieren expansiones más complejas mediante la adición de términos adicionales. De forma general, la teoría de Stokes es más adecuada para ondas cuya longitud no varía significativamente con la profundidad,

---

<sup>6</sup> George Gabriel Stokes. "On the theory of oscillatory waves". En: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 8 (1847), págs. 441-455.

<sup>7</sup> Robert G Dean y Robert A Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, 1991.

<sup>8</sup> Joseph Boussinesq. "Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal". En: *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* (1872).

<sup>9</sup> John D Fenton. "A fifth-order Stokes theory for steady waves". En: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 111.2 (1985), págs. 216-234.

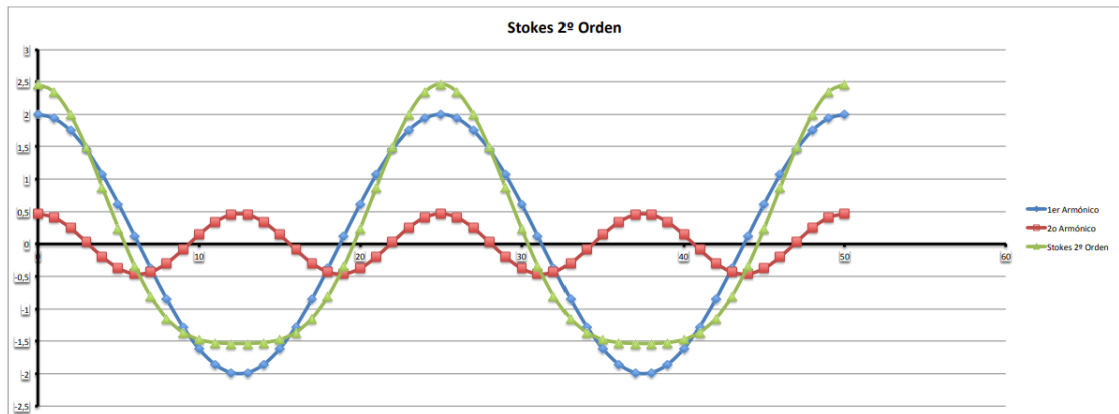
<sup>10</sup> Benoit Cushman-Roisin y Jean-Marie Beckers. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, 2011.

mientras que la teoría senoidal ofrece un mejor rendimiento en ondas de mayor longitud <sup>11</sup>.

**2.2.1. Teoría de stokes** Stokes jugó un papel pionero en el desarrollo de esta teoría y trajo grandes cambios fundamentales a la teoría lineal en 1847. Estos ajustes se reflejan en la forma de onda, que muestra picos más pronunciados y estrechos, teniendo una depresión más profunda y amplia en comparación con la teoría lineal <sup>12</sup>.

En la Figura 2, observe como la onda de Stokes de segundo orden colapsa en una onda sinusoidal doble. Este mecanismo forma la base de imágenes complejas resultantes de la superposición de ondas sinusoidales fundamentales. Dichas representaciones más elaboradas se ajustan de manera más precisa a los fenómenos naturales que ocurren en la realidad.

Figura 2. Formación de una onda de Stokes de segundo orden mediante la combinación de dos componentes senoidales.



**Fuente:** López, I., & Tinoco, H. (2014). Ondas Superficiales en el Mar.

<sup>11</sup> John D Fenton. "Nonlinear wave theories". En: *the Sea* 9.1 (1990), págs. 3-25.

<sup>12</sup> Coastal Engineering Research Center (US). *Shore protection manual*. Vol. 1. US Army Coastal Engineering Research Center, 1973.

La expansión de Stokes se basa en la suma de un conjunto de agrupaciones dependientes de los parámetros de expansión de la perturbación ( $\varepsilon = k \cdot a$ ), De esta manera, otra función que puede expresar el potencial de velocidad en función del número de términos se formuló como la ecuación 7.

$$\phi = \varepsilon\phi_1 + \varepsilon^2\phi_2 + \dots + \varepsilon^n\phi_n \quad (7)$$

Donde  $\phi_1$  representa el término de la teoría lineal,  $\phi_2$  representa la teoría de segundo orden de Stokes, así continuamente.

Sin derivación, el perfil de onda en aguas poco profundas predicho por la teoría de segundo orden de Stokes se obtiene de la ecuación 8:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2}{k^2 h^3} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (8)$$

La tarea principal es establecer correlaciones entre varios parámetros medidos en la realidad para gestionar matemáticamente las variables involucradas en ambos términos de la suma sinusoidal. Cada vez que aumenta el número de términos, es decir, al incrementar el orden de la función de Stokes, la complejidad de los términos afectan el cálculo de simulación del nivel del mar, aumentando proporcionalmente.

### 2.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OLEAJE

El potencial energético de las olas es un tema de gran aumento de interés en el campo de las energías renovables. Se refiere a la capacidad de las olas del océano para generar energía utilizable y llama la atención de investigadores, ingenieros y responsables políticos de todo el mundo. Esta introducción explorará los fundamentos y el alcance del potencial de la energía de las olas, resaltarán su importancia como fuente de energía renovable y explorará los desafíos y oportunidades asociados con su desarrollo y utilización.

Cuando se trata de un oleaje idealizado en el que tanto la altura como el periodo de

las olas permanecen constantes, es posible calcular la energía de las olas mediante la aplicación de la ecuación 9 :

$$P_{wave} = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H_s^2 \cdot T_e}{32 \cdot \pi} \quad (9)$$

Donde:

$\rho$  (densidad del agua): kg/m<sup>3</sup> (kilogramos por metro cúbico)

$g$  (aceleración debido a la gravedad): m/s<sup>2</sup> (metros por segundo al cuadrado)

$H_s$  (altura significativa de las olas): m (metros)

$T_e$  (periodo de tiempo entre dos olas consecutivas): s (segundos)

$\pi$  es la constante pi.

Donde  $H_s$  es la altura significativa de ola o la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en el registro,  $T_e$  es el período de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de una onda a lo largo de una línea imaginaria a medio camino entre la cresta y el valle.

## **2.4. CONVERTIDORES DE ENERGÍA DE LAS OLAS**

En la innegable necesidad de buscar formas sostenibles y eficientes de generar energía eléctrica, surge un campo de innovación crucial: los convertidores de energía. Estos dispositivos desempeñan un papel esencial en la captación y conversión de fuentes naturales de energía en electricidad utilizable. Uno de los ejemplos más emocionantes de esta tecnología es la utilización de convertidores de energía de oleaje, diseñados para capturar y convertir la energía cinética contenida en las olas del océano en energía utilizable, como electricidad u otras formas de energía. En este contexto, exploramos cómo estos convertidores aprovecharán la fuerza imparable del océano para proporcionar una fuente de energía renovable y sostenible en el futuro.

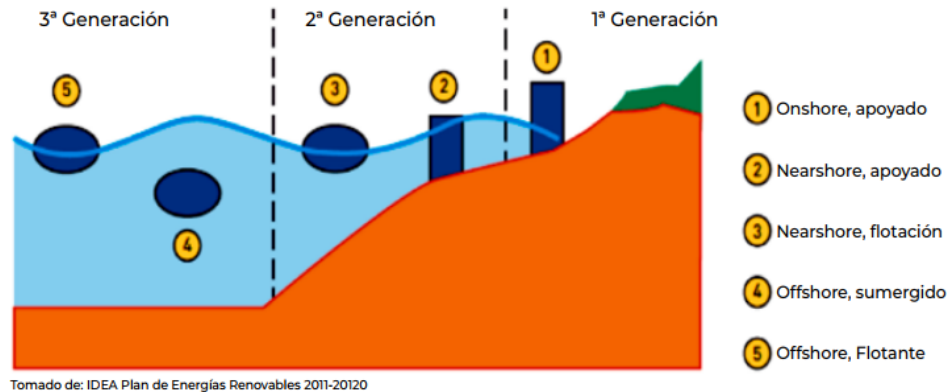
Estos convertidores son parte de la categoría más amplia de tecnologías de energía renovable marina y buscan aprovechar el vasto potencial energético de los océanos. Los convertidores de energía undimotriz utilizan diferentes mecanismos para capturar y convertir la energía de las olas en una forma de energía más conveniente y utilizable. Algunos de los enfoques comunes incluyen: Sistemas de flotación, Sistemas basados en la presión del agua, Sistemas de columna de agua oscilante y Dispositivos anclados al fondo del mar<sup>3</sup>.

Existen distintos tipos de dispositivos WEC (Wave Energy Converters), Categorizados según la distancia a la costa, el principio de captación, el método de instalación y la orientación. A continuación, se presentan en forma de tabla e imágenes (3,4,5) Su aprovechamiento y descripción de cada uno de ellos según su clasificación, tomados de <sup>3</sup>.

Tabla 1. Categorización de dispositivos WEC basada en su posición.

	<b>Descripción</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>En la costa (Onshore)</b>	La energía undimotriz onshore implica la captura y conversión de la energía de las olas cerca de la costa. Esto se logra mediante la instalación de dispositivos de conversión de energía en áreas cercanas a la línea de costa, donde las olas tienen un mayor impacto y pueden ser aprovechadas para generar electricidad, donde la fricción inferior disipa parte de la energía de las ondas del océano.	Ofrece una serie de ventajas, incluyendo su proximidad a la demanda de energía, facilidad de acceso para operaciones y mantenimiento, menor impacto ambiental y visual, integración con infraestructuras costeras y potencial para proyectos piloto y demostrativos.
<b>Cercanos a la costa (Nearshore)</b>	Son regiones del océano que se encuentran cerca de la costa, extendiéndose desde la línea de costa hasta donde el fondo marino comienza a descender, las características distintivas de las áreas nearshore incluyen aguas poco profundas, que típicamente tienen una profundidad menor que la longitud de onda de las olas, y una dinámica costera activa, influenciada por las mareas, las corrientes y la acción del oleaje.	La proximidad a la costa ofrece profundidades adecuadas para la instalación de dispositivos de gran envergadura, lo cual facilita su mantenimiento. Esto se traduce en una reducción significativa de los costos operativos y una mayor eficiencia en la generación de energía, aumentando así los beneficios económicos y la viabilidad a largo plazo de los proyectos de energía undimotriz.
<b>Fuera de la costa (Offshore)</b>	Implica la captura y conversión de la energía de las olas en alta mar, lejos de la costa o sumergidos, generalmente a una profundidad de entre 40 y 100 metros. Este enfoque implica instalar dispositivos de conversión de energía de las olas en áreas marinas más profundas, donde las olas son más potentes y consistentes.	Ofrecen una fuente de energía renovable con un alto potencial de generación, menor impacto visual y ambiental, pero son más costosos debido al equipo sofisticado y mantenimiento difícil de realizar.

Figura 3. Categorización de dispositivos WEC basada en su posición.



**Fuente:** IDÁRRAGA, Aris; DIAZ, Harold; PEÑARANDA, Jairo. Technical feasibility of technologies for the use of wave energy on the Colombian pacific coast, 2018.

La Figura 3 muestra una clasificación de dispositivos WEC, basada en su posición en relación con la costa y el mar. Se identifican cinco categorías principales:

**Onshore apoyado:** Estos dispositivos se instalan en la costa o en aguas poco profundas cercanas a la costa y están fijados al fondo marino o a una estructura en tierra firme para soporte.

**Nearshore apoyado:** Similar al anterior, estos dispositivos se encuentran cerca de la costa pero pueden estar en aguas un poco más profundas. También están fijados al fondo marino o a estructuras de soporte.

**Nearshore de flotación:** Estos dispositivos se ubican cerca de la costa pero flotan en la superficie del agua o se mantienen a poca profundidad mediante boyas o sistemas de flotación.

**Offshore sumergido:** Estos dispositivos se instalan mar adentro, a cierta distancia de la costa, y están diseñados para operar sumergidos debajo de la superficie del agua.

**Offshore flotante:** Similar al anterior, pero estos dispositivos flotan en la superficie del agua o se mantienen a poca profundidad mediante boyas o sistemas de flotación, ubicados mar adentro.

Esta categorización ofrece un panorama detallado de las distintas disposiciones y emplazamientos de los dispositivos WEC empleados para aprovechar la energía proveniente de las olas en distintos escenarios costeros.

Tabla 2. Categorización de los dispositivos WEC según su principio de captación.

	<b>Descripción</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Diferencia de presión Power Take-Off (PTO)</b>	Existen dos tipos principales de tecnologías basadas en la sobreten-sión de un fluido, que utiliza aire como medio de transferencia: la Columna de Agua Oscilante (OWC) y el Arquímedes.	Debido a la complejidad de la estructura tiene una instalación muy compleja y costosas, además un mantenimiento regular y poca adaptabilidad.
<b>Sistema de rebo-samiento y/o impacto</b>	Utilizan la energía de las olas, que inciden en una estructura para aumentar su energía potencial. Hay sistemas de como el offshore y onshore. Los sistemas de oscilación usan una pala articulada para transferir la energía de las olas.	Su escasa frecuencia se atribuye a las especificaciones requeridas en la ubicación y al costo elevado de la infraestructura civil
<b>Cuerpos flotantes</b>	Los sistemas de energía undimotriz con cuerpo flotante pueden tener un movimiento oscilatorio vertical y horizontal, y pueden ser absolutos o relativos. Sin embargo, los sistemas más comunes son aquellos en los que el movimiento es absoluto.	Los amarres son cruciales y son sensibles a las altas mareas, lo que hace que tengan menor estabilidad, pero mas económicos y adaptables a diferentes oleajes.

Los principios de captación de energía de las olas se presentan en la Figura 4, cada uno basado en un principio de captación específico. Estos dispositivos son los siguientes:

**OWC (Oscillating Water Column):** aprovechan el movimiento de una columna de agua que sube y baja dentro de un compartimento cerrado. El cambio en el nivel del agua comprime y libera aire en la parte superior del compartimento, generando así energía a través de una turbina o un generador.

**Cuerpo boyante con referencia fija:** emplean un cuerpo flotante que se eleva y desciende con el movimiento de las olas. La energía cinética de este movi-

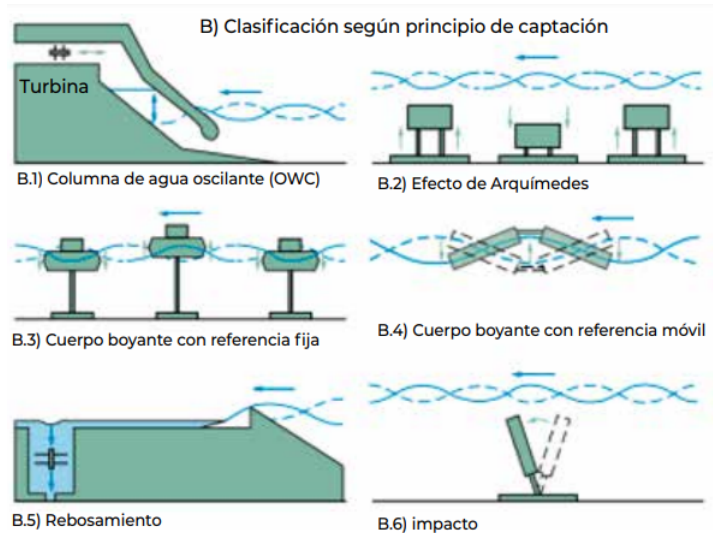
miento se transforma en energía eléctrica mediante un sistema de conversión mecánica.

**Efecto Arquímedes:** Estos dispositivos se basan en el principio del efecto Arquímedes, donde el empuje ascendente experimentado por un cuerpo sumergido en un fluido se convierte en energía.

**Cuerpo boyante con referencia móvil:** Similar al cuerpo boyante con referencia fija, pero en este caso la referencia del dispositivo se desplaza con el nivel del mar, permitiendo una captura más eficiente de la energía del movimiento de las olas.

**Impacto:** Estos dispositivos utilizan el impacto directo de las olas contra una estructura rígida para generar energía. El movimiento resultante se convierte en energía mecánica o eléctrica mediante sistemas de conversión adecuados.

Figura 4. Categorización de los dispositivos WEC según su principio de captación.



**Fuente:** IDÁRRAGA, Aris; DIAZ, Harold; PEÑARANDA, Jairo. Technical feasibility of technologies for the use of wave energy on the Colombian pacific coast, 2018.

Tabla 3. Categorización basada en el tamaño al frente de ola.

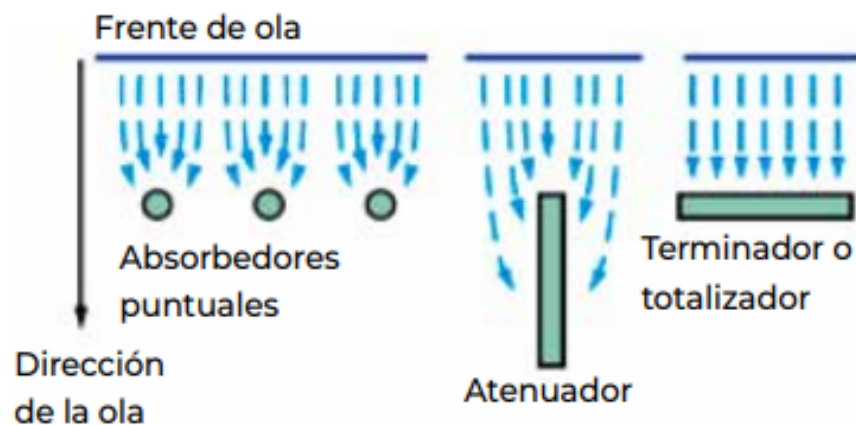
	<b>Descripción</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Atenuador/absorbedor lineal</b>	Son estructuras alargadas que se sitúan en paralelo al avance de las olas. Estos sistemas extraen la energía de manera progresiva y direccional. Un ejemplo de absorbedor lineal es el Pelamis, cuyo eje principal se sitúa perpendicular al frente de la onda incidente. De esta manera, la energía se captura a medida que la onda se mueve a lo largo del WEC <sup>13</sup> .	Estos dispositivos son altamente flexibles y pueden ser diseñados y adaptados a diferentes tipos de estructuras, lo que los hace útiles tanto en zonas costeras (nearshore) como mar adentro (offshore).
<b>Totalizador o terminador</b>	Son dispositivos alargados que se sitúan perpendicularmente a la dirección del avance de la ola. Ejemplos de totalizadores son el Rectificador Russell y el de impacto.	Debido a su disposición paralela al frente de la ola, estos objetos solo captan la energía de manera puntual, lo que les obliga a soportar grandes impactos. Por lo tanto, deben ser muy resistentes <sup>14</sup> .
<b>Absorbedor de puntos</b>	Estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente, cilíndricas y con simetría axial. Estos sistemas captan la energía de la ola directamente incidente y también la del entorno, siendo indiferentes a la dirección de propagación de la ola. Generalmente se sitúan varios absorbedores puntuales agrupados formando una línea. Ejemplos de absorbedores puntuales son los sistemas tipo boya, como el AquaBUOY o el Power-Buoy <sup>15</sup> .	Los absorbedores puntuales son fáciles de instalar y pueden ajustarse a diferentes configuraciones y aplicaciones. Además, su costo es relativamente bajo y no requieren grandes inversiones.

La categorización basada en la orientación frente a la ola de los dispositivos WEC se muestran en la Figura 5, pueden dividirse en varias categorías:

**Dirección de la ola:** Esta categoría se refiere a la alineación del dispositivo con respecto a la dirección de propagación de las olas. Los dispositivos pueden estar orientados perpendicularmente, paralelamente o en ángulo con respecto a la dirección de las olas.

**Frente de ola:** Algunos dispositivos están diseñados para capturar la energía en el frente de las olas, donde la energía es más concentrada. Estos dispositivos pueden estar ubicados en el punto más alto de la ola o en áreas donde las olas rompen.

Figura 5. Categorización basada en el tamaño y orientación al frente de ola.



**Fuente:** IDÁRRAGA, Aris; DIAZ, Harold; PEÑARANDA, Jairo. Technical feasibility of technologies for the use of wave energy on the Colombian pacific coast 2018.

Tabla 4. Categorización basada en el método de instalación.

	<b>Descripción</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Anclado al fondo</b>	Se caracteriza por su fijación al fondo marino mediante un sistema de anclaje, permitiéndole resistir las fuerzas del oleaje y las corrientes marinas.	Pueden ser instalados en Offshore. Tienen mayor estabilidad pero requiere una mayor cantidad de material para su construcción, lo que aumenta su impacto ambiental.
<b>Flotante</b>	Los sistemas de flotación se usan para sostener el sistema flotando en aguas profundas (o, en casos poco usados, nearshore).	Pueden ser más económicos de instalar y más versátiles aunque tiene menor estabilidad.
<b>Sumergible</b>	Esta completamente sumergido, ya sea que esté amarrado o anclado al fondo marino.	Pueden ser más resistentes y duraderos debido a su ubicación bajo el agua pero son mas costosos de instalar debido al anclaje al fondo marino y su mantenimiento complejo.

## 2.5. TIPO DE UNDIMOTRIZ QUE SE VA A EMPLEAR

Una vez finalizada la fase de investigación, en la que se recopiló información sobre los diferentes tipos de sistemas de captación de energía eléctrica de las olas, sus ventajas y desventajas, se llegó a la conclusión de que una de las mejores opciones es el dispositivo undimotriz tipo boya oscilante.

Este tipo de dispositivo funciona tanto en Nearshore como en Offshore, aunque se considera que su mejor desempeño sería en Nearshore, ya que su mantenimiento sería más fácil debido a su proximidad a la costa, y no estaría tan expuesto al desgaste, ya que la propagación de las olas disminuye al acercarse a la costa.

Una boya oscilante es un tipo de dispositivo de captación de energía undimotriz que convierte la energía cinética de las olas del mar en energía eléctrica. Estos dispositivos suelen estar compuestos por varias partes, incluyendo un sistema de flotadores

que se mueven con las olas, un sistema de transmisión que convierte el movimiento de los flotadores en energía mecánica, y un generador que convierte esa energía mecánica en energía eléctrica.

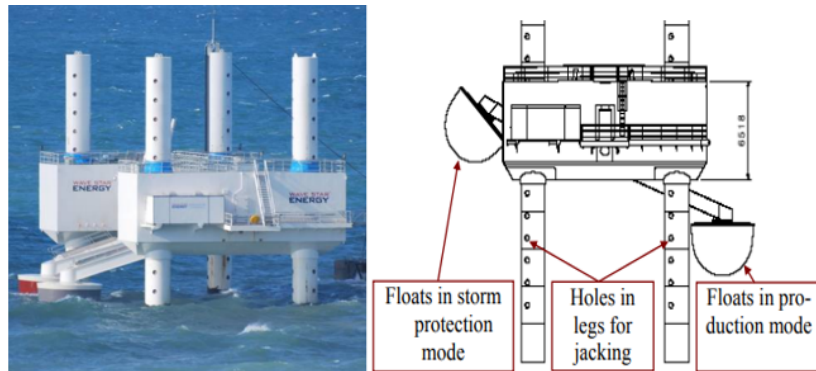
La boya oscilante es un tipo de absorbedor puntual, lo que significa que puede captar la energía de la ola desde diferentes posiciones, ya que su movimiento oscilante se mantiene en fase con el movimiento de las olas del mar. Además, las boyas oscilantes pueden ser diseñadas para seguir la dirección de las olas y maximizar así su eficiencia energética. Además, al ser un cuerpo flotante, su diseño es más económico y fácil de realizar.

Sin embargo, una desventaja importante de estos sistemas es su vulnerabilidad a sufrir daños en caso de aumento del nivel del mar. Este riesgo surge porque cuando el nivel del mar aumenta, el barco y los flotadores están expuestos a más fuerzas de las olas. Las olas más grandes pueden golpear la estructura violentamente, aumentando considerablemente el riesgo de daños. Para abordar este desafío, el Wave Star (ver Figura 6<sup>16</sup>) introdujo una solución creativa, utilizando una plataforma equipada con pronóstico de mareas, un sistema que permite ajustar su altura según sea necesario. Así, en caso de subidas bruscas del nivel del mar o llegada de fuertes olas, se puede elevar la plataforma para evitar que las vigas alcancen olas mayores. Esto ayuda a proteger el sistema de posibles daños y garantiza que funcione de forma segura y eficiente incluso en condiciones climáticas adversas.

---

<sup>16</sup> L Marquis, Morten Kramer y Peter Frigaard. "First power production figures from the wave star roshage wave energy converter". En: *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE-2010), Bilbao, Spain*. Vol. 68. 2010, págs. 1-5.

Figura 6. Sistema wave star C5



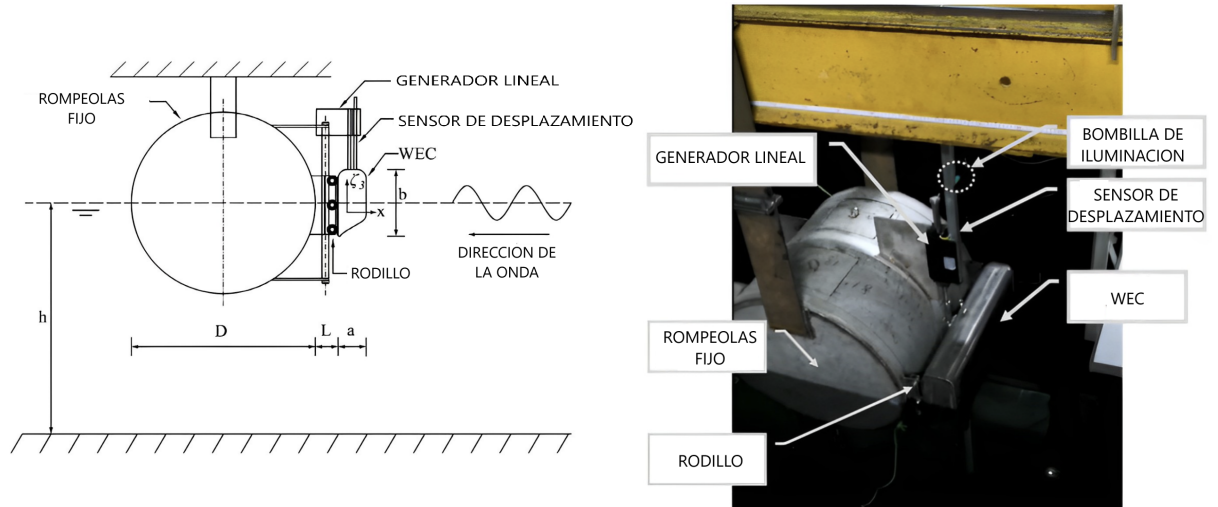
**Fuente:** MARQUIS, L.; KRAMER, Morten; FRIGAARD, Peter. First power production figures from the wave star roshage wave energy converter. En Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE-2010), Bilbao, Spain. 2010. p. 1-5.

La tecnología más destacada es el Wave Star C5-1000KW, un dispositivo danés altamente avanzado en términos de prototipos y con uno de los niveles de eficiencia más altos en el mercado. Este sistema se basa en una plataforma que sostiene 20 flotadores articulados. El dispositivo puede generar energía a partir de una altura de ola de tan solo 0,5 metros, lo que permite producir una potencia de hasta 1.000KW.

## 2.6. ESPECIFICACIONES DEL WEC TIPO BOYA OSCILANTE

El convertidor de energía de las olas (WEC) que se va utilizar en este trabajo de grado consta de una boya oscilante que se mueve únicamente en dirección vertical en relación al oleaje, con un ancho (a) y una altura (b), y un rompeolas (opcional) ( Ver Figura 7). La boya oscila en relación con una estructura de soporte montada por arriba del nivel de agua, la cual consiste en una combinación de columnas. La oscilación vertical del WEC interactúa con las olas, utilizándose para accionar un generador lineal y convertir la energía potencial en electricidad. Además, en algunos casos se suele utilizar un rompeolas para disminuir la turbulencia y mejorar su eficiencia. La boya está unida a la columna del soporte mediante seis ruedas de rodillos.

Figura 7. Esquema y modelo experimental del dispositivo WEC tipo boya oscilante



**Fuente:** REABROY, Ratthakrit, et al. Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater. 2019, p. 1174-1186.

## 2.7. DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS

**2.7.1. Ecuación del movimiento de oscilación** La fórmula que rige el movimiento de un dispositivo generador de energía de las olas se obtiene a partir de los principios de la dinámica de los barcos. Para evaluar la reacción de una embarcación ante las condiciones del oleaje, la ecuación de movimiento en seis grados de libertad se presenta por la ecuación 10:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{\eta}_j + B_{ij} \dot{\eta}_j + C_{ij} \eta_j] = \sum F_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

donde  $\eta$  representa la amplitud del movimiento,  $M_{ij}$  son los elementos de la matriz de generalización,  $A_{ij}$  son los elementos de la matriz de masa hidrodinámica o masa adicional,  $B_{ij}$  son los coeficientes de amortiguación hidrodinámica o de radiación,  $C_{ij}$  son los coeficientes de rigidez hidrostática, y  $F_i$  engloba el resultado de todas las

demás fuerzas en la dirección  $i$ .

En este análisis, el modelo WEC se evaluó en la dirección vertical y se consideró en el dominio del tiempo mediante la utilización de ANSYS CFD usando el el solver 6DOF. La ecuación de movimiento en el dominio del tiempo puede ser formulada basándose en la segunda ley de movimiento de Newton, como se indica en la ecuación 11:

$$(M)\ddot{z} = \sum F = F_e + F_r + F_h \quad (11)$$

donde  $M$  representa la masa del modelo WEC,  $\dot{z}$  es la aceleración en la dirección vertical,  $\sum F$  es la suma total de todas las fuerzas aplicadas,  $F_e$  representa la fuerza de excitación,  $F_r$  es la fuerza de radiación, y  $F_h$  es la fuerza hidrostática. De esta manera, la ecuación 12 que rige el movimiento puede ser formulada de la siguiente manera<sup>17</sup>:

$$(M)\ddot{z} = \int_0^t h_e(t - \tau)\eta(\tau)d\tau - \left( \int_0^t k_r(t - \tau)\dot{z}(\tau)d\tau + A_{r\infty}\ddot{z} + k_h z \right) \quad (12)$$

En el lado derecho de la ecuación, los términos que describen las fuerzas aplicadas involucran la integración del producto entre el impulso de Dirac  $h_e$  y la elevación de la onda  $(t)$ . Los segundos y terceros términos constituyen la fuerza de radiación, la cual surge debido a las ondas generadas por la oscilación  $z(t)$ , donde  $k_r(t)$  representa la función del impulso de radiación y  $A_r$  es la masa añadida de  $A(t)$  por inercia. El último término representa la fuerza de flotación de Arquímedes  $F_h$ .

**2.7.2. Vorticidad** En términos simples, la vorticidad se refiere a la rotación de un fluido. La velocidad de esta rotación puede ser expresada de diversas maneras. Para ilustrar este concepto, imaginemos un cuenco de agua colocado sobre una mesa

---

<sup>17</sup> Lorenzo Banos Hernandez, Peter Frigaard y Poul Henning Kirkegaard. "Numerical modeling of a wave energy point absorber". En: *Proceedings of the Twenty Second Nordic Seminar on Computational Mechanics*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. 2009, págs. 153-156.

de laboratorio. El agua en el cuenco puede estar girando, pero además de este giro, tanto el cuenco como el laboratorio giran debido a la rotación de la Tierra. Estos dos procesos son independientes entre sí, y podemos distinguir entre dos tipos de vorticidad: la vorticidad planetaria y la vorticidad relativa<sup>18</sup>.

En este contexto cuando el dispositivo *wec* se desplaza en un fluido viscoso, la separación de la capa límite conlleva la formación de un vórtice y una región de baja presión; el núcleo del fenómeno vórtice representa la presión más reducida. Por ende, debido a la distribución de estos vórtices, el dispositivo experimentará oscilaciones significativas con una fuerza de arrastre considerable en casos de vórtices intensos, lo cual puede obstaculizar el movimiento del dispositivo. Los vórtices son evaluados mediante el empleo de software de simulación CFD ANSYS FLUENT. Para un fluido en dos dimensiones (como en un plano), la vorticidad ( $\text{curl}_z \mathbf{V}$ ) se puede definir como se muestra en la ecuación 13:

$$\text{curl}_z \mathbf{V} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (13)$$

**2.7.3. Ecuaciones de gobierno** En el contexto del análisis de flujos, es fundamental considerar la ecuación de continuidad cuando la densidad es constante. Esta ecuación, expresada como:

Las ecuaciones fundamentales incluyen la ecuación de continuidad cuando la densidad es constante. esta ecuacion, expresada como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

y las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible de viscosidad cons-

---

<sup>18</sup> Robert H Stewart. *Introduction to physical oceanography*. 2008.

tante, dadas por:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (15)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (16)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (17)$$

Donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  denotan las componentes de la velocidad en los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , respectivamente, expresadas en unidades de  $m/s$ .  $\rho$  representa la densidad del fluido, medida en  $Kg/m^3$ ,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido en  $Pa \cdot s$ ,  $p$  indica la presión en Pascales,  $g$  corresponde a la aceleración debida a la gravedad en  $m/s^2$  y  $t$  es el tiempo expresado en segundos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, fundamentales para describir el comportamiento de los fluidos, se derivan mediante la aplicación de diversas hipótesis y simplificaciones. Entre las hipótesis adicionales asociadas a estas ecuaciones se encuentra la consideración de un flujo incompresible, donde las variaciones de densidad del fluido son insignificantes. Asimismo, se asume un comportamiento newtoniano del fluido, caracterizado por una viscosidad constante e independiente de la velocidad del flujo. En el caso específico de una boya que oscila verticalmente, se incorpora un modelo de seis grados de libertad, lo que implica la inclusión de términos de fuerza y momento en las ecuaciones de Navier-Stokes, según las ecuaciones de movimiento correspondientes. Además, se considera un flujo no estacionario, permitiendo la variación en el tiempo. Cabe destacar que estas hipótesis son esenciales para adaptar las ecuaciones a condiciones específicas y simplificar el análisis de fenómenos fluidodinámicos.

Se implementa la metodología del volumen de fluido (VOF) para rastrear la posición

de la superficie libre. Este método calcula la fracción de volumen de cada fluido (ya sea aire o agua) presente en cada volumen de control mediante la siguiente ecuación 18:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (18)$$

La densidad de la mezcla se calcula a partir de la fracción volumétrica.

La condición límite de oleaje en canal abierto permite simular la propagación de las olas, lo que resulta útil en la industria naval. Se trata de una condición límite aguas arriba y se aplica a la entrada de velocidad del modelo VOF. El perfil de ola para una ola incidente puede describirse como se muestra en la ecuación 19.

$$\zeta = A \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (19)$$

donde  $z$  es la altura de la onda,  $A$  es la amplitud de la onda,  $\epsilon$  es la diferencia de fase,  $t$  es el tiempo, y  $k_x$  y  $k_y$  son los números de onda en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente, tales que  $k_x = k \cos \theta$  y  $k_y = k \sin \theta$ . la frecuencia de onda efectiva  $\omega_e$  es representada en la ecuación 20:

$$\omega_e = \omega + k \cdot U \quad (20)$$

$U$  es la velocidad uniforme de la onda incidente y  $\omega$ , la frecuencia de la onda, se definen en la ecuación 21 como:

$$\omega = \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h)} \quad (21)$$

**2.7.4. Modelo laminar** Diversos investigadores han examinado cómo el modelo de turbulencia afecta la generación y propagación de ondas regulares. Lal y Elango-

van (2008)<sup>19</sup> y ZHANG, Hengming, et(2020)<sup>20</sup> realizaron comparaciones entre varios modelos de turbulencia, como el  $k-\epsilon$  y el SST, y concluyeron que los resultados no difieren significativamente al compararlos con el flujo laminar. En consecuencia, en el contexto de este estudio, se decidió asumir el flujo laminar.

**2.7.5. Velocity Inlet (velocidad de entrada)** La condición de contorno denominada Velocity Inlet se utiliza en ANSYS para definir la velocidad a la cual el fluido ingresa al dominio de la simulación <sup>21</sup>. Normalmente, la presión en un velocity inlet no se especifica, ya que el solver calculará la presión en función de la velocidad y otras condiciones del flujo.

La velocidad, expresada comúnmente en metros por segundo (m/s), puede ser constante o variar a lo largo de la entrada, dependiendo de las características del flujo que se simule. Además, en ciertas situaciones, se puede establecer un perfil de velocidad que refleje la variación a lo largo de la sección transversal de la entrada. Esto es especialmente relevante en flujos complejos, donde se busca capturar el comportamiento no uniforme del fluido al ingresar al dominio <sup>22</sup>.

**2.7.6. Pressure outlet (Salida de presión)** La condición de contorno denominada Pressure Outlet se emplea para establecer la presión en el punto de salida del fluido del dominio de simulación. Este tipo de condición de contorno es común en simulaciones de fluidos cuando no se conoce de antemano el patrón de velocidad

---

<sup>19</sup> Anant Lal y Muniyandy Elangovan. "CFD simulation and validation of flap type wave-maker". En: *International Journal of Mathematical and Computational Sciences* 2.10 (2008), págs. 708-714.

<sup>20</sup> Hengming Zhang et al. "Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter". En: *Applied energy* 257 (2020), págs. 1-19.

<sup>21</sup> ANSYS Inc. *User Guide*. ANSYS, 2024.

<sup>22</sup> *Complex Flow Dynamics*. vid. pág. 34. Publisher, 2022.

exacto en la salida, pero se tiene una idea de la presión en esa región <sup>23</sup>.

La presión en la salida se establece generalmente como un valor constante, comúnmente alrededor de 101.325 Pa (Pascal), que corresponde a la presión atmosférica a nivel del mar. Sin embargo, en simulaciones de flujo marino, es fundamental considerar que la presión de salida puede variar según la profundidad del agua y las condiciones ambientales. Esto implica que puede ser necesario realizar ajustes en función del entorno específico <sup>24</sup>.

Adicionalmente, se puede definir el tipo de flujo en la condición de Pressure Outlet. Por ejemplo, la opción outflow permite que el fluido salga del dominio sin restricciones adicionales, lo que ayuda a evitar efectos no físicos que podrían distorsionar los resultados. Esta configuración asegura un comportamiento más realista del modelo, facilitando el análisis del sistema y mejorando la precisión de los resultados <sup>25</sup>.

**2.7.7. Wall (Pared)** es una condición de contorno que representa superficies sólidas en el dominio donde el fluido no puede penetrar. Este tipo de condición impone restricciones sobre el flujo en contacto con las paredes, simulando la interacción entre el fluido y las superficies sólidas.

En un wall, la velocidad del fluido en la superficie de la pared se establece generalmente en cero (0 m/s) en todas las direcciones, lo que se conoce como condición de no deslizamiento. Además la presión en la pared no se especifica directamente y es calculada por el solver en función del resto del dominio.

---

<sup>23</sup> Yu-Ling Li y Kuo-Lun Tung. "CFD simulation of fluid flow through spacer-filled membrane module: selecting suitable cell types for periodic boundary conditions". En: *Desalination* 233.1-3 (2008), págs. 351-358.

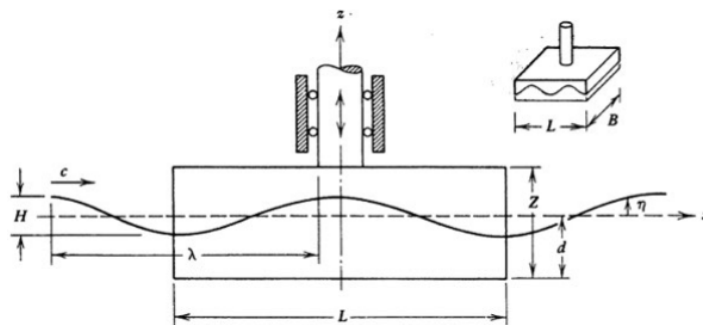
<sup>24</sup> *Characteristics of Fluid Flow*. Publisher, 2023.

<sup>25</sup> Dominik Obrist y Hendrik von Tengg-Kobligk. *Computational fluid dynamics (CFD) for predicting pathological changes in the aorta: is it ready for clinical use?* 2022.

### 3. WEC TIPO BOYA OSCILANTE

Para explicar la conversión de energía de las olas y la hidrodinámica asociada, recurriremos a un ejemplo simplificado, como se visualiza en la Figura 8. En este escenario, el cuerpo tiene la capacidad de oscilar únicamente en dirección vertical debido a la presencia de rodillos. En este contexto, asignamos las variables  $L$  para la longitud,  $B$  para la profundidad de la boya,  $d$  para el calado (distancia vertical entre un punto de la línea de flotación y línea base), y  $c$  para la velocidad y sentido de ola.

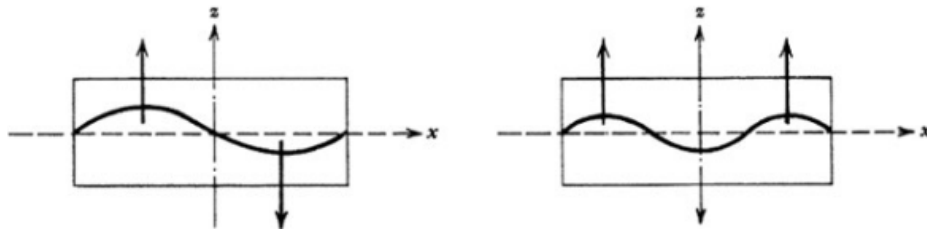
Figura 8. cuerpo flotante



**Fuente:** MCCORMICK, Michael E. Ocean wave energy conversion. Courier Corporation, 2013.

Es fundamental considerar ciertos aspectos en relación con la longitud de onda ( $\lambda$ ) y  $L$ , ya que si  $L=\lambda$ , según un perfil de onda sinusoidal descrito por la ecuación (1), no se generará ningún movimiento de oscilación. Esto se debe a que tanto la cresta como el valle de la onda se manifiestan simultáneamente a lo largo de la longitud del cuerpo, como se representa en la Figura 9.

Figura 9.  $L=\lambda$



**Fuente:** MCCORMICK, Michael E. Ocean wave energy conversion. Courier Corporation, 2013.

### 3.1. POTENCIA PROMEDIO DEL WEC

La potencia mecánica disponible de un cuerpo en oscilación pura se calcula como el producto de la fuerza inducida por el oleaje ( $F_y$ ) y la velocidad de oscilación (ecuaciones 22 y 23). Para determinar la fuerza inducida por el oleaje, es necesario primero definir la geometría del flotador. Siguiendo la "teoría de la franja", como se describe en McCormick (1973) y otros estudios, la fuerza inducida por el oleaje sobre un flotador con una geometría rectangular y una velocidad de oscilación en una ola lineal se expresa de la siguiente manera:

$$F_y = B_g \cdot U_y(t) \quad (22)$$

$$U_y = \frac{dy}{dt} = -w \cdot Z_0 \cdot \sin(\omega t + \gamma - \sigma) \quad (23)$$

Donde  $B_g$  representa el coeficiente de amortiguamiento del WEC (que depende de la geometría de la boya y se calcula mediante ANSYS),  $Z_0$  es la amplitud del movimiento del WEC, corresponde a la frecuencia de la onda circular,  $t$  es el tiempo en segundos,  $\gamma$  es un ángulo de fase asociado a la componente de fuerza de la onda, y  $\sigma$  es un ángulo de fase que depende principalmente del factor de amortiguación de un sistema adimensional.

La potencia de un cuerpo simétrico en resonancia con la onda se expresa como en la ecuación 24.

$$P_y = F_y \cdot \frac{dy}{dt} \quad (24)$$

y la potencia media durante un periodo de onda es la ecuación 25:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P_y dt = \frac{B_g \cdot w \cdot Z_0}{2} \left( 1 - \frac{\sin(2wT)}{2wT} \right) \quad (25)$$

Si reemplazamos la frecuencia angular de:  $w = 2\pi/T$ . Quedaría de la siguiente manera:

$$P = \frac{B_g \cdot \pi \cdot Z_0}{T} \quad (26)$$

Donde T es el periodo de ola, y al reemplazar el coeficiente de amortiguación queda de la siguiente manera:

$$P = \left[ \frac{\rho_{mar} g H B \lambda}{2\pi} (e^{-2\pi d/\lambda} + 1) \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right) \right] \frac{\pi \cdot Z_0}{T} \quad (27)$$

En la ecuación 27, todos los valores son conocidos en función del diseño actual del dispositivo undimotriz y condiciones de oleaje en la bahía Solano, a excepción del desplazamiento vertical del WEC ( $Z_0$ ). Este valor será determinado a través de la simulación realizada en ANSYS Fluent.

#### 4. ANÁLISIS DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA COSTA DEL PACIFICO

En las extensas superficies del océano, se esconde un impresionante potencial energético que alcanza los 2.700 GW<sup>26</sup>, de los cuales se podría aprovechar hasta 500 GW, esperando ser explorado y comprendido: la energía undimotriz. En este contexto, se busca extraer la energía generada por las olas en la región del Pacífico, para lo cual es esencial contar con un historial de datos detallado. Dichos datos, que comprenden la altura significativa (Hs) y el periodo (Te), son extraídos de los boletines meteomarineros mensuales publicados por la DIMAR<sup>27</sup> para la región del Pacífico durante el periodo de enero a diciembre de 2015 (desde el año 2016 hasta el 2023, las boyas por problemas técnicos se encuentran en mantenimiento). Cada uno de estos boletines proporciona gráficos diarios obtenidos por boyas de oleaje direccional ubicadas en Bahía Tumaco, Solano y Buenaventura, los cuales detallan tanto el periodo como la altura del oleaje. Estos datos son fundamentales para poder diseñar los dispositivos WEC y para evaluar la viabilidad de los mismos en función de las características del oleaje en la región en cuestión.

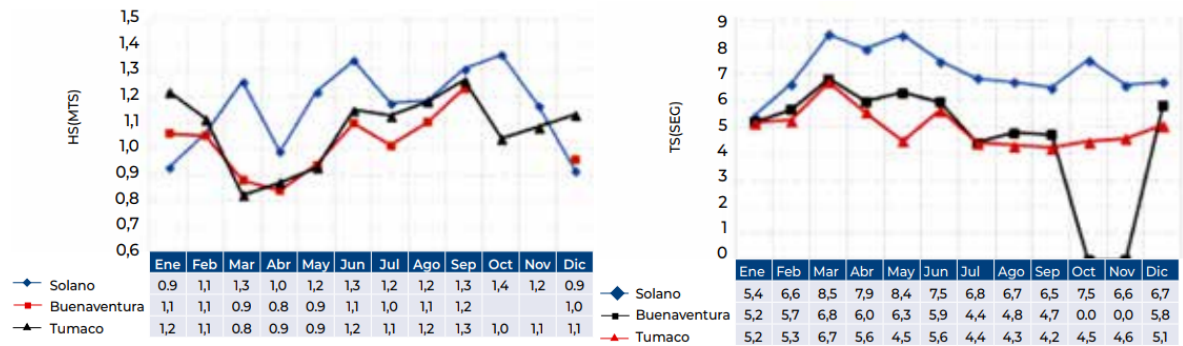
Debido a que la cantidad de mediciones diarias obtenidas en los boletines de la DIMAR variaban de manera constante, se hizo necesario aplicar un promedio a los valores diarios para poder analizarlos con mayor precisión. De esta manera, se pudo obtener una visión más clara y consistente de los datos recolectados y, por ende, tomar decisiones más informadas en base a ellos.

---

<sup>26</sup> Michael E McCormick y R Cengiz Ertekin. "Renewable sea power". En: *Mechanical engineering* 131.05 (2009), págs. 36-39.

<sup>27</sup> DIMAR. *Boletín Meteomarinero del Pacífico Colombiano 2015*. "<https://issuu.com/dimarcolombia/stacks/763fe9eac8124a61a12ec24db1fd43f4>". [Consultado 1 de mayo del 2023]. 2015.

Figura 10. Gráfica de altura significativa y periodo significativo de oleaje

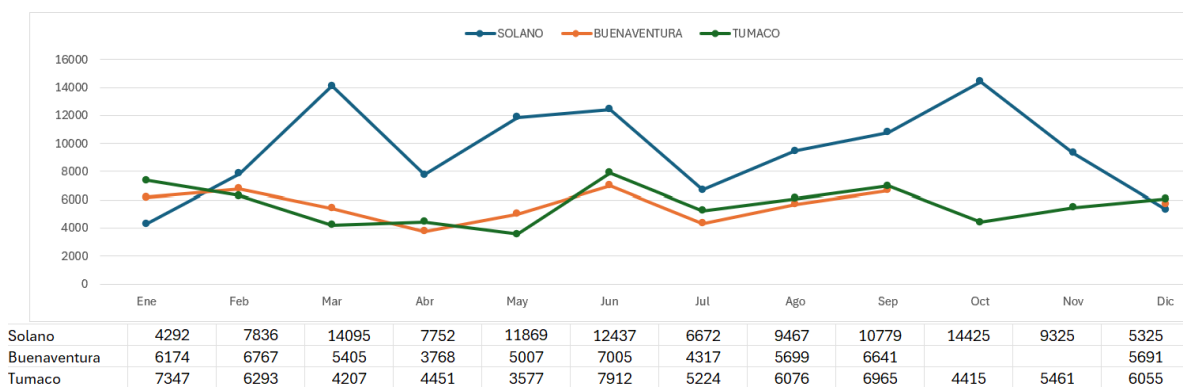


**Fuente:** IDÁRRAGA, Aris; DIAZ, Harold; PEÑARANDA, Jairo. Technical feasibility of technologies for the use of wave energy on the Colombian pacific coast, 2018.

Durante los meses de octubre y noviembre, las boyas ubicadas en la bahía de Buenaventura no estuvieron disponibles para su uso debido a trabajos de mantenimiento que se estaban llevando a cabo en ellas. Por lo tanto, durante este periodo de tiempo, no fue posible obtener mediciones o datos de estas boyas.

Con los datos obtenidos de la altura significativa y el periodo. Se calculó el potencial energético en Watt de frente de ola mediante la ecuación 9 en los tres municipios del litoral pacífico colombiano, como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Potencia de oleaje en el Pacifico colombiano (W/m)



#### **4.1. SELECCIÓN DE LA BAHÍA SOLANO**

Como se pudo apreciar en la Figura 11, la bahía con mayor potencial de oleaje es la bahía solano y según el artículo de convergia<sup>3</sup>: La zona norte del litoral pacífico colombiano, representada por el municipio de Bahía Solano, se considera la más adecuada para la instalación de dispositivos WEC. Esto se debe a que los acantilados que entran con una pendiente casi vertical al mar permiten que las olas que chocan contra ellos no se detengan bruscamente por el fondo marino al golpear contra el litoral. Además, los acantilados son un indicativo de que el oleaje en esta zona es fuerte. Si el comportamiento del oleaje es uniforme, se puede crear el fenómeno de reflexión, lo que aumenta el potencial de energía de las olas.

La roca cohesiva en la zona norte proporciona una base sólida, garantizando que la cimentación o anclaje del dispositivo se mantenga firme ante las condiciones climáticas adversas que puedan presentarse. Las rocas cohesivas, que se caracterizan por su capacidad para retener partículas unidas debido a la fuerza de atracción entre ellas, ofrecen una resistencia estructural que es esencial para soportar la carga y los esfuerzos a los que está sometido el dispositivo. Por el contrario, las zonas con rocas no cohesivas pueden deteriorar o incluso destruir cualquier anclaje con el tiempo debido a la erosión, lo que podría comprometer la estabilidad y funcionalidad del sistema.

En resumen, los dispositivos instalados en la región norte del litoral pacífico colombiano (Bahía Solano), tanto onshore como nearshore y offshore, estarán expuestos al oleaje durante todo el día, lo que asegura su eficiencia continua.

## **5. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO EN ANSYS FLUENT**

En el análisis CFD del convertidor undimotriz en la Bahía Solano, empleamos ANSYS Fluent para modelar con precisión la interacción entre la boya oscilante y las olas. Definimos parámetros clave, como la geometría de la boya, propiedades del fluido, configuración del Ansys y condiciones de contorno, para evaluar la eficiencia del sistema en este entorno marino. Este enfoque detallado sienta las bases para comprender y analizar la conversión de energía de las olas, destacando nuestra búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles.

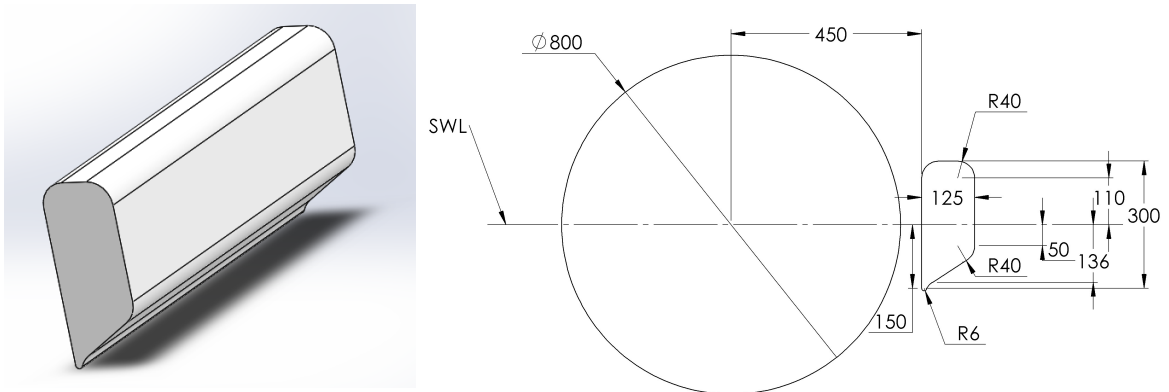
### **5.1. GEOMETRÍA DEL DISPOSITIVO PARA LA VALIDACIÓN**

Se tomaron como referencia las dimensiones del WEC de<sup>28</sup>, que incorpora un rompeolas. Las dimensiones clave tanto del WEC como del rompeolas se detallan en la Figura 12 (unidades en mm). En la sección 2.6 se puede ver una descripción más detallada de como funciona.

---

<sup>28</sup> Ratthakrit Reabroy et al. "Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater". En: *Energy Conversion and Management* 195 (2019), págs. 1174-1186.

Figura 12. Dimensiones del dispositivo (Sin escalado)



El dispositivo mecánicamente opera bajo las siguientes condiciones físicas:

- Masa: 9,74 Kg
- Centro de masa: (-3,58, 14,89, -375) mm
- Profundidad B: 750 mm

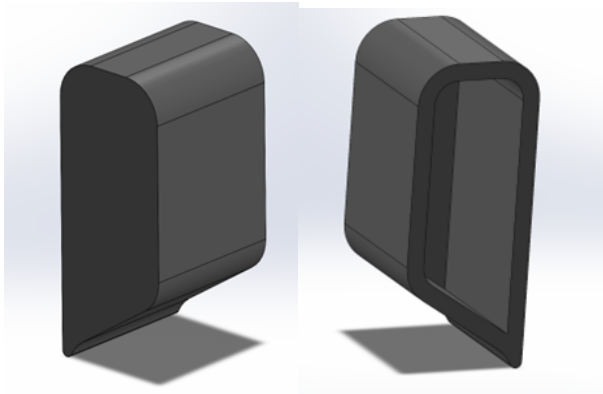
Cabe aclarar que la profundidad del dispositivo hace referencia a la profundidad del dispositivo en el modelo experimental ya que esta medida es importante tenerla para hacer los respectivos cálculos de potencia generada.

## 5.2. GEOMETRÍA DEL DISPOSITIVO WEC EN LA BAHIA SOLANO

En la figura 13 se muestra el dispositivo WEC, escalado a una proporción de 10:1, con medidas expresadas en metros como se puede observar en la figura 14. Para aligerar su peso, se ha implementado un sistema de vacío. Se ha seleccionado el PEAD (polietileno de alta densidad) como material, debido a su baja absorción de agua, lo que garantiza su resistencia a la humedad sin comprometer sus propiedades. Además, el PEAD destaca por su alta resistencia a impactos y su ligereza, lo

cual es beneficioso para el sistema, ya que su densidad es menor que la del agua de mar.

Figura 13. Esquema del dispositivo (Escala 10:1)

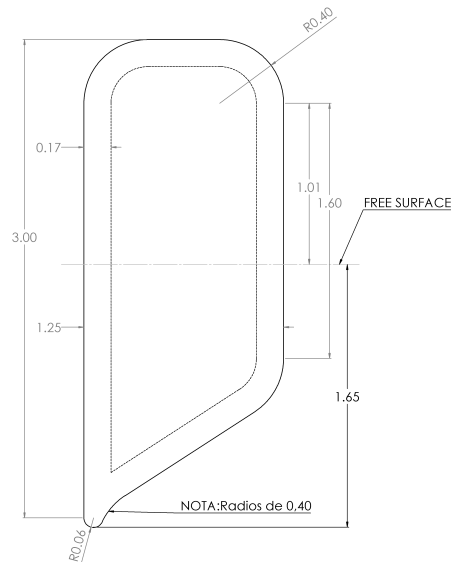


El dispositivo mecánicamente opera bajo las siguientes condiciones físicas:

- **Material:** Poliestireno de alta densidad
- **Masa:** 2.000 kg
- **Volumen:** 1,85 m<sup>3</sup>
- **Densidad:** 952 kg/m<sup>3</sup>
- **Profundidad sumergida:** 1.520 m

El espesor del dispositivo variará para ajustar su peso, con el fin de encontrar el valor ideal que se adapte al movimiento de las olas en la bahía Solano. Este ajuste permitirá mejorar el sistema en función de las condiciones específicas del entorno marino.

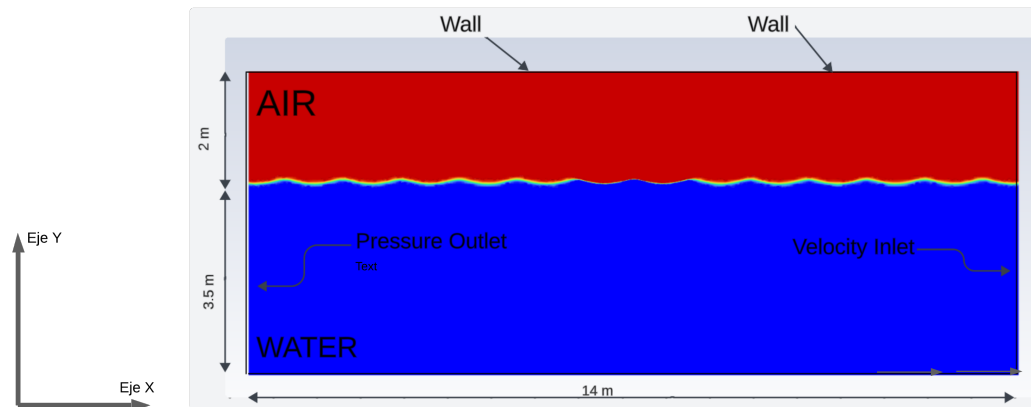
Figura 14. Dimensiones del dispositivo WEC unidades en (m)



### 5.3. GEOMETRÍA TANQUE DE OLAS PARA LA VALIDACIÓN

Para realizar la validación del modelo experimental con el numérico CFD se usó el tanque de olas de la Figura 16 , que presenta las condiciones de contorno y las dimensiones del modelo de simulación CFD. Este modelo está configurado en dos dimensiones, con una longitud de 14 metros, una altura de 5,5 metros. Las fases de aire y agua están separadas, con una profundidad de agua establecida en 3,5 metros. Los lados derecho e izquierdo se definen como entrada de velocidad y salida de presión, respectivamente. Las partes superior e inferior del dominio computacional se consideran paredes. El dispositivo WEC se ubica en el centro del tanque (a la mitad de la longitud del dominio y una altura de 3,5 m).

Figura 15. Dimensiones del tanque de olas (sin escalado)



Incorporar una playa al extremo del dominio (Numerical Beach) constituye una estrategia para potenciar la absorción de las ondas incidentes, mitigar su reflexión, aumentar la estabilidad numérica y facilitar el análisis de procesos litorales. y a su vez mejora los resultados con la realidad en estudios de olas en condiciones costeras.

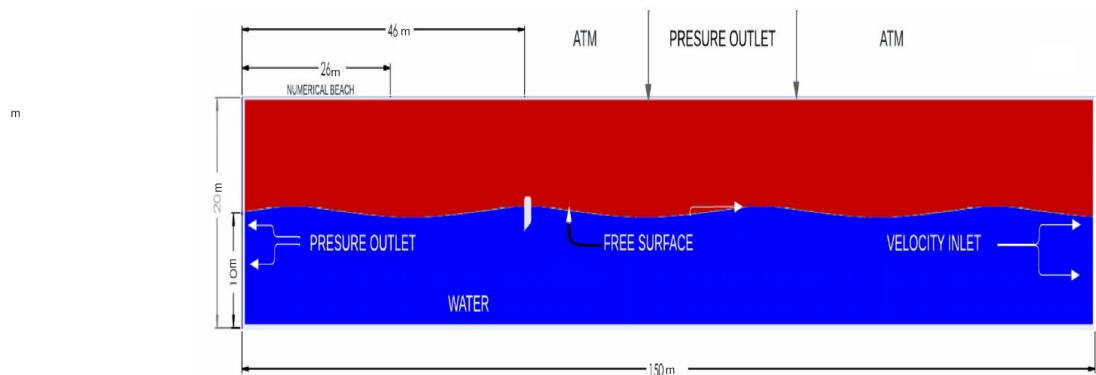
El modelo 2D en la simulación presenta varias implicaciones porque al reducir la complejidad geométrica o que puede llevar a una representación inadecuada de características importantes como la profundidad del dispositivo en el eje Z o el mecanismo en si donde se desplaza. La interacción de las olas con el dispositivo puede involucrar flujos tridimensionales, especialmente en situaciones donde se generan vórtices o flujos de retorno. Un modelo 2D no capturará estos efectos, lo que podría resultar en una predicción inexacta del rendimiento del WEC.

#### 5.4. GEOMETRÍA TANQUE DE OLAS EN LA BAHÍA SOLANO

Una vez finalizada la validación, se procedió a realizar el modelado computacional del dispositivo a gran escala, utilizando las características marítimas de Bahía Solano. Se le asignó un largo de 150 metros con el fin de capturar la mayor cantidad posible de olas que llegarán al dispositivo. En esta ocasión, se estableció una pre-

sión atmosférica en la parte superior del dominio, en lugar de una pared, ya que el dispositivo no se encuentra en un estanque de laboratorio. Además, se asignó un quinto de la distancia total del dominio a la Numerical Beach, permitiendo así incorporar la playa donde las olas se irán disipando. Para la simulación se decidió omitir el rompedor de olas para tener un diseño estructural mas básico y simple de realizar.

Figura 16. Dimensiones del tanque de olas (Escala 10:1)

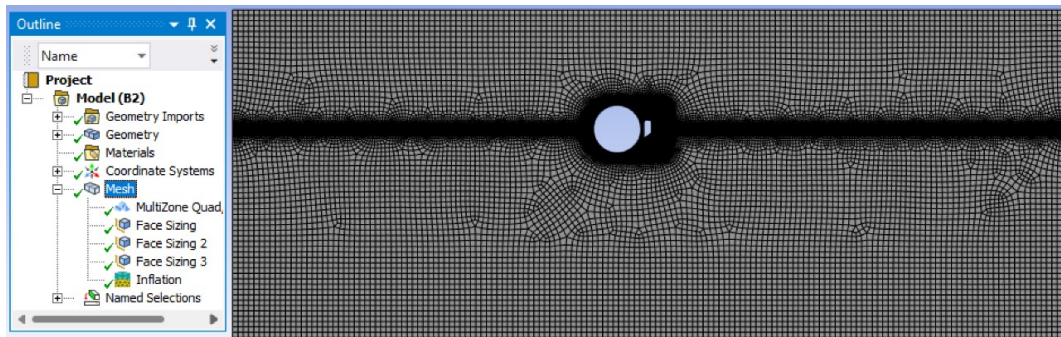


## 5.5. MALLADO PARA LA VALIDACIÓN

Se emplea el método "MultiZone Quad/Tri" para mallar el modelo Bidimensional, aprovechando la combinación de elementos cuadriláteros y triangulares para cubrir las partes más complejas del modelo. Además, se ajusta el tamaño de los elementos en las caras del modelo tridimensional utilizando "Face Sizing". El propósito de este ajuste, es mejorar la precisión de la simulación y reducir el costo computacional, centrándose en tres áreas específicas del modelo, los detalles mencionados anteriormente se pueden observar en la Figura 17.

Para generar las mallas en la zona de cifrado del nivel del líquido y en la zona de encriptación del movimiento, se seleccionó un generador de malla de celda recortada. Este tipo de generador es útil para crear mallas en geometrías complejas, ya que permite una mejor adaptación a las superficies del modelo.

Figura 17. Mesh del canal de oleaje



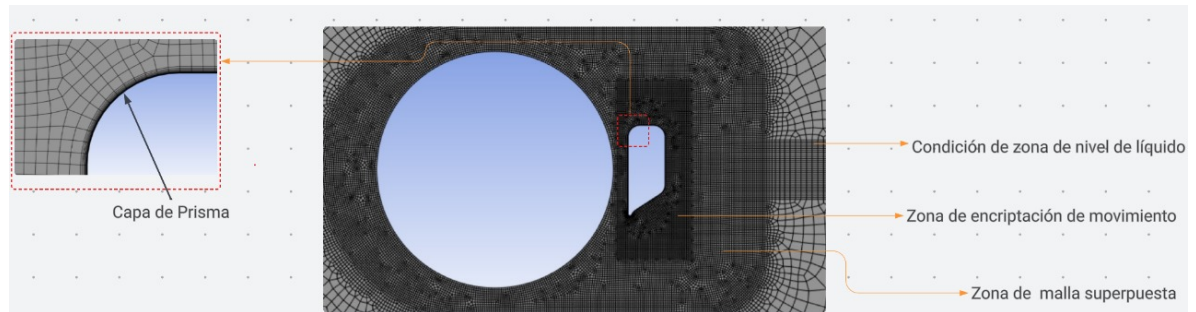
Además, se eligió el remallador de superficie, que se encarga de mejorar la calidad de la malla existente al ajustar la conectividad y la forma de los elementos, garantizando que la malla sea adecuada para las simulaciones.

Por último, se utilizó el generador de capas prismáticas Inflation, que permite crear una capa prismática cerca de la superficie del cuerpo. Esta capa se configura con diez capas, lo que ayuda a capturar de manera precisa los gradientes de velocidad y otras propiedades del flujo en la vecindad de la superficie. Esto es crucial para obtener resultados confiables en la simulación, especialmente en áreas donde se espera un cambio rápido en el comportamiento del flujo. Esta configuración se ilustra en la Figura 18.

Además, se aplica una zona de malla superpuesta para dividir la región compleja de la interfaz aire-agua en subdominios más simples. El flujo en cada subdominio se calcula de forma independiente y puede superponerse con los demás. Con Program Controlled se proporciona el manejo personalizado del mallado, brindando así flexibilidad y adaptabilidad en todo el proceso. Además, se usa "Free Face Mesh Type", una modalidad de mallado que selecciona el control de caras libres en el modelo, garantizando precisión en las condiciones de contorno. Finalmente, se utiliza Preserve Boundarie para asegurar que los bordes del modelo se mantengan intactos

durante todo el proceso de mallado.

Figura 18. Detalles de la generación de malla del modelo de tanque de olas.



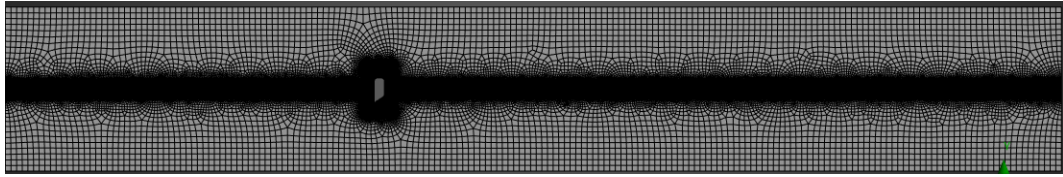
En el mallado se realizaron tres refinamientos con el objetivo de optimizar el costo computacional y proporcionar un mayor nivel de detalle en los puntos clave donde se desarrollan tanto el movimiento de las olas como el del dispositivo WEC.

El primer refinamiento, en la zona de nivel de líquido ( $\Delta_{x2}$ ), se llevó a cabo porque en esta área se generan las olas y se desplazan a través del dominio computacional hasta llegar al dispositivo WEC. El segundo refinamiento, en la zona de malla superpuesta ( $\Delta_{x3}$ ), se realizó para aumentar el detalle en el área donde está ubicado el dispositivo WEC con su rompedor de olas. Finalmente, el refinamiento en la zona de encriptación de movimiento ( $\Delta_{x4}$ ) se centró exclusivamente en el dispositivo WEC, ya que en este pequeño espacio se está generando el movimiento, lo que permite reducir el tamaño de la malla en esa área, optimizando la generación de datos, que es el aspecto más importante de la simulación.

## 5.6. MALLADO DEL TANQUE DE OLAS EN LA BAHÍA SOLANO

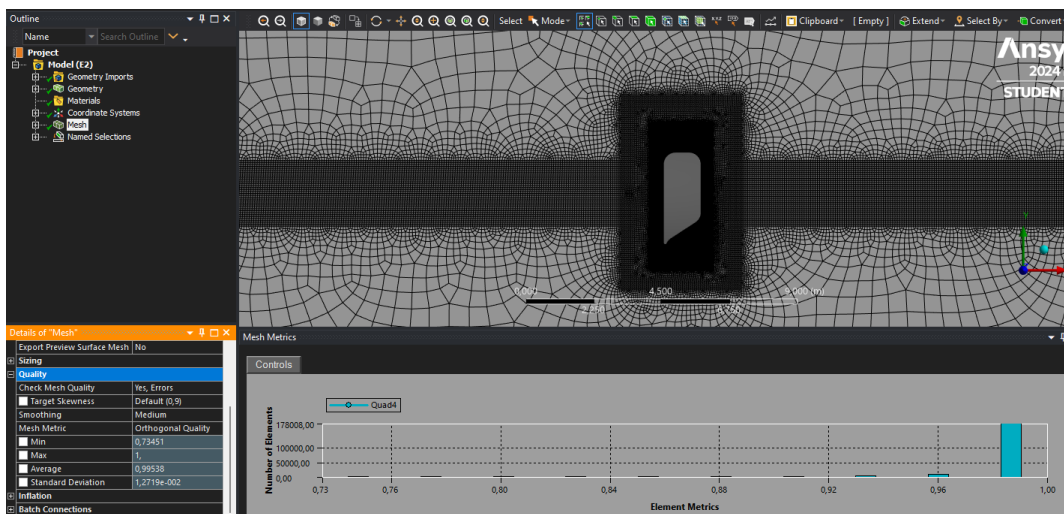
Para el mallado del dominio computacional en Bahía Solano, se utilizó el mismo método y nivel de refinamiento empleados en la fase de validación. A continuación, se presentan imágenes que muestran tanto el mallado como la calidad del mismo obtenida durante el proceso.

Figura 19. Mallado para la Bahía Solano.



Es importante resaltar que Orthogonal Quality ayuda a medir el grado de ortogonalidad de las celdas con respecto a las caras vecinas, lo que es crucial para asegurar la precisión y estabilidad numérica en los cálculos. Donde un valor cercano a 1 indica que las celdas tienen una buena calidad ortogonal, es decir, son casi perpendiculares a las caras vecinas, lo que favorece un buen comportamiento numérico, y el valor de cero indica lo contrario.

Figura 20. Calidad del mallado en base al Orthogonal Quality



Dado que el dispositivo se desplaza en la dirección vertical, fue necesario realizar un mayor refinamiento en la región donde se movería, con el fin de capturar detalles importantes, como el comportamiento de los vórtices y las capas límite. Además, se buscó un método de mallado que se adaptara mejor a la geometría del dispositivo, para evitar condiciones de contorno mal definidas que pudieran resultar en el cruce o colapso de las superficies. El método que mejor se ajustó a dicha geometría y generó un valor de calidad mayor fue el de Multizone Quad/Tri.

## 5.7. CONFIGURACIÓN DEL FLUENT

La tabla 5 presenta la configuración resumida del modelo en ANSYS FLUENT 12.1 para la simulación CFD, donde luego sera explicada.

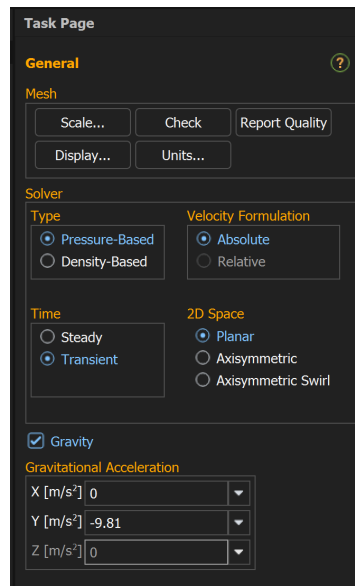
Tabla 5. Configuración del Fluent

<b>Codigo CFD</b>	ANSYS FLUENT 12.1
<b>Modelo fisico</b>	Transient gravedad $-9.81 \text{ m/s}^2$ Pressure Based
<b>Materials</b>	Aire $\rho=1.225 \text{ Kg/m}^3$ Agua $\rho=1.025 \text{ Kg/m}^3$
<b>Multiphase</b>	Volum of Fluid Open chanel Open chanel wave BC Type Sharp-Interfacial AntiDifusión Implicit Body Forces
<b>Viscocidad</b>	Laminar
<b>Boundary Condition</b>	Velocity Inlet Pressure Outlet Wall top Wall bottom
<b>Velocity Inlet</b>	Open chanel wave BC Free surface: 0 m Bottom level: -3.5 m Wave Theory: Second Order Stoke
<b>Cell Zone Condition</b>	Numerical Beach
<b>Dynamic Mesh</b>	Six DOF Rigid Boy
<b>Methods</b>	PISO PRESTO Second Order Upwin Compresive Primer Order implicit

A continuación, se explica la razón detrás de la selección de cada parámetro:

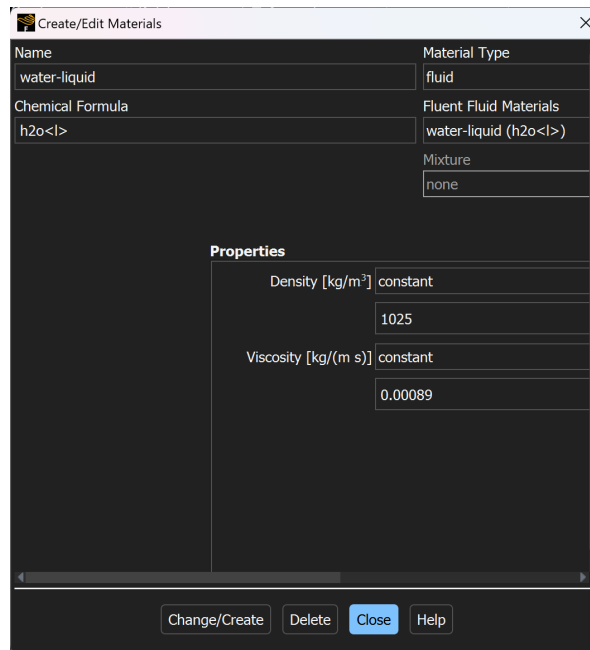
**Modelo Físico** Se optó por un análisis transitorio para capturar las variaciones temporales en la interacción del fluido y la estructura a lo largo del tiempo. El enfoque Pressure-Based se utiliza cuando se resuelven flujos de baja velocidad y cuando los efectos de la compresibilidad no son dominantes y es bueno para realizar simulaciones multifásicas.

Figura 21. Modelo Físico



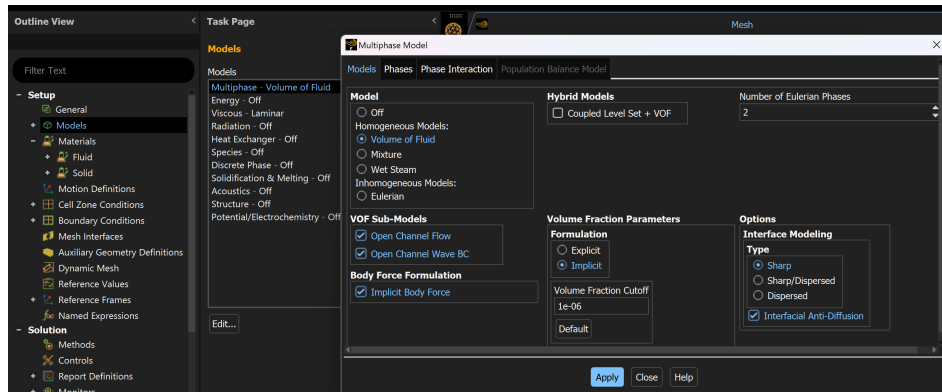
**Materiales** Se definió la densidad del agua de mar y se mantuvo la del aire como estándar.

Figura 22. Materiales



**Multiphase** Para modelar interfaces entre fases fluidas, se utilizó el modelo de Volumen de Fluidos y se implementaron las condiciones de Open Channel y Open Channel Wave BC para simular condiciones de canal abierto y la interacción de ondas. Type Sharp-Interfacial AntiDiffusion se utilizó para mejorar la precisión en la simulación de flujos debido a las interfaces agudas o con cambios abruptos en la composición del flujo. Este modelo está diseñado para reducir el difusión numérica que puede ocurrir en las interfaces entre diferentes fluidos o fases Facilitando la obtención de resultados más representativos y menos distorsionados por efectos numéricos no deseados. se utilizó Implicit Body Forces para considerar de manera implícita las fuerzas corporales (como la gravedad o las fuerzas centrífugas) en el cálculo de las ecuaciones que gobiernan el flujo o el movimiento del sólido.

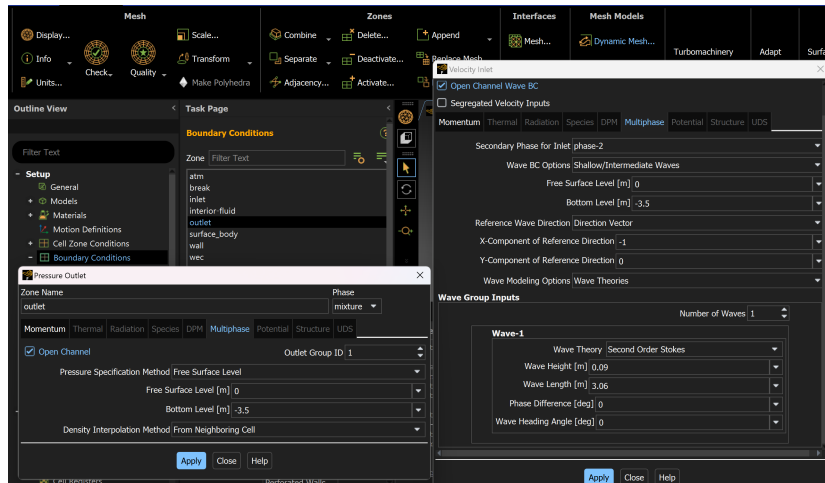
Figura 23. Multiphase



**Viscosidad** La explicación del porqué se escogió el modelo laminar se encuentra en la sección 2.8.4 y 6.2.

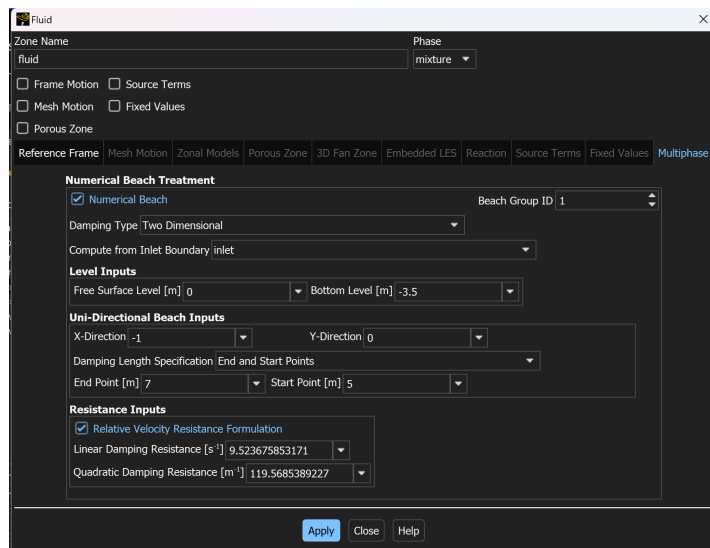
**Boundary condition** En velocity inlet se definieron los parámetros como la altura significativa de ola, la longitud de onda (se calculo mediante la ecuación 3), la superficie libre de onda, la profundidad del agua de mar y se definió la teoría computacional de oleaje que se ajustó más al modelo experimental. Se definieron 2 paredes en la parte inferior y superior debido a que las tomas de datos se realizaron en un tanque cerrado y la Pressure Outlet se definió a la salida del dominio porque no se conoce de antemano el patrón de velocidad exacto en la salida, pero se tiene una idea de la presión en esa región, asumiendo una presión atmosférica al salir al ambiente por lo que se esta simulando un dominio al aire libre.

Figura 24. Inlet y Outlet



**Cell zone Condition** La implementación de un Numerical Beach al final del dominio se eligió como una estrategia para mejorar la absorción de las ondas incidentes y reducir su reflexión.

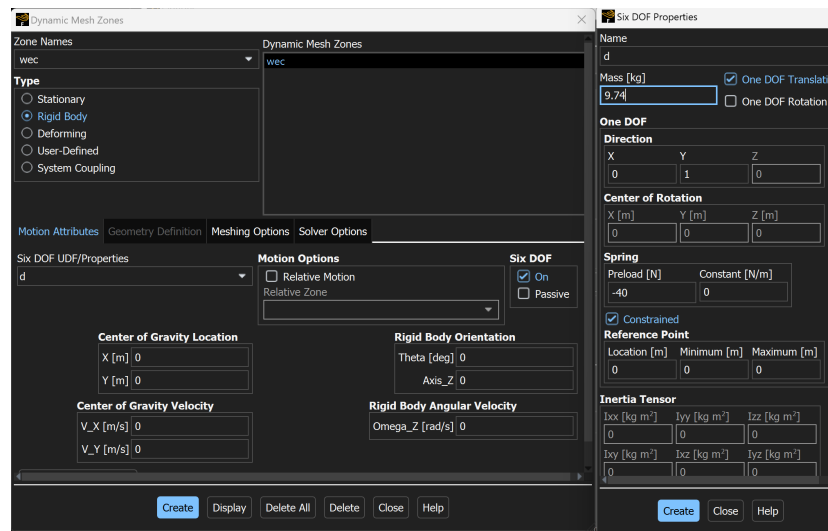
Figura 25. Numerical Beach



**Dynamic Mesh** se activo con la finalidad de que las mallas puedan adaptarse a las deformaciones o movimientos del dominio y así capturar de manera precisa el comportamiento del flujo ya que el dispositivo WEC cambia de posición con el

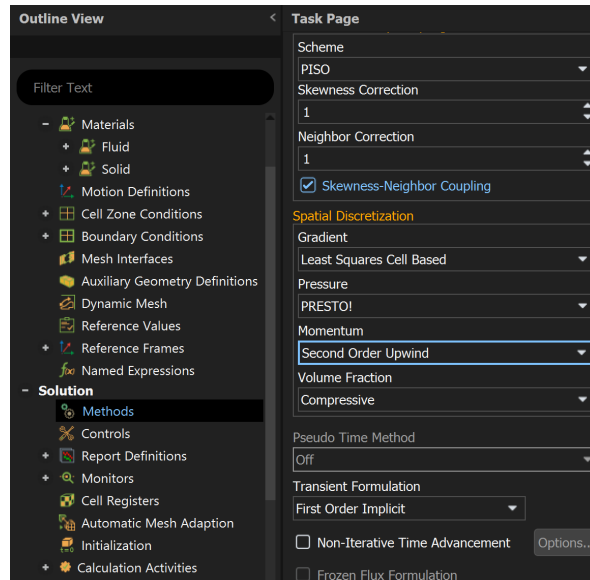
tiempo. El modelo 6-DOF calcula las fuerzas y momentos aplicados por el fluido sobre el cuerpo y ajusta el movimiento del cuerpo en función de estos efectos donde se definen parámetros específicos del movimiento para el cuerpo rígido y luego se designa qué parte del modelo debe ser tratada como un cuerpo rígido que se moverá bajo las condiciones especificadas (ver imagen 26). Se definió una condición de preload debido a que por la estructura donde esta sujeta el dispositivo WEC le genera una fuerza negativa.

Figura 26. Dynamic Mesh



**Methods** En cuanto al método utilizado para el acople Presión-Velocidad en el esquema PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), se activó skewness-neighbor con correcciones con el objetivo de mejorar la convergencia en situaciones de deformación de la malla. En la discretización espacial, se emplearon el esquema PRESTO, para la presión, Second Order Upwind para el momento y un esquema Compressive para la discretización de la fracción de volumen, todo ello con el fin de mejorar la precisión de la simulación.

Figura 27. Métodos



Se definió un valor de 1 al Skewness Correction para introducir ajustes en el cálculo de los términos convectivos y difusivos, mejorando la capacidad del solver para manejar mallas distorsionadas, ayudando a mantener la estabilidad de la simulación y asegurar que los resultados sean más precisos, incluso con una malla no ideal.

Un valor de 1 para la neighbor correction significa que se aplica una corrección completa a los términos que dependen de las interacciones entre los elementos vecinos en la malla, ya que si los elementos vecinos están muy distorsionados o desalineados, esta corrección contribuye a mejorar la precisión y la estabilidad de la simulación.

El método Least Squares Cell-Based utiliza una aproximación de mínimos cuadrados para calcular los gradientes en cada celda de la malla basándose en los valores de las celdas vecinas. Esta técnica asegura que los gradientes calculados son lo más precisos posible para una malla no estructurada o con geometrías complejas, minimizando el error de la aproximación.

Por lo general, estas correcciones se utilizan cuando la malla no está lo suficientemente refinada debido a limitaciones geométricas, como fue nuestro caso con la geometría compleja del dispositivo WEC. Especialmente en el borde inferior, ya que era posible observar ciertos elementos distorsionados, a pesar de tener un valor aceptable, en cuanto a la calidad del mallado. Además de que también se trataba de una simulación en estado transitorio donde el dispositivo se iba estar moviendo, y eso generaba una distorsión en la malla a medida que se desplaza el dispositivo, por lo cual se necesitó de una corrección para garantizar la estabilidad del solver.

## **6. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMATICO EN ANSYS FLUENT**

Con el fin de explorar la interacción entre el fluido y el sólido en el proceso de conversión de la energía proveniente de las olas, se ha implementado un modelo computacional CFD. Este modelo se basa en la configuración física establecida en la Universidad de Ingeniería de Harbin (ver Figura 7), en la cual se han definido varios parámetros de periodo (en un rango de 0,8 a 1,4 segundos) y una altura significativa de 0,08 metros. El objetivo principal de esta configuración es validar los resultados obtenidos en nuestra simulación mediante la comparación con datos reales.

### **6.1. INDEPENDENCIA DEL MALLADO**

La independencia de mallado se refiere a la verificación de que los resultados de una simulación numérica no cambian significativamente al variar la densidad o tamaño del mallado utilizado en la representación geométrica del dominio.

Para llevar a cabo la independencia de mallado, se llevó a cabo una comparación de la altura de la ola sin el WEC, utilizando como punto de referencia la ubicación del dispositivo undimotriz (en el centro del tanque). Esta metodología se implementó con el propósito de optimizar tanto el tiempo de cálculo como la precisión de los resultados computacionales. En este estudio particular, se emplearon tres tipos de mallados (ver tabla 6) con un periodo ( $T$ ) de 0,8 segundos y una altura significativa ( $H_s$ ) de 0,08 metros. Este enfoque permitió evaluar cómo variaciones en la densidad del mallado afectaban los resultados y aseguró que los mismos fueran robustos e independientes de la discretización espacial.

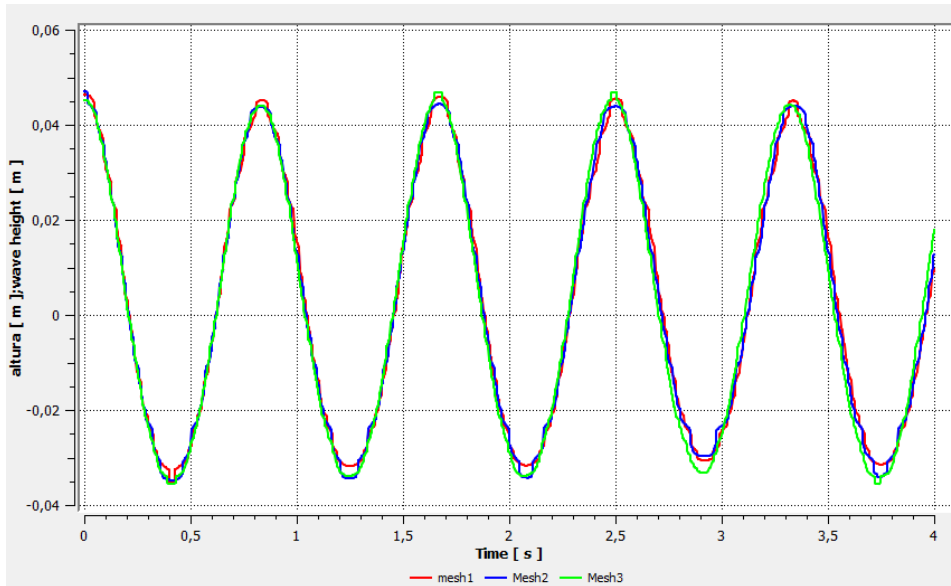
Tabla 6. Parámetros de los 3 mallados

Mesh	$\Delta_{x1}$	$\Delta_{x2}$	$\Delta_{x3}$	$\Delta_{x4}$	Number elements	Time Step	Time cpu [h]
1	0,2	0,055	0,015	0,006	20628	0,003	1
2	0,1	0,04	0,01	0,005	42321	0,003	3
3	0,07	0,025	0,009	0,0027	74172	0,003	5

En la tabla 6, cada  $\Delta_x$  corresponde a los tamaños de malla utilizados en cada configuración específica. El Time Step representa el intervalo de tiempo empleado en cada simulación, y el Time indica la duración total del proceso computacional de la simulación.

Se optó por ese valor de time step porque, al reducirlo, se observaba un aumento significativo en el costo computacional. Aunque un paso de tiempo más pequeño puede mejorar la precisión de los resultados, no se evidenció una mejora notable en la predicción de la altura de la ola que justificara este costo adicional. Por lo tanto, se incrementó el time step hasta alcanzar un balance entre precisión y eficiencia.

Figura 28. Comparación de los diferentes mallados sin el WEC

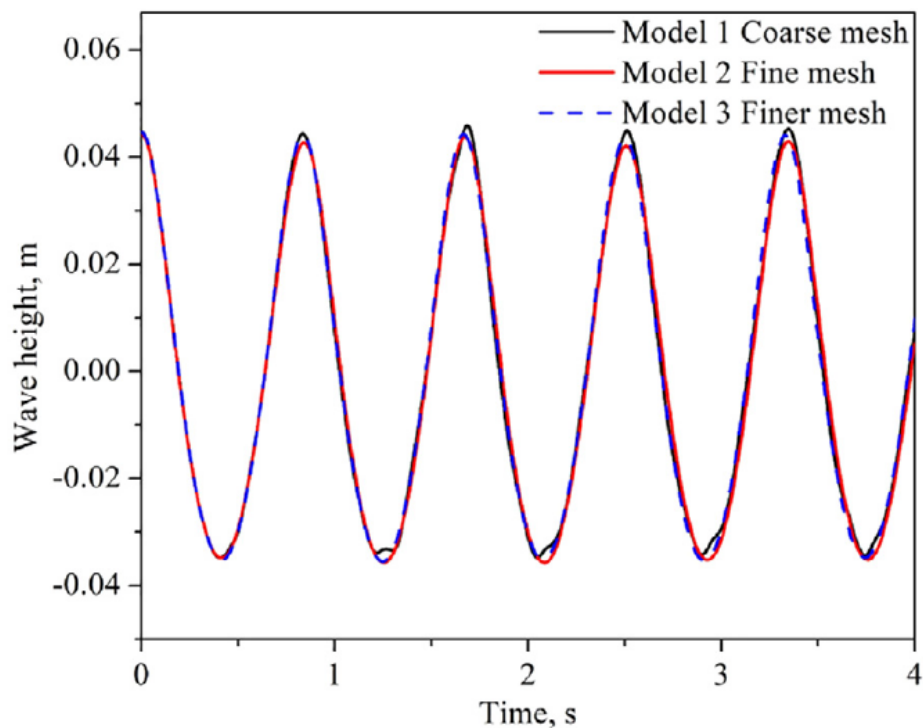


Al comparar los tres mallados, se observa que la malla 1 presenta una falta de fine-

za, especialmente evidente en los picos, donde pierde precisión. La malla 2, por otro lado, exhibe menos afinidad en las curvaturas en comparación con el mallado 3, pero aún así mantiene resultados precisos y aceptables. No obstante, se destaca que, según la tabla 6, el tiempo computacional de la malla 3 es el doble en comparación con el mallado 2. Además, a medida que transcurre la simulación, las diferencias entre los resultados de la malla 2 y la malla 3 se vuelven más notorias.

Por ultimo se comparo los datos obtenidos de la altura de oleaje en la Figura 28 con los datos tomados de (Reabroy, et al, 2019)<sup>28</sup>:

Figura 29. Comparación de los diferentes mallados sin el WEC de Reabroy



**Fuente:** REABROY, Ratthakrit, et al. Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater. 2019, p. 1174-1186.

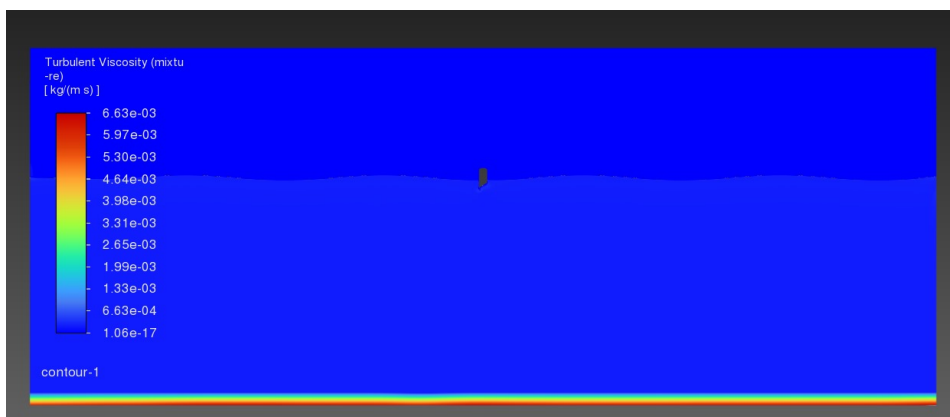
Como se evidencia en las Figuras 28 y 29, se aprecia una notable similitud entre los datos en relación con la altura de la ola y el período, mostrando una tendencia consistente en la forma en que estas olas se comportan en el centro del tanque. Sin

embargo, es posible notar en la Figura 29 una afinidad mejorada en los resultados. Sin embargo, se puede atribuir esta mejora en la afinidad de los resultados en la Figura 29 al empleo de un paso de tiempo durante la simulación de 0,001s.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO

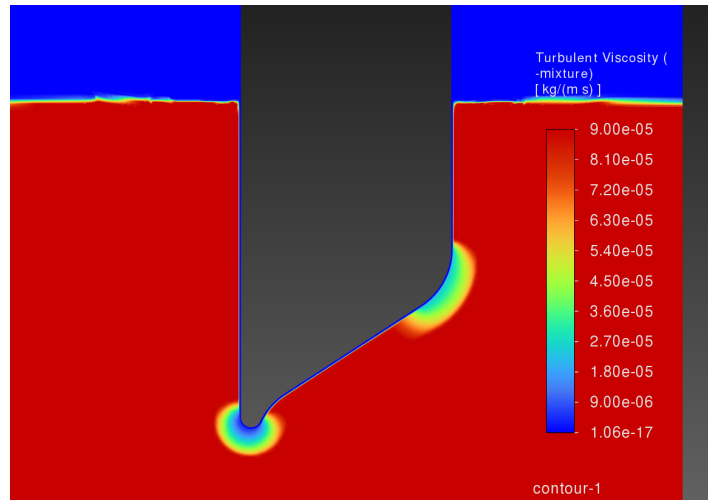
Para determinar si el flujo es laminar o turbulento, se realiza una comparación entre la viscosidad dinámica del agua de mar y la viscosidad turbulenta, utilizando una simulación con el modelo k-w (SST). Esta comparación permite evaluar el nivel de la viscosidad turbulenta (ver figura 30). Si la viscosidad turbulenta es de un valor similar o mayor que la viscosidad dinámica, el flujo se considera turbulento. En cambio, si la viscosidad turbulenta es significativamente menor que la viscosidad dinámica, el flujo se clasifica como laminar.

Figura 30. Viscosidad turbulenta



Como se puede observar en la imagen 30, se registra un alto valor de viscosidad turbulenta en la parte inferior, debido a la proximidad con la pared que representa el fondo marino. Sin embargo, en la región correspondiente al dispositivo WEC (ver figura 31), que es el área de interés para nuestro análisis, no se observa un valor elevado de viscosidad turbulenta.

Figura 31. Viscosidad turbulenta cerca al WEC



ya en la figura 31 se puede apreciar una viscosidad de  $9 \times 10^{-5}$ , lo cual es un valor muy pequeño si lo comparamos con la viscosidad dinámica del mar que es de  $0,89 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ . Además al analizar que no hay diferencia en la elevación de las olas entre los dos modelos, en nuestro trabajo actual, se aplica el modelo de flujo laminar. Y también por el hecho de que al aplicar el modelo k-w (SST) el costo computacional es demasiado elevado.

### 6.3. VALIDACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL WEC

Para asegurar la corrección de todos los parámetros, tales como la geometría del WEC, las configuraciones del mallado y del software Fluent, llevamos a cabo una comparación entre el desplazamiento experimental realizado por (Reabroy, et al, 2019)<sup>28</sup> y el desplazamiento obtenido en nuestra simulación CFD, como se muestra en las Figuras 32 y 33.

Figura 32. Desplazamiento del wec en Ansys Fluent con  $T_e:1,4$  y  $H_s:0,08$

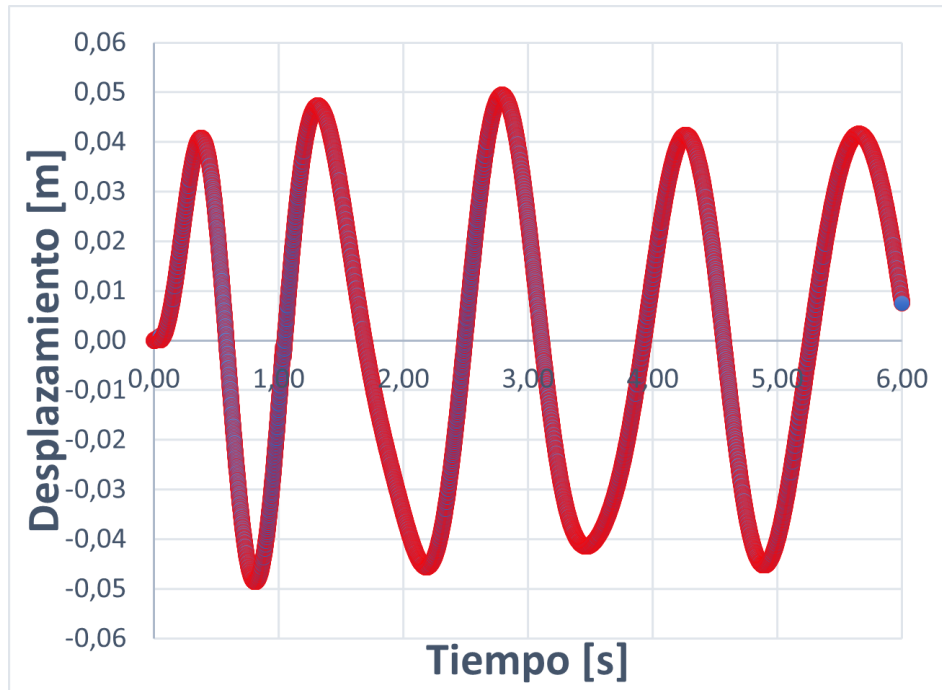


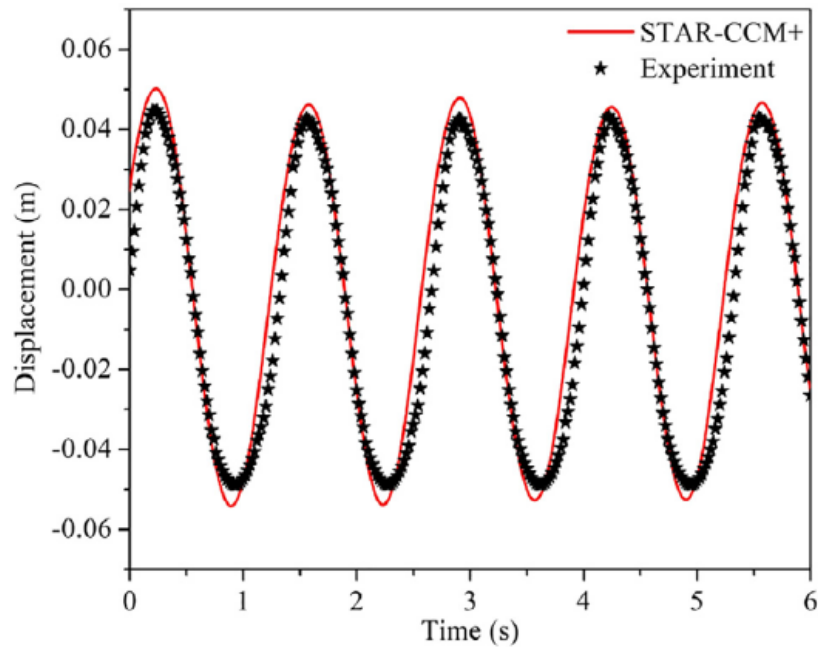
Tabla 7. Parámetros del mallado con el WEC

Mesh	$\Delta_{x1}$	$\Delta_{x2}$	$\Delta_{x3}$	$\Delta_{x4}$	Number elements	Time Step	Time cpu [h]
4	0,09	0,02	0,007	0,0053	55576	0,001	2

En la tabla 7, se presenta la configuración del mallado utilizada para obtener los resultados que se ilustran en la Figura 32. Esta configuración fue ajustada en función del análisis de la independencia del mallado, lo que reveló que no se requiere un número excesivo de elementos, ya que más allá de cierto punto, las variaciones en los resultados son mínimas. Además, se redujo el Time Step a 0,001 s dada la afinidad observada al comparar los resultados con los de Reabroy.

En el mallado, también se aplicó una técnica de Inflation al WEC, consistente en agregar 10 capas con un espesor máximo de 0,003, con el objetivo de mejorar la representación del dispositivo en la simulación.

Figura 33. Desplazamiento del wec experimental y cFD de Reabroy con  $T_e:1,4$  y  $H_s:0,08$



**Fuente:** REABROY, Ratthakrit, et al. Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater. 2019, p. 1174-1186.

La comparación entre los desplazamientos numéricos obtenidos mediante CFD y los datos experimentales, evidenciada en las Figuras 32 y 33, revela una notable coincidencia tanto en la dirección como en la magnitud del desplazamiento del WEC.

Sin embargo, se observa un desfase en la Figura 32, donde en ciertas partes le cuesta alcanzar los picos máximos de una onda sinusoidal. Además, se puede observar una diferencia en los períodos, ya que, a pesar de comenzar desde el mismo punto, finalizan en ubicaciones distintas. En ambas representaciones gráficas se evidencia el efecto de amortiguamiento, aunque se destaca una diferencia en la claridad con la que este fenómeno se presenta, siendo más pronunciado en la Figura 31.

Esta consistencia a lo largo del tiempo sugiere que el modelo CFD empleado ha logrado capturar de manera efectiva la dinámica del dispositivo bajo las condiciones de oleaje específicas estudiadas. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que las simulaciones CFD están sujetas a diversas fuentes potenciales de error que deben ser examinadas con atención para una interpretación precisa de los resultados.

Estos errores pueden manifestarse debido a las limitaciones propias del modelo utilizado, que pueden simplificar o idealizar ciertos aspectos del sistema físico, resultando en una representación incompleta de su comportamiento real. Además, se busca alcanzar la mayor cercanía posible entre las aproximaciones numéricas empleadas en la discretización del dominio y en la resolución numérica del mallado. No obstante, es importante tener en cuenta que estas aproximaciones pueden divergir, contando también con el costo computacional elegido, especialmente en zonas de alta variabilidad o refinamiento en el campo de flujo. Además, las condiciones de contorno establecidas en la simulación desempeñan un papel crucial, ya que cualquier desviación de las condiciones reales del problema puede influir en la precisión de los resultados. La incertidumbre asociada a los parámetros utilizados en la simulación, como la viscosidad del fluido o las propiedades del material, requirió realizar algunas suposiciones para garantizar una similitud lo más cercana posible a los resultados deseados, lo cual puede influir en los resultados obtenidos. Por último, incluso pequeños errores en la geometría del modelo o en la configuración de la simulación pueden tener un impacto significativo en los resultados finales.

En conclusión, al comparar los desplazamientos numéricos y experimentales muestran que el modelo CFD es válido y confiable en este estudio para predecir el desplazamiento del WEC bajo ciertas condiciones de oleaje específicas.

## 7. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL WEC TIPO BOYA OSCILANTE EN LA BAHÍA SOLANO

Para realizar el análisis del rendimiento del WEC, primero se determinó el valor de las amplitudes de desplazamiento del dispositivo en las olas de la Bahía Solano (ver figura 34). Este estudio se llevó a cabo en el mes de enero, durante el cual se probaron diversas configuraciones del WEC. En cada prueba, se ajustó el peso del dispositivo con el fin de encontrar la configuración que mejor se adaptara al movimiento de las olas en la bahía.

Los datos sobre el período y la altura de las olas se presentan en la figura 10, mientras que las dimensiones iniciales del dispositivo, con una masa de 2.200 kg, se muestran en la figura 34.

Figura 34. Desplazamiento del wec en la Bahia Solano( $Z_0$ )  $T_e:5,4s$  y  $H_s:0,9m$

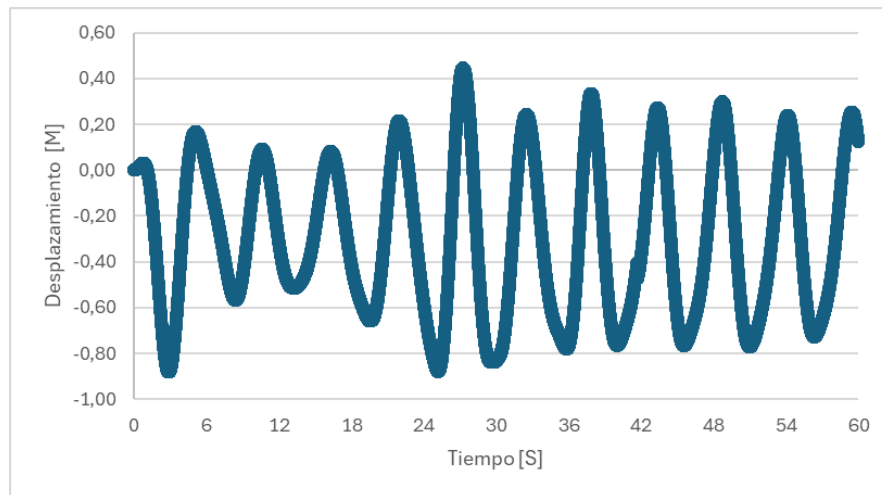


Tabla 8. Parámetros del mallado del WEC en la Bahía solano

Mesh	$\Delta_{x1}$	$\Delta_{x2}$	$\Delta_{x3}$	$\Delta_{x4}$	Number elements	Time Step	Time cpu [h]
5	0,7	0,07	0,04	0,01	189161	0,001	26

En la gráfica 34 se observa que, con un peso de 2,2 toneladas, al dispositivo le resulta difícil seguir los incrementos de las olas. Aunque en ciertos intervalos de

tiempo parece amortiguar el desplazamiento, a los 60 segundos vuelve a retomar el incremento adecuado de la ola. Esto podría deberse a que el peso utilizado es excesivo para el dispositivo, por lo que será necesario probar con pesos menores. Como se muestra en la figura 34, los desplazamientos generados son más irregulares en comparación con los datos obtenidos durante la validación. Esto se debe a que ya no estamos trabajando con datos de laboratorio, donde es posible controlar y ajustar tanto el período como la altura de las olas, manteniendo estos valores constantes a lo largo del tiempo para lograr un desplazamiento óptimo entre el dispositivo y las olas.

Una vez obtenido el desplazamiento del dispositivo  $Z_0$ , se procede a realizar el cálculo para determinar su potencial energético a lo largo del tiempo, utilizando la ecuación 27 mencionada en el capítulo 3.1.

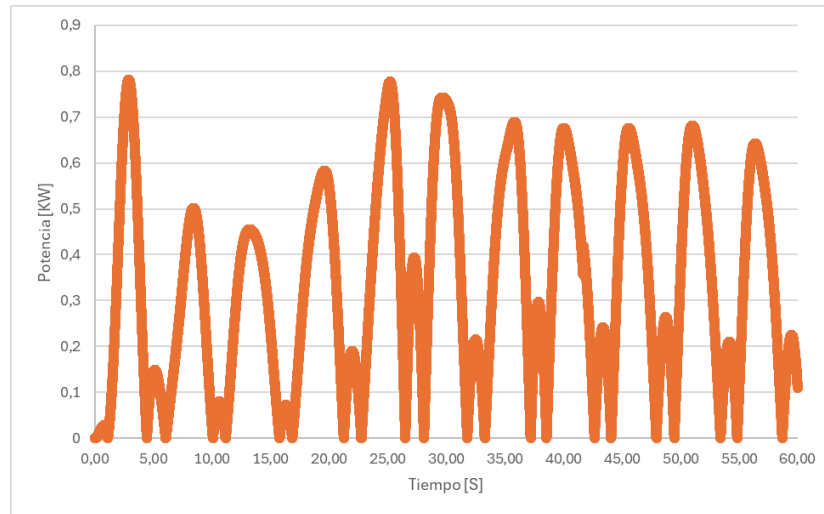
$$P = \left[ \frac{\rho_{mar} g H B \lambda}{2\pi} (e^{-2\pi d/\lambda} + 1) \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right) \right] \frac{\pi \cdot Z_0}{T}$$

Donde H sería la altura de oleaje, B la profundidad del dispositivo en la dirección Z,  $\lambda$  la longitud de onda, d es la superficie sumergida del dispositivo, L la longitud del dispositivo en la dirección x y T el periodo de ola.

$$P = \left[ \frac{1.025 \cdot \text{kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.9 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} \cdot 41.36}{2\pi} (e^{-2\pi \cdot 1.520/41.36} + 1) \sin\left(\frac{\pi \cdot 1.25}{41.36}\right) \right] \frac{\pi \cdot Z_0}{5.4}$$

A continuación, se presenta la gráfica en la que se sustituyeron todos los valores del desplazamiento del WEC durante los 60 segundos de simulación (ver figura 35).

Figura 35. Potencial del dispositivo WEC en la Bahía Solano Te:5,4s y Hs:0,9m



En la figura 35, se muestran los diferentes picos de potencial energético alcanzables durante el mes de enero en Bahía Solano. El pico máximo de potencia es de 0,8 kW, un valor elevado, aunque es importante señalar que se trata de un modelamiento idealizado que no considera la fricción mecánica que influye en la generación de energía, ya que incluir este factor incrementaría significativamente el costo computacional de la simulación, ya que sería necesario diseñar toda la estructura mecánica del dispositivo. Además, sería imprescindible realizar una simulación en 3D para obtener resultados más precisos.

Al promediar los datos, se obtiene una potencia de 0,413 kW en esos 60 segundos, lo cual es razonable si se tiene en cuenta el potencial máximo por hora en esta ubicación. A continuación, se procederá a calcular la eficiencia que el dispositivo puede alcanzar mediante la ecuación :

$$\eta = \frac{E_z}{E} \quad (28)$$

donde  $E_z$  y  $E$  son:

$$E_z = 0.5 \left[ \left( \rho_{mar} \cdot L \cdot B \cdot d + \frac{0.639 \cdot \rho_{mar} \cdot \pi \cdot L \cdot B^2}{4} \right) \left( \frac{2\pi \cdot H_s}{5.4} \right)^2 + \rho_{mar} \cdot g \cdot \pi \cdot L \right] \cdot Z_0^2 \quad (29)$$

$$E = \frac{\rho_{wec} \cdot g \cdot H_s^2 \cdot \lambda \cdot B}{8} \quad (30)$$

Para el  $Z_0$  se tomo un promediado de los valores obtenido en la figura 18 de 1,14.

$$E_z = 0.5 \left[ \left( 1025 \cdot 1.25 \cdot 1.5 \cdot 1.52 + \frac{0.639 \cdot 1025 \cdot \pi \cdot 1.25 \cdot 1.5^2}{4} \right) \left( \frac{2\pi \cdot 0.9}{5.4} \right)^2 + 1025 \cdot 9.81 \cdot \pi \cdot 1.25 \right] \cdot 1.23^2 = 3349N \cdot m$$

$$E = \frac{1025 \cdot 9.81 \cdot 0.9^2 \cdot 41.36 \cdot 1.5}{8} = 6316N \cdot m$$

$$\eta = \frac{3390N \cdot m}{6316N \cdot m} = 54\% \quad (31)$$

Con este resultado, podemos concluir que el dispositivo WEC en la Bahía Solano tiene un rendimiento satisfactorio, alcanzando un desempeño teórico del 54 % a pesar de las condiciones de oleaje irregular. Sin embargo, es importante destacar que esta eficiencia es teórica, y en la práctica pueden ocurrir pérdidas debido a la fricción generada por el riel en el que se desplaza en la dirección Y. Esto se debe a que la simulación se realizó únicamente con el dispositivo WEC, sin incluir el mecanismo completo que lo acompaña, ya que su inclusión habría complicado significativamente la simulación.

## 7.1. AJUSTE DE GEOMETRÍA

Para determinar qué diseño del WEC se adapta mejor a las condiciones de las olas en Bahía Solano (mes de enero), decidimos realizar modificaciones en el espesor

del dispositivo con el objetivo de variar su peso y analizar su comportamiento frente al movimiento de las olas en una toma de datos de 60 segundos. Como se muestra a continuación:

Figura 36. Potencia con WEC 2 Toneladas  $T_e:5,4s$  y  $H_s:0,9m$

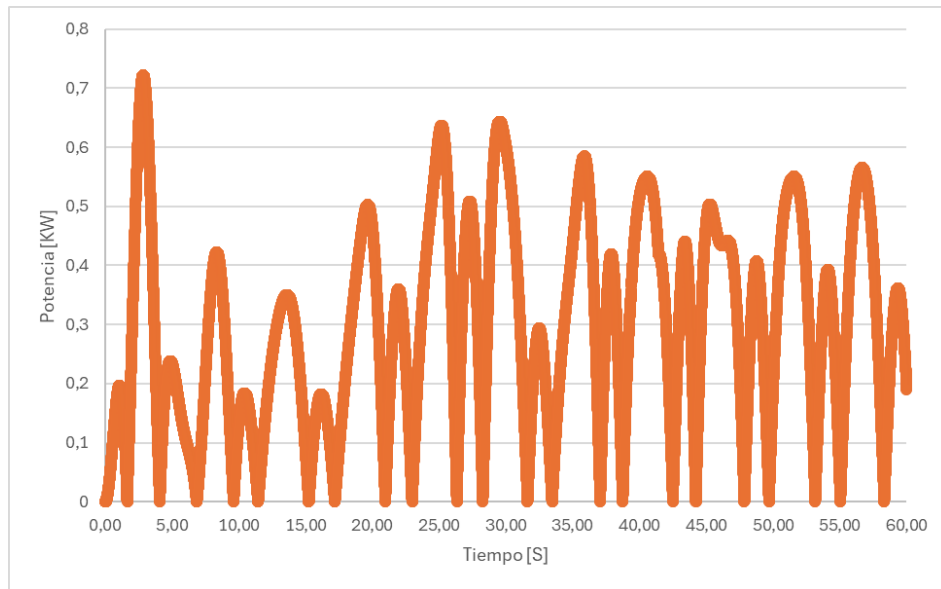
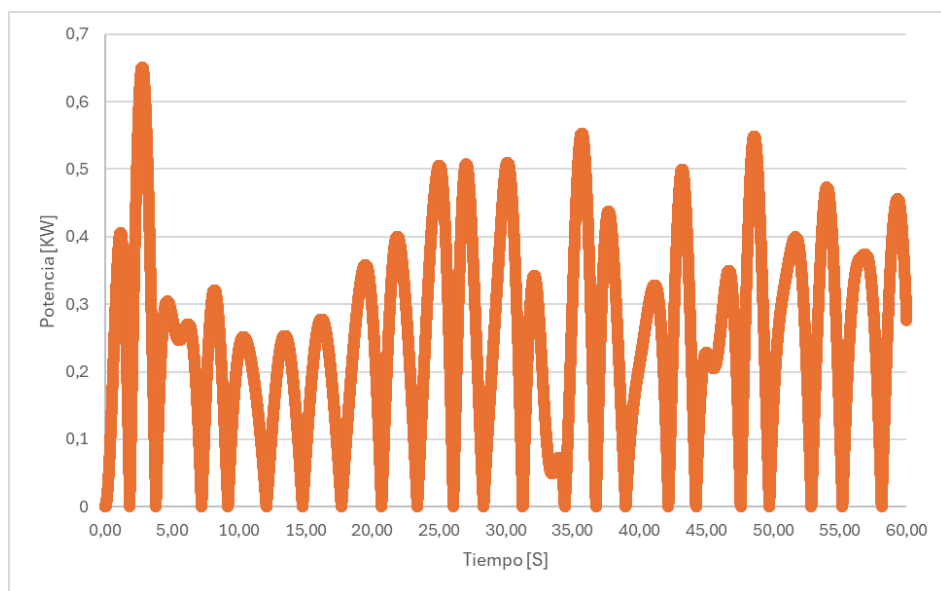


Figura 37. Potencia con WEC 1,8 Toneladas  $T_e:5,4s$  y  $H_s:0,9m$



Al analizar la gráfica y la tabla 8, se puede identificar que el peso de 1,8 toneladas

Tabla 9. KWh para los diferentes pesos del WEC

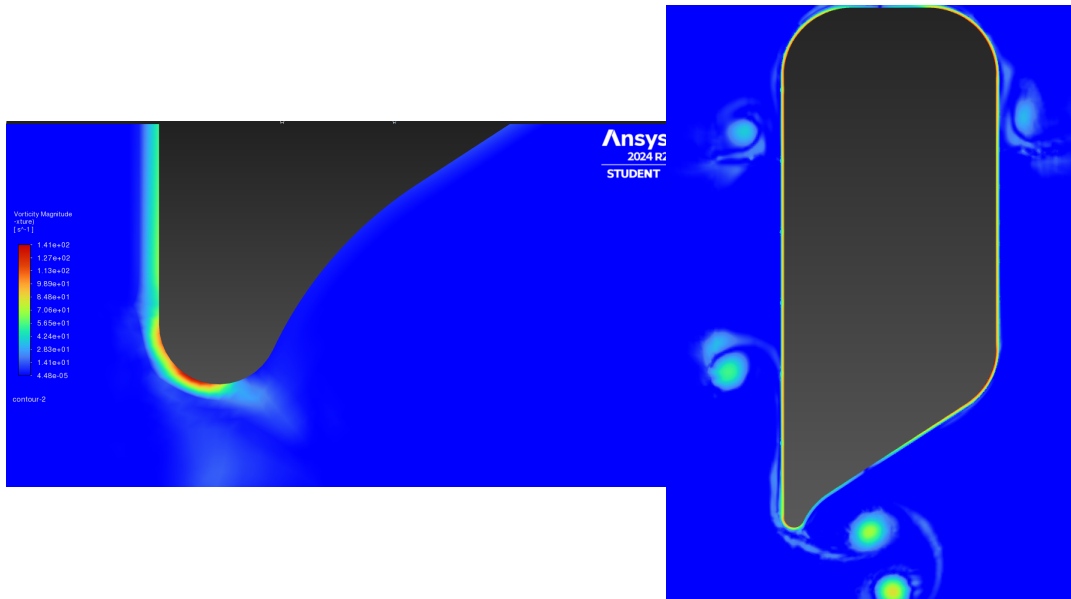
<b>Peso [T]</b>	<b>Energia [KWh]</b>
2,2	24,78 KWh
2	24,73 KWh
1,8	24,76 KWh

se adapta mejor al movimiento de las olas, ya que no genera picos de potencia tan abruptos, sino que mantiene una potencia más estable a lo largo del tiempo. A pesar de que el peso de 1,8 toneladas se ajusta mejor al comportamiento de las olas, logra obtener casi la misma potencia generada durante los 60 segundos de simulación que las demás configuraciones del dispositivo. Esto indica que, a pesar de modificar el peso, este factor no influye significativamente en el rendimiento del potencial undimotriz. En todas las configuraciones, se observa que al inicio de la simulación se obtienen los valores de potencia más elevados, lo cual se debe al impacto inicial de la ola. Sin embargo, esta potencia se atenúa y estabiliza conforme el dispositivo se mantiene en contacto con el agua a lo largo del tiempo.

## **7.2. ANÁLISIS DE VORTICIDAD**

Para realizar modificaciones en el diseño del dispositivo, es fundamental primero identificar las áreas donde se produce la separación de la capa límite, ya que esto genera la formación de vórtices y zonas de baja presión. El núcleo de estos vórtices representa una región de menor presión, y su distribución puede causar oscilaciones en el dispositivo, incrementando la fuerza de arrastre o drag cuando la intensidad del vórtice es alta. Esta fuerza puede resistir el movimiento del dispositivo, afectando negativamente su rendimiento. Y por ende se realiza un estudio en Ansys del comportamiento de dicho fenómeno como se observa a continuación:

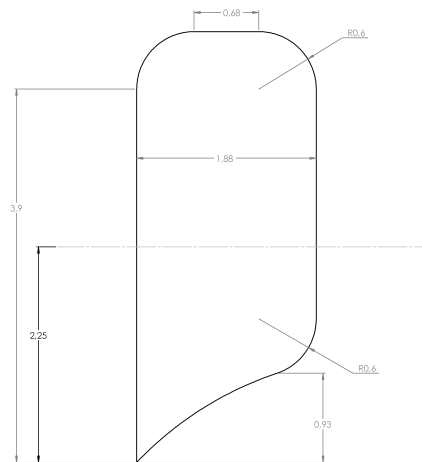
Figura 38. Vorticidad del WEC)



Las imágenes corresponden al momento en que el dispositivo WEC se encontraba en su punto más bajo, ya que es en esa posición donde se registraron los mayores niveles de vorticidad. Se concluye que este fenómeno podría estar limitando o frenando el desplazamiento del dispositivo cuando comienza a ascender hacia la superficie. Esto se debe a que en un flujo laminar, la vorticidad puede ser generada localmente en regiones donde hay cambios en la velocidad o la dirección del flujo o en la presencia de obstáculos, como es nuestro caso al interactuar el oleaje del mar con el dispositivo generando esos valores de vorticidad.

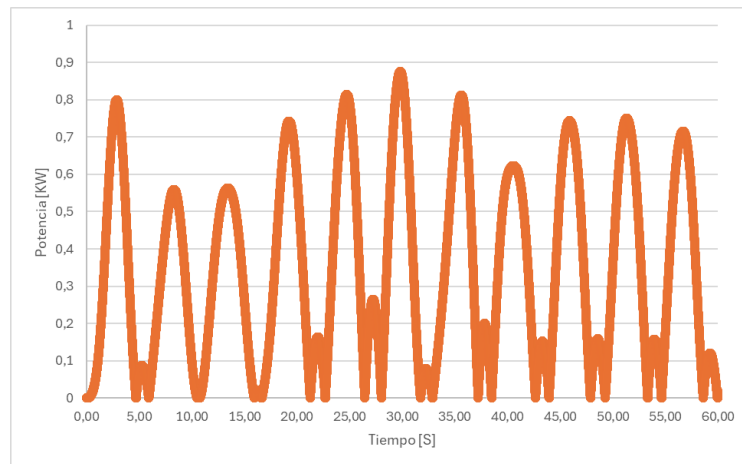
Como se puede observar, los puntos más críticos de vorticidad se concentran en el borde (Ver figura 23) inferior del WEC, lo que genera una mayor resistencia. Por esta razón, se ha decidido modificar dicho borde del dispositivo con el objetivo de mejorar su rendimiento.

Figura 39. Rediseño del dispositivo WEC en metros



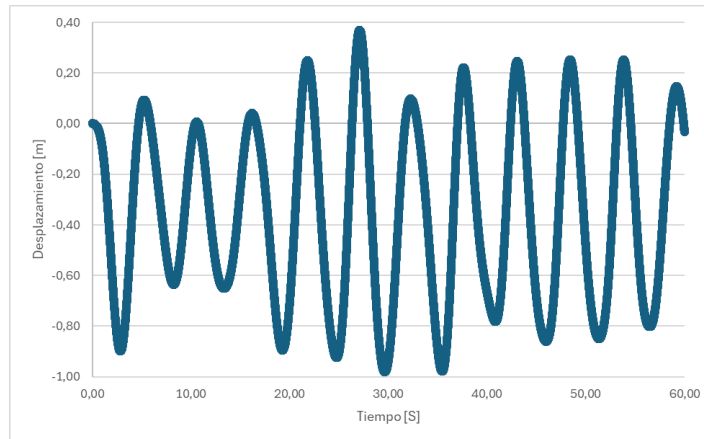
Los resultados de su Potencial Undimotriz obtenido para las condiciones de oleaje en el mes de enero se muestran a continuación:

Figura 40. Potencial del dispositivo WEC mejorado



Al calcular el promedio de los datos, se obtuvo una potencia promedio de 0,426 kW durante los 60 segundos de simulación. Esto indica que el cambio en la geometría del dispositivo, con el fin de reducir la generación de vorticidad, fue efectivo. Sin embargo, para lograr una mejora más significativa, sería necesario realizar un análisis más detallado de la vorticidad y localizar los puntos críticos donde se deban realizar ajustes geométricos.

Figura 41. Desplazamiento del dispositivo WEC mejorado



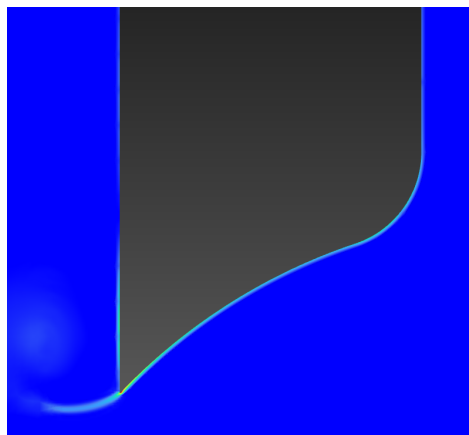
Logrando un  $Z_0$  significativo de 1,16 m.

$$\eta = \frac{3510N \cdot m}{6316N \cdot m} = 55 \% \quad (32)$$

Como se muestra en la ecuación 33, hubo un ligero aumento en la eficiencia del dispositivo. Aunque este incremento pueda parecer insignificante en el corto plazo, a lo largo de un año se hace evidente y notable dicha mejora en la eficiencia.

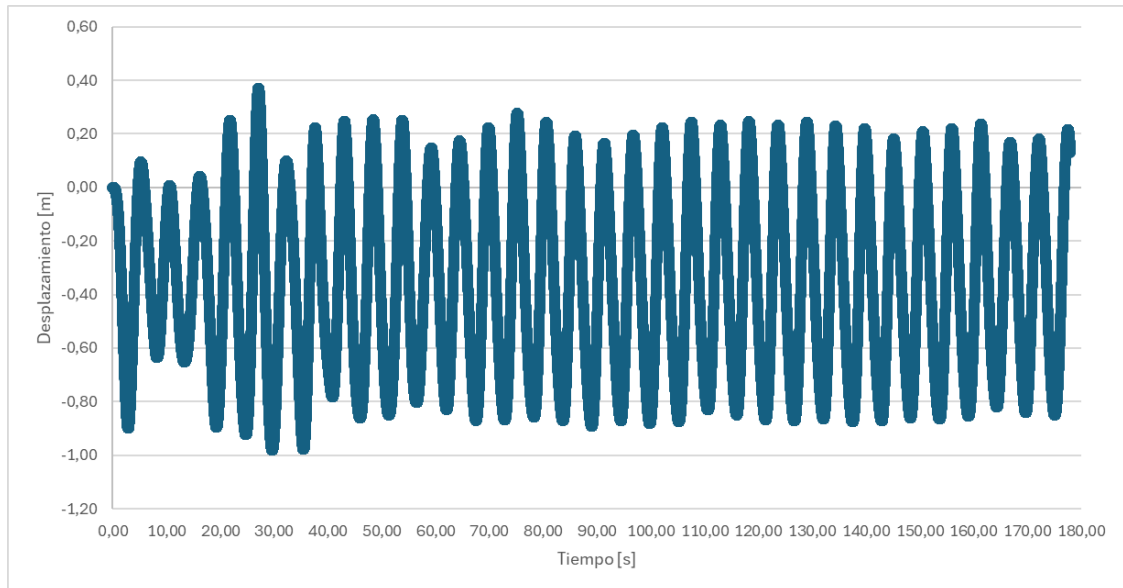
Como se muestra a continuación se puede apreciar como se mejoro la vorticidad en la parte inferior del WEC:

Figura 42. Vorticidad del WEC mejorado en el borde inferior



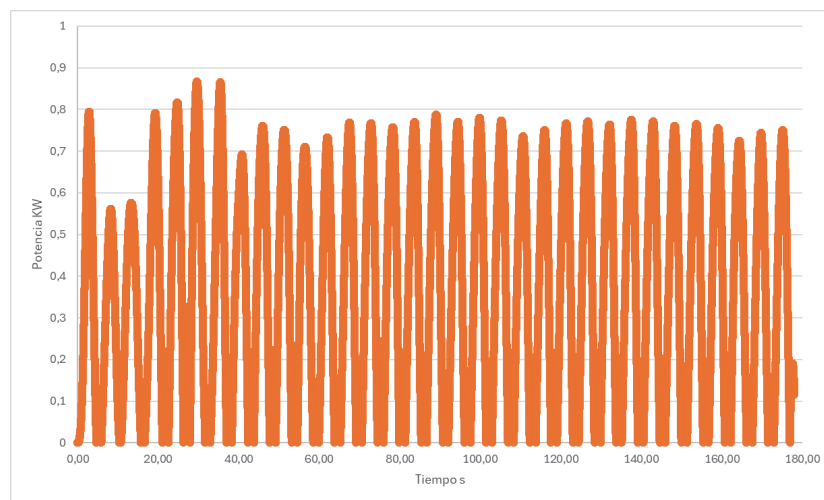
Se procedió a realizar una simulación más prolongada de tiempo con finalidad de saber en que momento se iba a estabilizar el oleaje con la nueva configuración del dispositivo WEC(Ver figura 27) la cual se pudo estabilizar en un rango de valores entre 0,25 y -0,85 m.

Figura 43. Desplazamiento del WEC mejorado con tiempo más prolongado



Ahora se procede a determinar el potencial con este tiempo más prolongado(ver figura 28).

Figura 44. Potencial del WEC mejorado con tiempo más prolongado



Como se puede apreciar en la imagen anterior se obtiene un potencial promedio de 0,7 Kw

### 7.3. COMPARACIÓN DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Si asumimos que el dispositivo opera 12 horas al día debido a fuertes tormentas o subidas del nivel del mar, y que trabaja todos los días del mes a la máxima potencia eléctrica registrada en enero, se obtendría una potencia total de:

$$\frac{0,7KW}{min} \cdot \frac{60min}{1hr} \cdot \frac{12hr}{1dia} \cdot \frac{30dias}{1mesenero} = 15120KW = 15,1MW$$

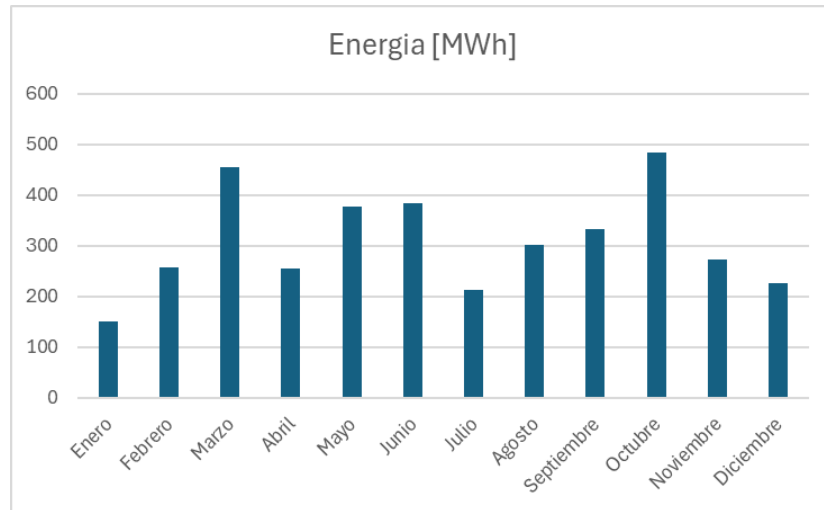
15,1 MW en el mes de enero en 1,5 metros por frente de ola.

Figura 45. Ubicación boya y longitud de utilización para el WEC



La imagen anterior muestra la ubicación exacta de la boya que recolectó datos sobre la altura significativa de las olas (Hs) y el período de éstas (Te), en un sitio con una longitud considerablemente extensa. Si consideráramos utilizar solo 20 metros de esa extensión para instalar 10 dispositivos WEC, podríamos obtener una producción teórica de 3706 MWh anuales como se muestra a continuación.

Figura 46. Energía en MWh por cada mes del 2015 para 10 WEC



como se muestra en la figura 30 Debido a que la altura significativa y el periodo fueron cambiando para los diferentes meses del año 2015 se obtuvieron diferentes valores de Energía.

Tabla 10. Producción y costos de diferentes fuentes de energía renovable en Colombia

Fuente de Energía	Producción Anual (MW)	Costo del kWh (COP)	Costo Anual (COP)
Energía Hidráulica	11.726 MW	\$150 - \$200	\$1.758.900.000
Energía Solar	290 MW	\$320 - \$480	\$92.800.000
Energía Eólica	19 MW	\$250 - \$400	\$4.750.000
WEC (10 Dispositivos)	3.706 MW	\$400 - \$600	\$1.482.400.000

Para poner estos datos en perspectiva, se observa en la Tabla 10 que, según SER Colombia (Asociación Energías Renovables) <sup>29</sup>, la capacidad instalada operativa de energía solar en Colombia en 2022 fue de 290 MW, mientras que la energía eólica alcanzó los 18,4 MW. Esto representa solo el 1,5 % y el 0,1 % de la capacidad eléctrica total del país, respectivamente. En comparación, la energía hidráulica, que es

<sup>29</sup> Javier Zuluaga. *Estimación de la capacidad instalada de energías renovables en Colombia. 2022.*

la fuente más significativa, aportó aproximadamente 11.726 MW <sup>30</sup>, constituyendo la mayor parte de la matriz energética nacional. Estos números reflejan una dependencia considerable de la energía hidráulica, lo que sugiere la necesidad de diversificación en el sector energético. Además, el potencial de energía renovable aún no explorado en Colombia es considerable; el país cuenta con una geografía favorable para la implementación de diversas fuentes renovables. En este contexto, la energía undimotriz se presenta como una opción prometedora, capaz de contribuir significativamente a la matriz energética, aprovechando el constante movimiento de las olas del océano. Esta fuente de energía emergente podría desempeñar un papel crucial en la diversificación y sostenibilidad de la matriz energética colombiana, ayudando a mitigar la dependencia de fuentes más establecidas y fortaleciendo la resiliencia del sistema energético frente a las fluctuaciones climáticas y estacionales.

En la Tabla 10, se muestra que el costo de producción de la energía undimotriz generada por 10 dispositivos WEC oscila entre 400 y 600 COP por kWh <sup>31</sup>. Este valor se ha tomado como referencia de España, dado que en Colombia aún no se ha establecido un costo específico para la producción de energía undimotriz. La comparación con otras fuentes de energía en el país sugiere que este rango de costos es competitivo en relación con la energía solar y eólica <sup>32</sup>.

En cuanto a los precios de venta, en 2024, el valor promedio del kWh en Colombia es de 986.16 COP <sup>33</sup> con este punto de referencia podríamos asumir que nuestro

---

<sup>30</sup> *Informe de generación de energía en Colombia. 2022.*

<sup>31</sup> "Costo de Producción de Energía Undimotriz en España". En: *Revista de Energía Renovable* 12.3 (2022), págs. 45-58.

<sup>32</sup> "Evaluación del Costo de Producción de Energía Solar y Eólica en Colombia". En: *Revista de Energía Renovable* 10.2 (2022), págs. 30-65.

<sup>33</sup> Grupo EPM. *Tarifas y precios de energía eléctrica. 2024.*

margen de ganancias se estaría situado entre 900 a 986 COP.

Tabla 11. Producción, costos e ingresos de diferentes fuentes de energía renovable en Colombia

<b>Fuente de Energía</b>	<b>Producción Anual</b>	<b>Ingreso [COP]</b>	<b>Ingreso neto [COP]</b>
Energía Hidráulica	11.726 MW	10,5 mil millones	9,74 mil millones
Energía Solar	290 MW	261.000.400	193.186.400
Energía Eólica	19 MW	17.137.040	13.987.040
WEC (10 Dispositivos)	3.706 MW	3.335.400.000	1.853.000.000

Como se muestra en la tabla 11 la energía undimotriz presenta una oportunidad que vale la pena explorar a largo plazo, ya que se manifiesta como una opción con un notable potencial de rentabilidad. Los ingresos anuales alcanzarían aproximadamente 1.222.400.000 COP. Con costos de producción que varían entre 400 y 600 COP por kWh <sup>31</sup>, el margen de ganancia anual oscila entre 1.222.400.000 y 1.853.000.000 COP. Estos números indican un retorno sobre la inversión sólido en un sector en crecimiento.

En el contexto de diversificación de la matriz energética de Colombia, es fundamental considerar la complementariedad entre fuentes como la solar, eólica y undimotriz. A medida que el país avanza hacia un futuro energético más sostenible, las inversiones en energía undimotriz podrían no solo contribuir a satisfacer la creciente demanda energética, sino también a alcanzar los objetivos de sostenibilidad. Por tanto, aunque la inversión inicial en energía undimotriz sea alta, su potencial es significativamente mayor en comparación con otras energías renovables, ya que no depende de temporadas de sol o de viento para proporcionar energía constante; las olas siempre estarán en movimiento, independientemente de la estación del año.

Este análisis destaca el potencial subutilizado de fuentes renovables emergentes como la energía undimotriz. Aunque la producción de **3706 MW** anuales del WEC

puede parecer modesta en comparación con las grandes capacidades de energía hidráulica, pero en temporadas de sequía donde la energía hidráulica decrece su implementación podría ser viable, especialmente en un país como Colombia, donde las costas tienen condiciones adecuadas para su desarrollo.

#### **7.4. ANÁLISIS DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN) Y LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

Para determinar la inversión inicial del proyecto undimotriz, se realizó un análisis de referencia basado en otras plantas undimotrices de escala similar. Se seleccionaron como referencia la Estación Wave Star Roshage y la Central Undimotriz de Mutriku, las cuales tienen características y dimensiones comparables a nuestro proyecto. De acuerdo con este análisis, se estimó que la inversión inicial requerida para nuestro proyecto es de aproximadamente 10,5 billones de COP.

En cuanto a la tasa de interés específica para nuestro proyecto, es importante considerar que las tasas de interés en Colombia varían según el plazo y el tipo de inversión, oscilando entre 8% y 12% para inversiones libres de riesgo. Sin embargo, nuestro proyecto presenta características que justifican una tasa de interés más alta:

- **Riesgo tecnológico:** La implementación de proyectos de alta tecnología, como la energía undimotriz, conlleva un alto riesgo de fracaso debido al desgaste constante por parte de las olas y subidas del mar.
- **Mercado emergente:** La energía undimotriz es una tecnología que se está empezando a implementar e innovar en mercados emergentes o en desarrollo, lo que aumenta la incertidumbre y el riesgo.
- **Costo de capital elevado:** Las plantas de energía undimotriz requieren un elevado costo de inversión debido a las condiciones geográficas donde se ubican, lo que aumenta el costo de financiamiento.

En consideración de estos factores, se justifica la selección de una tasa de interés más alta para nuestro proyecto del 15 % como se evidencia en la tabla 12.

Tabla 12. Calculo VAN y TIR

Año	Ingresos [COP]	Tasa de interés	VAN	TIR
0	-10.507.500.000	15 %	107.956.704	15,218 %
1	1.853.000.000			
2	1.853.000.000			
3	1.853.000.000			
⋮	⋮			
14	1.853.000.000			

Como se puede observar en la tabla 12, el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la tasa de interés, lo que indica que el proyecto es rentable a largo plazo y ofrece una tasa de retorno sobre la inversión atractiva.

Sin embargo, es importante considerar que estos cálculos se basan en suposiciones teóricas y no tienen en cuenta posibles imprevistos o reducciones en la eficiencia del sistema a medida que pasa el tiempo. En particular, después de 16 años, es posible que la eficiencia del sistema disminuya o que ocurran accidentes durante la instalación o el funcionamiento.

A pesar de estos riesgos, este estudio representa un primer paso importante hacia la implementación de esta tecnología en el futuro. A medida que se realicen más estudios y se desarrollen nuevas tecnologías, es probable que se puedan mejorar la eficiencia y la rentabilidad del sistema, lo que permitirá una producción de energía más sostenible y eficiente.

## 8. CONCLUSIONES

- El dispositivo alcanzó una potencia promedio de 0,7 kW, con un pico máximo de 0,8 kW durante las simulaciones. La amplitud de movimiento de la boya y la vorticidad generada desempeñaron un papel importante en el rendimiento del dispositivo, ya que son directamente proporcionales. Porque medida que se realizaban ajustes a estos parámetros, se lograban mejoras considerables en el desempeño del dispositivo
- La comparación entre los resultados numéricos obtenidos mediante CFD y los datos experimentales de Reabroy demostró una buena concordancia tanto en la dirección como en la magnitud del desplazamiento del WEC. A pesar de algunos desfases en los picos de la onda sinusoidal y diferencias en los períodos, el modelo CFD capturó efectivamente la dinámica del dispositivo bajo las condiciones de oleaje estudiadas.
- Se observó que la amplitud de movimiento de la boya oscilante es directamente proporcional al tamaño de las olas, pero el peso del dispositivo influye en la estabilidad del sistema. Un dispositivo con menor peso (2,2 toneladas) mejoró la estabilidad del WEC, evitando fluctuaciones extremas en la potencia generada, aunque no impactó significativamente la potencia promedio obtenida, indicando que el peso no influye significativamente en el rendimiento global del dispositivo. El peso de 2,2 toneladas mostró dificultades para adaptarse al movimiento de las olas, aunque mantuvo el mismo potencial promedio. Sin embargo, si se eligiera un dispositivo con un peso mayor, podría traer repercusiones, ya que con un mayor peso el dispositivo tendería a hundirse, debido a la dificultad para ascender, limitando así su efectividad.
- El análisis de vorticidad mostró que las concentraciones más altas se producen en el borde inferior del convertidor. Estas concentraciones limitan el desempe-

ño debido a la mayor resistencia hidrodinámica. Sin embargo, el rediseño del borde inferior redujo la vorticidad y mejoró la eficiencia del dispositivo, alcanzando una potencia promedio de 0,426 kW y una eficiencia del 55 %.

- Comparada con otras fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, la energía undimotriz en la costa del Pacífico colombiano representa un recurso significativo. Ya que con 10 dispositivos WEC, se estima una producción energética anual de 3706 MW, mientras que la energía solar y eólica alcanzaron valores de 290 MW y 18,4 MW respectivamente, teniendo en cuenta que Colombia cuenta con 17 parques fotovoltaicos y 2 parques eólicos. Esto resalta el potencial de los convertidores undimotrices para contribuir a la diversificación energética del país, especialmente en zonas como Bahía Solano, donde el oleaje es constante y predecible.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con el rediseño del WEC, enfocándose en la reducción de la vorticidad y otros factores que puedan limitar el rendimiento. Un análisis más detallado de las áreas críticas podría mejorar aún más la eficiencia del dispositivo.
- Se sugiere realizar estudios adicionales que incluyan el mecanismo completo del WEC para una simulación más realista y precisa. También sería beneficioso realizar pruebas en condiciones de oleaje más variadas para validar la robustez del diseño en diferentes escenarios.
- Dado el alto potencial de la energía undimotriz, se recomienda explorar su implementación a menor escala cerca a la costa y considerar su integración en la matriz energética nacional, complementando otras fuentes de energía renovable.
- Realizar una prueba de laboratorio a pequeña escala, simulando las condiciones de oleaje de Bahía Solano con el dispositivo WEC, con el fin de verificar los resultados obtenidos.
- Incluir diferentes modelos de diseño con el fin de encontrar el que mejor se adapte a las condiciones de oleaje.

## BIBLIOGRAFÍA

Boussinesq, Joseph. "Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal". En: *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* (1872) (vid. pág. 16).

Cataño, Y, JP Smith y J Naranjo. "Ondas Airy de gravedad y teoría de primer orden aplicadas a la atenuación de ondas estacionarias". En: *Avances en Recursos Hidráulicos* 08 (2001), págs. 17-26 (vid. pág. 13).

*Characteristics of Fluid Flow*. Publisher, 2023 (vid. pág. 36).

*Complex Flow Dynamics*. vid. pág. 34. Publisher, 2022 (vid. pág. 35).

"Costo de Producción de Energía Undimotriz en España". En: *Revista de Energía Renovable* 12.3 (2022), págs. 45-58 (vid. págs. 80, 81).

Cushman-Roisin, Benoit y Jean-Marie Beckers. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, 2011 (vid. pág. 16).

Davidson, F. J., J. Greening y D. J. Hargreaves. *Wave Energy: The Current Status and Future Directions*. Elsevier, 2006 (vid. pág. 25).

Dean, Robert G y Robert A Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, 1991 (vid. pág. 16).

DIMAR. *Boletín Meteomarino del Pacífico Colombiano 2015*. "<https://issuu.com/dimarcolombia/stacks/763fe9eac8124a61a12ec24db1fd43f4>". [Consultado 1 de mayo del 2023]. 2015 (vid. pág. 40).

EPM, Grupo. *Tarifas y precios de energía eléctrica*. 2024 (vid. pág. 80).

- “Evaluación del Costo de Producción de Energía Solar y Eólica en Colombia”. En: *Revista de Energía Renovable* 10.2 (2022), págs. 30-65 (vid. pág. 80).
- Fenton, John D. “A fifth-order Stokes theory for steady waves”. En: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 111.2 (1985), págs. 216-234 (vid. pág. 16).
- “Nonlinear wave theories”. En: *the Sea* 9.1 (1990), págs. 3-25 (vid. pág. 17).
- Figueredo Guerrón, Camilo Andrés y Fidel Esteban Quevedo Orjuela. “Evaluación de la energía undimotriz como una alternativa sustentable para alimentación de un sistema de levantamiento artificial en una plataforma semisumergible.” thesis. Fundación Universidad de América, 2022 (vid. pág. 10).
- Hernandez, Lorenzo Banos, Peter Frigaard y Poul Henning Kirkegaard. “Numerical modeling of a wave energy point absorber”. En: *Proceedings of the Twenty Second Nordic Seminar on Computational Mechanics*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. 2009, págs. 153-156 (vid. pág. 31).
- Idárraga, Aris y Harol Diaz. “Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del pacifico colombiano”. En: *Avances: Investigacion en Ingenieria* 15.1 (2018), págs. 286-301 (vid. págs. 11, 20, 42).
- Inc., ANSYS. *User Guide*. ANSYS, 2024 (vid. pág. 35).
- Informe de generación de energía en Colombia*. 2022 (vid. pág. 80).
- Lal, Anant y Muniyandy Elangovan. “CFD simulation and validation of flap type wave-maker”. En: *International Journal of Mathematical and Computational Sciences* 2.10 (2008), págs. 708-714 (vid. pág. 35).

- Li, Yu-Ling y Kuo-Lun Tung. "CFD simulation of fluid flow through spacer-filled membrane module: selecting suitable cell types for periodic boundary conditions". En: *Desalination* 233.1-3 (2008), págs. 351-358 (vid. pág. 36).
- Lissaman, P. B. S. *Ocean Wave Energy Conversion: A Comprehensive Review*. Springer, 2008 (vid. pág. 25).
- Marquis, L, Morten Kramer y Peter Frigaard. "First power production figures from the wave star roshage wave energy converter". En: *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE-2010), Bilbao, Spain*. Vol. 68. 2010, págs. 1-5 (vid. pág. 28).
- McClay, D., D. Ingram y J. Smith. "A review of wave energy technologies". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015), págs. 8-21 (vid. pág. 25).
- McCormick, Michael E y R Cengiz Ertekin. "Renewable sea power". En: *Mechanical engineering* 131.05 (2009), págs. 36-39 (vid. pág. 40).
- Obrist, Dominik y Hendrik von Tengg-Kobligk. *Computational fluid dynamics (CFD) for predicting pathological changes in the aorta: is it ready for clinical use? 2022* (vid. pág. 36).
- Pelissero, Mario et al. "Aprovechamiento de la energía undimotriz". En: (2018) (vid. pág. 11).
- Reabroy, Ratthakrit et al. "Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater". En: *Energy Conversion and Management* 195 (2019), págs. 1174-1186 (vid. págs. 43, 62, 64).
- Sabatier, François. "US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100. US Army Corps of Engineers, Washington, DC (6

volumes).” En: *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography* 108 (2007), pág. 146 (vid. págs. 14, 16).

Stewart, Robert H. *Introduction to physical oceanography*. 2008 (vid. pág. 32).

Stokes, George Gabriel. “On the theory of oscillatory waves”. En: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 8 (1847), págs. 441-455 (vid. pág. 16).

(US), Coastal Engineering Research Center. *Shore protection manual*. Vol. 1. US Army Coastal Engineering Research Center, 1973 (vid. pág. 17).

Zhang, Hengming et al. “Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter”. En: *Applied energy* 257 (2020), págs. 1-19 (vid. pág. 35).

Zuluaga, Javier. *Estimación de la capacidad instalada de energías renovables en Colombia*. 2022 (vid. pág. 79).