

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**

Estudio de factibilidad para la implementación de un convertidor de energía de olas (WEC) tipo punto absorbedor en la isla Isabela de las Galápagos

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Paul Steven Zambrano Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## DEDICATORIA

Le dedico este proyecto principalmente a mi madre, Elizabeth Zambrano, quién ha sido un gran apoyo a lo largo de toda mi vida, a pesar de su grave enfermedad, siempre ha estado junto a mí en todo mi desempeño como estudiante. A mi padre, Ramón Zambrano, que con su sabiduría y apoyo me instruyó durante mi niñez. Gracias a mis hermanos, Emily y Joao, por haberme soportado a lo largo de estos años, y junto a nuestros perritos, Mia, Milo, Fiona, Nina y Sasha han llenado de felicidad mi vida y nuestro hogar.

Gracias a una persona especial que considero que me ayudó en una etapa muy difícil de mi vida, a superar tantos obstáculos en tan poco tiempo, gracias por estar ahí siempre conmigo, Allison.

Finalmente, agradezco a mis amigos casi hermanos, quiénes han estado para mí en las buenas y en las malas, hasta el final, Joel, Félix, Juanjo, y David, y han sido parte de este camino hacia la vida profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y a mis padres, que, si no fuese por ellos y todo su apoyo en los momentos de tristeza y desesperación, y por haberme apoyado durante toda mi vida para poder alcanzar mis objetivos y llevar a este momento.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor Rubén Paredes, PhD, a quién le dedico todo el crédito de haber aprendido y culminado mi proyecto de tesis en este campo. Por su paciencia, guía y consejos. También agradezco a David Plaza, MSc, que a pesar de conocerlo muy poco me brindó sus conocimientos y experiencias para la finalización de la metodología de mi tesis.

Finalmente, agradezco a mis amigos Miguel, Kelly y Jonathan, con quiénes pasamos amanecidos estudiando durante los semestres más duros de la carrera, y nos hemos apoyado durante la mayoría de este proceso.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; **Paul Steven Zambrano Zambrano** y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Paul Zambrano

## **EVALUADORES**

---

David A. Plaza, MSc  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

Rubén J. Paredes, PhD  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Para reducir la dependencia del uso de combustibles fósiles, se están desarrollando convertidores de energía de olas (WEC) que permitirían capturar y almacenar la energía undimotriz. Estos dispositivos, en términos de diseño y costo, tienen ventajas sobre la energía solar y eólica, dado que requieren de menor espacio físico al operar en un fluido con mayor densidad energética. Sin embargo, el diseño de un dispositivo WEC para las costas ecuatorianas debe incluir las condiciones de mar dónde será implementado. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es el evaluar el desempeño de un convertidor de energía undimotriz para las condiciones del mar de las Islas Galápagos, con énfasis en la Isla Isabela debido a su alto potencial energético, utilizando la información provista por el centro europeo CMEMS e información recolectada por el INOCAR. Para aproximar de forma numérica la respuesta de un WEC esférico tipo point-absorber operando en Galápagos se utilizó el software de uso libre OpenFOAM.

Inicialmente se determinaron la frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento de una esfera de 1 metro de diámetro mediante un experimento numérico de decremento logarítmico. Después, se realizaron simulaciones incluyendo olas incidentes de 1 m de altura con distintos períodos, y se estudió la dependencia de la respuesta vertical y las fuerzas actuantes sobre el dispositivo con respecto al periodo de la ola. Los resultados numéricos son aceptables, con diferencias entre 3% y 20% en comparación predicciones analíticas disponibles en la literatura. Las predicciones de fuerza total sobre el dispositivo son usadas para definir una matriz de potencia, estimando que este dispositivo puede generar 89.3 MWh por año. Considerando el consumo energético anual de 7.2 GWh reportado en el 2018 de esta isla, se necesitarían 20 de estos dispositivos para cubrir con el 25% de su demanda energética.

**Palabras Clave:** Convertidor de energía undimotriz, WEC, CFD, matriz de potencia, RAO.

## **ABSTRACT**

*To reduce the energy consumption from fossil fuels, wave energy converters (WEC) are being developed to provide and storage wave energy. These devices in terms of design and cost, have advantages over solar and wind energy since they require less physical space when operating in a fluid with higher energy density. However, the WEC's design must include the sea conditions where it will be deployed, that is, taking in consideration the waves in Ecuador, WECs are an alternative for energy extraction. Therefore, the objective of this project is to evaluate the performance of a WEC for the sea conditions in Galapagos Island, with emphasis on Isabela Island, using the information obtained from the European CMEMS center, also, information collected by INOCAR. To numerically approximate the response of a point-absorber type spherical WEC operating in Galapagos, the open source CFD software OpenFOAM.*

*Initially, the natural frequency and damping coefficient of a sphere were determines by means of a numerical experiment of logarithmic decrement. Then, simulations including waves of 1 m of height with different periods were carried out, and the dependence of the vertical response and the forces acting on the device with respect to the period of the wave was studied. Numerical results are acceptable, with differences between 3% and 20% compared to the analytical predictions available in the literature. Total force predictions on the device are used to define a power matrix, estimating that the device can generate 89.3 MWh per year. Considering the annual energy consumption of 7.2GWh reported in 2018 on this island, 20 of these devices would be needed to contribute with 25% of its energy demand.*

**Keywords:** *Wave energy converter, numerical simulation, power matrix, RAO.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABIAS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	12
1. Introducción.....	12
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Justificación del problema .....	15
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
1.4 Marco teórico.....	16
1.4.1 Olas sinusoidales.....	16
1.4.2 Energía undimotriz.....	19
1.4.3 Sistema de Conversión de Energía tipo WEC.....	22
1.4.4 Cuantificación del Rendimiento .....	24
1.4.5 Respuesta de Sistemas Flotantes (RAO).....	26
1.5 Características de oleaje en las Islas Galápagos .....	27
1.6 Selección de localidades adecuadas .....	29
1.6.1 Rutas de navegación .....	29
1.6.2 Zonas excluidas por profundidad del mar.....	30
1.6.3 Zonas excluidas por factores geotécnicos.....	30



1.6.4	Zonas excluidas por hábitat animal .....	31
1.7	Zonas factibles .....	32
CAPÍTULO 2 .....		34
2.	Metodología.....	34
2.1	Descripción del software OpenFOAM .....	34
2.1.1	Ecuaciones Gobernantes .....	35
2.1.2	RANS .....	35
2.1.3	Fuerzas excitantes.....	36
2.1.4	Modelamiento de oleaje.....	37
2.2	Pre-procesamiento .....	38
2.2.1	Esquemas numéricos .....	39
2.2.2	Condiciones de frontera.....	40
2.2.3	Técnica de mallado Deforming .....	41
2.2.4	Generación de la ola.....	42
2.3	Decaimiento logarítmico de una esfera - Datos experimentales.....	44
2.4	Configuración de la simulación .....	47
2.4.1	Modificación del tutorial "FloatingBody" .....	48
2.4.2	Configuración de la simulación en OpenFOAM.....	50
CAPÍTULO 3 .....		53
3.	Resultados y Análisis.....	53
.....		53
3.1	Análisis del decremento logarítmico.....	53
3.1.1	Generación del mallado .....	53
3.1.2	Comparación de resultados .....	54
3.2	Análisis del modelo en olas regulares.....	59
3.2.1	Período de 2 segundos.....	59

3.2.2	Período de 4 segundos.....	63
3.2.3	Período de 6 segundos.....	67
3.2.4	Período de 8 segundos.....	71
3.2.5	Resumen de resultados y comparación .....	74
3.3	Potencia absorbida.....	77
3.4	Análisis económico.....	79
3.4.1	Fase preliminar .....	79
3.4.2	Fase de construcción e instalación.....	80
3.4.3	Mantenimiento menor .....	81
3.4.4	Mantenimiento mayor (cada 5 años) .....	82
3.4.5	Inversión inicial .....	82
3.4.6	Punto de equilibrio .....	82
CAPÍTULO 4 .....		84
4. Conclusiones Y Recomendaciones.....		84
.....		84
4.1	Conclusiones.....	84
4.2	Recomendaciones.....	85
BIBLIOGRAFÍA .....		87
APÉNDICES .....		92
4.3	Generación de Geometría y Mallado en Paraview 5.10.1.....	93
4.4	Cálculos teóricos de heave de una esfera .....	95
4.5	fvSolution.....	98
4.6	fvSchemes.....	99
4.7	Tabla de amortización .....	100
4.8	Código de la matriz de potencia.....	104

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CFD	Computational fluid dynamics
MERNNR	Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables
INP	Instituto Nacional de Preinversión
WEC	Wave Energy Converter
ROM	Recomendaciones de Obras Marítimas
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service

## SIMBOLOGÍA

T	Período de ola
H	Altura de ola
Hs	Altura significativa
$\lambda$	Longitud de ola
a	Amplitud de ola
w	Frecuencia de la ola
w*	Parámetro adimensional de frecuencia de ola
P	Potencia
CW	Capture Width
F	Flujo de energía
RAO	Response Amplitude Operator
WEC	Wave Energy Converter
TRL	Technology Readiness Level
OWC	Oscillant Water Column
OWSC	Oscillating Water Surge Converter

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Características de la ola [26] .....	17
Figura 1.2 Registro de una posible forma de onda [26].....	18
Figura 1.3 Profundidad relativa y asíntotas de funciones hiperbólicas [26].....	19
Figura 1.4 Distribución global de la altura significativa de la ola (1997-2006) [29] .....	20
Figura 1.5 Plantas de energía undimotriz. Marcadores morados: sede de desarrolladores; marcadores rojos: sitios de implementación, de prueba y demostración bajo desarrollo [30].....	21
Figura 1.6 TRL de la tecnología de energía oceánica [30].....	22
Figura 1.7 Categorías de tecnologías WEC clasificadas por principios de funcionamiento [31].....	23
Figura 1.8 Categorías de tecnologías WEC clasificadas por su orientación y tamaño, y subcategorías con respecto al principio del funcionamiento [31].....	24
Figura 1.9 Esquema descriptivo del flujo F de energía de la ola [31].....	25
Figura 1.10 Localización de la toma de datos (-0.9941, -90.0996) (Fuente: Google: MyMaps) .....	28
Figura 1.11 Relación altura significativa vs periodo, CMEMS 2015-2019.....	28
Figura 1.12 Zonas excluidas debido a las rutas de navegación [17].....	29
Figura 1.13 Zonas excluidas debido a la profundidad [17] .....	30
Figura 1.14 Zonas excluidas debido a la roca basáltica negra [17].....	31
Figura 1.15 Zona de distribución del hábitat animal [39] .....	32
Figura 1.16 Posibles localizaciones en base a todos los requerimientos [17]....	33
Figura 2.1 Fuerza de la presión total [41] .....	37
Figura 2.2 Dominio de olas recomendado en la dirección x, y [44] .....	38
Figura 2.3 Estructura de directorios.....	39
Figura 2.4 Directorio U (velocidad) para las condiciones de frontera.....	43
Figura 2.5 Directorio alpha.water para las condiciones de frontera.....	44
Figura 2.6 Modelo esférico utilizado para el experimento de decremento logarítmico .....	45

Figura 2.7 Desplazamiento del experimento de la esfera a lo largo del tiempo [47]	46
Figura 2.8 Tutorial FloatingBody [49]	48
Figura 2.9 Directorio dynamicMeshDict del tutorial “floatingBody”	49
Figura 2.10 Directorio snappyHexMesh de la simulación	49
Figura 2.11 Zona refinada alrededor del modelo esférico de 1 m de diámetro	51
Figura 2.12 Fronteras establecidas	52
Figura 3.1 Técnica de mallado <i>Deforming</i>	54
Figura 3.2 Directorio dynamicMesh	54
Figura 3.3 Simulación del decremento logarítmico para una esfera de 0.15 m.	55
Figura 3.4 Comparación entre la gráfica analítica con la experimental	56
Figura 3.5 Fuerza ejercida por la presión durante un período (Vista frontal y vista del fondo) – $t=0$ , $t=T/4$ , $t=T/2$	57
Figura 3.6 Fuerza ejercida por la presión durante un período de ola (Vista frontal y vista del fondo) – $t=3T/4$ , $t=T$	58
Figura 3.7 Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=2s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=6m$ ) – $t=0$ , $t=T/4$ , $t=T/2$ , $t=3T/4$ , $t=T$	60
Figura 3.8 Desplazamiento vertical ( $T=2s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=6m$ )	61
Figura 3.9 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 2s	62
Figura 3.10 Velocidad en la dirección Z ( $T=2s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=6m$ )	63
Figura 3.11 Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=4s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=25m$ ) – $t=0$ , $t=T/4$ , $t=T/2$ , $t=3T/4$ , $t=T$	64
Figura 3.12 Desplazamiento vertical ( $T=4s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=25m$ )	65
Figura 3.13 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 4s	66
Figura 3.14 Velocidad en la dirección Z ( $T=4s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=25m$ )	66
Figura 3.15 Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=6s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=56m$ ) – $t=0$ , $t=T/4$ , $t=T/2$ , $t=3T/4$ , $t=T$	68
Figura 3.16 Desplazamiento vertical ( $T=6s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=56m$ )	69
Figura 3.17 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 6s	70
Figura 3.18 Velocidad en la dirección Z ( $T=6s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=56m$ )	70
Figura 3.19 Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=8s$ , $H_s=1m$ , $\lambda=100m$ ) – $t=0$ , $t=T/4$ , $t=T/2$ , $t=3T/4$ , $t=T$	72

Figura 3.20 Desplazamiento vertical ( $T=8s$ , $H_s=1m$ , $\lambda= 100m$ ).....	73
Figura 3.21 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 8s .....	73
Figura 3.22 Velocidad en la dirección Z ( $T=8s$ , $H_s=1m$ , $\lambda= 100m$ ).....	74
Figura 3.23 Comparación del RAO.....	76
Figura 3.24 Matriz de potencia (Fuente: Matplotlib).....	77
Figura 3.25 Base de datos del estado de mar en las Galápagos en forma matricial .....	78
Figura 3.26 Producto entre la potencia absorbida y la ocurrencia.....	78
Figura 3.27 Flujo acumulativo para la recuperación de la inversión inicial.....	83
Figura 4.1 Geometría utilizada para la simulación de decremento logarítmico ..	93
Figura 4.2 Mallado y dominio utilizado para la simulación del decremento logarítmico .....	93
Figura 4.3 Geometría y dominio de la simulación con olas entrantes .....	94
Figura 4.4 Mallado de la simulación con olas entrantes .....	94
Figura 4.5 Matriz dinámica.....	96
Figura 4.6 fvSolution .....	98
Figura 4.7 fvSchemes .....	99
Figura 4.8 Código en Python de la Matriz de potencia .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tamaño de celda recomendado para las diferentes regiones del dominio de la ola [44] .....	38
Tabla 2.2 Propiedades físicas experimentales .....	45
Tabla 2.3 Condiciones de frontera para la simulación de decremento logarítmico .....	50
Tabla 2.4 Condiciones de frontera para la simulación de olas regulares .....	51
Tabla 2.5 Parámetros de la ola para la simulación de la esfera de 1 m de diámetro .....	52
Tabla 3.1 Resultados de la prueba de decremento logarítmico .....	55
Tabla 3.2 Comparación de resultados del experimento de decremento logarítmico .....	56
Tabla 3.3 Comparación de la respuesta vertical.....	75
Tabla 3.4 Comparación de la fuerza vertical .....	75
Tabla 3.5 Presupuesto de estudios preliminares, año cero.....	80
Tabla 3.6 Presupuesto de Fabricación y Suministros, año cero.....	81
Tabla 3.7 Presupuesto de construcción e instalación en mar .....	81
Tabla 3.8 Mantenimiento menor, año uno .....	81
Tabla 3.9 Mantenimiento mayor, año cinco .....	82
Tabla 3.10 Inversión inicial .....	82
Tabla 3.11 Resumen de gastos e ingresos .....	82
Tabla 4.1 Integración numérica de la masa virtual (T:2s, Hs:1m) .....	95
Tabla 4.2 Integración numérica del coeficiente de amortiguamiento (T:2s, Hs:1m) .....	96
Tabla 4.3 Integración numérica de la fuerza restauradora (T:2s, Hs:1m) .....	96
Tabla 4.4 Tabla de amortización.....	100



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se desarrolla un esfuerzo global para aprovechar la energía proveniente de fuentes renovables alternativas para la reducción del uso de combustibles fósiles. En el 2019 a nivel mundial se reporta que estas energías limpias: solar, eólica, hidráulica, producen el 10% de la energía total consumida [1]. Para diversificar la matriz energética en Ecuador, se está explorando la factibilidad de capturar la energía geotérmica [2], y la contenida en el océano (undimotriz) [3]. Entre ambas, la energía undimotriz predomina en popularidad debido a que sus instalaciones no ocupan grandes espacios y su alta producción energética [4]. Los dispositivos usados para capturar y convertir energía undimotriz se los conoce como WEC (por sus siglas en inglés Wave Energy Converter), que son diseñados considerando las condiciones de mar en las que va a operar. A pesar de que actualmente solo existen soluciones en etapa precomercial, estas han sido desarrolladas para las costas de Portugal, Reino Unido, Irlanda, España, China, Nueva Zelanda, donde se producen tormentas con condiciones extremas hasta 100 veces mayores que la promedio [5]. Por esta razón, los costos de construcción de los dispositivos WEC aumentan significativamente porque deben soportar las condiciones marinas extremas, en dónde va a ser instalado, para obtener una mayor eficiencia de conversión de energía en las condiciones de mar dominantes.

La eficiencia de captura de energía del dispositivo WEC depende de su mecanismo de conversión. Estos dispositivos, basados en su tamaño y orientación con respecto al frente de ola incidente, pueden ser clasificados en tres tipos: columna de agua oscilante, atenuantes, y absorbedores puntuales. Sobre el primer tipo, el primer dispositivo WEC que utilizó el mecanismo de columna de agua OWC (por sus siglas en inglés Oscillating Water Column), fue diseñado por Masuda [6] e implementado en Japón a inicios de los años 90. Este dispositivo de 500kW operaba dentro de una barcaza con 80 m de eslora que contenía 13 cámaras de OWC. Posteriormente se desarrolló el sistema MUTRIKU de 269 kW, alcanzando una eficiencia del 29% [7] con un área de 14 m<sup>2</sup>. Este sistema fue implementado en España en el 2011 por Torre-Enciso et al. [8], utilizando turbinas *Wells* impulsadas por aire presurizado por

las olas dentro de una cámara. Sobre el segundo tipo, el sistema Pelamis de 150 kW, con una eficiencia del 14% [9] y, una longitud de 120 m fue instalado en Portugal en el 2004 por Kermode et al.[10]. Este sistema utiliza el mecanismo atenuante, el cual utiliza boyas conectadas en cadena que transforman la energía a través de turbinas hidráulicas. Posteriormente Mortimer et al. [11] implementaron en Orkney, UK una segunda generación, el Pelamis P2, de mayores dimensiones y peso, entregando 750 kW. Sobre el tercer tipo, el sistema PowerBuoy de 150 kW, con una eficiencia del 42% [12], y 2.65 m de diámetro, fue implementado en Escocia y Santander por Taylor et al.[13]. Este sistema utiliza el mecanismo de puntos absorbedores, que consta de un extremo fondeado al lecho marino, y una boya que flota libremente en la superficie del mar. En base a este modelo, Pelissero et al. [14], desarrollaron un dispositivo electromecánico UTN (Universidad técnica Nacional) para las costas argentinas capaz de alcanzar una potencia de 100 kW por metro de ola. Por lo tanto, un diseño viable de un dispositivo WEC debe considerar las dimensiones óptimas para maximizar su eficiencia y operar en resonancia, además, utilizar un mecanismo que se adecue a las condiciones de mar en las que va a ser implementado.

Sobre el uso de energías renovables en Ecuador, se reporta que en el 2019 contribuyen con un 17% de toda la energía total consumida anualmente [15]. Específicamente en las Galápagos, el aprovechamiento de energía solar y eólica ha sido introducido gradualmente en la Isla Isabela hasta generar 800 MWh en el 2016 [16]. Esta energía representó el 16% de la demanda energética anual de 2,200 habitantes, y 56,000 turistas [17]. No obstante, estas tecnologías ocasionan un gran impacto ambiental para la flora y fauna de la isla debido a que requieren la construcción de gigantescas estructuras. Como alternativa para reducir el espacio intervenido, la energía undimotriz podría ser explorada considerando que es 5 veces más concentrada que la energía eólica y 30 veces más concentrada que la energía solar [18]. Dicho esto, para el diseño de un WEC, es fundamental incluir la selección del mecanismo de captura apropiado para las condiciones locales con menor perturbación al medio ambiente.

Estudios previos han analizado diferentes alternativas para capturar energía undimotriz en Ecuador. Por ejemplo, Viteri et al. [19] propusieron la instalación de 15 boyas de energía de 11 m de diámetro (Powerbuoy), con una potencia pico de 866 kW cada una, en la región costera de la provincia de Santa Elena, para abastecer hasta un 10% de la demanda energética anual de la provincia. Por otra parte, Lenin et al. [20] realizaron un estudio de factibilidad de generación de energía utilizando el sistema compuesto por 20 convertidores UTN de 3 m de diámetro y de 18.37 kW cada uno, para abastecer las necesidades de la isla Jambelí, analizando a detalle la alta capacidad que tiene la isla para la construcción de un parque undimotriz. Por último, Ribadeneira et al. [21] analizaron la factibilidad de utilizar un sistema de tanques ATR (por sus siglas en inglés Anti-roll) adaptados a embarcaciones cargueras que operan en el Atlántico Norte, que sirvió como base de un proyecto de investigación en ejecución para analizar la excitación producida por las olas a diferentes niveles de energía. En resumen, estas propuestas están en etapa de desarrollo tecnológico, es decir alcanzaron un nivel TRL 2 (por sus siglas en inglés, Technology Readiness Levels) [22], por lo que requerirían de altos costos iniciales para su implementación.

Todos los estudios mencionados demostraron la factibilidad dentro de la zona costera ecuatoriana. Con todo, la zona sur de la Isla Isabela en las Galápagos es la localidad con mayor densidad energética de oleaje del Ecuador, aumentando la viabilidad de la implementación de un sistema WEC [3]. Esto es debido a que el oleaje primario proveniente del suroeste de la isla, y el secundario del hemisferio norte, producen un potencial energético de 14 kW/m, con una variabilidad estacional mínima, lo que incrementaría la eficiencia del sistema [3].

### **1.1 Descripción del problema**

Actualmente, el desarrollo de soluciones basadas en energías renovables, como la solar y eólica, tienen presencia en la región insular debido a que la isla consta de un excelente nivel de irradiación solar y potencial eólico [16]. No obstante, en el 2018 se invirtieron USD 62 millones en estas fuentes limpias, aportando con 8.800 MWh de la producción total de electricidad, ocasionando que el otro 55.050 MWh

sea generado por motores de combustión interna [23]. Por otra parte, para construir una planta fotovoltaica de 3MW en la isla Santa Cruz, se intervinieron 29,000 metros cuadrados de terreno. De igual manera, en las islas San Cristóbal y Baltra existen 2 parques eólicos con una capacidad instalada de 4.65 MW, con aerogeneradores de casi 80 metros de altura [24]. Es decir, ambas tecnologías necesitan de un extenso terreno para su implementación, afectando los hábitats de la flora y fauna de la región. Para alcanzar la meta de suficiencia energética propuesta por el gobierno nacional [25], es importante desarrollar diferentes alternativas de fuentes de energía renovable. Una de ellas es la energía undimotriz, la cual aún no ha sido considerada tecnológicamente en el país. Las condiciones climáticas y poca variabilidad estacional de las Islas Galápagos hacen de la energía undimotriz una solución prometedora que requeriría intervenir menores extensiones de terreno que las energías limpias ya mencionadas.

## **1.2 Justificación del problema**

Este proyecto permitirá establecer una metodología mediante el uso del software OpenFOAM, para evaluar el desempeño de un dispositivo WEC que maximice el aprovechamiento de la energía disponible en el océano. Los resultados numéricos son validados usando datos experimentales. Con la finalidad de incrementar el desempeño funcional de convertidores undimotrices, mejorar la eficiencia de extracción de energía eléctrica y ampliar a un mayor número de usuarios. Es decir, podría beneficiar al Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, Ministerio del Ambiente en desarrollar un prototipo WEC que llegue a la etapa pre comercial.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la factibilidad de la implementación de un dispositivo WEC, para la reducción de la dependencia de combustibles fósiles de la región Insular combinando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

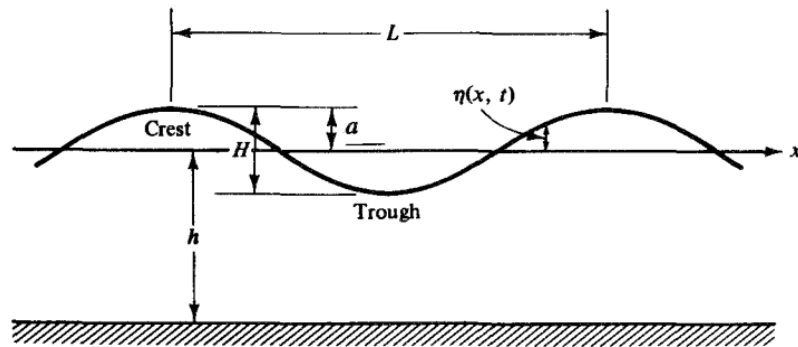
1. Determinar las características de oleaje y flujo de las corrientes marinas alrededor de la zona costera en la isla Isabela, procesando mediciones de olígrafo y datos satelitales.
2. Estimar la respuesta de un modelo absorbedor esférico bajo las condiciones de mar en la isla Isabela, utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluido computacional.
3. Estimar los diferentes riesgos ambientales que inciden en la implementación del dispositivo marino en la isla Isabela.
4. Determinar la viabilidad económica del prototipo considerando sus costos de construcción y operación en la isla Isabela.

## **1.4 Marco teórico**

Para entender las bases teóricas del presente proyecto, se utilizarán las definiciones de los términos y las ecuaciones utilizadas. Dado que el proyecto se implementa en las Islas Galápagos, se definirán los fundamentos teóricos acerca del diseño del modelo WEC considerando las condiciones del mar abierto.

### **1.4.1 Olas sinusoidales**

Los parámetros principales que describen a una ola senoidal son su longitud, altura, y la profundidad en dónde se propaga. Los demás parámetros, tales como la velocidad y aceleraciones, pueden ser determinadas teóricamente a partir de los parámetros principales. En la Figura 1.1, se muestra un esquema en 2 dimensiones de una ola propagándose en dirección  $x$ .



**Figura 1.1 Características de la ola [26]**

Donde se identifican los siguientes parámetros:

- L: longitud de onda [m]
- a: amplitud de onda [m]
- H: altura de la ola [m]
- h: profundidad de agua [m]
- $\eta$ : elevación de la superficie del agua [m]

Si un dispositivo mide la elevación de la superficie del agua,  $\eta$ , en función del tiempo, podría obtener un registro tal y como se muestra en Figura 1.2. En donde se interpreta al mar como una superposición de un gran número de sinusoides en distintas direcciones. Desafortunadamente, en el mar hay una gran cantidad de aleatoriedad, por ello, se necesita de técnicas estadísticas para aproximar su lectura. Si bien, para olas grandes o, alternativamente, olas en aguas someras son más regulares que las olas pequeñas o en aguas profundas, y no tan aleatorias. Es decir, se las puede describir como una senoide, la cual se repite periódicamente. Realísticamente, dada la no linealidad de las aguas someras se debe utilizar más de una senoide; no obstante, el uso de una senoide se puede mostrar como un resultado razonablemente preciso para ciertos propósitos [26].



**Figura 1.2 Registro de una posible forma de onda [26]**

Las características de la ola varían en función de relación entre su longitud y la profundidad del medio en el que se propaga. Es posible asociar el periodo de la ola con su longitud por medio de la relación de dispersión considerando profundidad intermedia de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (1)$$

Donde:

h: profundidad [m]

k: número de ola [1/m]

$\sigma$ : frecuencia angular [rad/sec]

Es posible identificar tres regiones con distinto comportamiento del oleaje en la Figura 1.3:  $kh < \frac{\pi}{10}$ ,  $\frac{\pi}{10} < kh < \pi$  y  $kh > \pi$ . Estas regiones se la definen como aguas someras, de profundidad intermedia y aguas profundas, respectivamente.

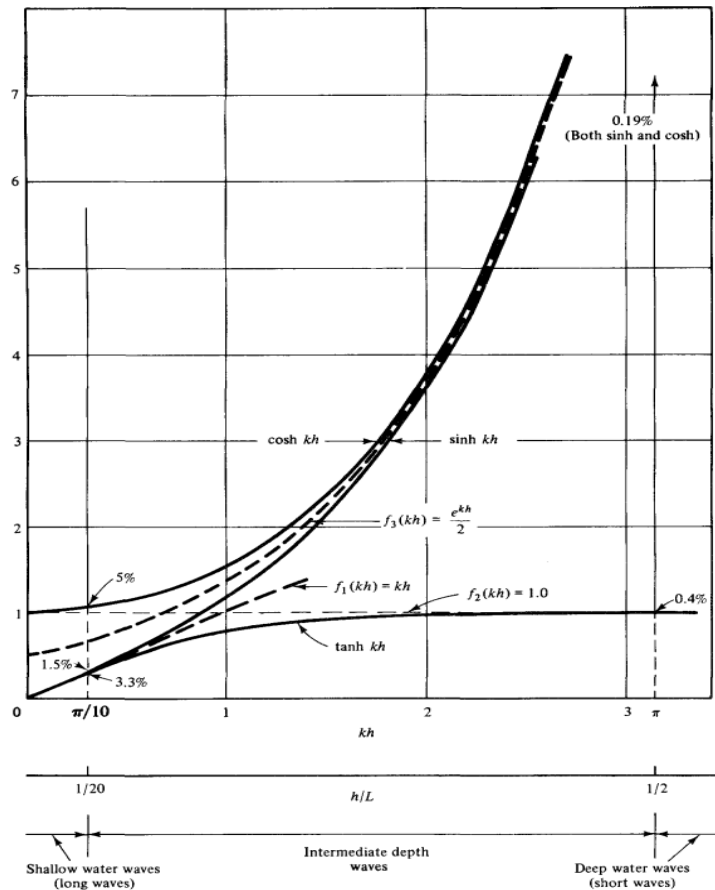


Figura 1.3 Profundidad relativa y asíntotas de funciones hiperbólicas [26]

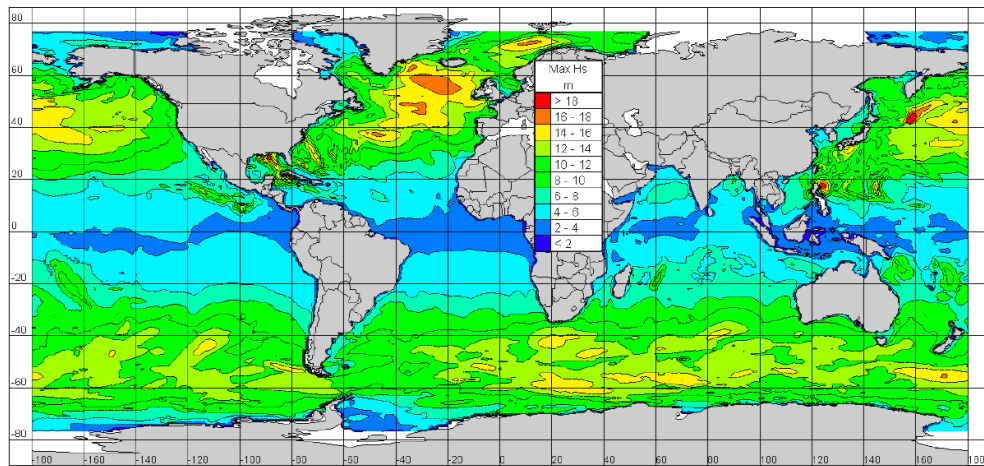
### 1.4.2 Energía undimotriz

La energía contenida en el océano o undimotriz es el transporte y la captura de energía por las olas de la superficie del océano. La energía capturada se utiliza luego para todo tipo de trabajo útil, incluida la generación de electricidad, desalinización del agua y el bombeo de agua. La energía undimotriz es un tipo de energía renovable y es la forma de recurso global estimada más grande de energía oceánica [27].

Actualmente, es uno de los tipos de energías renovables más estudiada, debido a que posee grandes ventajas sobre otras energías limpias. Por ejemplo, la menor incertidumbre en la predicción del estado de mar permite el desarrollo de diseños con una alta eficiencia en el proceso de conversión de energía. La energía



undimotriz está en primeras etapas de comercialización, su desarrollo está en etapa de investigación con limitados proyectos demostrativos alrededor del mundo [28]. A nivel global, existe un gran número de olas extremas, localizadas al sur del océano Índico y al norte del Atlántico, como se muestra en la Figura 1.4. En dónde se presentan resultados de una investigación global de recursos energéticos del océano, generado por el WAVEWATCH-III (NWW3) [29].



**Figura 1.4 Distribución global de la altura significativa de la ola (1997-2006) [29]**

El potencial de la energía undimotriz ha despertado el interés en varios países que pueden explotar esta energía como un recurso seguro de electricidad en el futuro. La Figura 1.5 ilustra las localizaciones alrededor del mundo en dónde ha implementado esta tecnología, a distintos niveles de desarrollo [30].



**Figura 1.5 Plantas de energía undimotriz. Marcadores morados: sede de desarrolladores; marcadores rojos: sitios de implementación, de prueba y demostración bajo desarrollo [30]**

Los cuales disponen de un nivel 6 de TRL, el cual indica que están en la etapa final de prueba, antes de la precomercialización, tal y como se indica en la Figura 1.5Figura 1.6 Figura 1.6 TRL de la tecnología de energía oceánica [30][30].

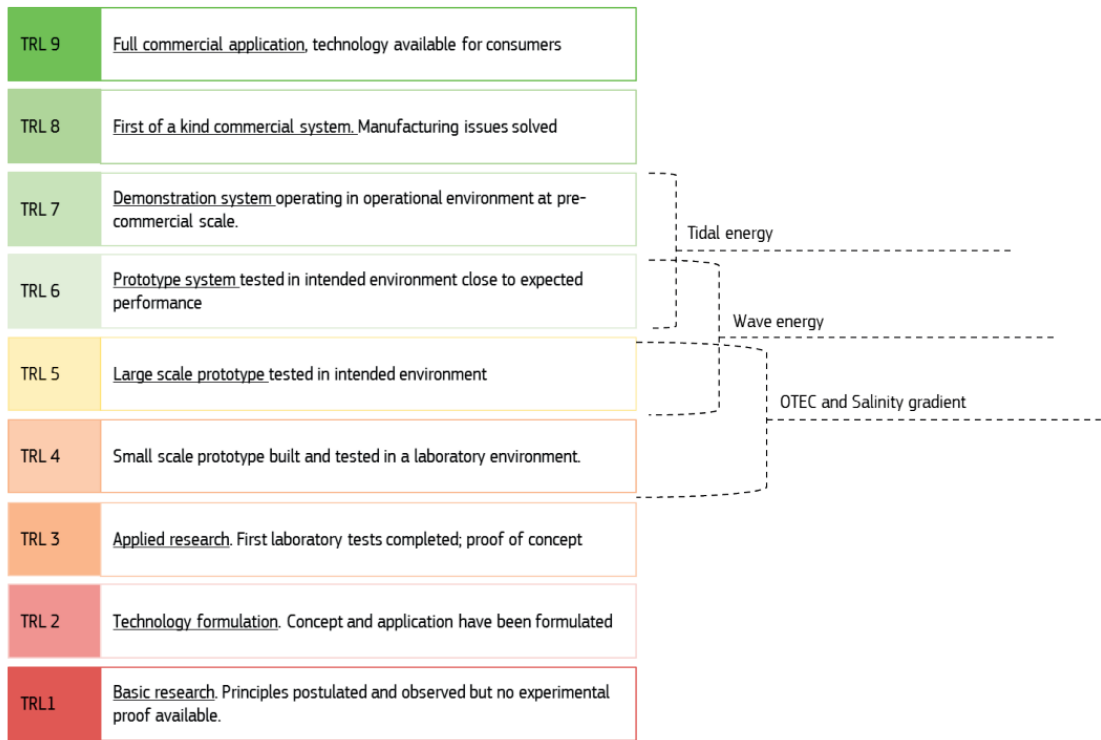
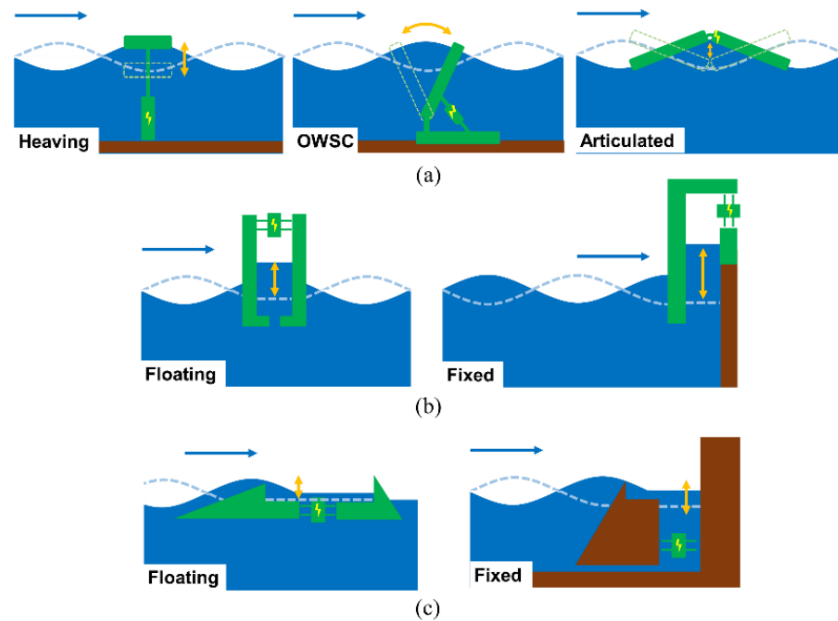


Figura 1.6 TRL de la tecnología de energía oceánica [30]

### 1.4.3 Sistema de Conversión de Energía tipo WEC

Los dispositivos para captura y conversión de energía undimotriz son conocidos como sistemas WEC (*abreviatura en inglés para Wave Energy Converter*). Existen distintos tipos WEC desarrollados para distintas aplicaciones, localizaciones y condiciones [12]. Las categorías de los WEC ilustrados en la Figura 1.7 están clasificados por principios de operación, y en la Figura 1.8 por orientación y tamaño con el frente de ola.

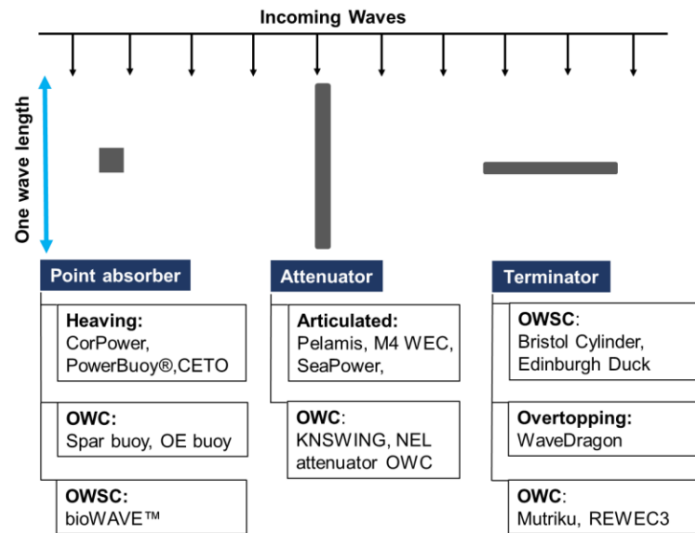


**Figura 1.7 Categorías de tecnologías WEC clasificadas por principios de funcionamiento [31].**

- (a) Cuerpo oscilante de tres distintas aplicaciones: levantamiento de cuerpo, convertidor de avance de ola oscilante (OWSC, por sus siglas en inglés Oscillant Water Surge Converter) y cuerpo articulado.
- (b) Columna de agua oscilante (OWC): de tipo flotante y fijo.
- (c) Rebasamiento: de tipo flotante y fijo.

Los OWC utilizan aire contenido sobre una columna de agua para impulsar las turbinas “Wells”, generando electricidad. Los OWC fijos pueden ubicarse en tierra o incrustarse en rompeolas, mientras que los OWC flotantes pueden instalarse en aguas profundas, aumentando el costo de producción de energía.

Los dispositivos de rebasamiento hacen que las olas ingresen a un reservorio para generar un flujo de cabeza y, posteriormente, impulsar turbinas para la generación de electricidad.



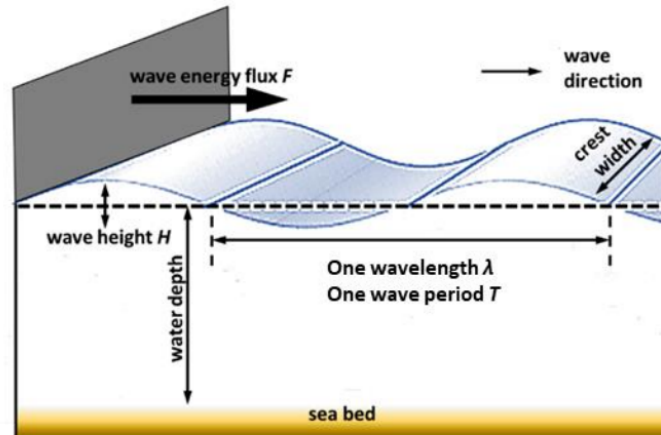
**Figura 1.8 Categorías de tecnologías WEC clasificadas por su orientación y tamaño, y subcategorías con respecto al principio del funcionamiento [31]**

En base a su tamaño y orientación con respecto al frente de ola, ver Figura 1.8, los WEC pueden ser clasificados en tres tipos: punto absorbedor (PA), atenuador y columna de agua oscilante. Para un PA, sus dimensiones deben ser mucho más pequeñas que la ola incidente. Para un atenuador, su longitud debe ser comparable o hasta mayor que la longitud de ola, y debe estar orientado paralelamente con la dirección de la ola. El ancho de una columna de agua oscilante debe ser comparable o hasta mayor que la longitud de ola, y el dispositivo debe estar alineado perpendicularmente con la dirección de la ola.

#### 1.4.4 Cuantificación del Rendimiento

Existen dos parámetros que se usan para cuantificar el rendimiento de la potencia de un WEC. El primero es el ancho de captura o CW (abreviatura en inglés para Capture Width) dado en metros, el cual es definido como la proporción de potencia  $P_{wave}$ , en kW, extraídos por un WEC del flujo F de energía contenido en una ola, en kW/m [31]. El segundo parámetro es el flujo de energía, que representa a la

potencia disponible en una ola por unidad de metro del ancho de ola, así como se describe en la Figura 1.9.



**Figura 1.9 Esquema descriptivo del flujo  $F$  de energía de la ola [31]**

Donde se identifican las siguientes variables:

- T: período de ola [s]
- $\lambda$ : longitud de onda [m]
- H: altura de la ola [m]

El ancho de captura está dado por la relación entre la potencia capturada teórica de la ola y el flujo de energía de la ola:

$$CW = \frac{P_{wave}}{F} \quad (2)$$

Para estados de mar realistas, el flujo de energía es expresado de la siguiente manera [32]:

$$F = 0.5 * H_s^2 T_e \quad (3)$$

En donde:

- $T_e$ : período de energía de ola [s]
- $H_s$ : altura significativa [m]

Por lo tanto, es posible estimar la potencia capturada por el dispositivo WEC con la siguiente expresión:

$$P_{wave} = 0.5 * Hs^2 Te * CW \quad (4)$$

Para una ola regular sinusoidal, la densidad energética se la expresa con la siguiente formula [33]:

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad (5)$$

Por otra parte, para cuantificar la potencia absorbida por el movimiento vertical de un cuerpo en olas regulares, se la describe en la siguiente ecuación [34]:

$$P_{wec} = \frac{F_o^2}{8b_{rad}} \quad (6)$$

En donde:

$P_{wec}$ : Potencia absorbida de una boya en movimiento vertical [W]

$F_o$ : Fuerza excitadora [N]

$b_{rad}$ : Coeficiente de amortiguamiento de radiación [Ns/m]

Donde  $F_o$  se calcula mediante la condición de equilibrio de la ecuación de movimiento [35]:

$$a\ddot{z} + b_{rad}\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \quad (7)$$

Los parámetros  $a, b_{rad}, c$ , corresponden a la masa virtual, coeficiente de amortiguamiento y fuerza restauradora respectivamente, la metodología de su cálculo se adjunta en el apéndice b, sección de Cálculos teóricos.

#### 1.4.5 Respuesta de Sistemas Flotantes (RAO)

El RAO (abreviatura en inglés para *Response Amplitude Operator*) es la función de transferencia entre la amplitud de la respuesta y la de excitación de la ola incidente. Además, la máxima respuesta ocurre en la condición de resonancia, que es cuando la frecuencia natural, en este caso, del modelo es igual a la frecuencia de la ola

incidente [35]. Bajo este contexto se identificará la geometría del modelo para alcanzar la máxima respuesta.

La frecuencia natural, en rad/s, del dispositivo WEC flotando libremente se la obtiene con la siguiente ecuación [36]:

$$W_n = \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (8)$$

En donde:

g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

D: diámetro base del modelo [m].

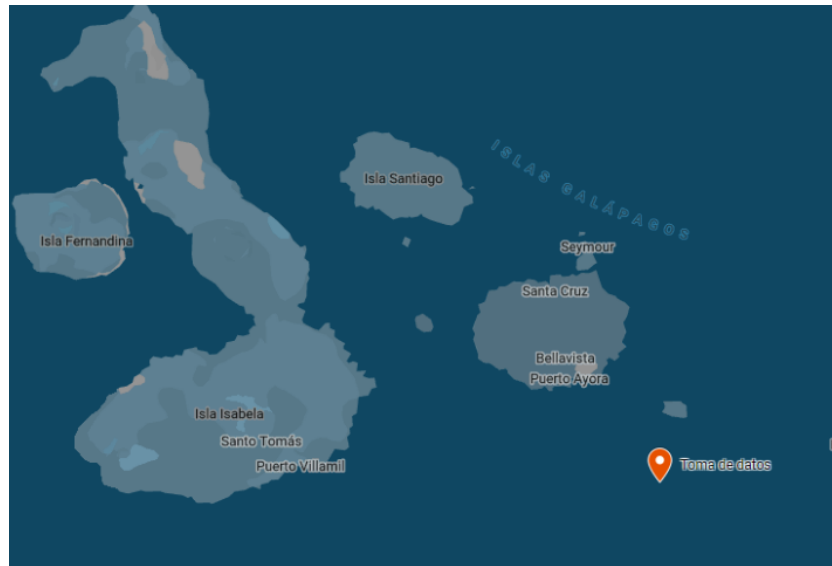
Para analizar la respuesta de un sistema flotante, se utiliza un parámetro adimensional,  $W^*$ , de la frecuencia de la ola  $\omega$  (rad/s), obtenido mediante la siguiente ecuación [36]:

$$W^* = \omega \sqrt{\frac{D}{g}} \quad (9)$$

## 1.5 Características de oleaje en las Islas Galápagos

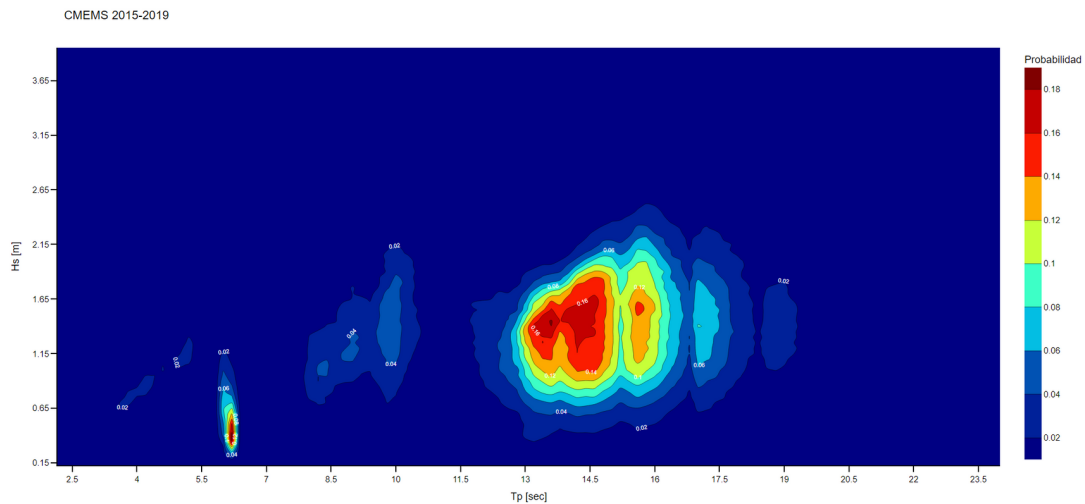
Finalmente, previo a realizar la metodología numérica se debe identificar el estado de mar de las Galápagos. Para ello, se mostrará un mapa de calor con la variación de la altura significativa y periodo de ola, datos disponibles del producto GLOBAL\_REANAYSIS\_WAV\_001\_032 [37], ubicado en las coordenadas (-0.9941, -90.0996), mostrados en la Figura 1.10 [38].





**Figura 1.10 Localización de la toma de datos (-0.9941, -90.0996) (Fuente: Google: MyMaps)**

En la Figura 1.11 muestra zonas de los oleajes más probables de color rojo, en donde existe la mayor probabilidad de ocurrencia, y a medida que el color se torna azul, esa frecuencia disminuye. Se evidencian 2 zonas predominantes con altura significativa entre el rango de 0.75 a 2 metros a periodos desde los 12 hasta 15 segundos, con un porcentaje de ocurrencia del 14%. Además, para alturas significativas de 0.15 a 1 metro, el periodo pico se concentra alrededor de 6 segundos.



**Figura 1.11 Relación altura significativa vs periodo, CMEMS 2015-2019 [37]**

## 1.6 Selección de localidades adecuadas

En esta sección se presentará una selección de localizaciones adecuadas para la implementación del WEC. Este análisis será realizado a partir de 4 distintos análisis presentados por medio del mapa de la región Insular. Al final, se presentará un mapa con todos esos análisis combinados. Este análisis se basó en el trabajo de investigadores de TU DELFT [17] con la finalidad de localizar una posible área de construcción.

### 1.6.1 Rutas de navegación

Para este análisis se excluyeron las embarcaciones pesqueras, dado a que los pescadores tienen su propio lugar de pesca, por ello se asume que esta locación pueda cambiar con el tiempo, por ello, no se excluyó una zona para los pescadores. Por otra parte, las interislas son encontradas entre los puertos de las islas habitadas, sus rutas son líneas rectas, o también pueden rodear las islas. Por ello, se pudo excluir las áreas pintadas de gris en la Figura 1.12 [17]

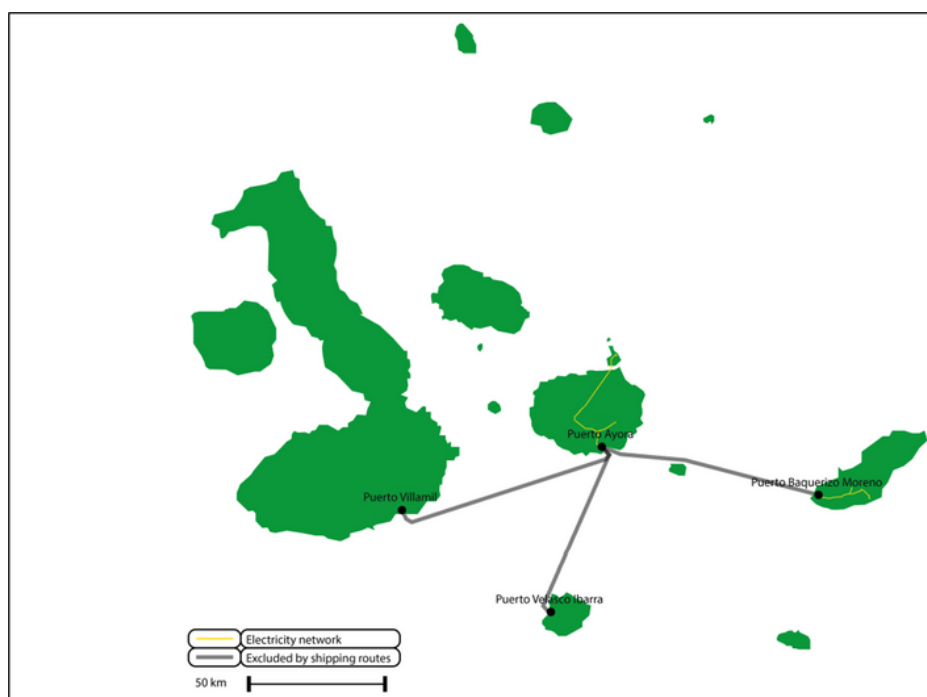


Figura 1.12 Zonas excluidas debido a las rutas de navegación [17]

### 1.6.2 Zonas excluidas por profundidad del mar

En base a la profundidad del mar, grandes zonas han sido excluidas, restando solamente zonas costeras. En dónde se encuentran profundidades desde hasta 100 metros. Dado que el dispositivo estará fondeado al lecho marino, las localizaciones ideales para su implementación deben tener un mínimo de 16 m y un máximo de 100 m de profundidad, tal y como se muestra en las zonas blancas de la Figura 1.13 [17]

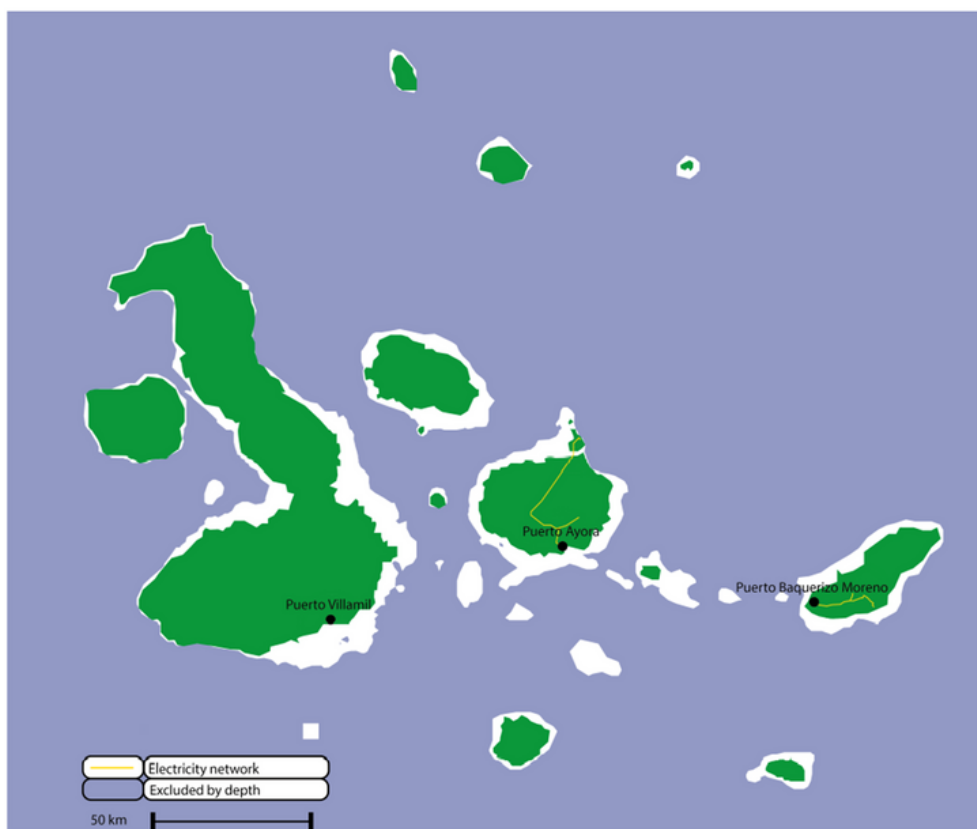
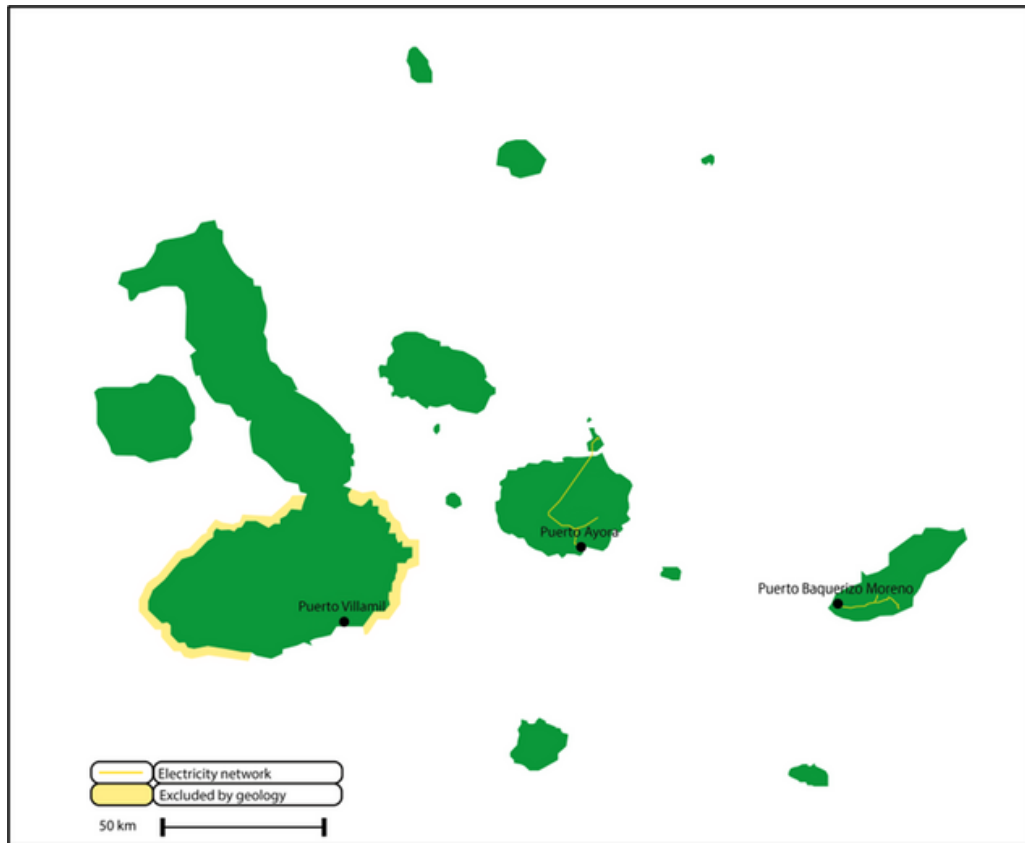


Figura 1.13 Zonas excluidas debido a la profundidad [17]

### 1.6.3 Zonas excluidas por factores geotécnicos.

Para la localización basada en el análisis geotécnico, se deben tomar en cuenta; terremotos, erupciones volcánicas, el subsuelo de la tierra y el fondo del océano. A pesar de ello, debido a la corriente alrededor de las islas, se asumió que toda la tierra se arrastra desde el fondo, por ello en el fondo del océano, alrededor de las islas, existen abundantes zonas con roza basáltica negra [17], tal y como se muestra en la Figura 1.14.



**Figura 1.14 Zonas excluidas debido a la roca basáltica negra [17]**

#### **1.6.4 Zonas excluidas por hábitat animal**

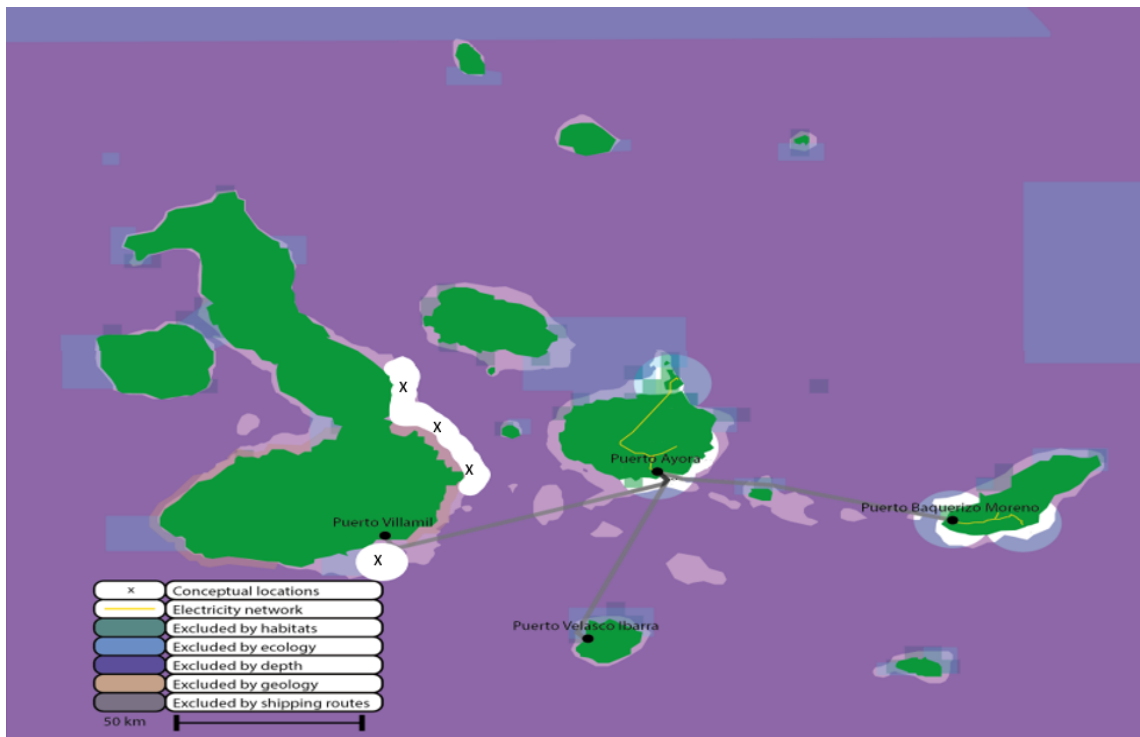
La Figura 1.15 representa una distribución de los hábitats animales, y localizaciones biodiversas del archipiélago [39]. Para el cuál se realizó una investigación de un total de 5x5 km. Cada celda representa una puntuación acerca de las especies habitando en esa área.



**Figura 1.15 Zona de distribución del hábitat animal [39]**

### 1.7 Zonas factibles

Para decidir las mejores localidades se realizó una combinación de todos los factores, en dónde se reconocen 3 posibles localizaciones, este análisis fue extraído del estudio realizado por SEAS [17].



**Figura 1.16 Posibles localizaciones en base a todos los requerimientos [17]**

En la Figura 1.16 la zona más destacada y la que podrá sacar más provecho de la construcción del parque undimotriz, es al sur de la Isla Isabela, dado que las olas del Océano Atlántico provienen del suroeste.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El movimiento de cualquier fluido puede ser descrito por tres ecuaciones obtenidas a partir de principios de conservación de masa o continuidad, cantidad de movimiento y de energía. Para fluidos incompresibles la ecuación de la energía no necesita ser resuelta, dado que no existe conexión explícita entre la ecuación de energía y las ecuaciones de continuidad y momento. El uso de CFD (Computational Fluid Dynamics) aproxima una solución para este conjunto de ecuaciones a partir de solucionadores numéricos y herramientas de post-procesamiento para evaluar los resultados [40].

En primer lugar, se revisará el tutorial “FloatingBody” junto a sus directorios, y se analizará los resultados obtenidos. Luego se adaptará el tutorial para modelar una esfera que representará a un sistema WEC con un mecanismo de punto absorbedor. Después se modelará una prueba de decaimiento logarítmico para estimar el amortiguamiento del prototipo y su frecuencia natural. Por último, se incluirán olas incidentes sinusoidales utilizando el modelo de turbulencia SST K- $\omega$ , para estimar la potencia generada por el dispositivo WEC.

Para el presente proyecto se utilizó uno de los WorkStations del laboratorio SiMarLab de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. El cual cuenta con 32 GB de memoria RAM, capacidad de almacenamiento de 2 TB, y 24 núcleos/cores. Asimismo, se utiliza el software libre OpenFOAM.com (Open Field Operation and Manipulation) v2206, que ofrece herramientas de CFD: preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

### 2.1 Descripción del software OpenFOAM

OpenFOAM es un software gratuito de código abierto que contiene herramientas para la configuración de casos CFD. El cual brinda una gran libertad al usuario y la posibilidad de que desarrolle sus propios solucionadores o condiciones de frontera.

OpenFOAM no tiene una interfaz de usuario, sino que se basa en archivos de texto para las entradas de los usuarios con una estructura importante de carpetas [40].

### 2.1.1 Ecuaciones Gobernantes

Como se mencionó anteriormente, existen tres ecuaciones gobernantes a considerar cuando se trabajan con fluidos: la ecuación de continuidad, cantidad de movimiento y de energía. Las ecuaciones de continuidad y de momentum para un fluido Newtoniano incompresible son [41]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \quad (11)$$

En donde:

$u_i$ : vector velocidad

$u_j$ : vector posición

t: tiempo

P: presión

$\rho$ : densidad

g: gravedad

En este proyecto se trabajará con un cuerpo con un grado de libertad, y así determinar la respuesta vertical, la ecuación se la simplifica de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g \quad (12)$$

### 2.1.2 RANS

Reynolds introdujo métodos de promedio estadístico para fluidos turbulentos, los cuales son utilizados para obtener los valores promedio de las propiedades del fluido a través del tiempo. Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Average Navier Stokes, por sus siglas en inglés) describen el



fluido por la velocidad promedio y las propiedades turbulentas. Las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles son las siguientes.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (13)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden reorganizar y al aplicar un promedio de tiempo sobre las ecuaciones para obtener la ecuación RANS [41].

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle P \rangle \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \rho \langle u_i u_j \rangle \right) \quad (14)$$

### 2.1.2.1 Modelo $k-\omega$ SST

Combina las características de los dos modelos de turbulencia. Mientras combina la precisión y robustez cercana a las paredes, evade los problemas de transmisión libre. La ecuación modelo final está dada por la siguiente ecuación [42]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \widehat{P}_k - \beta * \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_f) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (15)$$

### 2.1.3 Fuerzas excitantes

Para describir la interacción de una esfera sólida con agua se consideran varias fuerzas en función de su origen. Por ejemplo, la fuerza de boyantes es una fuerza restauradora que empuja a un cuerpo que está sumergido en un fluido. Esta fuerza actúa en dirección opuesta a la gravedad y, la fuerza de boyantes es calculada multiplicando el peso específico del fluido, densidad veces la gravedad y el volumen sumergido del cuerpo:

$$F_B = \rho g V \quad (16)$$

En una simulación CFD, estas fuerzas son calculadas integrando la distribución presión y velocidades actuando sobre el objeto. En el primer componente esto se realiza multiplicando la presión por el vector de área de cada celda, como se puede observar en la Figura 2.1. Luego la fuerza total es calculada sumando la fuerza local actuando en cada celda, utilizando la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = \sum p_i \vec{n}_i S_i \quad (17)$$

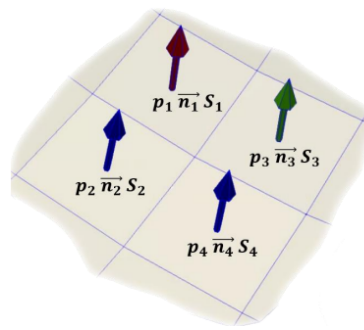
En donde:

F: es el vector de la fuerza ejercida por la presión

$p_i$ : presión en la cara  $i$

$n_i$ : vector normal de la cara  $i$

$S_i$ : área de la cara  $i$



**Figura 2.1 Fuerza de la presión total [41]**

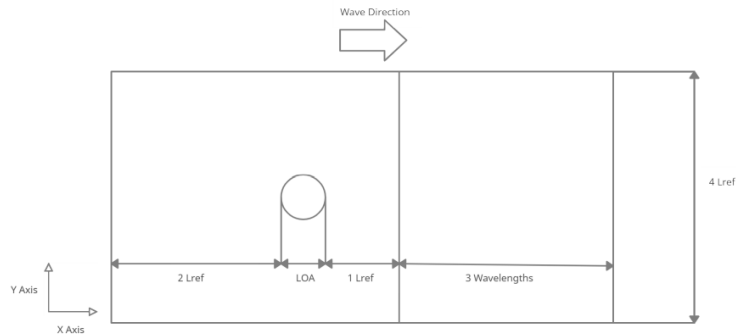
#### 2.1.4 Modelamiento de oleaje

El estado de mar de una localidad es representado como un conjunto de olas regulares [43]. Para modelar numéricamente la propagación de una ola regular es necesario modelar el dominio computacional para evitar numéricos no deseados, siguiendo las recomendaciones mostradas en la Figura 2.2, donde se muestran las recomendaciones generales para la dirección  $x$ ,  $y$  del dominio.

En la figura  $L_{ref}$ , se define de acuerdo con la siguiente condición:

$$L_{ref} = \text{Max}(\lambda, LOA)$$

y LOA es la longitud del objeto.



**Figura 2.2 Dominio de olas recomendado en la dirección x, y [44]**

Las zonas que definen el dominio tienen ciertas recomendaciones para el tamaño de las celdas, estas recomendaciones se mostrarán en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Tamaño de celda recomendado para las diferentes regiones del dominio de la ola [44]**

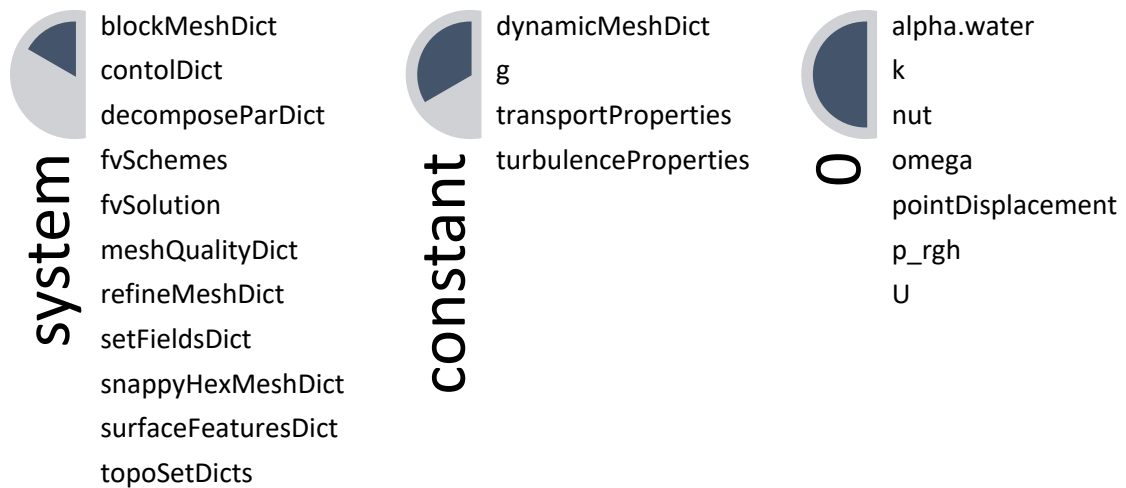
<b>Región</b>	<b>dx</b>	<b>dy</b>	<b>Dz</b>
Área no refinada	dref	dref	dref
B1	$\lambda/80$	$\lambda/20$	H/13
B2	dref	dref	H/13

Donde la distancia de referencia, dref, es definida como [45]:

$$d_{ref} = \frac{LOA * 2^8}{1000} \quad (18)$$

## 2.2 Pre-procesamiento

OpenFOAM contiene tres directorios utilizados para especificar los parámetros numéricos y detalles geométricos que se utilizarán para resolver un problema determinado. El contenido se muestra en la Figura 2.3:



**Figura 2.3 Estructura de directorios**

- System: detalla los parámetros relacionados con el procesamiento del problema.
- Constant: define las propiedades físicas, como la densidad, gravedad, viscosidad, etc. Asimismo, los modelos físicos de turbulencia y transporte.
- 0: establece las condiciones de frontera iniciales.

La descripción de cada uno de estos directorios se encuentra en la referencia [46].

### 2.2.1 Esquemas numéricos

El diccionario *fvSchemes* permitirá al usuario especificar cual esquema numérico será utilizado para las diferentes propiedades de la simulación. Existen una gran variedad de esquemas a elegir, estos son especificados en el sub-diccionario *fvSchemes*, los cuales se presentarán a continuación[40].

#### ***Esquema de tiempo***

Problemas de simulaciones transitorias requieren una discretización de las ecuaciones gobernantes en el tiempo. Esto se realiza mediante los esquemas de tiempo, el cual se define como las propiedades integradas con respecto al tiempo. Euler es un esquema de discretización espacial acotado implícito de primer orden. El cual ha mostrado ser bastante estable, y preciso con la condición de que el

número de Courant se mantenga menor a 1. El esquema Euler se itera de acuerdo con:

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi = \frac{\phi - \phi^0}{\Delta t} \quad (19)$$

Donde  $\phi$  representa cualquier propiedad dada, y  $\phi^0$  es la propiedad en el paso de tiempo anterior.

El esquema de tiempo Crank-Nicolson es de segundo orden, el cual requiere un coeficiente entre 0 y 1, dónde 0 representa a Euler y 1 a Crank-Nicolson. Se recomienda utilizar un valor de 0.9 para obtener una buena combinación entre precisión y robustez. Esta dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi = \frac{\phi - \phi^{00}}{2\Delta t} \quad (20)$$

Donde  $\phi^{00}$  es la propiedad en el paso de dos tiempos atrás [40].

### 2.2.2 Condiciones de frontera

Se dan las condiciones de frontera utilizadas para los diferentes casos de simulación [40].

#### **zeroGradient**

Está disponible para todas las cantidades como una condición límite donde el gradiente normal de la definida la cantidad es constante, lo que significa que el gradiente de la cantidad es cero en el límite.

#### **fixedFluxPressure**

Ajusta el gradiente de presión para que cumpla con el valor de flujo especificado en ese límite por la condición de contorno de la velocidad.

#### **movingWallVelocity**

Es una condición de contorno para la velocidad que aplica la velocidad calculada en el *dynamicMeshDict* al límite especificado. Esta condición de contorno es necesaria en OpenFOAM cuando trata con límites de paredes móviles.

### **fixedValue**

La condición de contorno especifica un valor en el contorno y los gradientes de la cantidad especificada, luego se ajusta durante la simulación para cumplir con el valor especificado en el límite.

### **pressureInletOutletVelocity**

Es una condición límite de velocidad que especifica la presión en el límite. Se le asigna la a velocidad de flujo de salida una condición de límite de gradiente cero y la velocidad de flujo de entrada se especifica a partir del valor de celda interno calculado en el límite de la simulación.

### **inletOutlet**

Permite al usuario especificar el valor de entrada en el límite para la cantidad dada, ese flujo de salida es calculado dentro de la simulación.

### **kqRWallfunction**

Esta función calcula la energía cinética  $k$  en el borde como una condición de frontera para un modelo turbulento.

### **omegaWallfunction**

Calcula la disipación turbulenta  $\omega$  en la frontera. Toma en consideración un parámetro en la dirección  $Y$ , el cuál varía dependiendo de la ecuación utilizada sobre una subcapa sobre la celda en la que esté localizada.

## **2.2.3 Técnica de mallado Deforming**

Es una extensión de la malla estática donde se implementan fronteras deformables dentro del mallado. Este mallado tiene un número de celdas específicas y dicho número se mantiene constante durante toda la simulación. Se especifica una

frontera con el movimiento de la simulación, asimismo, se establece un mallado interno y externo alrededor de la geometría, en este caso, la esfera.

El movimiento del cuerpo implementa una deformación de las celdas dependiendo del tamaño del movimiento. La deformación de las celdas necesita ser tratada en una robusta y estable manera, de manera que produzca resultados precisos y confiables.

#### **2.2.4 Generación de la ola**

Afortunadamente, *interFoam* incluye herramientas con el propósito de crear y absorber olas. Al usar este tipo de herramientas solo se necesita cambiar el tipo de "patch" para la entrada y salida del dominio. Es decir, se cambia la condición de frontera de la velocidad por *waveVelocity* y para la función de color de cambio de condición de frontera se utiliza *waveAlpha*, en la entrada [44]. Esto es ilustrado en la Figura 2.4 y la Figura 2.5.

```

U x
-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: v2206 |
| \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
| \ \ / M a n i p u l a t i o n | |
|=====|
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField   uniform (0 0 0);
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type      waveVelocity;
        value     uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type      waveVelocity;
        alpha     alpha.water;
        value     $internalField;
    }

    stationaryWalls
    {
        type      slip;
    }

    atmosphere
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        tangentialVelocity $internalField;
        value     uniform (0 0 0);
    }

    sphere
    {
        type      movingWallVelocity;
        value     uniform (0 0 0);
    }
}
// *****

```

Figura 2.4 Directorio U (velocidad) para las condiciones de frontera



```

alpha.water
/*----- C++ -----*/
|=====|
| \\ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / | O p e r a t i o n | Version: v2206 |
| \\ / | A n d | Web: www.OpenFOAM.com |
| \\ / | M a n i p u l a t i o n |
|=====|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       alpha.water;
}
// *****

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];
internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type      waveAlpha;
        value     $internalField;
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
        lowerBound 0;
        upperBound 1;
        value     $internalField;
    }

    stationaryWalls
    {
        type      zeroGradient;
        inletValue $internalField;
        value     $internalField;
    }

    atmosphere
    {
        type      zeroGradient;
        inletValue $internalField;
        value     $internalField;
    }

    sphere
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

```

Figura 2.5 Directorio alpha.water para las condiciones de frontera

### 2.3 Decaimiento logarítmico de una esfera - Datos experimentales

Las predicciones numéricas de una simulación de decaimiento logarítmico de una esfera de 0.3 m de diámetro obtenidas en este proyecto, se compararán con datos experimentales, ver Figura 2.6, publicados por Kramer et al. [47]. Las propiedades físicas del sistema están dadas en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Propiedades físicas experimentales**

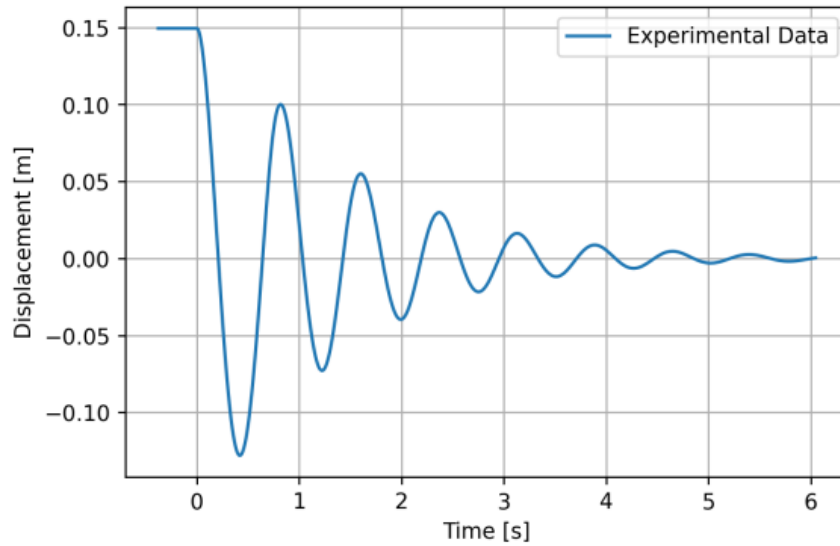
Parámetro	Valor
Diámetro de la esfera [m]	0.3
Masa de la esfera [kg/m <sup>3</sup> ]	7.07
Profundidad del agua [m]	0.6
Densidad del agua [kg/m <sup>3</sup> ]	998.2
Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2
Aceleración de la gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9.81
Viscosidad cinemática del agua [m <sup>2</sup> /s]	1.1e10 <sup>-6</sup>
Viscosidad cinemática del aire [m <sup>2</sup> /s]	1.5e10 <sup>-5</sup>

Se dejó caer la esfera en el experimento con una elevación del centro de masa de 0.15 m desde la superficie del agua.



**Figura 2.6 Modelo esférico utilizado para el experimento de decremento logarítmico**

Se monitoreó el movimiento vertical de la esfera durante 6 segundos, como se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Desplazamiento del experimento de la esfera a lo largo del tiempo [47]**

La primera oscilación no se la considera debido a que tiene un comportamiento diferente porque inicia fuera del agua en la primera oscilación. Además, se conoce que la curva de amortiguamiento es descrita por la siguiente fórmula:

$$x(t) = x_0 e^{-\theta t} \quad (21)$$

Donde  $x(t)$  es la posición del centro de masa de la esfera en la dirección  $z$ ,  $x_0$  es la posición inicial.  $\theta$  es el coeficiente de amortiguamiento calculado por la siguiente ecuación.

$$\theta_\tau = \log \left( \frac{x_0 - x_1}{x_2 - x_3} \right), \quad (22)$$

Donde  $x_1$  es el primer valle,  $x_2$  es el pico que le sigue, luego continúa con el mismo patrón. Obteniendo un coeficiente de amortiguamiento experimental de 0.13.

Además, se obtiene el período natural de la boya  $T_n$ , midiendo el tiempo en el que el dispositivo completa una oscilación, y, finalmente se calcula la frecuencia natural del dispositivo.

$$\omega_m = \frac{2\pi}{T_n}, \quad (23)$$

Posterior a esto, se realiza un análisis dimensional para la esfera de 0.15 m de diámetro en base a una esfera “prototipo” de 1 m de diámetro, utilizando el siguiente factor de escala  $\lambda$  [35]:

$$\lambda = \frac{\text{Diámetro de referencia del prototipo}}{\text{Diámetro de referencia del modelo}} = \frac{D_p}{D_m} \quad (24)$$

Es posible relacionar las frecuencias naturales entre el modelo y el prototipo, como se muestra a continuación [35]:

$$\omega_p = \frac{1}{\lambda^{1/2}} \omega_m \quad (25)$$

En donde:

$\omega_p$ : velocidad angular del prototipo [rad/s]

$\omega_m$ : velocidad angular del modelo [rad/s]

De igual manera, es posible relacionar el coeficiente de amortiguamiento con la siguiente expresión [48]:

$$b_p = b_m \lambda^{2.5} \quad (26)$$

En donde:

$b_p$ : coeficiente de amortiguamiento del prototipo [kg\*s/m]

$b_m$ : coeficiente de amortiguamiento del modelo [kg\*s/m]

## 2.4 Configuración de la simulación

En esta sección las diferentes simulaciones realizadas son presentadas, con sus condiciones iniciales y condiciones de frontera. Todas ellas fueron modeladas como un fluido isotérmico e incompresible, es decir, con una temperatura y densidad

constante. El modelo de transporte elegido es el Newtoniano para el agua y el aire, asimismo se asume que la viscosidad del fluido es constante. Además, el paso de tiempo en las simulaciones es de  $5e-4$  s, dado que las velocidades no son muy altas, el paso debe ser lo suficientemente corto para producir un número de CFL bajo, y capturar todas las fuerzas importantes en el fluido que inciden en la simulación.

#### 2.4.1 Modificación del tutorial “FloatingBody”

El primer paso en este trabajo fue el análisis del tutorial FloatingBody [49], el cual consiste en el comportamiento de un prisma dentro de un fluido en movimiento, el dominio se muestra en la Figura 2.8.

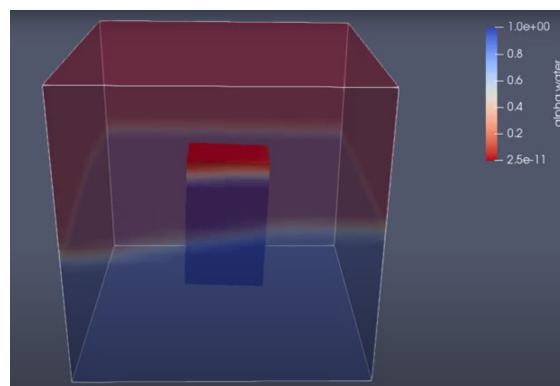


Figura 2.8 Tutorial FloatingBody [49]

En este tutorial se utiliza la técnica de mallado Overset, y divide la simulación en 2 directorios, uno para el mallado (background), y otro para el cuerpo en movimiento (floatingBody). Ahora bien, para la simulación primero se va a modificar el dominio, mediante el directorio blockMeshDict, ya que el cuerpo del tutorial consta de las dimensiones mostradas en la Figura 2.9

```

1  /*----- C++ -----*/
2  |
3  | \ \ \ \ \ Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ \ \ \ Operation  Version: v2206
5  | \ \ \ \ \ And        Website: www.openfoam.com
6  | \ \ \ \ \ Manipulation
7  |
8  |-----*/
9  FoamFile
10 {
11   version      2.0;
12   format       ascii;
13   class        dictionary;
14   object       dynamicMeshDict;
15 }
16 // * * * * *
17 motionSolverLibs (sixDoFRigidBodyMotion);
18
19 dynamicFvMesh    dynamicOversetFvMesh;
20
21 solver           sixDoFRigidBodyMotion;
22
23 sixDoFRigidBodyMotionCoeffs
24 {
25
26   patches        (floatingObject);
27   innerDistance  100.0;
28   outerDistance  101.0;
29
30   centreOfMass   (0.5 0.5 0.3);
31
32   // Cuboid dimensions
33   Lx              0.24;
34   Ly              0.24;
35   Lz              0.4;
36
37   // Density of the solid
38   rhoSolid        700;
39 }

```

**Figura 2.9 Directorio dynamicMeshDict del tutorial “floatingBody”**

Mientras que el tutorial utiliza dynamicMesh para dimensionar el prisma, para este proyecto se utilizará snappyHexMesh para insertar la boya esférica cuya geometría es generada en formato stl y, asimismo, se refinarán las áreas en dónde habrá movimiento, es decir, en el paso de las olas y el movimiento vertical del dispositivo, ver Figura 2.10.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  |
3  | \ \ \ \ \ Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ \ \ \ Operation  Version: 5
5  | \ \ \ \ \ And        Web: www.OpenFOAM.org
6  | \ \ \ \ \ Manipulation
7  |
8  |-----*/
9  FoamFile
10 {
11   version      2.0;
12   format       ascii;
13   class        dictionary;
14   object       snappyHexMeshDict;
15 }
16 // * * * * *
17 castellatedMesh true;
18 snap           true;
19 addLayers      true;
20
21 geometry
22 {
23   sphere.stl
24   {
25     type triSurfaceMesh;
26     scale 1;
27     name sphere;
28   }
29   refinementBox1
30   {
31     type searchableBox;
32     min (-13 -5 -3);
33     max (22 5 3.25);
34   }
35   refinementBox2
36   {
37     type searchableBox;
38     min (1 -5 -5);
39     max (6 5 5);
40   }
41 }
42

```

**Figura 2.10 Directorio snappyHexMesh de la simulación**

## 2.4.2 Configuración de la simulación en OpenFOAM

Se presentarán los modelos físicos, condiciones de frontera y modelos numéricos. El solver `sixDoFRigidBodyMotion` es utilizado para resolver en todos los casos, junto al solver de movimiento `CrankNicolson`.

### 2.4.2.1 Simulación de decremento logarítmico

Esta simulación con la técnica de mallado `Deforming`, es la caída de la boya de 0.15 m de radio a una altura de 0.09 m sobre la superficie del agua calmada. Las condiciones de frontera son mostradas en la Tabla 2.3.

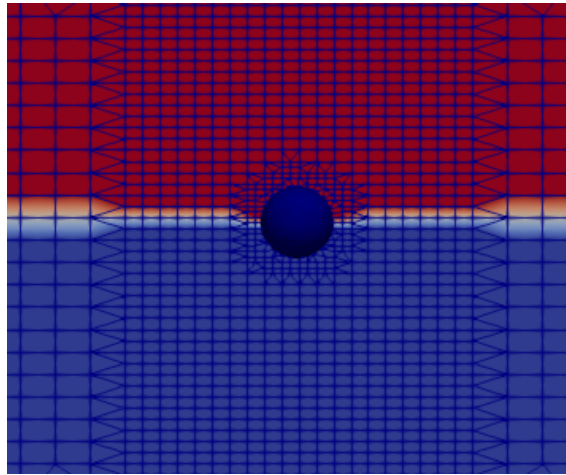
**Tabla 2.3 Condiciones de frontera para la simulación de decremento logarítmico**

	<code>stationaryWalls</code>	<code>atmosphere</code>	<code>floatingObject</code>
<code>zoneID</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>zeroGradient</code>
<code>pointDisplacement</code>	<code>fixedValue</code>	<code>fixedValue</code>	<code>calculated</code>
<code>p_rgh</code>	<code>fixedFluxPressure</code>	<code>totalPressure</code>	<code>zeroGradient</code>
<code>alpha.water</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>zeroGradient</code>
<code>U</code>	<code>fixedValue</code>	<code>pressureInlet OutletVelocity</code>	<code>movingWallVelocity</code>

La simulación es de tipo laminar debido a que la altura de caída es muy baja, por lo tanto, tendrá una velocidad baja. Los métodos numéricos son muy importantes para la precisión de las simulaciones. En OpenFOAM, esto se especifica en los directorios `fvSchemes` y `fvSolution`, los cuales se presentan en el apéndice C.

### 2.4.2.2 Simulación del modelo sometido a olas regulares

Para poder capturar el flujo turbulento alrededor de la esfera, se refino la zona cercana a la esfera Figura 2.11.



**Figura 2.11 Zona refinada alrededor del modelo esférico de 1 m de diámetro**

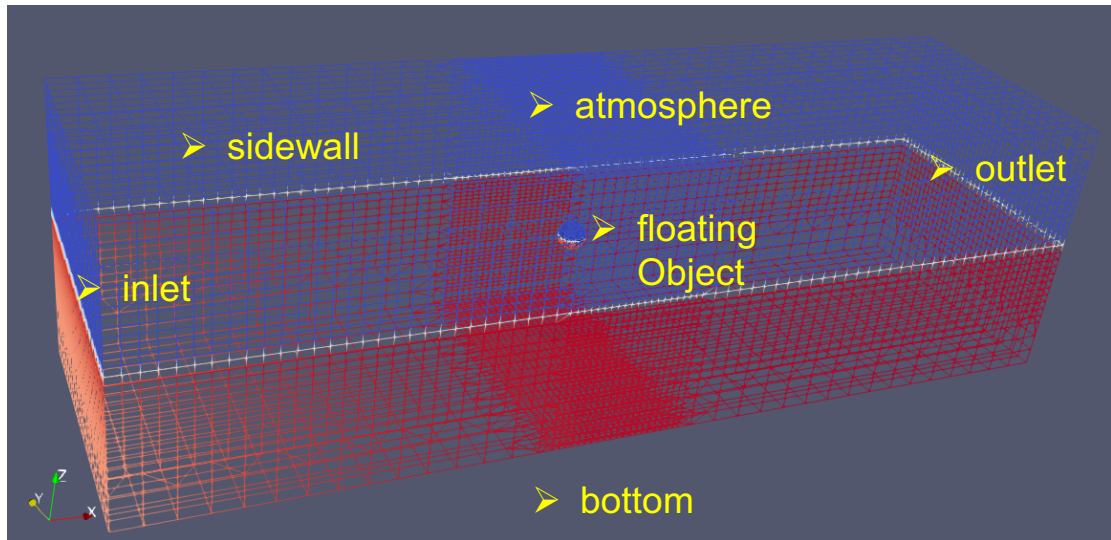
Para ello, el modelo  $k-\omega$  SST es utilizado para resolver la zona alrededor de la esfera, el cual requiere ciertas condiciones de frontera extra, las cuales son presentadas en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Condiciones de frontera para la simulación de olas regulares**

	bottom	sidewall	inlet
zoneID	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
pointDisplacement	fixedValue	fixedValue	calculated
p_rgh	fixedFluxPressure	fixedFluxPressure	fixedFluxPressure
alpha.water	zeroGradient	zeroGradient	waveAlpha
U	fixedValue	pressureInletOutletVelocity	waveVelocity
	outlet	atmosphere	floatingObject
zoneID	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
pointDisplacement	fixedValue	fixedValue	calculated
p_rgh	fixedFluxPressure	fixedFluxPressure	zeroGradient
alpha.water	zeroGradient	inletOutlet	zeroGradient
U	waveVelocity	pressureInletOutletVelocity	movingWallVelocity

Las olas provienen del eje negativo de las x, la esfera de 1 metro de diámetro es utilizada para esta simulación, como se ilustra en la Figura 2.12; inicialmente está sumergida hasta la mitad, la cual es sometida a distintos períodos de ola, un fluido turbulento es utilizado para el modelo de esta situación.





**Figura 2.12 Fronteras establecidas**

Para obtener olas regulares realistas se utilizó el modelo de Stokes 2<sup>nd</sup> orden, con los parámetros mostrados en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Parámetros de la ola para la simulación de la esfera de 1 m de diámetro**

Parámetro	Valor
Hs [m]	1
T [s]	2, 4, 6, 8
$\omega$ [rad/s]	3.14, 1.57, 1.05, 0.79
$\lambda$ [m]	6, 24, 56, 100

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron en las simulaciones numéricas. Primero se analizarán los resultados del decremento logarítmico de la boya, después, del modelo sometido a olas regulares para los diferentes períodos establecidos en la configuración de la simulación, y posteriormente compararlos con los resultados analíticos obtenidos por la literatura del Bhattacharyya. Finalmente, a partir de los resultados determinados se estimará la potencia generada por el dispositivo, y se estimarán los gastos finales de un prototipo.

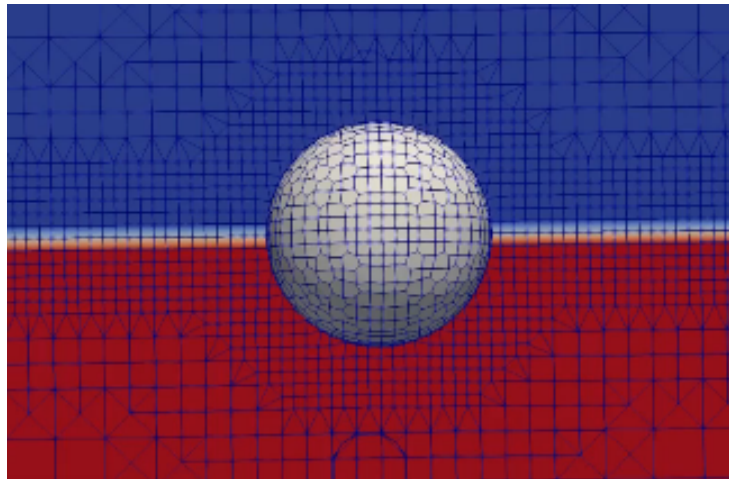
### 3.1 Análisis del decremento logarítmico

#### 3.1.1 Generación del mallado

En este proyecto se utilizó el tipo de mallado deformable, dado que requiere menos recursos computacionales para su convergencia.

##### ***3.1.1.1 Generación del mallado con Deforming***

Al crear un mallado deformable, el movimiento del cuerpo y la deformación de la malla en la simulación debe ser considerada. Como fue descrito antes, el refinamiento alrededor del cuerpo es muy importante para la resolución del fluido alrededor del mismo. También se necesita generar un refinamiento a lo largo de la superficie del agua, para obtener una interacción entre el agua y el aire. Además, como el mallado alrededor de la esfera es deformado y las celdas se mueven a lo largo de la superficie con el movimiento vertical de la esfera, el refinamiento en la interfase debe ser lo suficientemente ancho para mantener una interacción mientras las celdas se mueven. El mallado final tiene un número total de celdas de 53.751, y es mostrado en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Técnica de mallado *Deforming***

Al cuál, en el directorio `dynamicMesh`, se le dará una libertad de movimiento de malla de 5 metros, como frontera externa, y 0.1 como frontera interna al cuerpo, ver Figura 3.2.

```

dynamicMeshDict
1  /*----- C++ -----*/
2
3  // =====
4  // \ \ \ \ \ Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
5  // \ \ \ \ \ Operation  | Version: 5
6  // \ \ \ \ \ And        | Web: www.OpenFOAM.org
7  // =====
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     object       dynamicMeshDict;
14 }
15 // ***** //
16 motionSolverLibs ("libsixDoFRigidBodyMotion.so");
17
18 dynamicFvMesh    dynamicMotionSolverFvMesh;
19
20 solver           sixDoFRigidBodyMotion;
21
22 sixDoFRigidBodyMotionCoeffs
23 {
24     patches       (sphere);
25     innerDistance 0.1;
26     outerDistance 5;
27
28     centreOfMass (3.5 0 0.25);
29     mass          261.8;
30     momentOfInertia (27.23 27.23 27.23);
31     rhoInf        1;
32     report        on;
33 }

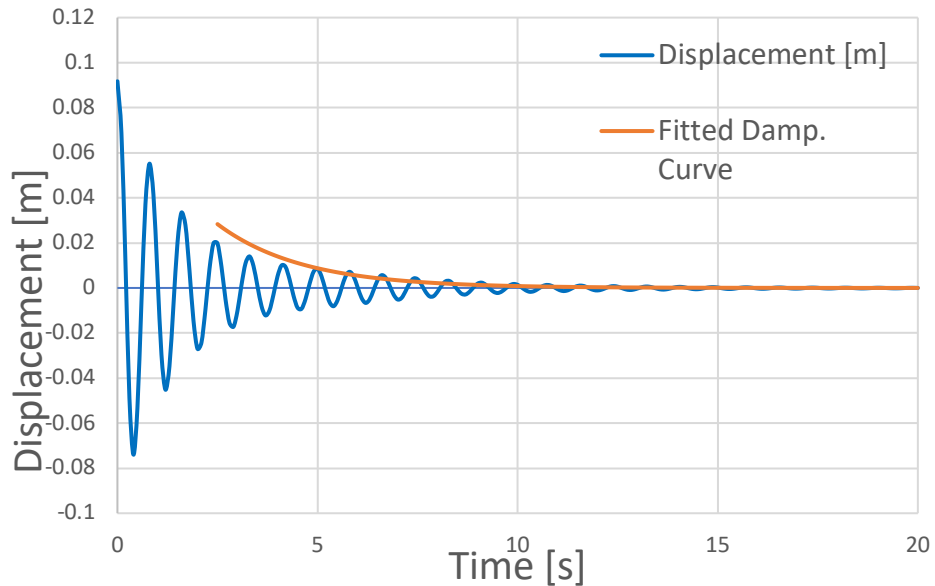
```

**Figura 3.2 Directorio `dynamicMesh`**

### 3.1.2 Comparación de resultados

Inicialmente la esfera de 0.15 m estaba ubicada teóricamente en una posición neutral en el dominio de la simulación, posteriormente cae a una altura de 0.09 m,

debido a que su comportamiento mostrará una mayor linealidad [50]. Para monitorear su tiempo de decremento, la simulación continuó durante 20 segundos hasta que alcanzó su estabilidad. Así como se muestra en la Figura 3.3. En dónde la curva de amortiguamiento descrita está decreciendo progresivamente.



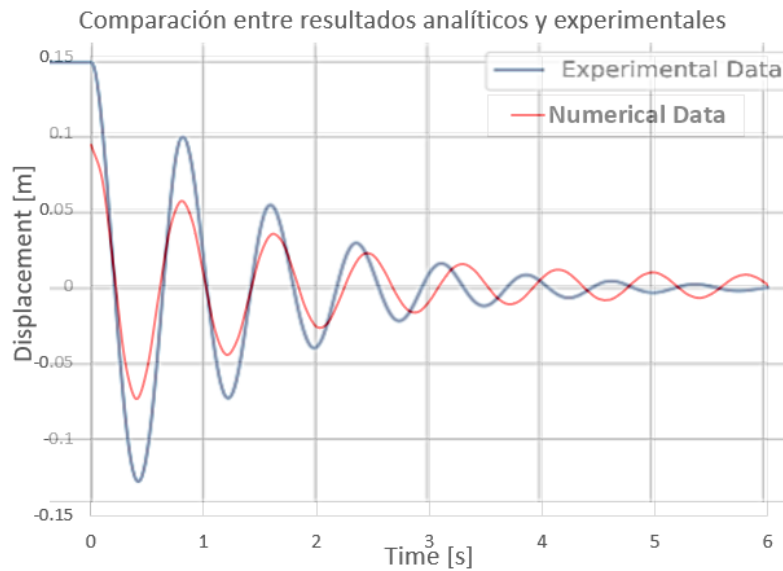
**Figura 3.3 Simulación del decremento logarítmico para una esfera de 0.15 m**

Obteniendo los resultados de coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural mostrados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Resultados de la prueba de decremento logarítmico**

	<b>Numérico</b>	<b>Experimental</b>
Coeficiente de amortiguamiento	0.13	0.1295
Frecuencia natural [rad/s]	7.85	8.27

Y se compararon los resultados obtenidos del coeficiente de amortiguamiento con el experimento, tal y como se muestra en la Figura 3.4.

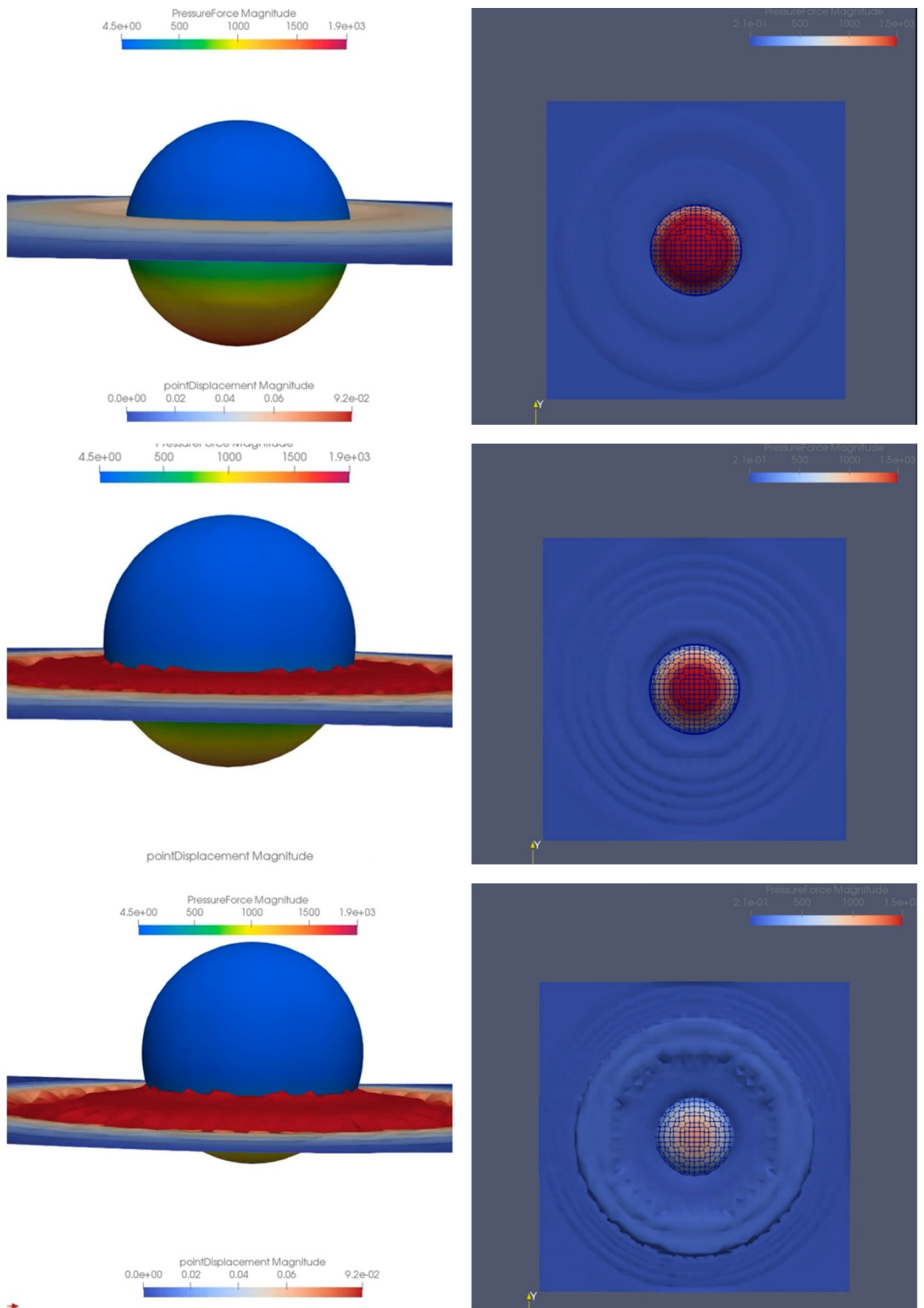


**Figura 3.4 Comparación entre la gráfica analítica con la experimental**

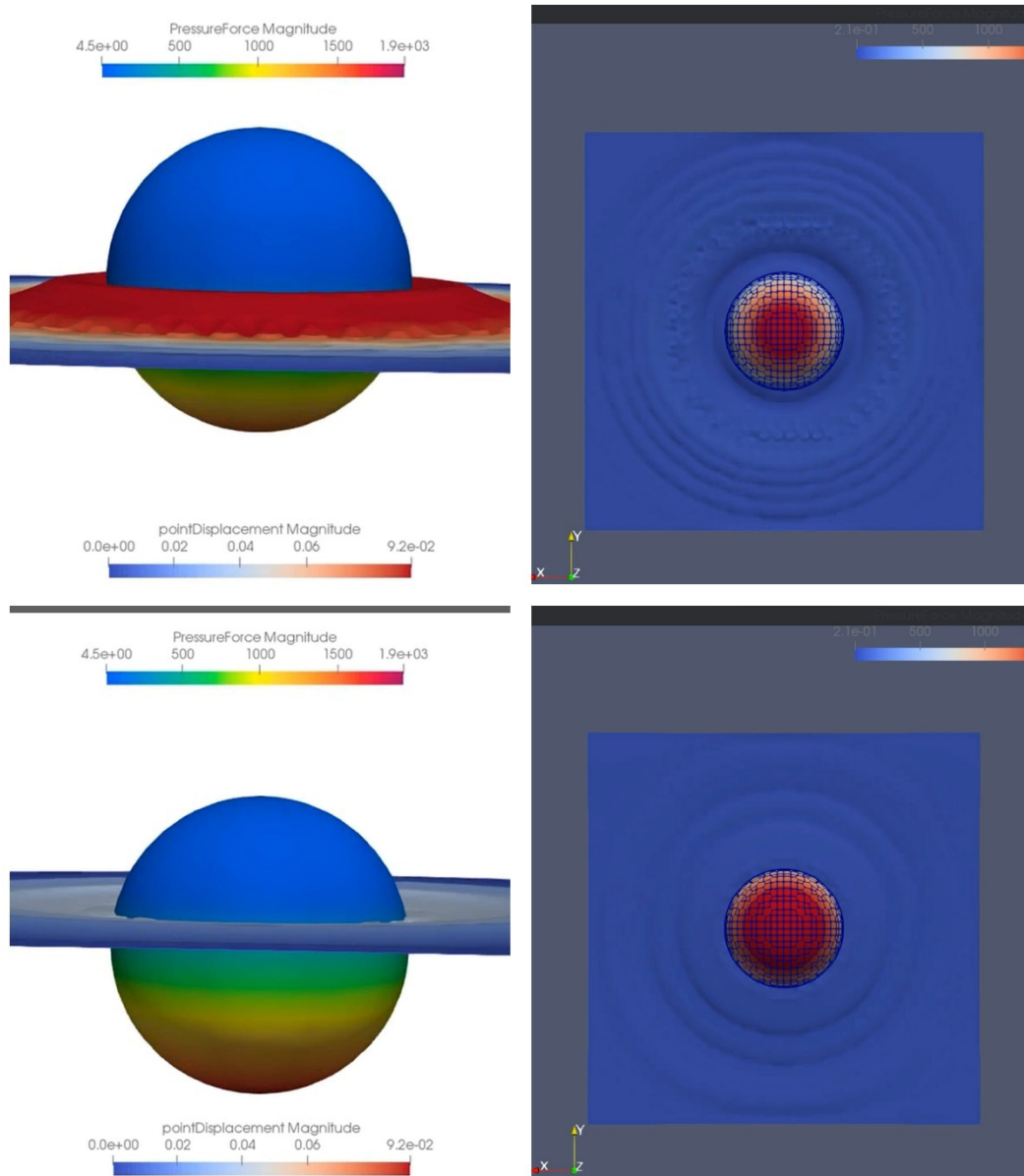
En la Tabla 3.2 se obtuvo una diferencia del 0.4%, dando validación a los resultados obtenidos por el método numérico, y credibilidad a la malla utilizada, la cual, como se mostró en la Figura 3.1 consta de 53.751 elementos, los cuales fueron suficientes para el dominio utilizado en esta prueba.

**Tabla 3.2 Comparación de resultados del experimento de decremento logarítmico**

	<b>Experimental</b>	<b>OpenFOAM</b>	<b>Diferencia en %</b>
$\omega_n(\text{rad/s})$	8.27	7.85	5%
$\theta$	0.1301	0.1295	0.4%



**Figura 3.5 Fuerza ejercida por la presión durante un período (Vista frontal y vista del fondo) –  $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$**



**Figura 3.6 Fuerza ejercida por la presión durante un período de ola (Vista frontal y vista del fondo) –  $t=3T/4$ ,  $t=T$**

En la Figura 3.5 y la Figura 3.6 se pueden apreciar las vistas frontales y del fondo de la boya, en dónde la fuerza se concentra en el punto más bajo del modelo, hasta que sale del agua después de la primera oscilación. En las direcciones de X y Y las fuerzas son despreciables, dando un máximo de 0.0004 N y 0.02 N respectivamente.

En resumen, las fuerzas positivas que actúan sobre la esfera dominan en función de la influencia de la boyantes y la gravedad.

## **3.2 Análisis del modelo en olas regulares**

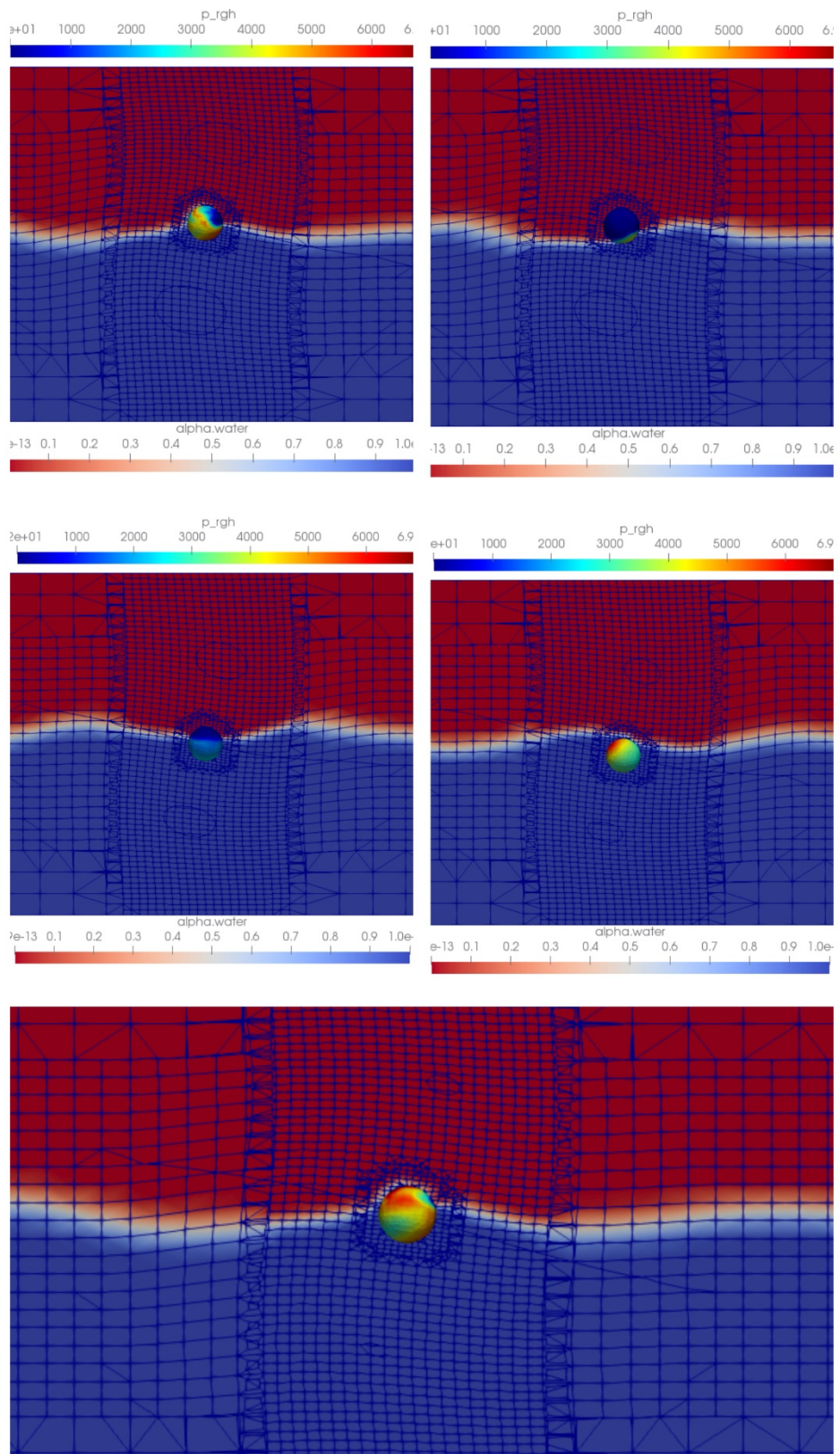
En esta sección se analizarán los resultados obtenidos de 4 simulaciones de la boya sometida a olas regulares considerando diferentes períodos, en cada una de ellas. Estas simulaciones fueron realizadas para determinar la respuesta que produjeron la excitación de las olas en el modelo, con períodos de 2, 4, 6 y 8 segundos. Además, se obtuvo que la frecuencia natural de la esfera es de 3.4 rad/s, utilizando el análisis dimensional mencionado en la sección 2.3.

### **3.2.1 Período de 2 segundos**

En la Figura 3.7 se muestra la distribución de presión dinámica a la cual estaba sometida la boya a diferentes instantes de tiempo. En donde se puede apreciar que, en el punto más alto de la respuesta vertical de la boya, fue casi el punto más bajo de elevación de la ola, es decir, dada la alta frecuencia de la ola se desfasó casi una oscilación a la frecuencia natural de la boya de 3.4 rad/s. Debido a esto, se alcanzó los valores más altos de presión dinámica cuando la esfera estuvo en la posición más baja, tal y como se aprecia en el instante de tiempo,  $t=3T/4$  de la Figura 3.7.

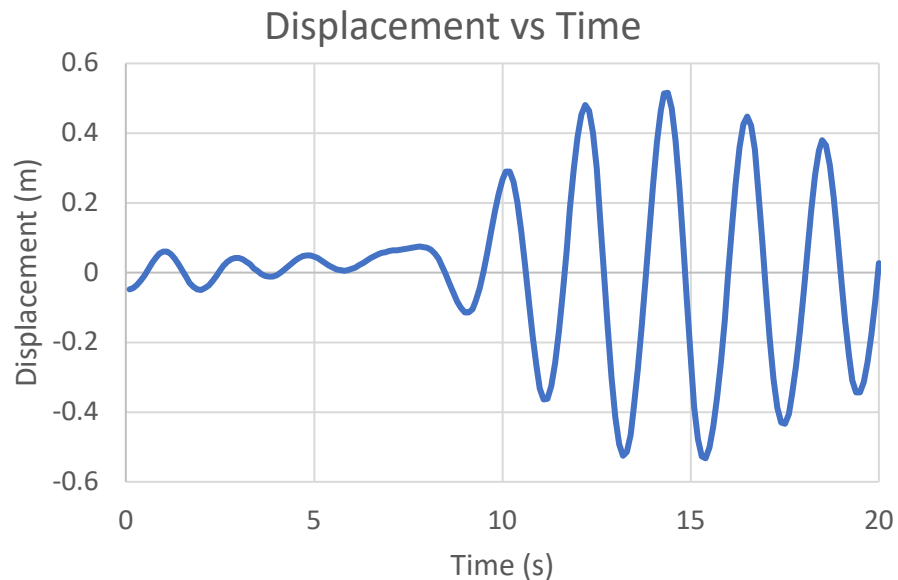
Se aprecia que los puntos de presión dinámica dónde se concentraba la fuerza fue en los laterales de la boya, dada la fuerza horizontal que ejercen las olas incidentes. Por lo tanto, a medida que la ola se iba aproximando a la boya, la presión dinámica fue aumentando progresivamente hasta llegar a su valor máximo de 6900 Pa.





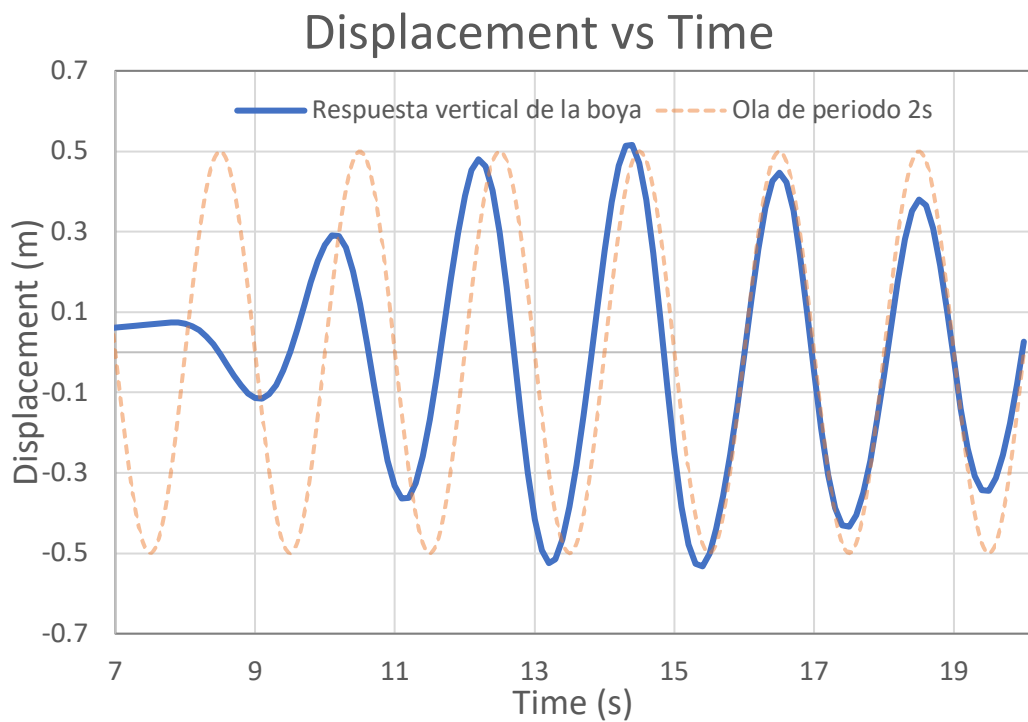
**Figura 3.7** Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=2s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 6m$ ) –  $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$ ,  $t=3T/4$ ,  $t=T$

Por ello, cabe recalcar que el desfase entre la esfera y las olas es debido a la diferencia entre ambas frecuencias. Esto se lo puede asociar con los resultados de desplazamiento vertical del centro de gravedad de la boya mostrados en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Desplazamiento vertical ( $T=2s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 6m$ )**

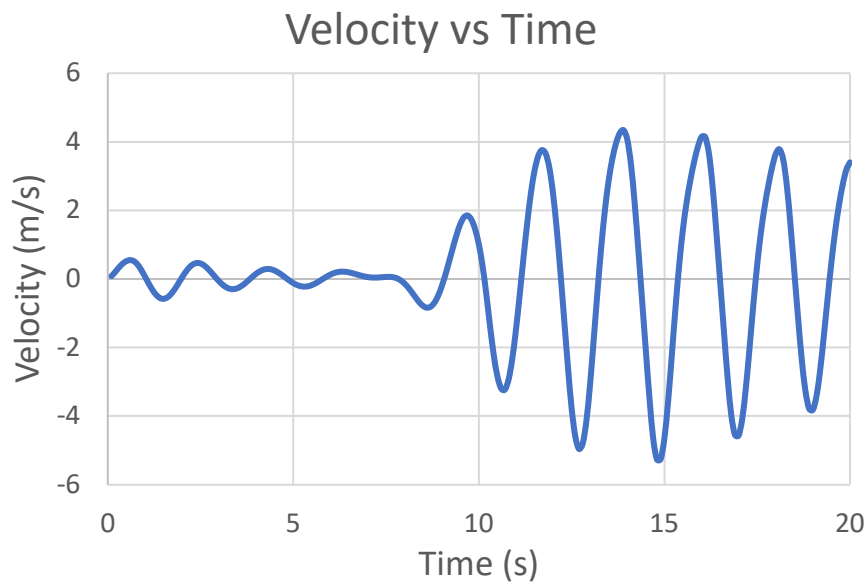
En esta figura se muestra que se alcanzó una máxima elevación de 0.52 m, demostrando que se elevó sobre la superficie del agua por 0.02 m, dado que la amplitud máxima de la ola es de 0.5 m, esto fue ocasionado debido a la alta frecuencia de la ola. No obstante, este desfase solo ocurrió al inicio de la simulación, tal y como se demuestra en la Figura 3.9, además, éste gráfico se sobrepuso con la ola sinusoidal de período de 2 segundos, utilizando la ecuación de la ola.



**Figura 3.9 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 2s**

Además, después del instante de tiempo de 15 segundos, el desplazamiento vertical de la boya disminuyó, esto quiere decir que la simulación no tuvo el tiempo suficiente para alcanzar convergencia. Asimismo, la alta frecuencia de la ola y su alta pendiente en cada oscilación ocasionó que la esfera tenga un movimiento de alta rapidez a lo largo del tiempo.

En la Figura 3.10 es presentado el gráfico de la velocidad vertical de la boya con estas condiciones de oleaje. Se puede observar que existen velocidades positivas son menores que las negativas, esto es por la influencia de la energía potencial que está ganando al caer, es decir, dada la aceleración de la gravedad, aumenta progresivamente la velocidad de caída de la boya, porque, como se mencionó antes, esta sale del agua.



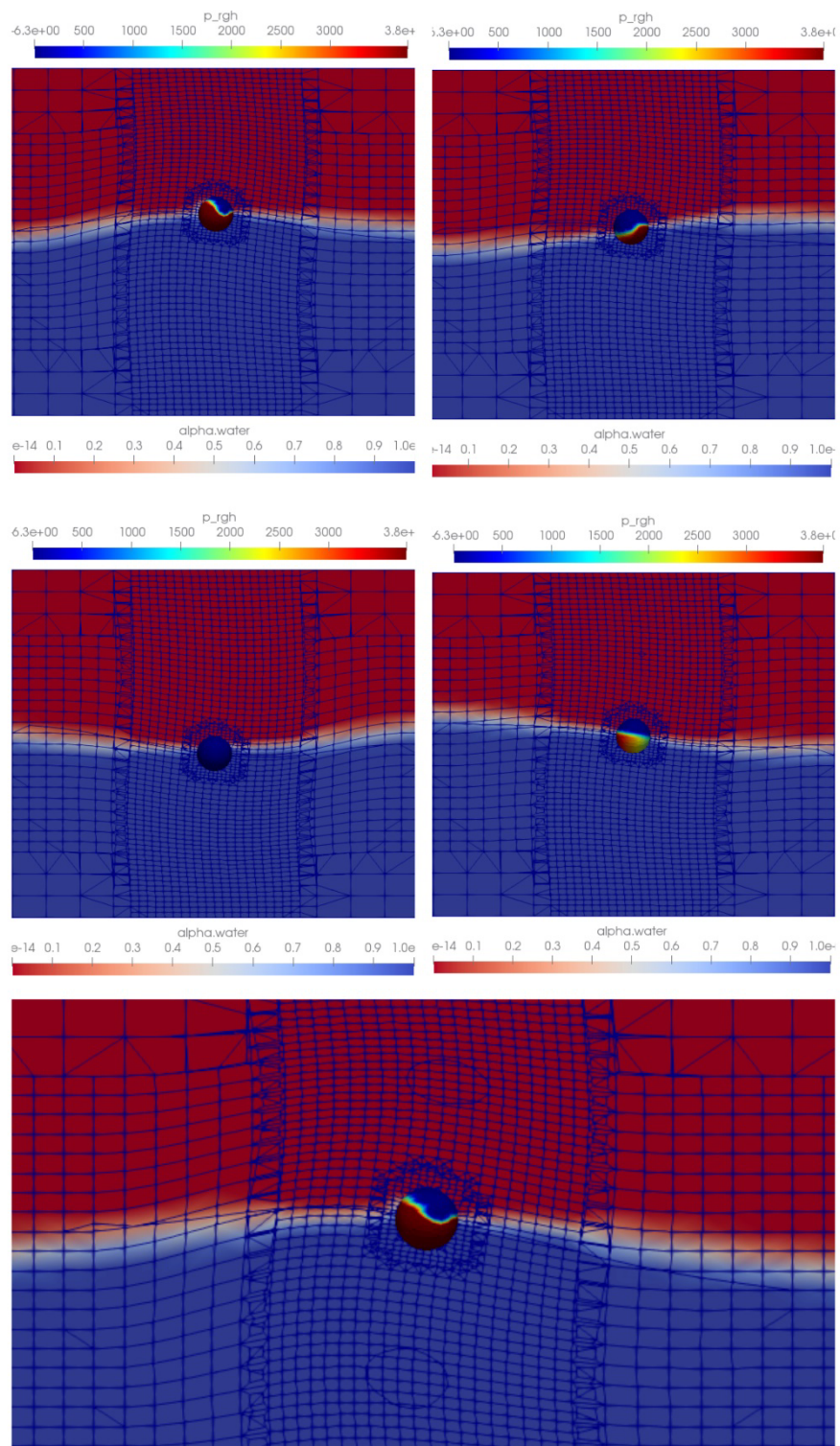
**Figura 3.10 Velocidad en la dirección Z ( $T=2s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 6m$ )**

Además, así como el desplazamiento, muestra zonas de alta pendiente en cada oscilación debido al corto periodo que existe en las olas entrantes. Finalmente, cabe recalcar que la generación de olas para esta simulación comenzó desde los 8 segundos, esto se debe a un error en el preprocesamiento.

### 3.2.2 Período de 4 segundos

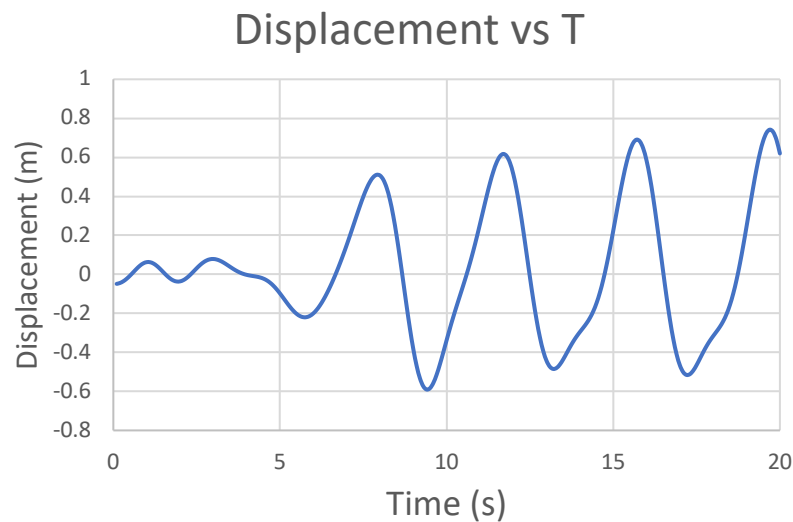
En la Figura 3.11 se presentan los resultados de la distribución de la presión dinámica en la boya, tal y como se lo hizo en la sección anterior. En la cual, a diferencia de las olas con período de 2 segundos, se observa que hubo mayor presión dinámica en el punto más alto de la elevación de la ola, y así, a medida que va entrando la ola en el frente de la esfera, la presión dinámica ejercida está disminuyendo progresivamente. Alcanzando una presión dinámica máxima de 3800 Pa.

Por otra parte, se encontró que el movimiento de la boya estuvo acorde a la elevación de la ola, esto se debe a que la frecuencia de la ola disminuyó. Alcanzando así, la resonancia entre la frecuencia de la esfera y la de las olas entrantes.



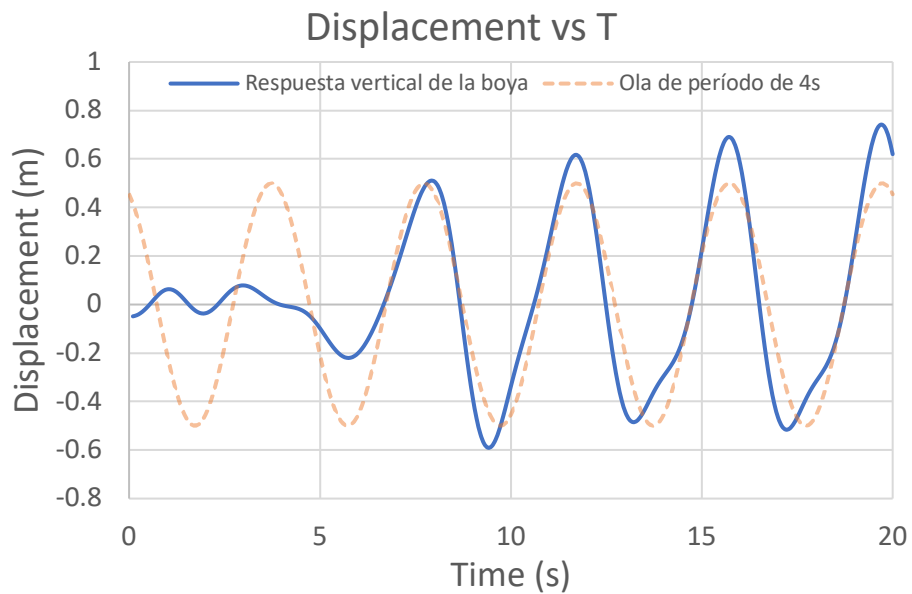
**Figura 3.11** Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=4s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 25m$ ) –  $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$ ,  $t=3T/4$ ,  $t=T$

Para el instante de tiempo  $t=3T/4$  en la Figura 3.11, dónde la boya se encontró en el valle de la ola, se observó que la presión es menor, lo que quiere decir que en esos instantes de tiempo las olas entrantes se mantuvieron al mínimo en magnitud. Tal y como se observa, en la Figura 3.12 la boya se mantuvo un instante de tiempo más largo que el anterior caso en lo alto de la cresta de la ola, tal y como se esperaba.



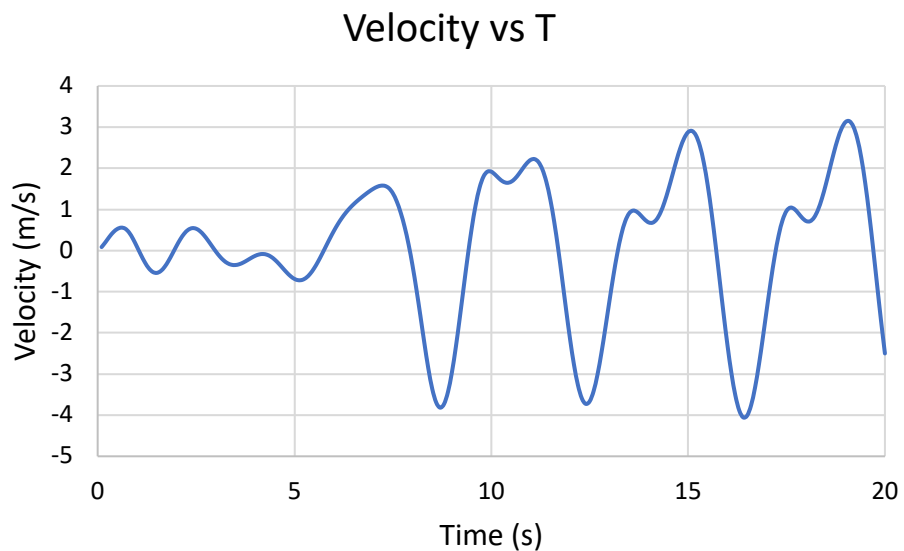
**Figura 3.12 Desplazamiento vertical ( $T=4s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 25m$ )**

Sin embargo, obtuvo la mayor respuesta vertical de entre todas las simulaciones de 0.72 m, es decir, el sistema encontró una frecuencia cercana a la resonancia; asimismo, desde la segunda oscilación se estabilizó, obteniendo una mayor uniformidad con el movimiento de las olas de 4s, tal y como se muestra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 4s**

En la Figura 3.14 se adjunta la velocidad vertical que tuvo el modelo en estas condiciones, donde se aprecia que la ola logra estabilizarse en la tercera y cuarta oscilación.



**Figura 3.14 Velocidad en la dirección Z ( $T=4s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 25m$ )**

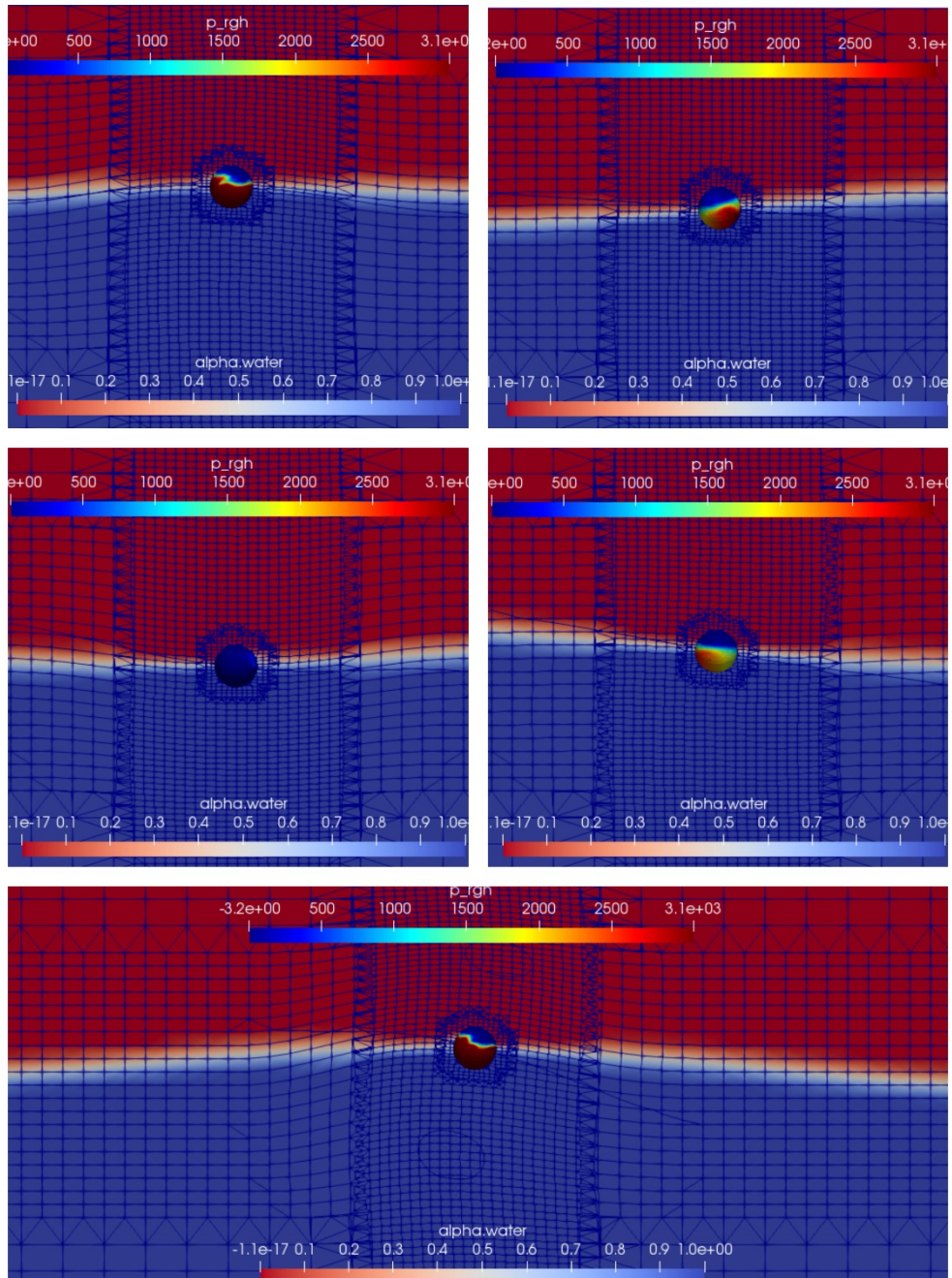
Así como el anterior caso, dado los efectos de la gravedad, la velocidad de caída logra ser mayor que la positiva en ordenes de magnitud. La velocidad logra

distorsionarse debido a que la frecuencia de la ola disminuyó, es decir, existen otros efectos físicos en la ola que causaron esa “joroba” en el gráfico antes de que alcance su velocidad máxima.

### **3.2.3 Período de 6 segundos**

En la Figura 3.15 se presentan los resultados de la distribución de la presión dinámica en la boya, dado que la frecuencia disminuyó las fuerzas dinámicas de las olas entrantes fueron menores, con una presión máxima de 3100 Pa. Mostrando un comportamiento similar a las anteriores simulaciones, con la diferencia existieron mayores instantes de tiempo dónde las fuerzas actuantes se mantuvieron a un mínimo 480 Pa.

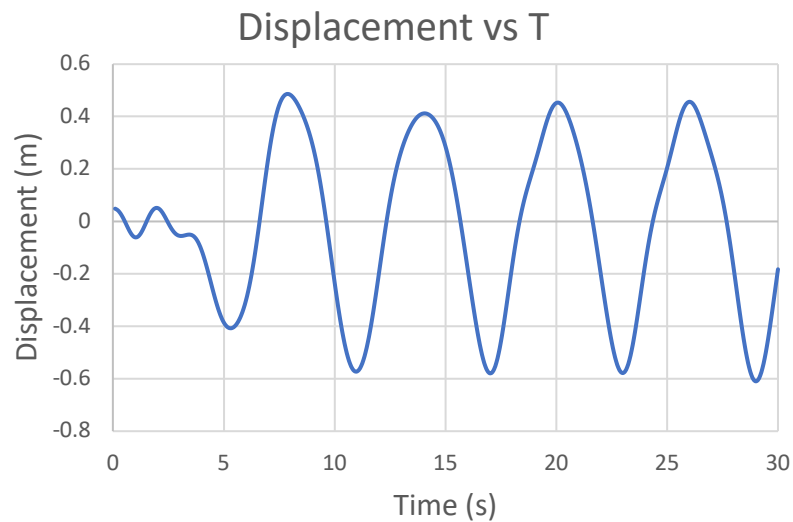




**Figura 3.15 Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=6s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 56m$ ) –  $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$ ,  $t=3T/4$ ,  $t=T$**

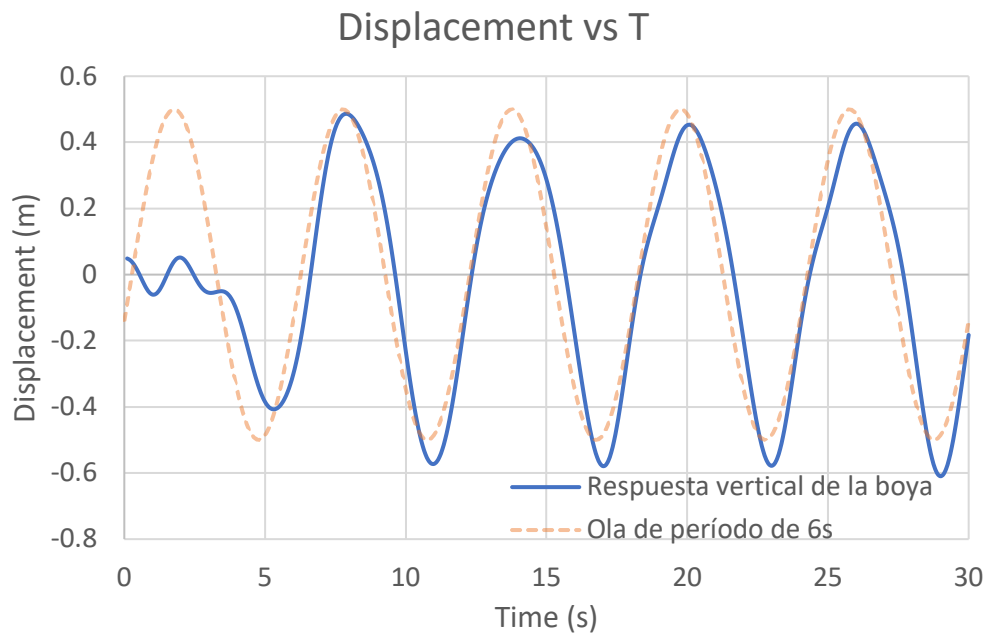
Por tanto, la variación de la boyantes en la esfera no varió mucho, debido a que el cuerpo no se sumergió tanto como en los anteriores casos, que es cuando la mitad de la boya sumergida permanece descansando durante un mayor tiempo de ola.

En la Figura 3.16 la ola entrante de 6 segundos alcanzó la estabilización desde la primera oscilación, esto se reflejó en el movimiento uniforme que tiene la boya. En la simulación se determinó que tu máxima respuesta fue de 0.49 m, cuyo valor se aproxima casi al de la amplitud de la ola, de 0.5 m, esto ocurre por la uniformidad del movimiento de la esfera junto con la ola.



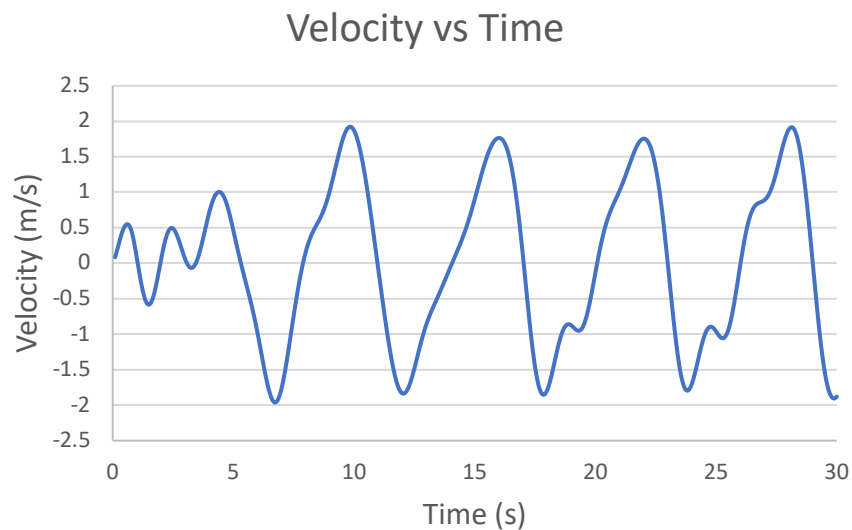
**Figura 3.16 Desplazamiento vertical ( $T=6s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 56m$ )**

La curvatura del movimiento es menos pronunciada que en los anteriores casos, es decir, la boya se mantuvo en la cresta superior de la ola durante un período de tiempo más largo debido a la baja frecuencia, ver Figura 3.17.



**Figura 3.17 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 6s**

En la Figura 3.18 muestra los resultados de la velocidad vertical de la boya, en donde dada su uniformidad, en las primeras dos oscilaciones no muestra ningún tipo de distorsión, sin embargo, en la tercera y cuarta oscilación hay diferentes pérdidas de velocidad al momento en que la boya está subiendo por la cresta de la ola hasta caer uniformemente.

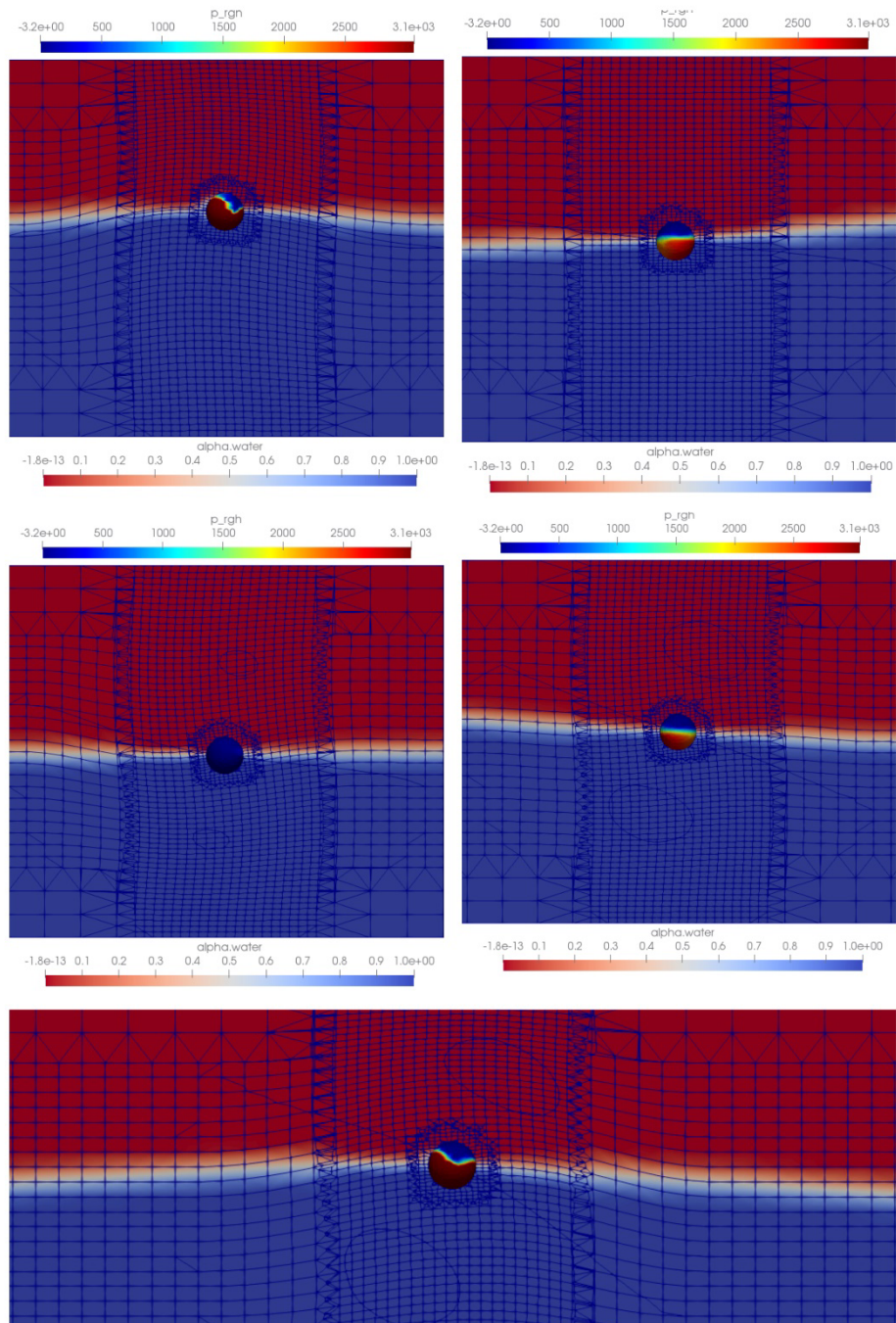


**Figura 3.18 Velocidad en la dirección Z ( $T=6s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 56m$ )**

La velocidad en la esfera disminuyó hasta casi 2 m/s en comparación a los anteriores casos. Esto ocurre porque al aumentar el período de ola, disminuye la frecuencia de esta, ocasionando una menor velocidad en el movimiento del cuerpo. Sin embargo, este sube con mayor uniformidad que los otros casos, esto se puede apreciar en el punto más alto de la cresta del gráfico hasta el punto más bajo.

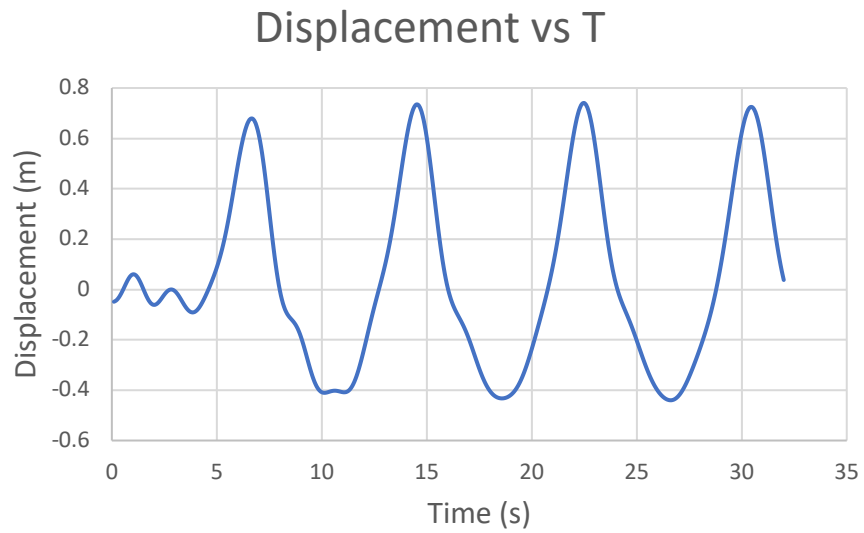
#### **3.2.4 Período de 8 segundos**

En la Figura 3.19 los resultados de la distribución de presión dinámica de la simulación de 8 segundos son presentados. Donde al aumentar el período de la ola, la presión máxima disminuyó hasta un total de 3000 Pa, manteniendo durante un período de tiempo más largo a una presión mínima de 400Pa a la boya. En la Figura 3.19 en los tiempos  $t=0$  y  $t=T$ , se observa como las fuerzas dinámicas sumergen la esfera casi por completo, esto es porque recibe mayor volumen de agua proveniente de las olas entrantes por un intervalo de tiempo superior a los anteriores casos.



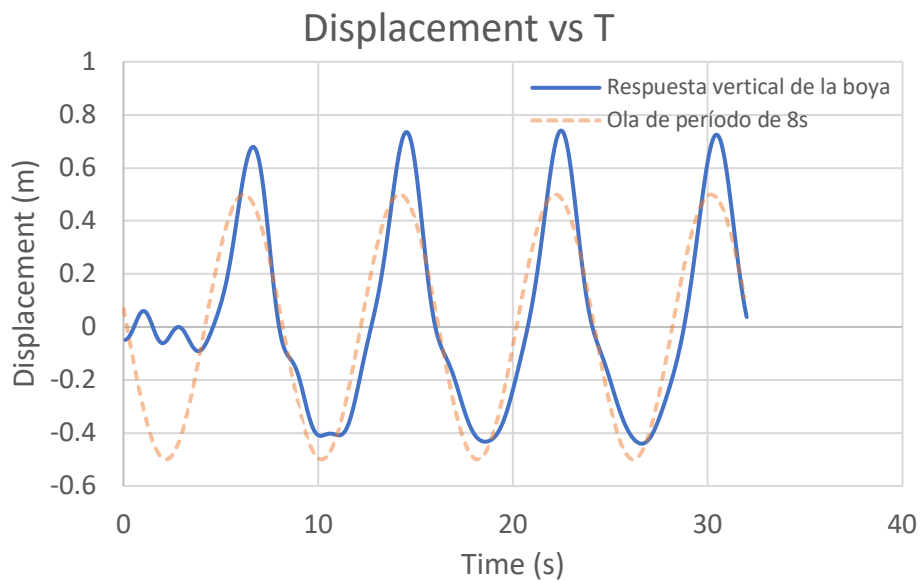
**Figura 3.19** Distribución de presión dinámica durante un período de ola ( $T=8s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 100m$ ) –  $t=0$ ,  $t=T/4$ ,  $t=T/2$ ,  $t=3T/4$ ,  $t=T$

La Figura 3.20 dónde se presenta el desplazamiento vertical de la esfera, muestra una uniformidad acorde a las olas entrantes, tal y como se obtuvo en el caso anterior.



**Figura 3.20 Desplazamiento vertical ( $T=8s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 100m$ )**

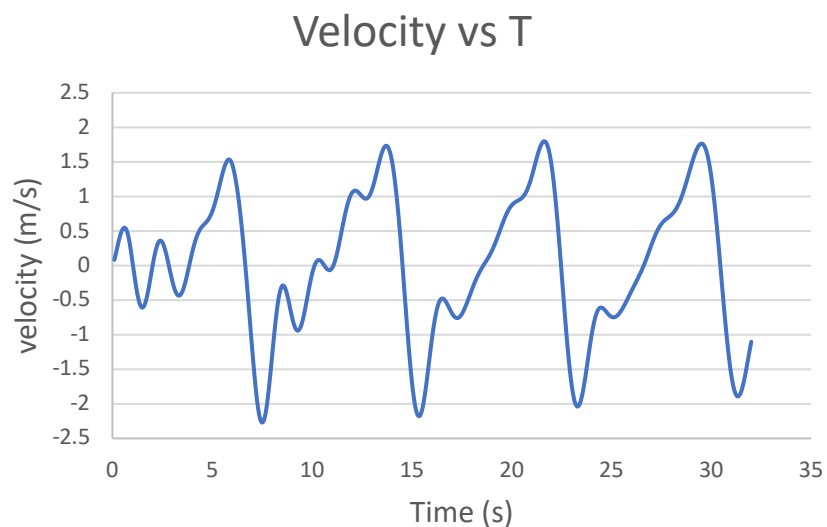
Sin embargo, la boya permaneció por un mayor período de tiempo en la cresta inferior de la ola que en la superior, esto es ocasionado porque al momento en que el cuerpo se elevó las fuerzas hidrodinámicas lo sumergieron casi al instante, y, al bajar por la cresta de la ola permanece casi en estable por un instante de tiempo mayor que en los otros casos, tal y como se observa en la...



**Figura 3.21 Respuesta vertical de la boya sobrepuesta en la ola de 8s**

En la Figura 3.22 la velocidad obtenida en la simulación de 8 segundos de período muestra una gran variabilidad al momento en que la boya está bajando por la cresta de la ola. Así como se mostró en la Figura 3.19 fuerzas hidrodinámicas actuando sobre la boya al momento que atraviesa la ola, generan estas alteraciones en la velocidad cuando está cayendo.

Ahora bien, cuando el cuerpo sube por la ola, se muestra una velocidad uniforme, esto ocurre debido al largo período, y se puede apreciar en el punto más alto de la primera oscilación de la Figura 3.22 hasta el punto más bajo.



**Figura 3.22 Velocidad en la dirección Z ( $T=8s$ ,  $H_s=1m$ ,  $\lambda= 100m$ )**

### 3.2.5 Resumen de resultados y comparación

En esta sección se procederá a hacer una comparación entre resultados obtenidos en la simulación y los obtenidos analíticamente, mediante el proceso explicado en la literatura de Bhattacharyya, capítulo 4 [35]. Donde la respuesta vertical fue obtenida mediante la resolución de la ecuación de movimiento, adjunta en el apéndice B, sección 4.4 (7).

Se compararán los resultados de la respuesta vertical del modelo esférico y la sumatoria de todas las fuerzas actuantes sobre el mismo en las 4 corridas que se realizaron; además, se calculó la diferencia porcentual entre ambos procesos.

Los resultados numéricos mostrados en la Tabla 3.3, fueron obtenidos seleccionando la máxima amplitud obtenida para cada simulación [50].

**Tabla 3.3 Comparación de la respuesta vertical**

<b>Respuesta vertical (m)</b>				
<b>T (s)</b>	<b>Frecuencia amortiguada (rad/s)</b>	<b>Analítico (Bhattacharyya)</b>	<b>Numérico</b>	<b>Diferencia</b>
2	1.38	0.66	0.52	21%
4	1.34	0.68	0.74	8%
6	1.23	0.47	0.49	3%
8	1.18	0.32	0.45	30%

En la Tabla 3.3 se realizó la comparación de la respuesta vertical de ambos métodos, como se mencionó en la sección 3.2.2, la resonancia se encontró a este período, alcanzando una mayor respuesta vertical por parte de la boya. Dado que analíticamente se determinó que la frecuencia natural del modelo es de 1.34 rad/s y la de la simulación en estas condiciones es de 1.52 rad/s.

Las diferencias porcentuales entre las respuestas verticales son críticos para los períodos, de 2 y 8 segundos, con una diferencia del 21% y 30% respectivamente. Para el primer caso, la alta frecuencia de ocurrencia en la ola entrante ocasionó que la boya se eleve casi sobre la superficie del agua, lo cual no ocurre en el caso analítico. Mientras que, para el segundo el gran volumen que sumergía a la boya hizo que alcanzara elevaciones mayores en un instante de tiempo menor. Numéricamente se determinó la presión hidrostática e hidrodinámica que entregaba el sistema, y luego, mediante el proceso sección 2.1.3 del capítulo de Metodología, se calculó la fuerza vertical que actuaba en la esfera.

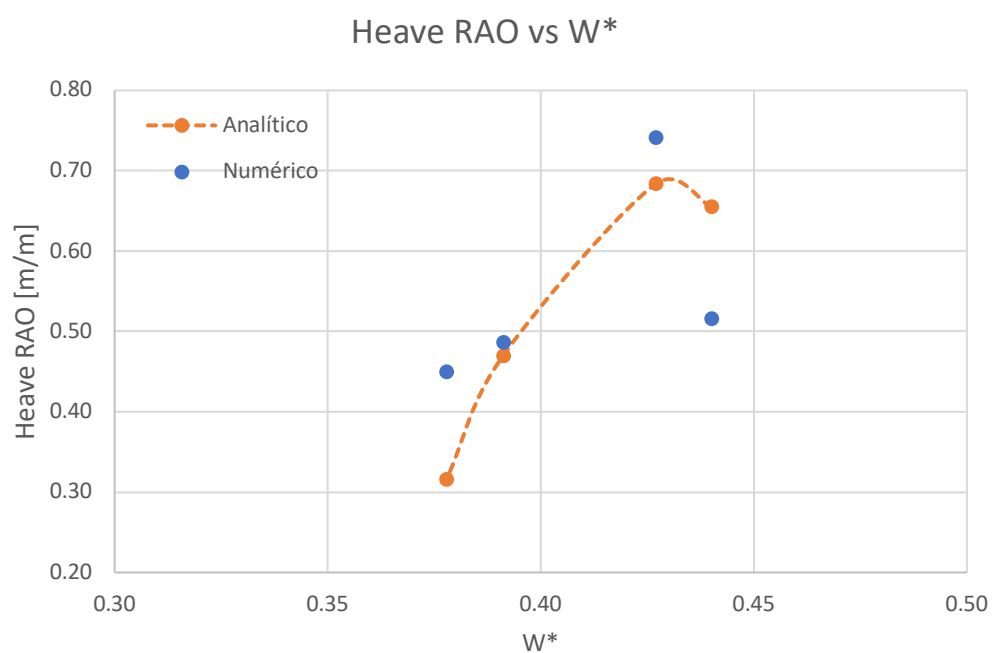
**Tabla 3.4 Comparación de la fuerza vertical**

<b>Fuerza vertical (N)</b>				
<b>T (s)</b>	<b>Frecuencia amortiguada (rad/s)</b>	<b>Analítico (Bhattacharyya)</b>	<b>Numérico</b>	<b>Diferencia</b>
2	1.38	7878.92	7945.60	1%
4	1.34	9420.86	9820.47	4%
6	1.23	8478.89	9047.10	6%
8	1.18	8554.37	8763.80	2%



La sumatoria de las fuerzas que actuaban en el movimiento de la boya son mostrados en la Tabla 3.4. Comparación de la fuerza vertical entre las cuales fueron incluidas: la fuerza inercial, la cual incluye la masa virtual del cuerpo; la fuerza amortiguadora, la cual se resiste al movimiento; la fuerza restauradora, la encargada de llevar al cuerpo de vuelta al equilibrio; y la fuerza excitadora, que es la fuerza de encuentro entre la ola y la masa del cuerpo, esta ecuación se la encuentra en el apéndice B sección 4.4. Obteniendo diferencias porcentuales relativamente bajas, dada la cantidad de consideraciones que se tomaron al momento de calcular las fuerzas actuantes.

Por otra parte, con ayuda de estos resultados se determinó el RAO, el cual, tal y como se muestra en Figura 3.23, indican que, para el período de ola de 4 segundos ( $W^* = 0.43$ ), la respuesta vertical de la esfera mejora significativamente. Idealmente un dispositivo convertidor de energía de olas debe ser diseñado para tener una frecuencia natural cerca de la frecuencia de ola más común en el área de implementación.



**Figura 3.23 Comparación del RAO**

Desafortunadamente, como se mencionó en la sección 1.5, la mayor ocurrencia entre las simulaciones realizadas es a un período de 6 segundos para el estado de mar de las Islas Galápagos, se deben realizar modificaciones en las dimensiones y la geometría del modelo esférico.

### 3.3 Potencia absorbida

Para cuantificar la potencia absorbida se graficó mediante el uso de las bibliotecas Matplotlib y Seaborn, se obtuvo el siguiente diagrama de calor mostrado en la Figura 3.24. El cuál representa la misma zona que se ilustra en la Figura 1.11. Además, las zonas en dónde la probabilidad de ocurrencia era prácticamente 0% fueron descartadas, por ello en la ilustración hay zonas en blanco. Haciendo uso de la ecuación (6), se calcula la  $P_{wec}$ , la cual es representada como un DataFrame. Posterior a ello se obtiene la matriz de potencia utilizando un código de Python, especificado en el apéndice D.

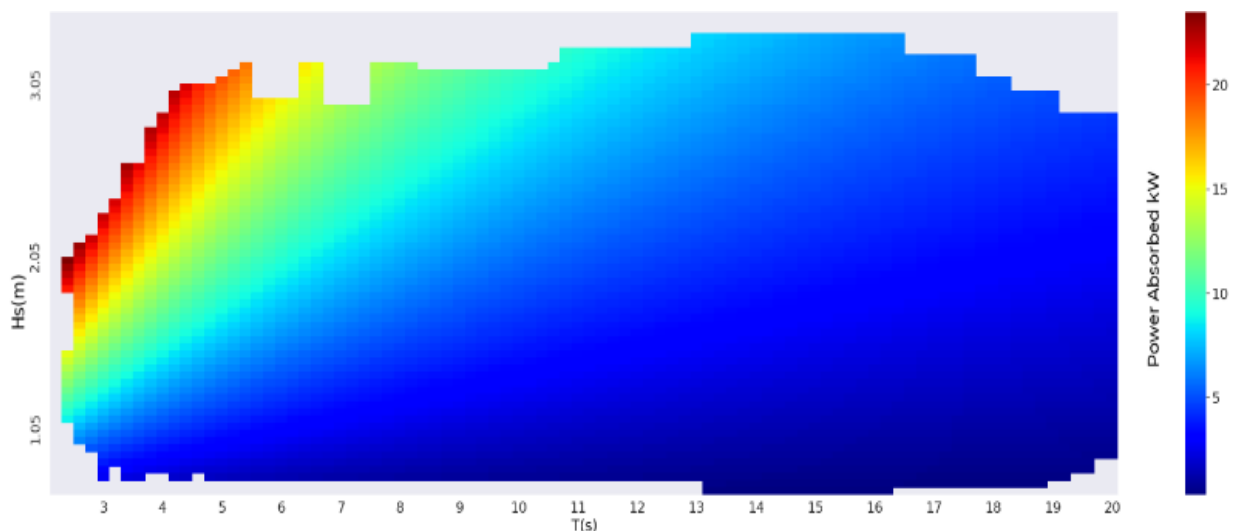
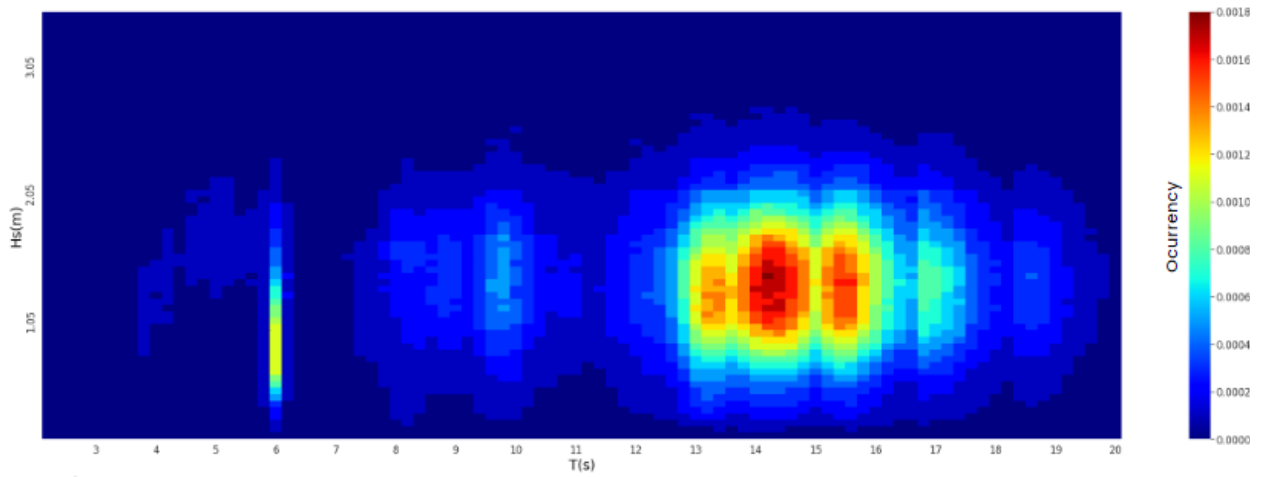


Figura 3.24 Matriz de potencia (Fuente: Matplotlib)

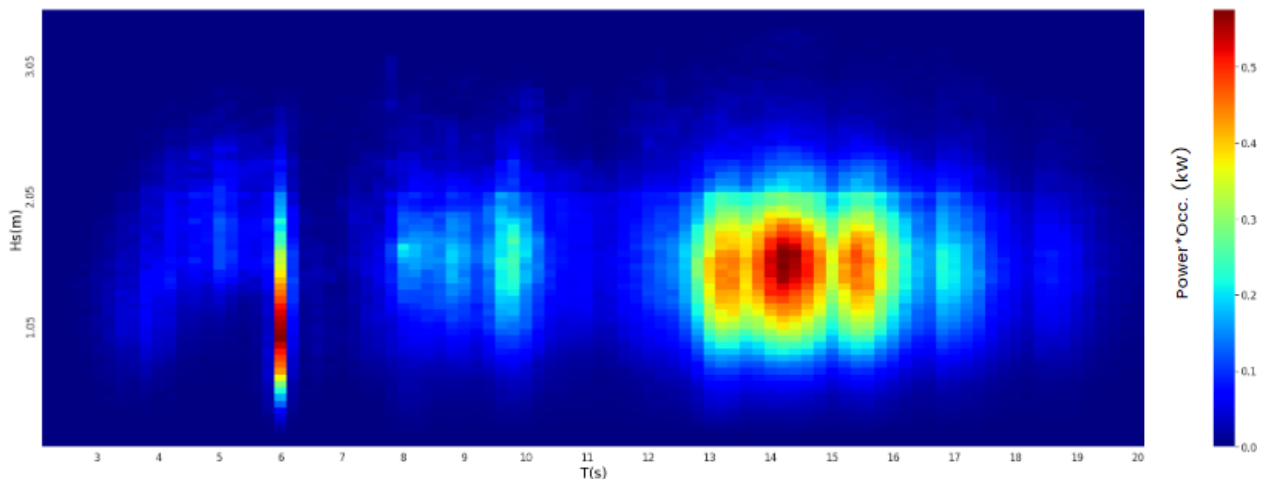
Luego, se obtuvo la información de la Figura 1.11, en forma matricial, y fue ploteada de la misma manera, tal y como se muestra a continuación en la Figura 3.25:



**Figura 3.25 Base de datos del estado de mar en las Galápagos en forma matricial**

$$Total\ Pabs = \sum P_{wec} * occ \quad (27)$$

Realizando la sumatoria de la expresión (27), se obtuvo una potencia total absorbida de 10.2 kW por dispositivo, lo que anualmente equivale a 89.3 MWh, el producto de ambas matrices se observa en la Figura 3.26.



**Figura 3.26 Producto entre la potencia absorbida y la ocurrencia**

Por lo tanto, se necesitarán aproximadamente un parque de 20 dispositivos, los cuales producirán un total de 1.8 GWh para abastecer con el 25% de los 7.3 GWh que se producen anualmente en la isla Isabela [3].

### **3.4 Análisis económico**

En esta sección se requiere definir una secuencia de actividades, definiendo el proyecto por fases, y así obtener una estimación económica para el proyecto del parque undimotriz.

#### **3.4.1 Fase preliminar**

En esta fase se consideró que para el funcionamiento del dispositivo convertidor de olas con un mecanismo de punto absorbedor debe ser revisado, para su adaptación a las condiciones climáticas de la región Insular, determinando su dimensionamiento óptimo y maximizar su eficiencia. En donde se distinguen las siguientes actividades:

- Construcción de modelos a escala
- Pruebas en el tanque de olas
- Evaluación mecánica, eléctrica y estructural
- Diseño final

Además, se consideraron estudios complementarios del sitio, dónde se estimó el comportamiento de las características climáticas en las Islas Galápagos, para ello se requiere medir dichas características, mediante las siguientes actividades:

- Estudio de batimetría
- Evaluación de corrientes
- Evaluación de oleaje
- Diseño eléctrico

Se presenta el presupuesto en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Presupuesto de estudios preliminares, año cero**

<b>Estudios prel. de prototipo</b>	
Cons. Modelos a escala (1/25-1/10-1/2)	\$ 70,700.00
Pruebas en tanque de olas	\$ 50,000.00
Evaluación constructiva	\$ 15,000.00
Subtotal	\$ 135,700.00
<b>Estudios prel. En sitio</b>	
Batimetría	\$ 20,000.00
Evaluación de corrientes	\$ 15,000.00
Evaluación de oleaje	\$ 15,000.00
Diseño eléctrico	\$ 10,000.00
Subtotal	\$ 60,000.00

### **3.4.2 Fase de construcción e instalación**

En esta fase se consideraron las fundaciones de la empresa COPCI, Construcciones Portuarias y Cimentaciones, las cuales ejecutan las siguientes actividades:

- Soldadura en tierra para la tubería
- Instalación del cuerpo flotador
- Instalación de central de transformación de energía
- Instalación de central de transformación de energía
- Recubrimiento epóxico anticorrosivo en la estructura

Se presentan los presupuestos por fabricación y construcción en la Tabla 3.6 y en la Tabla 3.7 respectivamente:

**Tabla 3.6 Presupuesto de Fabricación y Suministros, año cero**

<b>Fabricación</b>	
Ensamblaje electromecánico	\$ 400,000.00
Cuerpo Flotador	\$ 200,000.00
Coraza metálica	\$ 100,000.00
Central de transformación	\$ 30,000.00
Pintura con aditivo epóxico anticorrosivo	\$ 50,000.00
Subtotal	\$ 780,000.00
Suministros de equipos para transformación de energía	
Transformador	\$ 25,000.00
Equipos varios	\$ 20,000.00
Subtotal	\$ 45,000.00
Suministros de tubería para colocación de convertidores	
Tubería de aprox 1000-1200m	\$ 840,000.00
Subtotal	\$ 840,000.00

**Tabla 3.7 Presupuesto de construcción e instalación en mar**

<b>Construcción e Instalación en mar</b>	
Almacenamiento y soldadura	\$ 100,000.00
Transporte de tubería y convertidor	\$ 120,000.00
Instalación de tubería, convertidor y central de transformación	\$ 1,120,000.00
Subtotal 3	\$ 1,340,000.00

### 3.4.3 Mantenimiento menor

En esta sección refiere a un mantenimiento menor anual a cada convertidor en su sistema eléctrico y en la estructura, por prevención.

Se presenta el presupuesto en la Tabla 3.8:

**Tabla 3.8 Mantenimiento menor, año uno**

<b>Mantenimiento menor (Cada año)</b>	
Mantenimiento mecánico y estructural	\$ 8,000.00
Mantenimiento eléctrico	\$ 20,000.00
Mantenimiento de transformador	\$ 2,000.00
Subtotal	\$ 30,000.00

### 3.4.4 Mantenimiento mayor (cada 5 años)

Este mantenimiento es de carácter estructural principalmente, en dónde se rehabilitan o refuerzan los elementos de la estructura.

Se presenta el presupuesto en la Tabla 3.9:

**Tabla 3.9 Mantenimiento mayor, año cinco**

<b>Mantenimiento mayor (Cada 5 años)</b>	
Eliminación de bioma marina	\$ 20,000.00
Pintura epóxica	\$ 10,000.00
Trabajos de soldadura	\$ 40,000.00
Subtotal	\$ 70,000.00

### 3.4.5 Inversión inicial

La inversión inicial se la divide en tres partes, con un total de \$3,200,700 como se aprecia en la Tabla 3.10:

**Tabla 3.10 Inversión inicial**

<b>Inversión Inicial</b>	
Estudios preliminares	\$ 195,700.00
Fabricación y Suministros	\$ 1,665,000.00
Construcción e Instalación en mar y tierra	\$ 1,340,000.00
TOTAL	\$ 3,200,700.00

En la tabla de amortización se observa un período de retorno de 13 años aproximadamente, adjuntada en el apéndice D.

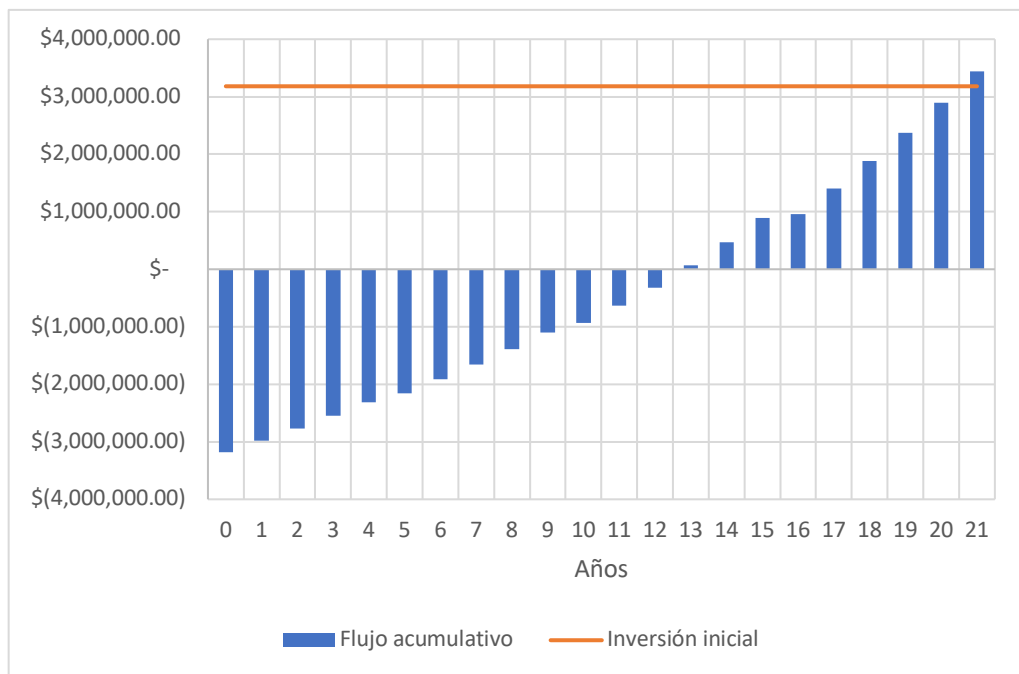
### 3.4.6 Punto de equilibrio

Bajo el esquema de ingresos menos los gastos, se observa que el retorno de la inversión se dio en 13 años. Considerando un abono mensual de \$32,458.25 a un precio de \$0.45/kW. En resumen, los resultados se adjuntan en la Tabla 3.11:

**Tabla 3.11 Resumen de gastos e ingresos**

<b>Resumen (155 meses)</b>	
Gastos totales	\$ 3,968,547.87
Ingresos totales	\$ 5,031,028.75

Y finalmente, se determinó el flujo acumulativo para estimar en cuántos años se iba a recuperar la inversión inicial, dando un total de 21 años de recuperación para la inversión inicial, tal y como se muestra en la Figura 3.27:



**Figura 3.27 Flujo acumulativo para la recuperación de la inversión inicial**



# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Las condiciones de oleaje frente a las costas de la Isla Isabela son muy favorables para la generación de energía, dado que no solamente presentan una alta densidad energética, sino que su variabilidad es relativamente baja. Implicando que la posibilidad de conversión de energía de las olas entrantes, suponen un nivel bajo de riesgo para los WEC, obteniendo una alta eficiencia y factores de capacidad. Además, los dos casos que dominan debido a su alta probabilidad de ocurrencia son las olas con un período de 6 segundos, y de 11 hasta 14 segundos, con una altura significativa de 1 a 2 metros.
- Los resultados numéricos obtenidos mediante OpenFOAM demuestran la efectividad de esta herramienta para evaluar el rendimiento de convertidores de energía a nivel de diseño inicial. Por otra parte, los resultados muestran que la respuesta vertical de la esfera depende del período de ola y su amplitud. Se estimó que la frecuencia natural del dispositivo es de 3.4 segundos, y un coeficiente de amortiguamiento de 0.13. Además, el proyecto demuestra que para el diseño apropiado del WEC se debe considerar al área de implementación, para asegurar que las dimensiones son apropiadas para su óptimo desempeño.
- Se verificaron las simulaciones numéricas mediante resultados analíticos obtenidos en la literatura de Bhattacharyya, mostrando una incertidumbre menor al 5% en algunos casos, encontrando un rango de validación alto. A pesar de ello, se determinó un 20% diferencia para los períodos de 2 y 8 segundos de ola, requiriendo así, una refinación en la malla en la zona de entrada y salida de las olas entrantes.
- Se estimó que el dispositivo puede generar 89.3 MWh al año, y si se considera que en el 2018 se consumió un total de 7.2 GWh en la isla Isabela, se necesitan 20 de estos dispositivos para contribuir con el 25% de la demanda energética.

- El impacto ambiental de la energía undimotriz se considera baja, dado que el impacto visual y las emisiones ocasionadas por su construcción son de baja cresta. No obstante, su construcción puede llegar a perjudicar a la vida marina. Además, su instalación en el fondo del mar puede ocasionar daños en el lecho marino. Por lo tanto, la localización ideal del parque de energía undimotriz dadas las indicaciones en la sección 1.6, está en las coordenadas (-1.02437, -90.99563) al sur de la isla Isabela, y además, en dónde proviene el oleaje del Océano Atlántico.
- La inversión inicial para implementar esta tecnología en las Galápagos se considera de alto riesgo, dado que aún está en desarrollo, aumentando la incertidumbre por aspectos inexplorados durante su implementación. Entonces, aún está lejos de ser competitiva ante tecnologías renovables de nivel comercial, así como la eólica y la solar.

## 4.2 Recomendaciones

Se recomienda:

- Determinar los parámetros de altura, longitud, período y celeridad de las olas previo al análisis del diseño de este sistema, dado que esto permitirá establecer el diseño para aspectos reales.
- Realizar un análisis detallado de la geometría de la boya, debido a que el parámetro del RAO influye en la respuesta que tendrá el dispositivo frente a las olas incidentes.
- Ejecutar una distinta técnica de mallado, como la Overset, que a pesar de utilizar mayores recursos computacionales cuenta con una mayor validación y obtención de resultados de mayor precisión.
- Analizar la convergencia de malla previo a la corrida de cada simulación, y así disminuir la incertidumbre entre los resultados experimentales y analíticos.
- Aumentar el tiempo de simulación para períodos más pequeños, y de esta manera, lograr que la ola entrante se estabilice y lograr mejores resultados de respuesta de la boya.

- Restringir el movimiento de la boya únicamente al eje vertical, ya que las olas poseen movimiento en el eje horizontal que pueden afectar los elementos que soportan el posible prototipo.
- Considerar el área de implementación, y de esta manera asegurar el tamaño y geometría del dispositivo para un mejor desempeño.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bob Dudley, “BP Statistical Review of World Energy,” 2017.
- [2] IIGE, “Proyecto 17: Plan de líneas de investigación para el desarrollo de la geotermia,” 2021.
- [3] INOCAR, “ESTUDIO DE LA ENERGÍA DE OLAS, CORRIENTES Y ENERGÍA CINÉTICA DE RÍOS EN EL ECUADOR PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA,” Guayaquil, 2011.
- [4] M. J. Chimbo Campuzano and R. R. Rodriguez Santos, “APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL ECUADOR,” *Ingenius*, no. 17, p. 23, Dec. 2016, doi: 10.17163/ings.n17.2017.03.
- [5] J. Fernández Chozas, *Energía undimotriz: Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad*. Lambert Academic Publishing, 2012.
- [6] A. F. O. Falcão and J. C. C. Henriques, “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review,” *Renewable Energy*, vol. 85. Elsevier Ltd, pp. 1391–1424, Jan. 01, 2016. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.086.
- [7] G. Ibarra-Berastegi, J. Sáenz, A. Ulazia, P. Serras, G. Esnaola, and C. Garcia-Soto, “Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016),” *Ocean Engineering*, vol. 147, pp. 20–29, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.10.018.
- [8] Biscay Marine Energy Platform, “Características Técnicas - Área MUTRIKU,” 2011.
- [9] E. Gorr-Pozzi, H. García-Nava, M. Larrañaga, M. G. Jaramillo-Torres, and M. G. Verduzco-Zapata, “Wave energy resource harnessing assessment in a subtropical coastal region of the pacific,” *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/jmse9111264.
- [10] L. The European Marine Energy Center, “Pelamis Wave Power,” 2004.
- [11] Claudio Paschoa, “Marine Techonology,” 2013. [Online]. Available: [www.seadiscovery.com](http://www.seadiscovery.com)

- [12] T. Aderinto and H. Li, "Review on power performance and efficiency of wave energy converters," *Energies*, vol. 12, no. 22. MDPI AG, Feb. 2019. doi: 10.3390/en12224329.
- [13] Ocean Power Technologies, "PB3 PowerBuoy," 2019.
- [14] M. Pelissero *et al.*, "Aprovechamiento de la Energía Undimotriz," 2011.
- [15] IRENA, "Energy Profile of Ecuador," 2022.
- [16] E. S.A. and M. D. E. Y. E. Renovable, "Resumen Ejecutivo de Rendición de Cuentas." 2017.
- [17] S. van Adrichem, B. Guinee, Y. Steenman, J. Verbart, and J. Zijlstra, "Multidisciplinary Project SEAS Floating photovoltaics for the Galapagos Islands." 2019.
- [18] International Energy Agency. and Organization for Economic Co-operation and Development., *World energy outlook*. OECD/IEA, 2008.
- [19] R. C. Mendoza and D. V. Rivera, "ENERGÍA UNDIMOTRIZ, ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA", Santa Elena, 2012.
- [20] Jairo Hernández and Luis Tovar, "PLAN DE NEGOCIOS: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA ABASTECER DE ENERGÍA ELÉCTRICA A LA PARROQUIA JAMBELÍ, CANTÓN SANTA ROSA, PROVINCIA DEL ORO.," *ESPOL*, 2015.
- [21] B. Ribadeneira, S. Benalcázar, and W. Guachamin-Acero, "Feasibility study of flopper stoppers as a passive roll compensation system for offshore construction vessels," *Ocean Engineering*, vol. 264, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112380.
- [22] NASA, "Technology Readiness Level," 2012.
- [23] IIGE, "Balance Energético De La Provincia de Galápagos." 2018.
- [24] Global Sustainable Electricity Partnership, "Proyecto Eólico Isla San Cristóbal-Galápagos," 2016. [Online]. Available: [www.globalelectricity.org/galapagos](http://www.globalelectricity.org/galapagos)
- [25] PNUD, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, and gef, "Energía Verde para Galápagos," Santa Cruz, 2016. [Online]. Available: [www.undp.org.ec](http://www.undp.org.ec)

- [26] R. G. Dean and R. A. Dalrymple, "Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists." 1991.
- [27] National Renewable Energy Laboratory, "Wave energy," 2017.
- [28] OES, "Ocean energy systems annual reports." 2020.
- [29] A. Cornett, "A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT," 2008.
- [30] Davide. Magagna, Andreas. Uihlein, and European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., *2014 JRC ocean energy status report: technology, market and economic aspects of ocean energy in Europe*. Publications Office, 2015.
- [31] S. Jin, S. Zheng, and D. Greaves, "On the scalability of wave energy converters," *Ocean Engineering*, vol. 243, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110212.
- [32] Beyene A. and J.H. Wilson, "Comparison of wave energy flux for northern, central, and southern coast of California based on long-term statistical wave data.," 2006.
- [33] J. N. Newman, "Marine Hydrodynamics," London, 2017.
- [34] Falnes J. and P. McIver, "Surface wave interactions with systems of oscillating bodies and pressure distributions.," 1985.
- [35] Rameswar. Bhattacharyya, *Dynamics of marine vehicles*. Wiley, 1978.
- [36] M. N. Berenjkoo, M. Ghiasi, and C. G. Soares, "Influence of the shape of a buoy on the efficiency of its dual-motion wave energy conversion," *Energy*, vol. 214, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118998.
- [37] CMEMS, "Copernicus Marine Service Information, «Data Base GLOBAL\_REANALYSIS\_WAV\_001\_032,»," 2021. [https://data.marine.copernicus.eu/products?view=details&option=com\\_csw&product=](https://data.marine.copernicus.eu/products?view=details&option=com_csw&product=) (accessed Feb. 07, 2023).
- [38] E. Villamarín, "SML-21-1012- Caracterización del estado de mar en las rutas autorizadas entre los puertos habitados de las Galápagos- Rafael González," 2021.

- [39] B. Delgado, N. Moity, and G. Banda-Cruz, “Informe técnico de meta análisis de biodiversidad para conservación marina y terrestre: el caso de las islas Galápagos.,” p. 2016, 2015.
- [40] OpenCFD Ltd., “url: <https://www.openfoam.com/>,” *The open source CFD toolbox*.
- [41] B. Andersson, R. Andersson, L. Hakkason, M. Mortensen, R. Sudiyo, and B. van Wachem, *Computational Fluid Dynamics for Engineers. 14th ed. Cambridge University Press*. 2018.
- [42] F. R. Menter, *Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective*. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009.
- [43] Musiedlak Pierre-Henri, “NUMERICAL MODELLING OF RESPONSES OF OFFSHORE WAVE ENERGY CONVERTERS IN EXTREME WAVES,” 2019. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10026.1/15115>
- [44] NUMECA International, *NUMECA Online Documentation Platform*. Brussels, Belgium, 2021.
- [45] N. International, *NUMECA Online Documentation Platform*. 2021.
- [46] María Tadea Quintuña Rodríguez, “CARACTERIZACIÓN NUMÉRICA DE LA INFLUENCIA DE LA SUPERFICIE LIBRE EN EL FLUJO ALREDEDOR DEL SUBMARINO DARPA SUBOFF-5470 USANDO OPENFOAM,” 2020.
- [47] M. B. Kramer *et al.*, “Highly accurate experimental heave decay tests with a floating sphere: A public benchmark dataset for model validation of fluid–structure interaction,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14020269.
- [48] J. Tan, H. Polinder, A. J. Laguna, P. Wellens, and S. A. Miedema, “The influence of sizing of wave energy converters on the techno-economic performance,” *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 1, pp. 1–25, 2021, doi: 10.3390/jmse9010052.
- [49] O. Ltd., “url: <https://www.openfoam.com/>,” *The open source CFD toolbox*.
- [50] H. Islam and C. Guedes Soares, “Validation study for a heaving sphere in waves,” in *Developments in Renewable Energies Offshore - Proceedings*

*the 4th International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2020, 2021, pp. 88–95. doi: 10.1201/9781003134572-12.*



# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### 4.3 Generación de Geometría y Mallado en Paraview 5.10.1

Para la generación del dominio se utilizó la referencia de [45], utilizando el directorio BlockMeshDict, creando un bloque con un mallado simple. Mientras que, utilizando el directorio SnappyHexMesh, se realizó un refinado vertical nivel 4.

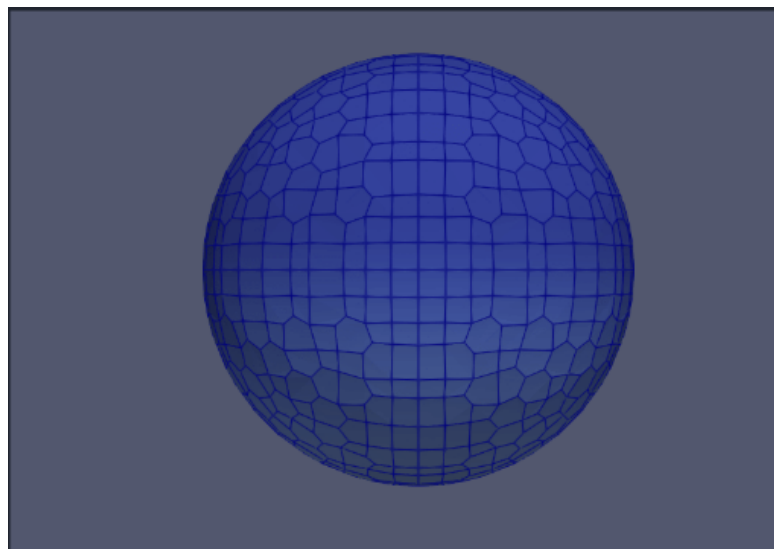


Figura 4.1 Geometría utilizada para la simulación de decremento logarítmico

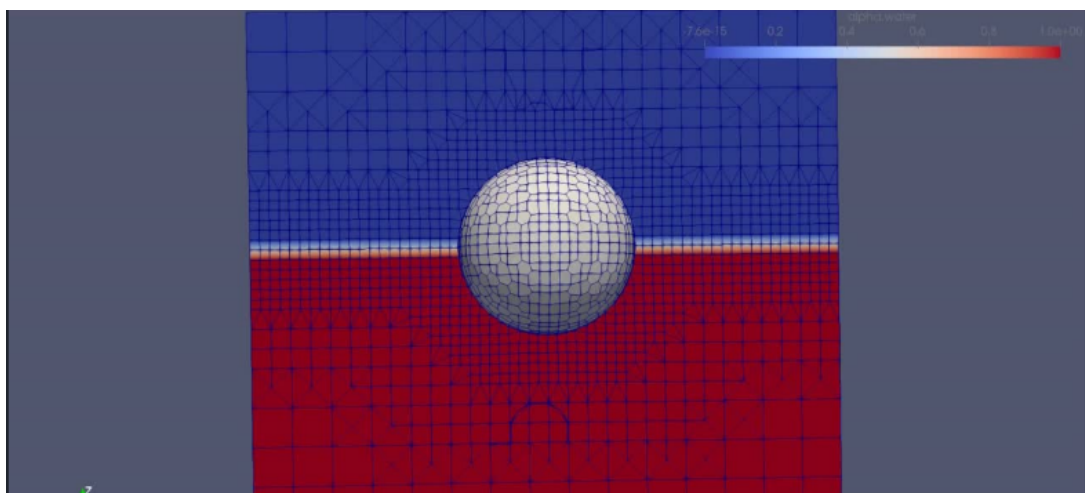
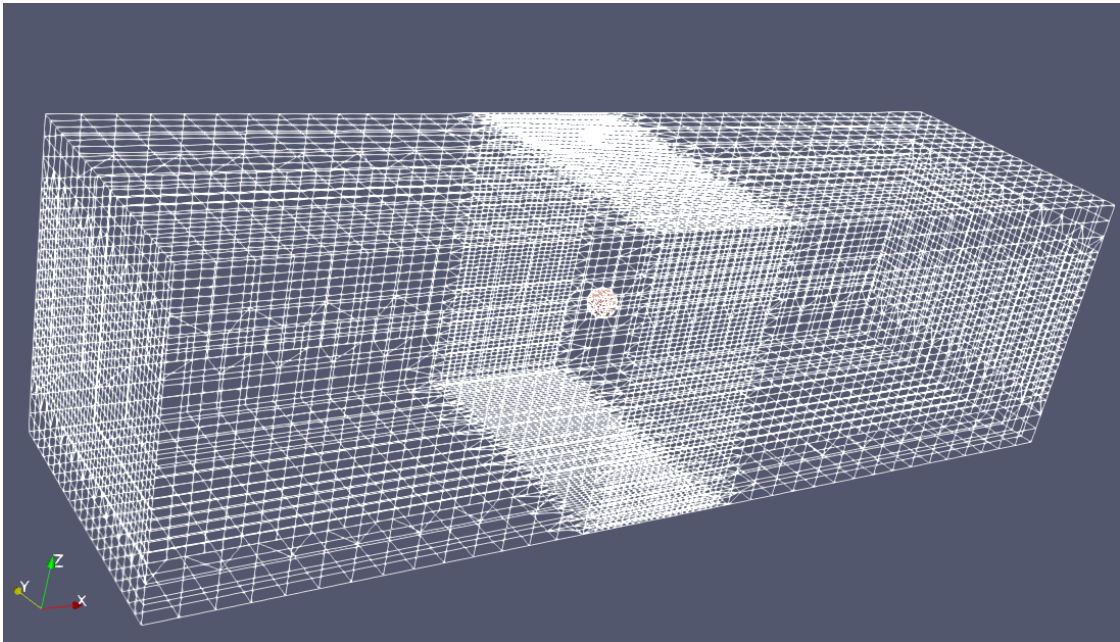
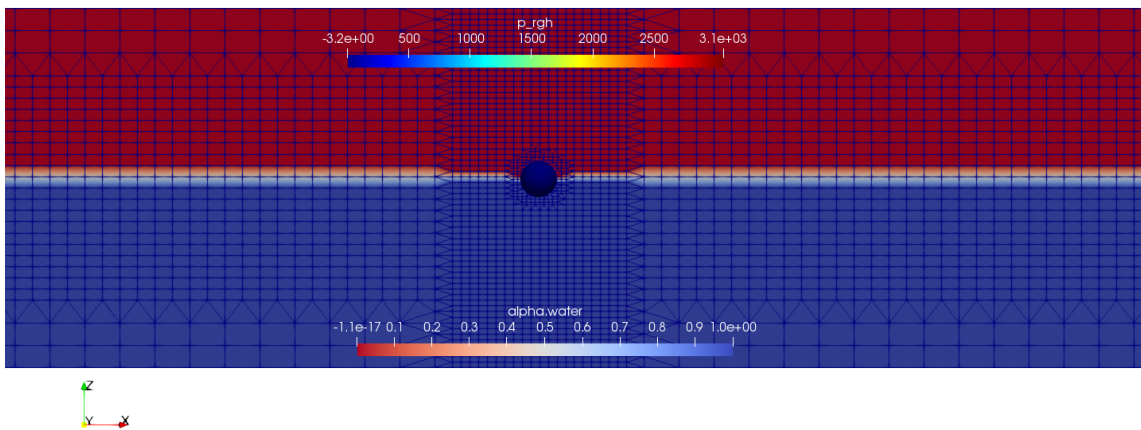


Figura 4.2 Mallado y dominio utilizado para la simulación del decremento logarítmico



**Figura 4.3 Geometría y dominio de la simulación con olas entrantes**



**Figura 4.4 Mallado de la simulación con olas entrantes**

## APÉNDICE B

### 4.4 Cálculos teóricos de heave de una esfera

Para determinar los resultados analíticos se utilizó integración numérica, tal y como se indica en la literatura de Bhattacharyya, capítulo 4. En donde, para la oscilación forzada se debe calcular los siguientes elementos[35]:

#### Masa virtual

Es la suma entre la masa del modelo y la masa añadida, calculada mediante la siguiente ecuación:

$$a_z = \rho \frac{\pi}{2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} C y^2(x) dx \quad (28)$$

**Tabla 4.1 Integración numérica de la masa virtual (T:2s, Hs:1m)**

Bn	Tn	Asec	we <sup>2</sup> *Bn/2g	Bn/Tn	Bn*Tn	βn	C	ρπ*Bn <sup>2</sup> /8	an	Factor	Prod
0.00	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
2.79	1.50	1.38	1.40	1.86	4.19	0.79	0.65	3056.81	1986.93	4.00	7947.70
3.00	1.50	3.53	1.51	2.00	4.50	0.79	0.65	3534.29	2297.29	2.00	4594.58
2.79	1.50	5.69	1.40	1.86	4.19	0.79	0.65	3056.81	1986.93	4.00	7947.70
0.00	1.50	7.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
										SUM	20489.99
										Added mass for heaving	5122.50
										mass	7068.58
										% Of model mass	0.72
										Virtual mass (kg)	12191.08

#### Constante de amortiguamiento

Es utilizado para incluir el efecto que genera la fuerza de amortiguamiento, al momento de actuar en dirección opuesta, se la muestra en la siguiente ecuación:

$$b_{rad} = \rho \frac{g^2 \overline{A^2}}{\omega_e^3} \int_{-L/2}^{L/2} dx \quad (29)$$

**Tabla 4.2 Integración numérica del coeficiente de amortiguamiento (T:2s, Hs:1m)**

we <sup>2</sup> *Bn/2g	Bn/Tn	βn	An	An <sup>2</sup>	bn	Factor	Prod
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
1.40	1.86	0.79	0.75	0.56	1745.87	4.00	6983.46
1.51	2.00	0.79	0.83	0.69	2138.18	2.00	4276.36
1.40	1.86	0.79	0.75	0.56	1745.87	4.00	6983.46
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
						SUM	18243.29
						Damping Coeff (kg*s/m)	4560.82

### Fuerza restauradora

Es la fuerza adicional a la fuerza de boyantes que actúa sobre un cuerpo es sumergido por encima de su línea de flotación, se obtiene mediante la siguiente integral:

$$c = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y(x)dx \quad (30)$$

**Tabla 4.3 Integración numérica de la fuerza restauradora (T:2s, Hs:1m)**

Bn	ρgBn	Factor	Prod
0	0.00	1.00	0.00
2.79	27369.90	4.00	109479.60
3	29430.00	2.00	58860.00
2.79	27369.90	4.00	109479.60
0	0.00	1	0.00
		SUM	277819.20
Restoring Force (kg/m)			69454.80

### Fuerza total de la respuesta del heave

La fuerza total del heave es calculada mediante la matriz dinámica mostrada en la Figura 4.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} (-\omega^2(M + A_{33}) + i\omega B_{33} + \rho g A_{PF}) \bar{F}_3 e^{i\omega t} \\ + (\omega^2(Mx_G - A_{35}) + i\omega B_{35} - \rho g M_{PF}) \bar{F}_5 e^{i\omega t} = \bar{F}_3 e^{i\omega t} \\ \\ (-\omega^2(I + A_{55}) + i\omega B_{55} + \rho g I_{PF}) \bar{F}_5 e^{i\omega t} \\ + (\omega^2(Mx_G - A_{53}) + i\omega B_{53} - \rho g M_{PF}) \bar{F}_3 e^{i\omega t} = \bar{F}_5 e^{i\omega t} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} [D_{11}(\omega) \quad D_{12}(\omega)] \\ [D_{21}(\omega) \quad D_{22}(\omega)] \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \bar{\zeta}_3 \\ \bar{\zeta}_5 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_3 \\ \bar{F}_5 \end{array} \right\}$$

**Figura 4.5 Matriz dinámica**

Y como sólo se incluirán los efectos del *heave* ( $F_3$ ), y no del *pitch* ( $F_5$ ), se obtiene la siguiente expresión:

$$F_3 = -\omega^2(M + a_z) + i\omega b_{rad} + c \quad (31)$$

### **Respuesta vertical**

Finalmente, para obtener la respuesta vertical de la esfera, se despeja la amplitud de respuesta en la Figura 4.5.

$$\zeta_3 = \frac{F_3}{-\omega^2(M + a_z) + i\omega b_{rad} + c} \quad (32)$$

# APÉNDICE C

## 4.5 fvSolution

El archivo .txt de fvSolution de la simulación de olas es mostrada en la Figura 4.6.

```
----- C++ -----
Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  | Version: 5
And        | Web: www.OpenFOAM.org
Manipulation

foamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSolution;
}

// *****

solvers
{
  "alpha.water.*"
  {
    nAlphaCorr      2;
    nAlphaSubCycles 1;
    cAlpha          1;

    MULESCorr       yes;
    nLimitIter      5;
    alphaApplyPrevCorr yes;

    solver          smoothSolver;
    smoother        symGaussSeidel;
    tolerance       1e-8;
    relTol          0;
  }

  "pcorr.*"
  {
    solver          PCG;
    preconditioner
    {
      preconditioner GAMG;
      tolerance      1e-8;
      relTol         0;
      smoother       DICGaussSeidel;
      cacheAgglomeration no;
    }

    tolerance       1e-05;
    relTol          0;
    maxIter         100;
  }

  p_rgh
  {
    solver          GAMG;
    tolerance       1e-8;
    relTol          0.01;
    smoother        DIC;
  }

  p_rghFinal
  {
    solver          PCG;
    preconditioner
    {
      preconditioner GAMG;
      tolerance      1e-8;
      relTol         0;
      nCycles        2;
      smoother       DICGaussSeidel;
      nPreSweeps     2;
    }

    tolerance       1e-8;
    relTol          0;
    maxIter         20;
  }

  "(U|k|epsilon)"
  {
    solver          smoothSolver;
    smoother        GaussSeidel;
    tolerance       1e-6;
    relTol          0.1;
    nSweeps         1;
  }

  "(U|k|epsilon)Final"
  {
    solver          smoothSolver;
    smoother        GaussSeidel;
    tolerance       1e-6;
    relTol          0;
    nSweeps         1;
  }
}
```

Figura 4.6 fvSolution

## 4.6 fvSchemes

El archivo .txt de fvSchemes de la simulación de olas, la cual contiene los esquemas que el solver utiliza para calcular las ecuaciones gobernantes es mostrada en la Figura 4.7.

```
/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O peration | Version: 5 |
| \ \ / / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M anipulation |
|-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "system";
    object fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default CrankNicolson 0.9;
}

gradSchemes
{
    default Gauss linear;
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U) Gauss vanLeerV;
    div(phi,alpha) Gauss vanLeer;
    div(phi,b,alpha) Gauss linear;
    div(phi,k) Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default linear;
}

snGradSchemes
{
    default corrected;
}

wallDist
{
    method meshWave;
}

fluxRequired
{
    default no;
    p_rgh;
    pcorr;
    alpha.water;
}
```

Figura 4.7 fvSchemes



## APÉNDICE D

### 4.7 Tabla de amortización

Se adjunta la tabla de amortización, con un retorno de la inversión de 13 años.

**Tabla 4.4 Tabla de amortización**

Descripción	Inversión inicial	Abono	Interés	Principal	Saldo final
	\$ 3,200,700.00	\$ 32,458.25	\$ 13,336.25	\$ 19,122.00	\$ 3,181,578.00
	\$ 3,181,578.00	\$ 32,458.25	\$ 13,256.58	\$ 19,201.68	\$ 3,162,376.33
	\$ 3,162,376.33	\$ 32,458.25	\$ 13,176.57	\$ 19,281.68	\$ 3,143,094.64
	\$ 3,143,094.64	\$ 32,458.25	\$ 13,096.23	\$ 19,362.02	\$ 3,123,732.62
	\$ 3,123,732.62	\$ 32,458.25	\$ 13,015.55	\$ 19,442.70	\$ 3,104,289.92
	\$ 3,104,289.92	\$ 32,458.25	\$ 12,934.54	\$ 19,523.71	\$ 3,084,766.21
	\$ 3,084,766.21	\$ 32,458.25	\$ 12,853.19	\$ 19,605.06	\$ 3,065,161.16
	\$ 3,065,161.16	\$ 32,458.25	\$ 12,771.50	\$ 19,686.75	\$ 3,045,474.41
	\$ 3,045,474.41	\$ 32,458.25	\$ 12,689.48	\$ 19,768.77	\$ 3,025,705.64
	\$ 3,025,705.64	\$ 32,458.25	\$ 12,607.11	\$ 19,851.14	\$ 3,005,854.50
	\$ 3,005,854.50	\$ 32,458.25	\$ 12,524.39	\$ 19,933.86	\$ 2,985,920.64
	\$ 2,985,920.64	\$ 32,458.25	\$ 12,441.34	\$ 20,016.91	\$ 2,965,903.73
Mantenimiento menor	\$ 2,997,438.58	\$ 32,458.25	\$ 12,489.33	\$ 19,968.92	\$ 2,977,469.66
	\$ 2,977,469.66	\$ 32,458.25	\$ 12,406.12	\$ 20,052.13	\$ 2,957,417.53
	\$ 2,957,417.53	\$ 32,458.25	\$ 12,322.57	\$ 20,135.68	\$ 2,937,281.86
	\$ 2,937,281.86	\$ 32,458.25	\$ 12,238.67	\$ 20,219.58	\$ 2,917,062.28
	\$ 2,917,062.28	\$ 32,458.25	\$ 12,154.43	\$ 20,303.82	\$ 2,896,758.46
	\$ 2,896,758.46	\$ 32,458.25	\$ 12,069.83	\$ 20,388.42	\$ 2,876,370.03
	\$ 2,876,370.03	\$ 32,458.25	\$ 11,984.88	\$ 20,473.37	\$ 2,855,896.66
	\$ 2,855,896.66	\$ 32,458.25	\$ 11,899.57	\$ 20,558.68	\$ 2,835,337.98
	\$ 2,835,337.98	\$ 32,458.25	\$ 11,813.91	\$ 20,644.34	\$ 2,814,693.64
	\$ 2,814,693.64	\$ 32,458.25	\$ 11,727.89	\$ 20,730.36	\$ 2,793,963.28
	\$ 2,793,963.28	\$ 32,458.25	\$ 11,641.51	\$ 20,816.74	\$ 2,773,146.54
	\$ 2,773,146.54	\$ 32,458.25	\$ 11,554.78	\$ 20,903.47	\$ 2,752,243.07
Mantenimiento menor	\$ 2,785,391.31	\$ 32,458.25	\$ 11,605.80	\$ 20,852.45	\$ 2,764,538.85
	\$ 2,764,538.85	\$ 32,458.25	\$ 11,518.91	\$ 20,939.34	\$ 2,743,599.52
	\$ 2,743,599.52	\$ 32,458.25	\$ 11,431.66	\$ 21,026.59	\$ 2,722,572.93
	\$ 2,722,572.93	\$ 32,458.25	\$ 11,344.05	\$ 21,114.20	\$ 2,701,458.74
	\$ 2,701,458.74	\$ 32,458.25	\$ 11,256.08	\$ 21,202.17	\$ 2,680,256.56
	\$ 2,680,256.56	\$ 32,458.25	\$ 11,167.74	\$ 21,290.51	\$ 2,658,966.05
	\$ 2,658,966.05	\$ 32,458.25	\$ 11,079.03	\$ 21,379.22	\$ 2,637,586.82
	\$ 2,637,586.82	\$ 32,458.25	\$ 10,989.95	\$ 21,468.30	\$ 2,616,118.52
	\$ 2,616,118.52	\$ 32,458.25	\$ 10,900.49	\$ 21,557.76	\$ 2,594,560.76
	\$ 2,594,560.76	\$ 32,458.25	\$ 10,810.67	\$ 21,647.58	\$ 2,572,913.18
	\$ 2,572,913.18	\$ 32,458.25	\$ 10,720.47	\$ 21,737.78	\$ 2,551,175.40

	\$ 2,551,175.40	\$ 32,458.25	\$ 10,629.90	\$ 21,828.35	\$ 2,529,347.05
Mantenimiento menor	\$ 2,564,191.22	\$ 32,458.25	\$ 10,684.13	\$ 21,774.12	\$ 2,542,417.10
	\$ 2,542,417.10	\$ 32,458.25	\$ 10,593.40	\$ 21,864.85	\$ 2,520,552.25
	\$ 2,520,552.25	\$ 32,458.25	\$ 10,502.30	\$ 21,955.95	\$ 2,498,596.30
	\$ 2,498,596.30	\$ 32,458.25	\$ 10,410.82	\$ 22,047.43	\$ 2,476,548.87
	\$ 2,476,548.87	\$ 32,458.25	\$ 10,318.95	\$ 22,139.30	\$ 2,454,409.58
	\$ 2,454,409.58	\$ 32,458.25	\$ 10,226.71	\$ 22,231.54	\$ 2,432,178.03
	\$ 2,432,178.03	\$ 32,458.25	\$ 10,134.08	\$ 22,324.17	\$ 2,409,853.86
	\$ 2,409,853.86	\$ 32,458.25	\$ 10,041.06	\$ 22,417.19	\$ 2,387,436.67
	\$ 2,387,436.67	\$ 32,458.25	\$ 9,947.65	\$ 22,510.60	\$ 2,364,926.07
	\$ 2,364,926.07	\$ 32,458.25	\$ 9,853.86	\$ 22,604.39	\$ 2,342,321.68
	\$ 2,342,321.68	\$ 32,458.25	\$ 9,759.67	\$ 22,698.58	\$ 2,319,623.10
	\$ 2,319,623.10	\$ 32,458.25	\$ 9,665.10	\$ 22,793.15	\$ 2,296,829.95
Mantenimiento menor	\$ 2,333,456.81	\$ 32,458.25	\$ 9,722.74	\$ 22,735.51	\$ 2,310,721.29
	\$ 2,310,721.29	\$ 32,458.25	\$ 9,628.01	\$ 22,830.24	\$ 2,287,891.05
	\$ 2,287,891.05	\$ 32,458.25	\$ 9,532.88	\$ 22,925.37	\$ 2,264,965.68
	\$ 2,264,965.68	\$ 32,458.25	\$ 9,437.36	\$ 23,020.89	\$ 2,241,944.79
	\$ 2,241,944.79	\$ 32,458.25	\$ 9,341.44	\$ 23,116.81	\$ 2,218,827.97
	\$ 2,218,827.97	\$ 32,458.25	\$ 9,245.12	\$ 23,213.13	\$ 2,195,614.84
	\$ 2,195,614.84	\$ 32,458.25	\$ 9,148.40	\$ 23,309.85	\$ 2,172,304.98
	\$ 2,172,304.98	\$ 32,458.25	\$ 9,051.27	\$ 23,406.98	\$ 2,148,898.01
	\$ 2,148,898.01	\$ 32,458.25	\$ 8,953.74	\$ 23,504.51	\$ 2,125,393.50
	\$ 2,125,393.50	\$ 32,458.25	\$ 8,855.81	\$ 23,602.44	\$ 2,101,791.05
	\$ 2,101,791.05	\$ 32,458.25	\$ 8,757.46	\$ 23,700.79	\$ 2,078,090.27
	\$ 2,078,090.27	\$ 32,458.25	\$ 8,658.71	\$ 23,799.54	\$ 2,054,290.73
Mantenimiento menor+mayor	\$ 2,182,626.59	\$ 32,458.25	\$ 9,094.28	\$ 23,363.97	\$ 2,159,262.62
	\$ 2,159,262.62	\$ 32,458.25	\$ 8,996.93	\$ 23,461.32	\$ 2,135,801.30
	\$ 2,135,801.30	\$ 32,458.25	\$ 8,899.17	\$ 23,559.08	\$ 2,112,242.22
	\$ 2,112,242.22	\$ 32,458.25	\$ 8,801.01	\$ 23,657.24	\$ 2,088,584.98
	\$ 2,088,584.98	\$ 32,458.25	\$ 8,702.44	\$ 23,755.81	\$ 2,064,829.17
	\$ 2,064,829.17	\$ 32,458.25	\$ 8,603.45	\$ 23,854.80	\$ 2,040,974.37
	\$ 2,040,974.37	\$ 32,458.25	\$ 8,504.06	\$ 23,954.19	\$ 2,017,020.18
	\$ 2,017,020.18	\$ 32,458.25	\$ 8,404.25	\$ 24,054.00	\$ 1,992,966.18
	\$ 1,992,966.18	\$ 32,458.25	\$ 8,304.03	\$ 24,154.22	\$ 1,968,811.96
	\$ 1,968,811.96	\$ 32,458.25	\$ 8,203.38	\$ 24,254.87	\$ 1,944,557.09
	\$ 1,944,557.09	\$ 32,458.25	\$ 8,102.32	\$ 24,355.93	\$ 1,920,201.16
	\$ 1,920,201.16	\$ 32,458.25	\$ 8,000.84	\$ 24,457.41	\$ 1,895,743.75
Mantenimiento menor	\$ 1,936,214.28	\$ 32,458.25	\$ 8,067.56	\$ 24,390.69	\$ 1,911,823.59
	\$ 1,911,823.59	\$ 32,458.25	\$ 7,965.93	\$ 24,492.32	\$ 1,887,331.27
	\$ 1,887,331.27	\$ 32,458.25	\$ 7,863.88	\$ 24,594.37	\$ 1,862,736.90
	\$ 1,862,736.90	\$ 32,458.25	\$ 7,761.40	\$ 24,696.85	\$ 1,838,040.06
	\$ 1,838,040.06	\$ 32,458.25	\$ 7,658.50	\$ 24,799.75	\$ 1,813,240.31

	\$ 1,813,240.31	\$ 32,458.25	\$ 7,555.17	\$ 24,903.08	\$ 1,788,337.23
	\$ 1,788,337.23	\$ 32,458.25	\$ 7,451.41	\$ 25,006.84	\$ 1,763,330.38
	\$ 1,763,330.38	\$ 32,458.25	\$ 7,347.21	\$ 25,111.04	\$ 1,738,219.34
	\$ 1,738,219.34	\$ 32,458.25	\$ 7,242.58	\$ 25,215.67	\$ 1,713,003.67
	\$ 1,713,003.67	\$ 32,458.25	\$ 7,137.52	\$ 25,320.73	\$ 1,687,682.94
	\$ 1,687,682.94	\$ 32,458.25	\$ 7,032.01	\$ 25,426.24	\$ 1,662,256.70
	\$ 1,662,256.70	\$ 32,458.25	\$ 6,926.07	\$ 25,532.18	\$ 1,636,724.52
Mantenimiento menor	\$ 1,679,265.60	\$ 32,458.25	\$ 6,996.94	\$ 25,461.31	\$ 1,653,804.29
	\$ 1,653,804.29	\$ 32,458.25	\$ 6,890.85	\$ 25,567.40	\$ 1,628,236.89
	\$ 1,628,236.89	\$ 32,458.25	\$ 6,784.32	\$ 25,673.93	\$ 1,602,562.96
	\$ 1,602,562.96	\$ 32,458.25	\$ 6,677.35	\$ 25,780.90	\$ 1,576,782.06
	\$ 1,576,782.06	\$ 32,458.25	\$ 6,569.93	\$ 25,888.32	\$ 1,550,893.73
	\$ 1,550,893.73	\$ 32,458.25	\$ 6,462.06	\$ 25,996.19	\$ 1,524,897.54
	\$ 1,524,897.54	\$ 32,458.25	\$ 6,353.74	\$ 26,104.51	\$ 1,498,793.03
	\$ 1,498,793.03	\$ 32,458.25	\$ 6,244.97	\$ 26,213.28	\$ 1,472,579.75
	\$ 1,472,579.75	\$ 32,458.25	\$ 6,135.75	\$ 26,322.50	\$ 1,446,257.25
	\$ 1,446,257.25	\$ 32,458.25	\$ 6,026.07	\$ 26,432.18	\$ 1,419,825.07
	\$ 1,419,825.07	\$ 32,458.25	\$ 5,915.94	\$ 26,542.31	\$ 1,393,282.76
	\$ 1,393,282.76	\$ 32,458.25	\$ 5,805.34	\$ 26,652.91	\$ 1,366,629.85
Mantenimiento menor	\$ 1,411,347.42	\$ 32,458.25	\$ 5,880.61	\$ 26,577.64	\$ 1,384,769.78
	\$ 1,384,769.78	\$ 32,458.25	\$ 5,769.87	\$ 26,688.38	\$ 1,358,081.41
	\$ 1,358,081.41	\$ 32,458.25	\$ 5,658.67	\$ 26,799.58	\$ 1,331,281.83
	\$ 1,331,281.83	\$ 32,458.25	\$ 5,547.01	\$ 26,911.24	\$ 1,304,370.59
	\$ 1,304,370.59	\$ 32,458.25	\$ 5,434.88	\$ 27,023.37	\$ 1,277,347.21
	\$ 1,277,347.21	\$ 32,458.25	\$ 5,322.28	\$ 27,135.97	\$ 1,250,211.24
	\$ 1,250,211.24	\$ 32,458.25	\$ 5,209.21	\$ 27,249.04	\$ 1,222,962.21
	\$ 1,222,962.21	\$ 32,458.25	\$ 5,095.68	\$ 27,362.57	\$ 1,195,599.63
	\$ 1,195,599.63	\$ 32,458.25	\$ 4,981.67	\$ 27,476.58	\$ 1,168,123.05
	\$ 1,168,123.05	\$ 32,458.25	\$ 4,867.18	\$ 27,591.07	\$ 1,140,531.98
	\$ 1,140,531.98	\$ 32,458.25	\$ 4,752.22	\$ 27,706.03	\$ 1,112,825.95
	\$ 1,112,825.95	\$ 32,458.25	\$ 4,636.77	\$ 27,821.48	\$ 1,085,004.47
Mantenimiento menor	\$ 1,132,009.87	\$ 32,458.25	\$ 4,716.71	\$ 27,741.54	\$ 1,104,268.33
	\$ 1,104,268.33	\$ 32,458.25	\$ 4,601.12	\$ 27,857.13	\$ 1,076,411.20
	\$ 1,076,411.20	\$ 32,458.25	\$ 4,485.05	\$ 27,973.20	\$ 1,048,437.99
	\$ 1,048,437.99	\$ 32,458.25	\$ 4,368.49	\$ 28,089.76	\$ 1,020,348.23
	\$ 1,020,348.23	\$ 32,458.25	\$ 4,251.45	\$ 28,206.80	\$ 992,141.43
	\$ 992,141.43	\$ 32,458.25	\$ 4,133.92	\$ 28,324.33	\$ 963,817.11
	\$ 963,817.11	\$ 32,458.25	\$ 4,015.90	\$ 28,442.35	\$ 935,374.76
	\$ 935,374.76	\$ 32,458.25	\$ 3,897.39	\$ 28,560.86	\$ 906,813.91
	\$ 906,813.91	\$ 32,458.25	\$ 3,778.39	\$ 28,679.86	\$ 878,134.05
	\$ 878,134.05	\$ 32,458.25	\$ 3,658.89	\$ 28,799.36	\$ 849,334.69
	\$ 849,334.69	\$ 32,458.25	\$ 3,538.89	\$ 28,919.36	\$ 820,415.33
	\$ 820,415.33	\$ 32,458.25	\$ 3,418.40	\$ 29,039.85	\$ 791,375.48

Mantenimiento menor+mayor	\$ 956,076.43	\$ 32,458.25	\$ 3,983.65	\$ 28,474.60	\$ 927,601.83
	\$ 927,601.83	\$ 32,458.25	\$ 3,865.01	\$ 28,593.24	\$ 899,008.59
	\$ 899,008.59	\$ 32,458.25	\$ 3,745.87	\$ 28,712.38	\$ 870,296.21
	\$ 870,296.21	\$ 32,458.25	\$ 3,626.23	\$ 28,832.02	\$ 841,464.19
	\$ 841,464.19	\$ 32,458.25	\$ 3,506.10	\$ 28,952.15	\$ 812,512.05
	\$ 812,512.05	\$ 32,458.25	\$ 3,385.47	\$ 29,072.78	\$ 783,439.26
	\$ 783,439.26	\$ 32,458.25	\$ 3,264.33	\$ 29,193.92	\$ 754,245.34
	\$ 754,245.34	\$ 32,458.25	\$ 3,142.69	\$ 29,315.56	\$ 724,929.78
	\$ 724,929.78	\$ 32,458.25	\$ 3,020.54	\$ 29,437.71	\$ 695,492.07
	\$ 695,492.07	\$ 32,458.25	\$ 2,897.88	\$ 29,560.37	\$ 665,931.71
	\$ 665,931.71	\$ 32,458.25	\$ 2,774.72	\$ 29,683.53	\$ 636,248.17
Mantenimiento menor	\$ 688,186.38	\$ 32,458.25	\$ 2,867.44	\$ 29,590.81	\$ 658,595.57
	\$ 658,595.57	\$ 32,458.25	\$ 2,744.15	\$ 29,714.10	\$ 628,881.47
	\$ 628,881.47	\$ 32,458.25	\$ 2,620.34	\$ 29,837.91	\$ 599,043.56
	\$ 599,043.56	\$ 32,458.25	\$ 2,496.01	\$ 29,962.24	\$ 569,081.33
	\$ 569,081.33	\$ 32,458.25	\$ 2,371.17	\$ 30,087.08	\$ 538,994.25
	\$ 538,994.25	\$ 32,458.25	\$ 2,245.81	\$ 30,212.44	\$ 508,781.81
	\$ 508,781.81	\$ 32,458.25	\$ 2,119.92	\$ 30,338.33	\$ 478,443.48
	\$ 478,443.48	\$ 32,458.25	\$ 1,993.51	\$ 30,464.74	\$ 447,978.75
	\$ 447,978.75	\$ 32,458.25	\$ 1,866.58	\$ 30,591.67	\$ 417,387.07
	\$ 417,387.07	\$ 32,458.25	\$ 1,739.11	\$ 30,719.14	\$ 386,667.94
	\$ 386,667.94	\$ 32,458.25	\$ 1,611.12	\$ 30,847.13	\$ 355,820.80
	\$ 355,820.80	\$ 32,458.25	\$ 1,482.59	\$ 30,975.66	\$ 324,845.14
	\$ 324,845.14	\$ 32,458.25	\$ 1,353.52	\$ 31,104.73	\$ 293,740.41
Mantenimiento menor	\$ 348,335.88	\$ 32,458.25	\$ 1,451.40	\$ 31,006.85	\$ 317,329.03
	\$ 317,329.03	\$ 32,458.25	\$ 1,322.20	\$ 31,136.05	\$ 286,192.98
	\$ 286,192.98	\$ 32,458.25	\$ 1,192.47	\$ 31,265.78	\$ 254,927.20
	\$ 254,927.20	\$ 32,458.25	\$ 1,062.20	\$ 31,396.05	\$ 223,531.15
	\$ 223,531.15	\$ 32,458.25	\$ 931.38	\$ 31,526.87	\$ 192,004.28
	\$ 192,004.28	\$ 32,458.25	\$ 800.02	\$ 31,658.23	\$ 160,346.05
	\$ 160,346.05	\$ 32,458.25	\$ 668.11	\$ 31,790.14	\$ 128,555.90
	\$ 128,555.90	\$ 32,458.25	\$ 535.65	\$ 31,922.60	\$ 96,633.30
	\$ 96,633.30	\$ 32,458.25	\$ 402.64	\$ 32,055.61	\$ 64,577.69
	\$ 64,577.69	\$ 32,458.25	\$ 269.07	\$ 32,189.18	\$ 32,388.52
	\$ 32,388.52	\$ 32,458.25	\$ 134.95	\$ 32,323.30	\$ 65.22

## APÉNDICE D

### 4.8 Código de la matriz de potencia

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import pandas as pd

power = pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/powerp.csv', index_col=0)
print(power.columns)
power.index=power.index.astype(str)
clmns = power.columns.values
for j in range(len(clmns)):
    if clmns[j].find('.') != -1:
        clmns[j]=''
print(clmns)
row = power.index.values
for i in range(len(row)):
    if ('.0') not in row[i]:
        row[i]=''
print(row)

plt.figure(figsize=(40,13))

sns.heatmap(power, cmap="jet", annot=False, annot_kws={'fontsize':15, 'fontweight':'bold'}, xticklabels=clmns)
sns.set(font_scale=1.5)

plt.xlabel('T(s)', fontsize=20,color="#000000")
plt.ylabel('Hs(m)', fontsize=20,color="#000000")
```

Figura 4.8 Código en Python de la Matriz de potencia