

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis de la estabilidad dinámica de Estaciones Móviles Guardacostas en
Palma Real usando OpenFOAM

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Saúl Abad Regalado Calderón

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a mis padres, Maribel y Saul, a mi hermana Karen quienes han sido los pilares fundamentales en mi vida y que me han brindado su apoyo incondicional, desde que tengo memoria, para cumplir con todas las metas que me he planteado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, que sin él no hubiera logrado todo lo que me he propuesto en la vida.

Agradezco a mis padres, Saúl y Maribel, a mi hermana Karen, que con sus palabras y apoyo han el motor que necesitaba para ser la persona que soy ahora.

Agradezco a Andrea, Juan José y Sebastián que con sus consejos nunca me dejaron caer y siempre me motivaron a dar todo de mí. A Freire R., por ser mi primer amigo desde el prepolitécnico.

A mis profesores de la carrera que, con sus conocimientos brindados y apoyo, pude culminar este sueño tan grande, ser ingeniero Naval.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Saúl Abad Regalado Calderón* 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"



Saúl A. Regalado C.

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**DAVID ANDRES PLAZA
MENDOZA**

.....
David Plaza Mendoza, MSc.
PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
**RUBEN JOSE PAREDES
ALVARADO**

.....
Rubén Paredes Alvarado, PhD.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El Comando de Guardacostas del Ecuador cuenta con dos estaciones flotantes móviles EMG que brindan apoyo logístico a sus unidades que operan en sectores sin oleaje: Isla Puná, Guayas y río Mataje, Esmeraldas. Sin embargo, estas unidades deberían estar operando en zonas costeras como Palma Real, Esmeraldas debido a donde la incidencia de las actividades ilegales. Desafortunadamente, un gran número del personal presentó mareos debido al oleaje de esta zona. En este proyecto se evaluó numéricamente la estabilidad dinámica del movimiento de balance de una EMG si operara en Palma Real usando OpenFOAM.

Las simulaciones numéricas del flujo agua-aire fueron realizadas utilizando el solucionador *interFoam* con el modelo de turbulencia k-Epsilon. En este caso, se utilizó el método numérico RANS con un solo grado de libertad y sin tomar en cuenta el amarre de la EMG. La simulación consistió en dejar caer una columna de agua con un ancho y una altura inicial para que excite el objeto flotante y comience a oscilar. El estado de mar de Palma Real se lo determinó a partir de datos publicados por el Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, con los cuales se determinó la altura significativa de las olas para los diferentes meses de un año promedio. Finalmente, el MSI se lo determinó mediante una formulación que utiliza la función error y el valor del área bajo la curva del espectro de respuesta.

Como resultado, se obtuvo la amplitud del ángulo de balance para KG= 1, 1.5 y 2 m donde se verificó que la amplitud del ángulo de balance aumenta conforme el KG es mayor. Combinando los resultados numéricos y analíticos se determinó el Índice de Malestar por Movimiento (MSI) y se verificó que para ninguna de las condiciones cumple con el porcentaje máximo permisible por las normas ISO-2631 (20%) debido a que el mínimo valor de MSI obtenido fue de 30%. Sin embargo, se identificó que la disminución del KG también disminuye el valor del MSI, aunque éste igual se encuentre fuera del rango permisible.

Palabras Clave: Estación Móvil Guardacostas, interFOAM, kEpsilon, Índice de Malestar por Movimiento.

ABSTRACT

The Ecuadorian Coast Guard Command has two mobile stations that are providing logistical support to the coast guard units that operate in the south of Puna Island and in Mataje river. However, the Mobile Stations should be operating in areas where the incidence of illegal activities is higher, such as Palma Real, Esmeraldas, where there is a high rate of drug trafficking. In this project, it is proposed to perform the analysis of the dynamic stability of Coast Guard Mobile Stations in Palma Real using OpenFOAM.

Numerical simulations were performed using the interFOAM solver applying the kEpsilon turbulence model. In this case, RANS numerical method was used with only one degree of freedom and without taking into account the EMG mooring. The simulation consisted of dropping a column of water with an initial width and height so that it excites the floating object and begins to oscillate. Sea state was determined from the data published by the Oceanographic Institute of Ecuadorian Navy by calculating the significant height of waves for an average year. Finally, the MSI was determined by a formulation that uses the error function and the value of the area under the curve of the response spectrum.

As a result, the amplitude of the roll angle for KG= 1, 1.5 and 2 m was obtained, where it was verified that the amplitude of the roll angle increases as the KG is higher. Combining the numerical and analytical results, the Motion Sickness Index (MSI) was determined and it was verified that for none of the conditions it accomplishes with the maximum permissible percentage by the ISO-2631 standards (20%) because the minimum value of MSI obtained was 30%. However, it was identified that the decrease in KG also decreases the value of MSI, although it is still outside the permissible range.

Keywords: *Mobile Coast Guard Stations, interFOAM, kEpsilon, Motion Sickness Index.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	12
1. Introducción	12
1.1 Descripción del problema	13
1.2 Justificación del problema	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
1.4 Marco teórico.....	14
1.4.1 Estado de mar.....	14
1.4.2 Movimientos de un buque.....	15
1.4.3 Respuesta en mar irregular.....	16
1.4.4 Altura Metacéntrica Transversal	17
1.4.5 Simulaciones numéricas en estructuras flotantes	18
1.4.6 MULES	19
1.4.7 Descripción de las EMG	20
CAPÍTULO 2.....	21
2. Metodología	21

2.1	Caracterización del Estado de mar.....	21
2.1.1	Período de las olas	21
2.1.2	Altura Significativa de las olas	22
2.1.3	Batimetría.....	24
2.2	Uso de OpenFOAM	25
2.2.1	Introducción a OpenFOAM	25
2.2.2	Descripción de los métodos numéricos.....	25
2.2.3	Diagrama de flujo de trabajo de CFD.....	26
2.2.4	Descripción de la aplicación del tutorial floatingObject para el análisis de la EMG	27
2.2.5	Preprocesamiento.....	28
2.2.6	Especificaciones del procesamiento computacional	38
2.2.7	Post procesamiento	43
CAPÍTULO 3.....		50
3.	Resultados Y ANÁLISIS	50
3.1	Datos de entrada de la simulación.	50
3.1.1	Matriz de simulación	51
3.2	Convergencia de malla.....	52
3.2.1	Resultados de la convergencia	56
3.3	Espectro de mar	57
3.4	Amplitud de balance	57
3.4.1	Ancho de ola= 2.5 m	59
3.4.2	Ancho de ola= 5 m	60
3.4.3	Ancho de ola= 7.5 m	61
3.4.4	Ancho de ola= 10 m.....	62
3.4.5	Resultados finales.....	63
3.5	Factor de amortiguamiento.....	63

3.6	Periodo de oscilación	64
3.7	Superficie libre.....	65
3.8	RAO.....	70
3.9	Análisis del confort de la tripulación	73
3.9.1	Espectro de respuesta	73
3.9.2	MSI	74
3.10	Análisis de presupuesto	77
3.10.1	Desglose de costos unitarios	78
	Equipo Informático.....	78
	Software	79
	Lugar de trabajo	79
	Material de oficina	79
	Personal	79
3.10.2	Presupuesto total	80
	CAPÍTULO 4.....	82
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	82
4.1	Conclusiones.....	82
4.2	Recomendaciones.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	84
	APÉNDICES.....	87
	APÉNDICE A: BATIMETRÍA	87
	APÉNDICE B: DECREMENTO LOGARÍTMICO	91
	APÉNDICE C: EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESPECTRO DE RESPUESTA	96
	APÉNDICE D: SUPERFICIE LIBRE	98
	APÉNDICE E: PLANOS	101

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EMG	Estaciones Móviles Guardacostas
FWT	Turbinas eólicas flotantes
WECs	Convertidores de energía de las olas flotantes
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada
CFD	Computational Fluid Dynamics
RAO	Response Amplitude Operator
MSI	Índice de Malestar por Movimiento

SIMBOLOGÍA

Mil	Milésima de pulgada
Mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Altura significativa para diferentes estados de mar	15
Figura 1.2 Notación para los movimientos de un buque.....	16
Figura 1.3 RAO para el balance como una función del tiempo.....	17
Figura 1.4 Altura metacéntrica y brazo adrizantes	17
Figura 1.5 EMG ubicada en la isla Puná	20
Figura 2.1 Reporte ANLS Armónico	21
Figura 2.2 Estado de mar de Palma Real.....	23
Figura 2.3 Espectro de mar, estado 3, Beaufort 4 de Palma Real, Esmeraldas	23
Figura 2.4 Batimetría de Palma Real.....	24
Figura 2.5 Diagrama de flujo de la simulación numérica	26
Figura 2.6 Estructura de directorios del caso “floatingObject”	27
Figura 2.7 Archivo blockMeshDict	29
Figura 2.8 Dominio Computacional creado por blockMeshDict	30
Figura 2.9 Archivo dynamicMeshDict	31
Figura 2.10 Vista en planta del dominio computacional.....	32
Figura 2.11 Vista en planta del dominio computacional deformado.....	32
Figura 2.12 Archivo topoSet	33
Figura 2.13 Malla refinada utilizando topoSet.....	33
Figura 2.14 Archivo turbulenceProperties.....	34
Figura 2.15 Archivo transportProperties	35
Figura 2.16 Archivo k.....	36
Figura 2.17 Archivo épsilon	37
Figura 2.18 Archivo controlDict.....	39
Figura 2.19 Archivo fvSchemes.....	40
Figura 2.20 Diagrama de flujo del algoritmo PIMPLE	42
Figura 2.21 Función PIMPLE.....	42
Figura 2.22 Archivo setFields	43
Figura 2.23 Movimiento oscilatorio libre amortiguado	44
Figura 3.1 Dominio Computacional de la simulación.....	51
Figura 3.2 Modelo de la EMG en la simulación	51

Figura 3.3 Anchos de ola utilizados en la simulación	52
Figura 3.4 Archivo blockMeshDict para malla gruesa.....	53
Figura 3.5 Archivo blockMeshDict para malla intermedia.....	53
Figura 3.6 Archivo blockMeshDict para malla fina.....	54
Figura 3.7 Vista perspectiva de la malla gruesa.....	55
Figura 3.8 Vista perspectiva de la malla intermedia	55
Figura 3.9 Vista perspectiva de la malla fina	55
Figura 3.10 Espectro de mar, estado 3, Beaufort 4 de Palma Real, Esmeraldas	57
Figura 3.11 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo.....	59
Figura 3.12 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo.....	60
Figura 3.13 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo.....	61
Figura 3.14 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo.....	62
Figura 3.15 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.05 m.....	66
Figura 3.16 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.10 m.....	67
Figura 3.17 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.15 m.....	68
Figura 3.18 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.20 m.....	69
Figura 3.19 RAO, ancho de la columna de agua 0.05 m.....	70
Figura 3.20 RAO, ancho de la columna de agua 0.10 m.....	71
Figura 3.21 RAO, ancho de la columna de agua 0.15 m.....	71
Figura 3.22 RAO, ancho de la columna de agua 0.20 m.....	72
Figura 3.23 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.05 m	73
Figura 3.24 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.10 m	73
Figura 3.25 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.15 m	74
Figura 3.26 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.20 m	74
Figura 3.27 MSI, ancho de la columna de agua 0.05 m	75
Figura 3.28 MSI, ancho de la columna de agua 0.10 m	75
Figura 3.29 MSI, ancho de la columna de agua 0.15 m	76
Figura 3.30 MSI, ancho de la columna de agua 0.20 m	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de las condiciones de mar	15
Tabla 1.2 Características de las EMG	20
Tabla 2.1 Altura significativa de las olas en Palma Real.....	22
Tabla 3.1 Características del modelo	50
Tabla 3.2 Matriz de simulación del modelo.....	52
Tabla 3.3 Características de las mallas	54
Tabla 3.4 Cálculo del período de oscilación	56
Tabla 3.5 Resultados del período de oscilación para los distintos mallados.....	56
Tabla 3.6 Características del estado de mar 3	57
Tabla 3.7 Máxima amplitud del ángulo de balance.....	63
Tabla 3.8 Factor de amortiguamiento promedio	63
Tabla 3.9 Desviación estándar del Factor de amortiguamiento	64
Tabla 3.10 Período promedio del balance del modelo.....	64
Tabla 3.11 Desviación estándar del período.....	64
Tabla 3.12 Posiciones de evaluación de la superficie libre.....	65
Tabla 3.13 Período promedio del balance del prototipo.....	70
Tabla 3.14 MSI para Palma Real.....	77
Tabla 3.15 Presupuesto Total del proyecto	80

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Plano de Seguridad de EMG

PLANO 2 Plano de circuitos de EMG

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El Comando de Guardacostas del Ecuador es un órgano de control de las operaciones marítimas que tiene como objetivo la protección de la vida humana en el mar, la erradicación de las actividades ilegales, la protección del medio ambiente marino y garantizar la seguridad nacional. Las estaciones móviles (EMG) son estructuras flotantes de tipo pontón, cuyo objetivo es prestar apoyo logístico a los buques albatros en sus operaciones de búsqueda y rescate. La implementación de las estaciones móviles, en la zona costera ecuatoriana, surge como alternativa para mejorar la eficiencia del trabajo realizado por el Comando Guardacostas.

Las estaciones móviles deben estar situadas en zonas donde la incidencia de las actividades ilegales sea mayor, y su diseño debe garantizar que el personal abordo opere con seguridad y con un alto nivel de eficiencia operativa. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis dinámico considerando las condiciones de mar locales para la evaluación del confort de la tripulación. Este tipo de análisis se lo puede realizar mediante pruebas experimentales en modelos a escala o mediante un modelo numérico. La principal desventaja de las pruebas experimentales es el costo mientras que los modelos computacionales pueden lograr el objetivo deseado si se aumenta la precisión y confiabilidad en las etapas de la espiral de diseño a un menor costo (Weber, 2012).

La comunidad científica ha desarrollado herramientas para analizar numéricamente el comportamiento dinámico de las estructuras flotantes en presencia del viento y las olas, como los aerogeneradores flotantes (FWT) (Bae, 2014) y los convertidores flotantes de energía de las olas (WEC) (Johanning, 2007). Estos modelos hidrodinámicos de radiación-difracción lineales con términos adicionales de corrección debido a los efectos no lineales, tales como la fuerza de Froude-Krylov, han generado resultados prometedores (Penalba Retes, 2015). Recientemente, se ha estudiado la contribución de la fuerza viscosa, en convertidores WECs usando simulaciones donde se ha incluido la fuerza de Morison de primer orden y se ha llegado a la conclusión que el efecto de la fuerza viscosa era despreciable para este

caso (Bhinder, 2011). El modelo de difracción es capaz de proporcionar resultados aplicables en la fase de diseño preliminar y requiere un menor costo computacional por lo que será el usado en este estudio.

1.1 Descripción del problema

Actualmente, dos EMG ubicadas al sur de la Isla Puná y el río Mataje - Esmeraldas brindan apoyo logístico a las unidades guardacostas que operan en Machala, sur de Esmeraldas y norte de Manabí. Estas ubicaciones fueron escogidas para disminuir los problemas de movimientos exagerados que fueron inicialmente reportados cuando fueron fondeadas en la playa El Matal y el Lago Cuyabeno, donde la formación de olas, al igual que en el océano, es debido al viento.

Adicionalmente, se redujo el número de tripulantes debido a los malestares (mareos), que gran parte de ellos reportaron, al estar a bordo cumpliendo con sus actividades. Esta reducción de personal ha disminuido la efectividad operativa del EMG debido a la sobrecarga de tareas del personal. Finalmente, los problemas reportados detuvieron la implementación de más Estaciones Móviles en los demás puntos estratégicos de la zona costera del país definidos en función de índices de actividades ilícitas.

1.2 Justificación del problema

Las unidades del Comando Guardacostas son parte de operaciones de: i) rescate de embarcaciones en riesgo de naufragio, ii) salvamento de vidas humanas en alta mar; y iii) neutralización de tráfico ilegal de hidrocarburos, estupefacientes, mercadería, pesca ilícita y asalto a embarcaciones. Entre los años 2015 al 2017, se registraron 354, 502, y 263 casos de actividades ilícitas en la zona costera ecuatoriana.

Los asaltos en alta mar se han incrementado en estos últimos años, causando impotencia en los pescadores artesanales al perder sus lanchas, motores, artes de pesca y muchas veces la vida de seres queridos. Entre 2014 y 2020 se han reportado 3062 asaltos, 52 de cada 1000 pescadores son afectados por delitos en alta mar y se han registrado 33 muertos en los últimos ocho años (Pérez, 2019).

Por este motivo, urge el despliegue de Estaciones Móviles Guardacostas en más puntos estratégicos de la zona costera del país que ayudaría a reducir considerablemente las actividades ilícitas en mar abierto

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la estabilidad dinámica del movimiento de balance de la Estación Móvil Guardacostas operando en Palma Real usando OpenFOAM.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Definir los parámetros de operación de la Estación Móvil incluyendo la caracterizando del estado de mar en Palma Real - Esmeraldas a partir de las mediciones de oleaje realizadas por INOCAR.
2. Determinar el factor de amortiguamiento del movimiento de balance del sistema dinámico considerando tres posiciones de CG utilizando el método de decremento logarítmico y simulaciones numéricas en OpenFOAM.
3. Determinar el Operador de la Amplitud de la Respuesta (RAO) en balance de la Estación Móvil Guardacostas combinando resultados numéricos y analíticos.
4. Determinar el Índice de Malestar por Movimiento (MSI) basado en el balance de la EMG operando en Palma Real, Esmeraldas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Estado de mar

El movimiento de las olas en la superficie del mar es muy irregular, sin embargo, los oceanógrafos han sido capaces de predecir estadísticamente variaciones significativas en la altura de las olas para una ubicación/región determinada durante un período de tiempo definido determinado. Por ejemplo, la altura significativa de ola para un mar irregular es la media aritmética de las alturas de ola del tercio más alto de un registro dado (Bhattacharyya, 1978). Además, la altura significativa depende de la velocidad del viento o del número de Beaufort (el número de Beaufort es una medida empírica de la intensidad del viento basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento). Típicamente, el estado de mar

en una ubicación en particular es definido en función de su altura significativa histórica mediante la Tabla 1.1. Estos valores son graficados en la Figura 1.1 para obtener una ecuación polinómica de grado 2 con un coeficiente de correlación entre los datos de 0.99.

Tabla 1.1 Clasificación de las condiciones de mar (Bhattacharyya, 1978)

Estado de mar	Altura Significativa [ft]	Altura Significativa [m]
0	0.00	0.00
1	0.90	0.27
2	2.57	0.78
3	4.15	1.26
4	6.25	1.91
5	8.87	2.70
6	12.50	3.81
7	17.30	5.27

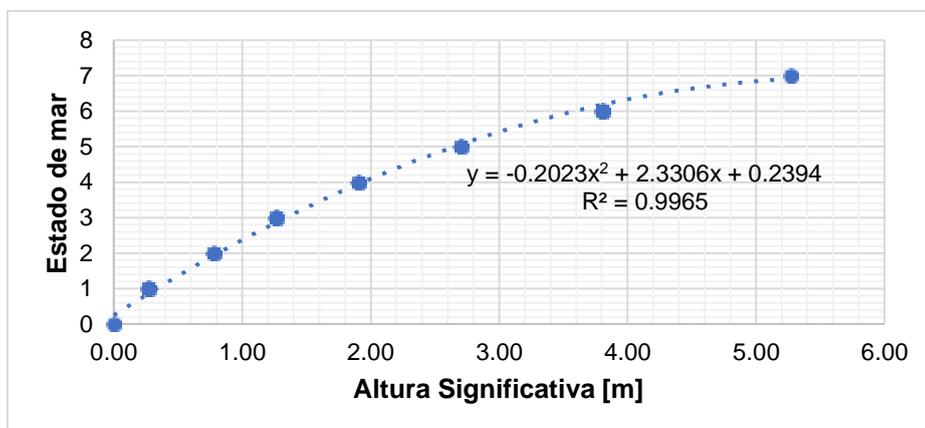


Figura 1.1 Altura significativa para diferentes estados de mar

1.4.2 Movimientos de un buque

El movimiento de una estación móvil que flota sobre la superficie de mar irregular es el mismo que el de una embarcación. Estos movimientos son casi siempre oscilatorios, como se muestra en la Figura 1.2. Hay seis tipos de movimiento, tres de los cuales son de traslación y tres de rotación en torno a tres ejes principales. El eje X apunta hacia proa, el eje Y hacia babor y el eje Z hacia arriba. Los

movimientos traslacionales son avance, deriva y arfada y los rotacionales son balance, cabeceo y guiñada respectivamente (Hidalgo, 2018).

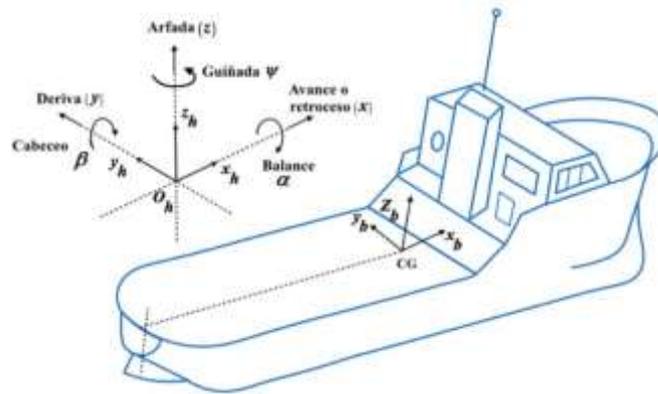


Figura 1.2 Notación para los movimientos de un buque (Hidalgo, 2018)

1.4.3 Respuesta en mar irregular

El RAO (Response Amplitude Operator) es un parámetro usado para mostrar la variación de amplitud de la respuesta de uno de los movimientos por unidad de amplitud de ola en función de la frecuencia de la ola incidente (Lewis, 1988).

En la Figura 1.3 se puede observar la gráfica del RAO para el balance, obtenida analíticamente relacionando la amplitud del balance con la amplitud de la ola, de un buque con eslora de 137 m, radio de giro en x de 9.4 m, altura metacéntrica transversal de 1.76 m, un desplazamiento de 12500 toneladas y viajando 20 nudos a un ángulo de 150° con respecto a las olas. En este caso, no se ha tomado en cuenta los efectos no lineales y se ha considerado que el buque se encuentra navegando en olas regulares. El RAO también puede ser determinado experimentalmente relacionando la amplitud de cada movimiento con la amplitud de ola tomada de registros simultáneos de movimientos y amplitudes de ola (Bhattacharyya, 1978).

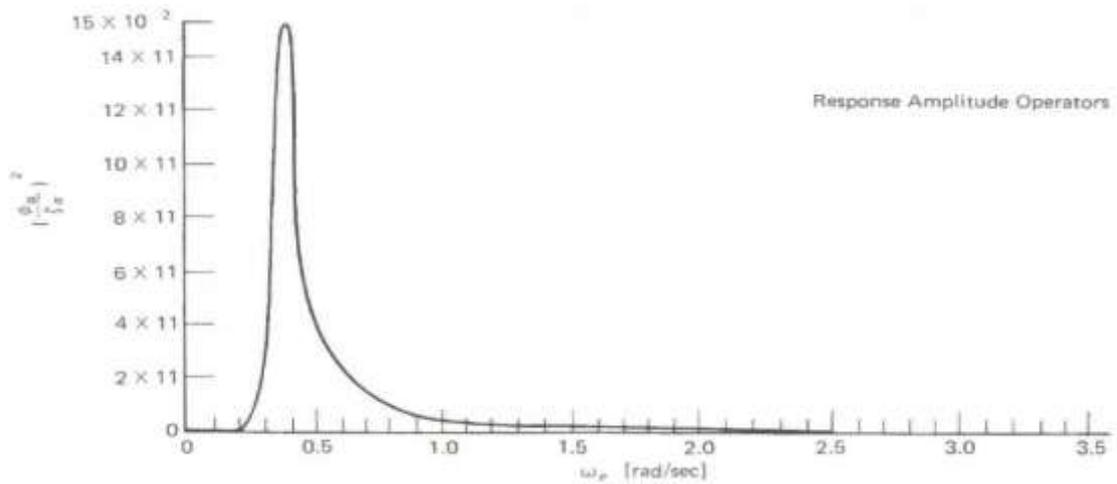


Figura 1.3 RAO para el balance como una función del tiempo (Bhattacharyya, 1978)

1.4.4 Altura Metacéntrica Transversal

El Metacentro es el punto de intersección de una línea vertical que pasa por el Centro de Boyantes "B" con el plano de Crujía cuando el ángulo de escora es inferior a 5° , para ángulos mayores el metacentro ya no pertenece a dicha línea vertical. A la distancia BM se le llama radio metacéntrico transversal y es la distancia entre el metacentro y el centro de carena. La distancia vertical GM se conoce como altura o distancia metacéntrica y es muy usada como una indicación del valor de la estabilidad de la nave (Rodríguez Castillo, 2000).

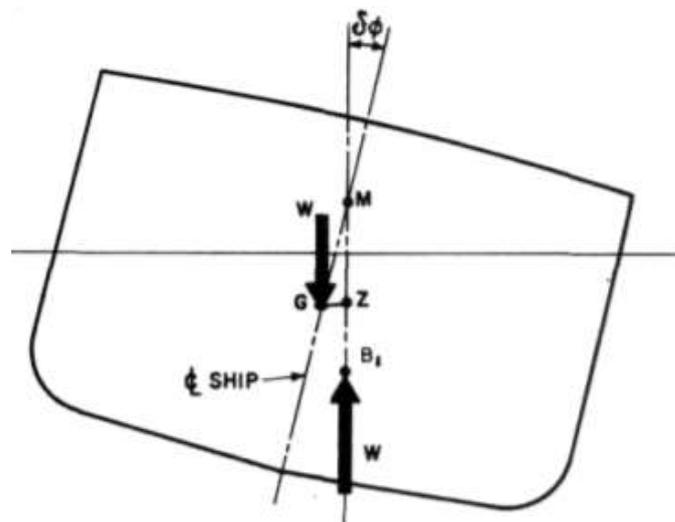


Figura 1.4 Altura metacéntrica y brazo adrizantes (Lewis, 1988)

Además, se la puede calcular con la siguiente ecuación:

$$GM_t = KB + BM_t - KG \quad (1.1)$$

Donde,

KB es el centro de boyantez [m].

BM_t es el radio metacéntrico [m].

KG es el centro de gravedad [m].

La EMG puede ser tratada como si fuera una barcaza por lo que el radio metacéntrico y el centro de boyantez pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$KB = \frac{\nu}{2} \quad (1.2)$$

$$BM_t = \frac{I_t}{\nabla} \quad (1.3)$$

$$I_t = \frac{B^3L}{12} \quad (1.4)$$

Donde,

B es el calado [m].

L es la eslora [m].

I_t es la inercia transversal [m^4].

∇ es el desplazamiento [m^3].

1.4.5 Simulaciones numéricas en estructuras flotantes

El estudio del comportamiento de estructuras flotantes en el mar ha evolucionado con el pasar de los años, considerando cada vez más factores en la etapa de modelado, con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad. El análisis de las estructuras flotantes ha sido realizado utilizando el método numérico RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). En este método, las ecuaciones de movimiento que describen el flujo turbulento no se resuelven directamente si no que se descomponen en un valor medio otro fluctuante y son promediadas en el

tiempo (Rodi, 1997). Como resultado, este método numérico es el que menor costo computacional requiere.

Muchos estudios han utilizado CFD para modelar convertidores de energía de las olas (WECs) en uno o dos grados de libertad comparando los resultados con otros obtenidos de métodos más rápidos, pero de menor fidelidad. Se ha llegado a la conclusión que los efectos no lineales tales como el arrastre viscoso pueden tener un gran impacto en las estimaciones de producción de energía. Por lo tanto, estos efectos deben ser tenidos en cuenta por las simulaciones numéricas con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad (Palm J. , 2014).

Otros estudios han realizado el análisis del comportamiento de convertidores de energía de las olas incluyendo el sistema de amarre o fondeo. En este tipo de simulaciones se suele utilizar una equivalencia de resorte lineal simplificada para modelar la dinámica de amarre. El análisis totalmente acoplado se realizó para el convertidor de energía OWEL en cabeceo, levantamiento y deriva usando un acoplamiento de Ansys-CFX a Orcaflex. Los resultados obtenidos fueron buenos pero el proceso de acoplamiento no fue descrito en detalle. Además, aún se necesita validar los estudios CFD que aborden las no linealidades presentes en estos objetos flotantes (Nicholls-Lee, 2013).

En este caso, se utilizará el método numérico RANS con un solo grado de libertad y sin tomar en cuenta el amarre de la EMG. Las ecuaciones van a ser resueltas utilizando el solucionador interFoam proporcionado en OpenFOAM, un marco computacional de volumen finito centrado en celdas para la dinámica de fluidos que admite mallas poliédricas no estructuradas.

1.4.6 MULES

La versión OpenFOAM 1.4 implementó MULES (Multi-dimensional limiter for explicit solution). Es un método efectivo para garantizar el acotamiento de los campos escalares en los solucionadores de volumen de fluido para sistemas multifásicos. Sin embargo, el método es fundamentalmente explícito al introducir un límite de número de Courant y, por consiguiente, un límite de paso de tiempo cuando se ejecutan los solucionadores y que solo puede ser mitigado implementando un subciclo de paso de tiempo (Greenshields, 2019).

1.4.7 Descripción de las EMG

Las dos Estaciones Móviles Guardacostas, ubicadas en el sur de la Isla Puná y en el río Mataje, tienen iguales características. Ambas poseen una infraestructura de tres pisos de concreto y metal, un casco prismático de metal con las dimensiones mencionadas en la Tabla 1.1. Además, tienen 4 anclas, de dos toneladas cada una, que le permiten estar fondeadas en ubicaciones con 15 m de profundidad.

Tabla 1.2 Características de las EMG

Eslora de diseño [m]	15.50
Manga de diseño [m]	13.00
Puntal de diseño [m]	2.80
Calado de diseño [m]	1.95
Francobordo [m]	0.95
Desplazamiento en línea de diseño [ton]	361.99
Desplazamiento total [ton]	578.30
Coefficiente de Bloque	1.00



Figura 1.5 EMG ubicada en la isla Puná

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización del Estado de mar

2.1.1 Período de las olas

La determinación de la frecuencia de las olas en Palma Real, Esmeraldas se la realizó utilizando los datos obtenidos del INOCAR del Reporte ANLS Armónico. Este reporte determina los componentes armónicos de un registro particular del nivel del mar, que puede ser usado para generar datos de mareas astronómicas pasados y futuros en ese sitio (Searson, 1995). En la Figura 2.1, en la columna 3, se pueden observar los valores de frecuencia para los cuales se generó el reporte armónico, se trabajó con la distribución de frecuencias para calcular el período de operación de la EMG.

HARM065

Palma Real Units in CM
 STATION 65 TIME ZONE = -75, LATITUDE = 126, LONGITUDE = 7851
 NUMBER OF VALID DATA = 2403 AVERAGE =187.75 STANDARD DEVIATION = 92.34
 THEORETICAL RMS = 6.59 MATRIX CONDITION = .86
 ANALYSIS OF HOURLY TIDAL HEIGHTS STN 65 11H 17/ 4/11 TO 13H 26/ 7/11
 NO.OBS.= 2403 NO.PTS.ANAL.= 2403 MIDPT=12H 6/ 6/11 SEPARATION =1.00

NO	NAME	FREQUENCY	STN	M-Y/	M-Y	AL	GL	A	GNWCH
1	Z0	.00000000	65	411/	7111	187.7176	.00	187.7176	.00
2	MM	.00151215	65	411/	711	1.8791	335.25	1.8791	27.00
3	MSF	.00282193	65	411/	711	1.0373	221.31	1.0373	97.23
4	ALP1	.03439657	65	411/	711	.1699	45.29	.1703	228.92
5	2Q1	.03570635	65	411/	711	.0672	263.60	.0754	267.44
6	Q1	.03721850	65	411/	711	.5455	68.52	.5720	129.95
7	O1	.03873065	65	411/	711	2.5004	355.74	2.4877	114.84
8	NO1	.04026859	65	411/	711	.4094	284.90	.5998	284.01
9	K1	.04178075	65	411/	711	11.7461	343.80	11.7717	350.55
10	J1	.04329290	65	411/	711	.6377	351.66	.7436	61.99
11	OO1	.04483084	65	411/	711	.7563	8.77	.8300	84.33
12	UPS1	.04634299	65	411/	711	.1504	29.14	.1656	155.99
13	EPS2	.07617731	65	411/	711	.6663	57.96	.6672	252.72
14	MU2	.07768947	65	411/	711	3.6391	108.80	3.6529	354.95
15	N2	.07899925	65	411/	711	24.0538	75.75	24.2319	146.01
16	M2	.08051140	65	411/	7111	123.6485	106.58	124.2111	228.49
17	L2	.08202355	65	411/	711	2.8738	138.41	2.3907	143.54
18	S2	.08333334	65	411/	711	27.1298	160.65	27.1261	160.77
19	ETA2	.08507364	65	411/	711	.4713	258.80	.4708	134.55
20	MO3	.11924210	65	411/	711	.5016	332.88	.5013	213.90
21	M3	.12076710	65	411/	711	.4191	156.63	.4222	339.55
22	MK3	.12229210	65	411/	711	.1465	26.53	.1475	155.19
23	SK3	.12511410	65	411/	711	.8087	295.23	.8104	302.11
24	MN4	.15951060	65	411/	711	.1862	220.12	.1885	52.30
25	M4	.16102280	65	411/	711	1.3142	232.31	1.3262	116.14
26	SN4	.16233260	65	411/	711	.2335	350.22	.2352	60.61
27	MS4	.16384470	65	411/	711	.2770	317.74	.2782	79.78
28	S4	.16666670	65	411/	711	.1065	51.72	.1065	51.96
29	2MK5	.20280360	65	411/	711	.1046	275.99	.1058	166.57
30	2SK5	.20844740	65	411/	711	.0969	336.02	.0971	343.01
31	2MN6	.24002200	65	411/	711	.3326	277.49	.3381	231.59
32	M6	.24153420	65	411/	711	.5455	352.33	.5530	358.08
33	2MS6	.24435610	65	411/	711	.2972	9.69	.2998	253.64
34	2SM6	.24717810	65	411/	711	.1487	353.50	.1494	115.66
35	3MK7	.28331490	65	411/	711	.0533	74.42	.0542	86.92
36	M8	.32204560	65	411/	711	.2477	190.16	.2523	317.82

Figura 2.1 Reporte ANLS Armónico (INOCAR, 2022)

2.1.2 Altura Significativa de las olas

A partir de datos publicados por el Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR, 2022), se puede determinar la altura significativa de las olas para los diferentes meses de un año promedio, como se muestra en la Tabla 2.1. Estos valores fueron obtenidos mediante la media aritmética del tercio con mayor altura de olas registradas por cada mes.

Tabla 2.1 Altura significativa de las olas en Palma Real

Mes del año	Altura Significativa [m]
Enero	1,85
Febrero	1,89
Marzo	1,92
Abril	1,87
Mayo	1,85
Junio	1,77
Julio	1,8
Agosto	1,89
Septiembre	1,93
Octubre	1,95
Noviembre	1,9
Diciembre	1,9

Luego, se graficó el estado de mar en función del mes del año en Palma Real como se puede observar en la Figura 2.2. El valor máximo de altura significativa ocurre en el mes de octubre en estado de mar 4, y el mínimo en junio, estado de mar de 3.

En la Figura 2.3, se puede observar el gráfico del espectro de mar de Palma Real, estado tres, determinado con la formulación de Pierson-Moskowitz (Bhattacharyya, 1978), ecuación (2.1).

$$S^+(\omega_e) = \frac{8.1 \times 10^{-5}}{\omega_e} g^2 e^{-0.74 \frac{g}{V \omega_e}} \quad [m^2 * seg] \quad (2.1)$$

Donde,

V es la velocidad del viento $\frac{m}{seg}$.

g es la gravedad $\frac{m}{seg^2}$.

ω_e es la frecuencia de encuentro $\frac{rad}{seg}$.

Como se puede observar, la ecuación 2.1 solamente depende del viento, porque se la gráfica para un rango de frecuencias y la gravedad es una constante. El valor de la velocidad del viento fue cuantificado en las visitas que se realizaron a la EMG y se llegó a la conclusión que el número de Beaufort era igual a cuatro.

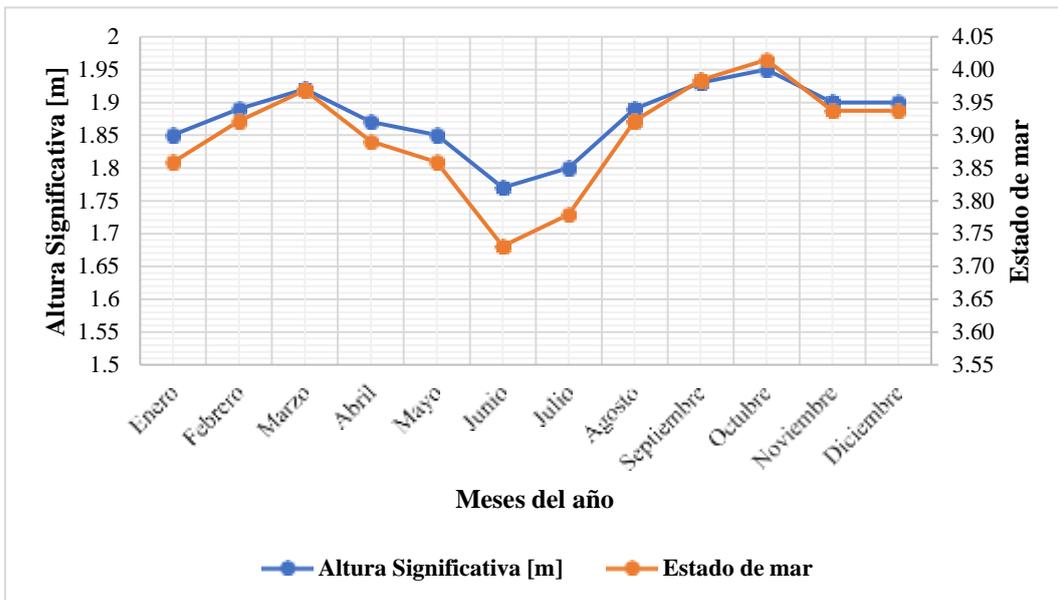


Figura 2.2 Estado de mar de Palma Real

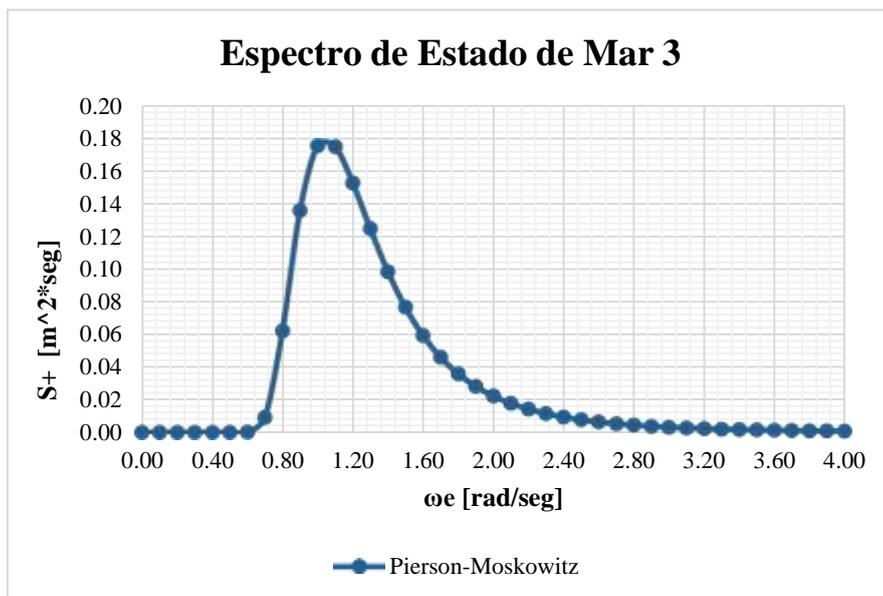


Figura 2.3 Espectro de mar, estado 3, Beaufort 4 de Palma Real, Esmeraldas

2.1.3 Batimetría

La batimetría estudia el relieve de superficie de la profundidad submarina, sea esta el fondo del mar, ríos o lagos; para respaldar la seguridad de la navegación, además de predecir mareas, corrientes y olas (Collett, 1986). En el presente trabajo se digitalizó la batimetría de Palma Real a partir de las cartas náuticas publicadas por el Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR, 2022), como se presenta en el Anexo B. La Figura 2.4 nos permite identificar si la zona analizada cumple con la condición mínima de profundidad para poder ubicar la EMG. Como se puede observar, las zonas de color rojo tienen una profundidad de 10 m, en estas zonas se podría fondear la EMG.

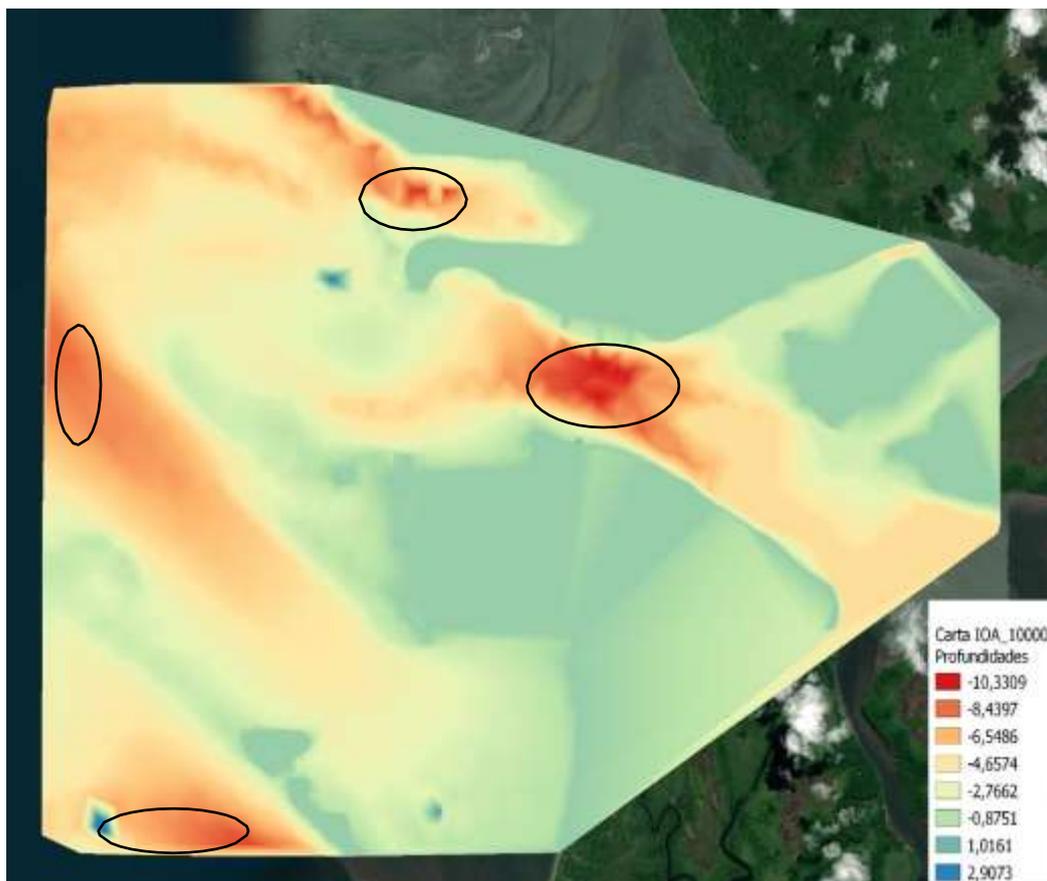


Figura 2.4 Batimetría de Palma Real

2.2 Uso de OpenFOAM

2.2.1 Introducción a OpenFOAM:

OpenFOAM es el principal software de código abierto para modelar problemas relacionados con la dinámica de fluidos. Cuenta con aproximadamente 250 aplicaciones ya implementadas que se dividen en dos categorías: los solucionadores, diseñados para resolver un problema de mecánica de fluidos en específico, y las utilidades, diseñadas para el procesamiento de datos. Además, contiene una colección de aproximadamente 100 bibliotecas C++ que permiten a los usuarios ampliar la colección de solucionadores, utilidades y bibliotecas, desarrollando más aplicaciones ejecutables, de acuerdo con el método, la física y las técnicas de programación empleadas para resolver cada problema (Greenshields, 2019).

2.2.2 Descripción de los métodos numéricos

En este proyecto se ha utilizado la versión 7 de OpenFOAM por ser un software de código abierto cuya estructura general permite realizar cualquier análisis CFD: preprocesamiento, ejecución de la simulación y postprocesamiento. OpenFOAM dispone de los siguientes métodos numéricos.

- **Direct Numerical Simulation (DNS):** Proporciona una solución numérica para las ecuaciones transitorias de Navier-Stokes con una precisión físicamente consistente en el espacio y el tiempo debido a que resuelve un amplio rango de escalas de tiempo y longitud que afectan el campo de flujo (Moin, 1998). Por este motivo, este método numérico es el que requiere mayor costo computacional. En OpenFOAM, este método numérico es usado en el solver `dnsfoam` (Greenshields, 2019).
- **Large Eddy Simulation (LES):** Resuelve el sistema de ecuaciones de gobierno en una malla muy gruesa que ignora las escalas de longitud más pequeñas que son las que requieren mayor costo computacional para poder ser resueltas y a números de Reynolds es superior a 10^6 (Janicka, 2005). En OpenFOAM, este método numérico es usado en los solvers: `chemFoam`, `coldEngineFoam`,

fireFoam, XiFoam, buoyantPimpleFoam, DPMFoam, sprayFoam, reactingParcelFoam (Greenshields, 2019).

- **Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS):** Promedia en el tiempo las ecuaciones de Navier-Stokes por lo que, la derivada en el tiempo desaparece de las ecuaciones. La descomposición de Reynolds consiste en expresar cada variable en un valor promedio más una parte fluctuante. Este método numérico es el que menor costo computacional requiere y en OpenFOAM es usado en los solvers: chemFoam, coldEngineFoam, fireFoam, XiFoam, buoyantPimpleFoam, DPMFoam, sprayFoam, reactingParcelFoam (Greenshields, 2019).

2.2.3 Diagrama de flujo de trabajo de CFD

En la Figura 2.5 se presenta el diagrama de flujo seguido para completar cualquier simulación numérica realizada en OpenFOAM.

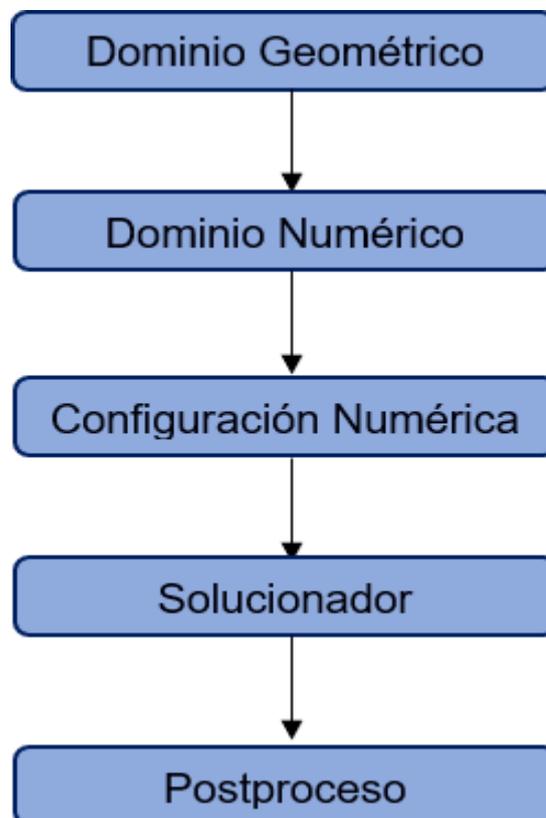


Figura 2.5 Diagrama de flujo de la simulación numérica (Barajas, Lara, & Maza, 2016).

2.2.4 Descripción de la aplicación del tutorial floatingObject para el análisis de la EMG

Para el presente trabajo, se trabaja con el tutorial “floatingObject”, el caso se lo puede encontrar dentro de la carpeta “multiphase” donde se debe escoger el solver “interFOAM”.

Como todo caso de OpenFOAM cuenta con tres carpetas o directorios que se utilizan para especificar los detalles numéricos de la simulación, cuyo contenido se muestra en la Figura 2.6. Los archivos resaltados con color verde fueron los utilizados para capturar la respuesta del cuerpo.

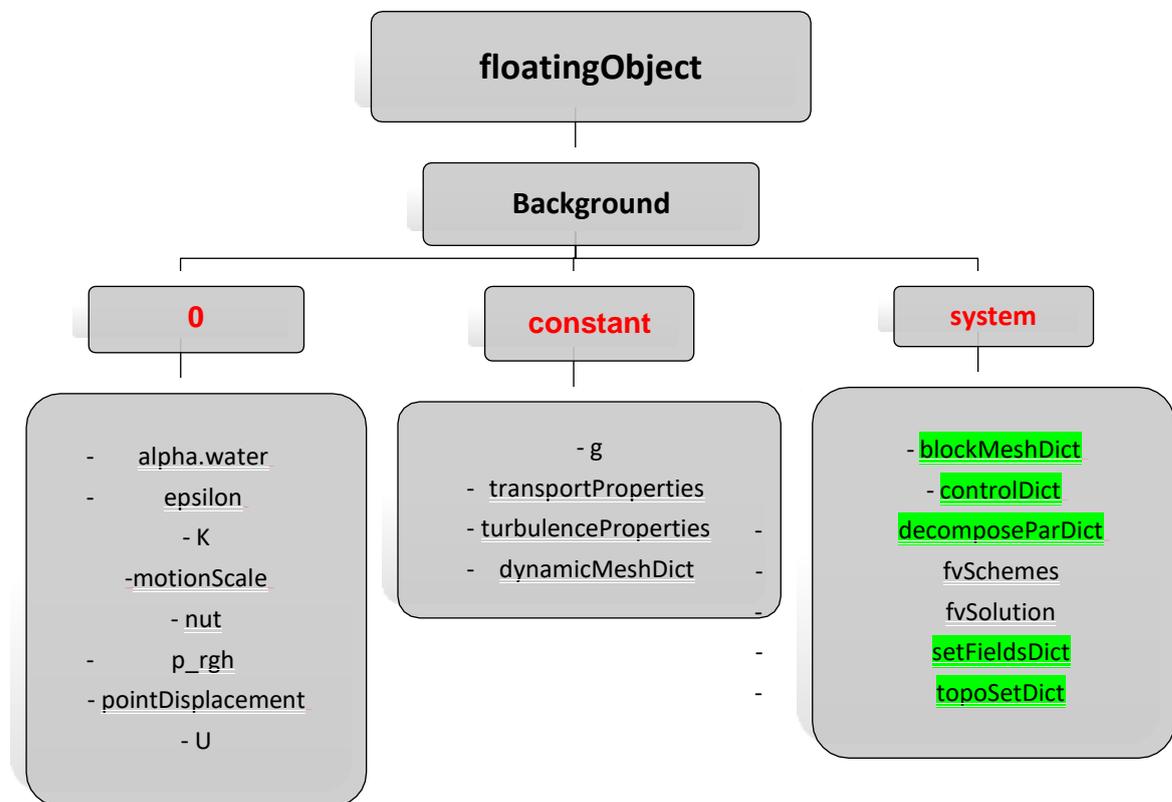


Figura 2.6 Estructura de directorios del caso “floatingObject”

Los tres directorios principales son:

- 0: En este directorio se establecen las condiciones iniciales y de frontera iniciales de la simulación.

- Constant: Este directorio contiene la descripción completa de la malla del caso en el subdirectorio “polyMesh”. Además, se detallan las propiedades físicas del problema.
- System: Este directorio sirve para establecer los parámetros relacionados con el procedimiento de la resolución del problema.

2.2.5 Preprocesamiento

2.2.5.1 Creación del mallado

En esta sección, se describen los archivos en OpenFOAM que permiten generar la malla del problema, tales como: blockMeshDict, dynamicMeshDict, topoSet, turbulenceProperties, transportProperties.

BlockMeshDict

Este archivo, ubicado en el directorio “system”, genera la malla usada para discretizar el dominio físico usando bloques hexaédricos con 8 vértices. En primer lugar, se definen los vértices de referencia de la malla de acuerdo con el dominio computacional requerido por el usuario. Luego, se definen los bloques que forman parte de la malla utilizando los vértices especificados, donde cada bloque está compuesto por: 8 vértices, el número de división del bloque en cada dirección y el radio de expansión. Además, se identifican las fronteras que para este caso son: paredes estacionarias, atmósfera y objeto flotante. Finalmente, las caras de los bloques se asignan como parches y se pueden fusionar, pero en este caso no es necesario debido a que sólo se tiene un bloque.

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0)
    (1 0 0)
    (1 1 0)
    (0 1 0)
    (0 0 1)
    (1 0 1)
    (1 1 1)
    (0 1 1)
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 20 30) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

boundary
(
    stationaryWalls
    {
        type wall;
        faces
        (
            (0 3 2 1)
            (2 6 5 1)
            (1 5 4 0)
            (3 7 6 2)
            (0 4 7 3)
        );
    }

    atmosphere
    {
        type patch;
        faces
        (
            (4 5 6 7)
        );
    }

    floatingObject
    {
        type wall;
        faces ();
    }
);

mergePatchPairs
(
);

```

Figura 2.7 Archivo blockMeshDict

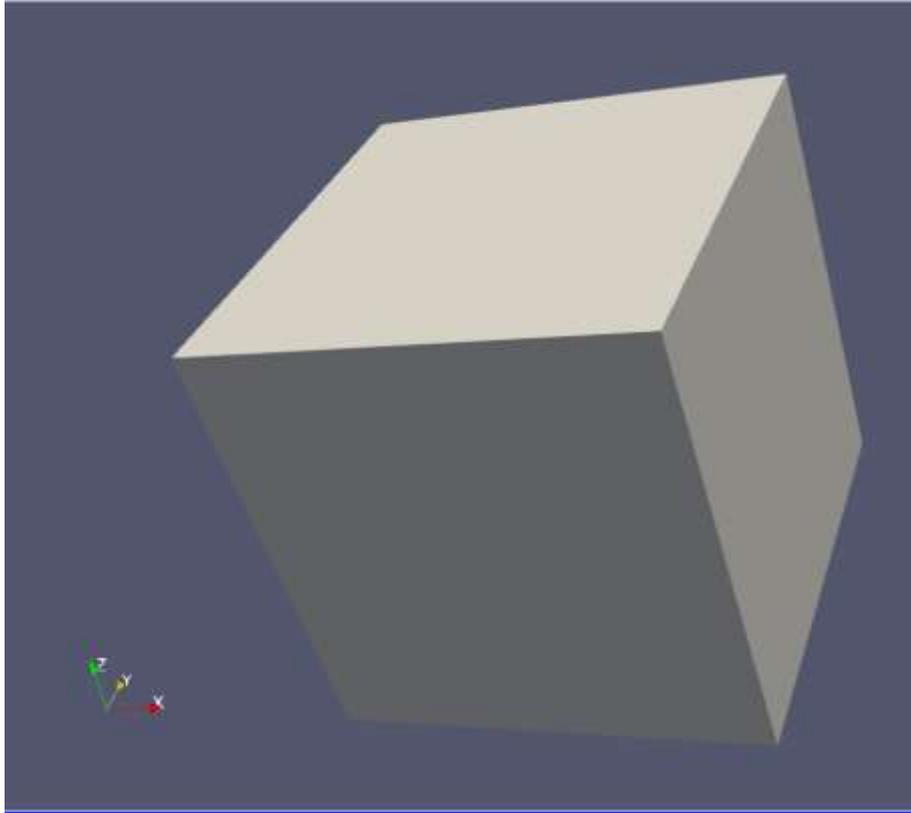


Figura 2.8 Dominio Computacional creado por blockMeshDict

dynamicMeshDict

Este archivo, ubicado en el directorio “constant”, permite deformar la malla durante la simulación para capturar el movimiento del cuerpo flotante interactuando con los fluidos. Dentro del archivo se especifican el control de transformación de la malla, los parámetros físicos del cuerpo rígido, los parámetros del solucionador que resolverá los movimientos del cuerpo, así como la definición de las fuerzas y restricciones de movimiento del cuerpo (Greenshields, 2019). En la Figura 2.9, se observa que el motionsolver elegido es el “sixDoFRigidBodyMotion” que permite el movimiento de los seis grados de libertad para un cuerpo rígido como el floatingObject. En la parte de constraints, se restringe el caso a un solo grado de

libertad para analizar el balance. Con “fixedPoint” se eliminó el movimiento lineal y con “fixedAxis” se restringió la rotación del objeto sólo para el eje x.

```

dynamicFvMesh      dynamicMotionSolverFvMesh;

motionSolverLibs  ("libsixDoFRigidBodyMotion.so");

motionSolver      sixDoFRigidBodyMotion;

sixDoFRigidBodyMotionCoeffs
{
    patches        (floatingObject);
    innerDistance  0.05;
    outerDistance  0.52;

    centreOfMass   (0.5 0.45 0.52);

    // Cuboid dimensions
    Lx              0.31;
    Ly              0.26;
    Lz              0.06;

    // Density of the solid
    rhoSolid        800;

    // Cuboid mass
    mass            #calc "$rhoSolid*$Lx*$Ly*$Lz";

    // Cuboid moment of inertia about the centre of mass
    momentOfInertia #codeStream
    {
        codeInclude
        #{
            #include "diagTensor.H"
        #};
    };
};

code
#{
    scalar sqrLx = sqr($Lx);
    scalar sqrLy = sqr($Ly);
    scalar sqrLz = sqr($Lz);
    os <<
        $mass
        *diagTensor(sqrLy + sqrLz, sqrLx + sqrLz, sqrLx + sqrLy)/12.0;
};

report            on;
accelerationRelaxation 0.7;
//accelerationDamping 0;

solver
{
    type Newmark;
}

constraints
{
    fixedPoint
    {
        sixDoFRigidBodyMotionConstraint point;
        centreOfRotation (0.5 0.45 0.5);
    }

    fixedAxis
    {
        sixDoFRigidBodyMotionConstraint axis;
        axis (1 0 0);
    }
}

```

Figura 2.9 Archivo dynamicMeshDict

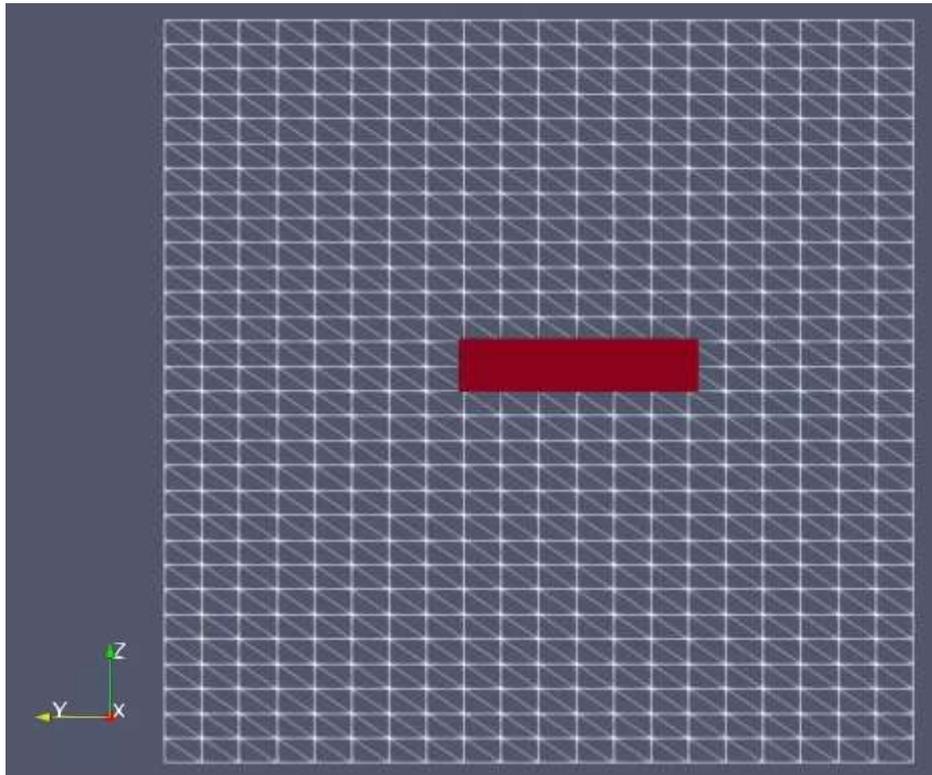


Figura 2.10 Vista en planta del dominio computacional

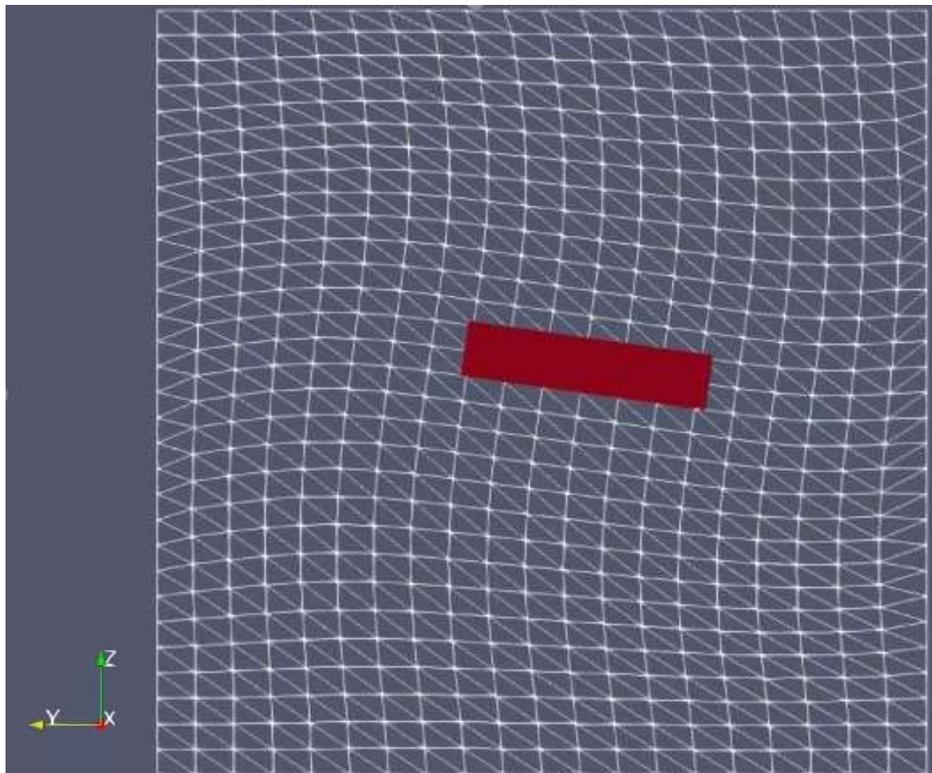


Figura 2.11 Vista en planta del dominio computacional deformado

topoSet

Este archivo, ubicado en el directorio “system”, define las diferentes zonas de la malla que son refinadas de manera progresiva. En el presente archivo, se define la posición de la estación móvil dentro del dominio computacional como se muestra en la Figura 2.12. Se debe tener en cuenta que la región definida en este archivo debe coincidir con las dimensiones de la estación móvil previamente establecidas en el archivo “blockMeshDict” como se observa en la Figura 2.13, caso contrario la simulación no correrá.

```
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       topoSetDict;
}

// *****

actions
(
  {
    name      c0;
    type      cellSet;
    action    new;
    source    boxToCell;
    sourceInfo
    {
      box (0.345 0.32 0.5) (0.655 0.58 0.56);
    }
  }

  {
    name      c0;
    type      cellSet;
    action    invert;
  }
);
```

Selección de celdas en una región

Definición de la ubicación de EMG dentro del dominio

Figura 2.12 Archivo topoSet

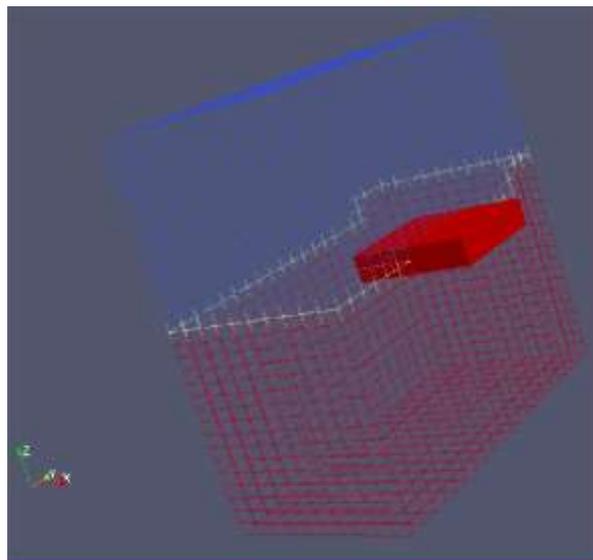


Figura 2.13 Malla refinada utilizando topoSet

turbulenceProperties

Este archivo, ubicado en el directorio “constant”, es utilizado para especificar el tipo de simulación que en el presente trabajo es RAS con un modelo de turbulencia kEpsilon. Además, se activa la turbulencia y la impresión de los coeficientes para cada intervalo de tiempo como se observa en la Figura 2.14.

```
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       turbulenceProperties;
}
// * * * * *

simulationType RAS;

RAS
{
  RASModel      kEpsilon;

  turbulence     on;

  printCoeffs   on;
}
```

Figura 2.14 Archivo turbulenceProperties

transportProperties

En este archivo, ubicado en el directorio “constant”, se establecen las propiedades físicas del problema como se puede notar en la Figura 2.15. En el presente trabajo, se elige el Modelo Newtoniano dado que se asume la viscosidad como constante y se establecen los valores de viscosidad cinemática y de densidad tanto para el agua como para el aire.

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       transportProperties;
}
// *****

phases (water air);

water
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              1e-06;
    rho             998.2;
}

air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              1.48e-05;
    rho             1;
}

sigma            0;

```

Figura 2.15 Archivo transportProperties

2.2.5.2 Condiciones iniciales o de frontera

En esta sección, se describen los archivos en OpenFOAM que establecen las condiciones para las fronteras previamente especificadas en el archivo "blockMeshDict". Todos los archivos se encuentran en el directorio "0" y son los siguientes:

K

Este archivo es utilizado para definir la energía cinética turbulenta por unidad de masa de las fluctuaciones de turbulencia en un flujo turbulento isotrópico y para su estimación se usa la ecuación (2.2).

$$k_{inlet} = \frac{\rho}{2} (I|u|)^2 \quad (2.2)$$

Donde,

k_{inlet} es la energía cinética turbulenta $\frac{m^2}{seg^2}$.

I es la intensidad de turbulencia.

u es una velocidad de referencia del flujo $\frac{m}{seg}$.

En la Figura 2.16, se puede observar que, tanto para las paredes estacionarias como para la EMG, se ha elegido la `kqRWallFunction` como condición de frontera debido a que proporciona una envoltura simple alrededor de la condición de gradiente cero que se puede utilizar para la energía cinética turbulenta (Greenshields, 2019).

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  location     "0";
  object       k;
}
// *****

dimensions    [0 2 -2 0 0 0];

internalField uniform 0.007235;

boundaryField
{
  stationaryWalls
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0.007235;
  }
  atmosphere
  {
    type      inletOutlet;
    inletValue uniform 0.007235;
    value     uniform 0.007235;
  }
  floatingObject
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0.007235;
  }
}

```

Figura 2.16 Archivo k

Epsilon

Este archivo es utilizado para definir la tasa de disipación de energía cinética turbulenta que es un parámetro fundamental indicativo de la fuerza de la turbulencia isotrópica y para su estimación se usa la ecuación (2.3) (Greenshields, 2019).

$$\epsilon = \frac{C_{\mu} u^{0.7777} k^{1.177}}{L} \quad (2.3)$$

Donde,

ϵ es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta $\frac{m^2}{s^3}$.

C_{μ} es una constante del modelo igual a 0.09.

L es una escala de longitud de referencia [m].

```
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volScalarField;
  location     "0";
  object       epsilon;
}
// * * * * *

dimensions     [0 2 -3 0 0 0];

internalField  uniform 2.02e-06;

boundaryField
{
  stationaryWalls
  {
    type          epsilonWallFunction;
    Cmu           0.09;
    kappa         0.41;
    E             9.8;
    value         uniform 2.02e-06;
  }
  atmosphere
  {
    type          inletOutlet;
    inletValue    uniform 2.02e-06;
    value         uniform 2.02e-06;
  }
  floatingObject
  {
    type          epsilonWallFunction;
    Cmu           0.09;
    kappa         0.41;
    E             9.8;
    value         uniform 2.02e-06;
  }
}
```

Figura 2.17 Archivo épsilon

En el archivo épsilon, mostrada en la Figura 2.17, se puede observar la constante von Kármán constant (κ), una constante adimensional que describe cómo se distribuye la velocidad longitudinal en la dirección normal a la pared en un flujo

turbulento y que en este caso es igual a 0.41. Además, se tiene el parámetro de rugosidad de la pared ϵ y la constante del modelo empírico (C_{mu}) con valores de 9.8 y 0.09 respectivamente.

2.2.6 Especificaciones del procesamiento computacional

En esta sección, se describen los archivos en OpenFOAM asociados con el proceso de resolución del problema. Todos los archivos se encuentran en el directorio “system” que al menos debe contener los siguientes: controlDict, fvSchemes y fvSolution.

ControlDict

Este archivo es usado para establecer los parámetros de control de la simulación tales como: el tiempo, la lectura y la escritura de los resultados del problema. En el primer archivo se detallan el centro de rotación, el centro de masa y la amplitud de los movimientos de traslación y rotación en las tres direcciones.

En el presente trabajo, el tiempo total de la simulación es de 60 segundos y los resultados se escriben cada 0.1 segundos (ΔT).

Una vez se empieza la simulación, simultáneamente se genera una carpeta llamada “Postprocessing” donde se crean dos archivos: “sixDoFRigidBodyState” y “alpha.water”.

En el primer archivo, debido a que se eliminó el movimiento de traslación en las tres direcciones y se permitió solo el movimiento rotacional de balance como se muestra en la Figura 2.9, se espera que las columnas de los movimientos traslaciones de como resultado cero en las tres direcciones y en las columnas de los movimientos rotaciones sólo existan valores para la dirección x.

Mientras tanto, los resultados del segundo archivo muestran cómo varía la columna de agua a través del tiempo para una posición específica establecida por el usuario.

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// *****

application    interFoam;
startFrom      startTime;
startTime      0;
stopAt         endTime;
endTime        60;
deltaT         0.01;
writeControl   adjustableRunTime;
writeInterval  0.1;
purgeWrite     0;
writeFormat    binary;
writePrecision 12;
writeCompression off;
timeFormat     general;
timePrecision  6;
runTimeModifiable yes;
adjustTimeStep yes;

maxCo          1;
maxAlphaCo     1;
maxDeltaT      1;
}

functions
{
  sixDoFRigidBodyState
  {
    type          sixDoFRigidBodyState;
    libs          ("libsixDoFRigidBodyState.so");
    angleFormat   degrees;
  }

  probes
  {
    type probes;
    libs ("libsampling.so");
    writeControl adjustableRunTime;
    writeInterval 0.1;
  }

  fields
  (
    alpha.water
  );

  probeLocations
  (
    (0.5 0.16 0.52)
    (0.5 0.16 0.53)
    (0.5 0.16 0.54)
    (0.5 0.16 0.55)
    (0.5 0.16 0.56)
    (0.5 0.16 0.57)
    (0.5 0.16 0.58)
    (0.5 0.16 0.59)
    (0.5 0.16 0.60)
    (0.5 0.16 0.61)
    (0.5 0.16 0.62)
    (0.5 0.16 0.63)
    (0.5 0.69 0.52)
    (0.5 0.69 0.53)
    (0.5 0.69 0.54)
    (0.5 0.69 0.55)
    (0.5 0.69 0.56)
    (0.5 0.69 0.57)
    (0.5 0.69 0.58)
    (0.5 0.69 0.59)
    (0.5 0.69 0.60)
    (0.5 0.69 0.61)
    (0.5 0.69 0.62)
    (0.5 0.69 0.63)
  );
}

```

Figura 2.18 Archivo controlDict

fvSchemes

fvSchemes es el archivo que establece el esquema numérico para los diferentes términos (Barajas, Lara, & Maza, 2016). Se establecieron parámetros de discretización temporal (CrankNicolson); términos derivados de gradiente, es decir, términos de gradiente normal de superficie (Gauss lineal es un esquema de discretización de segundo orden) y los términos de divergencia, como términos de

advección y otros términos que a menudo son de naturaleza difusiva, considerando que Gauss limitedLinearV y Gauss vanLeer son de segundo orden y Gauss upwind es un esquema numérico de primer orden. Por otro lado, también se consideraron los términos laplacianos, como el término de difusión en la ecuación del momento (valores entre 0 y 1 para manejar una malla no ortogonal); las interpolaciones de valores de celda a cara (linear es un esquema de discretización de segundo orden) y el componente de gradiente normal a la cara de una celda, el cual toma valores entre 0 y 1 para manejar una malla no ortogonal (Barajas, Lara, & Maza, 2016).

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes → Discretización del tiempo
{
  default      CrankNicolson 0.9;
}

gradSchemes → Discretización del término gradiente
{
  default      Gauss linear;
}

divSchemes → Discretización del término convectivo
{
  div(rhoPhi,U)  Gauss vanLeerV;
  div(phi,alpha) Gauss vanLeer;
  div(phirb,alpha) Gauss linear;
  div(phi,k)     Gauss upwind;
  div(phi,epsilon) Gauss upwind;
  div(((rho*nuEff)*dev2(I(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes → Discretización de los términos Laplacianos
{
  default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes → Método usado para interpolar
{
  default      linear;
}

snGradSchemes → Discretización de los gradientes normales a la superficie
{
  default      corrected;
}

```

Figura 2.19 Archivo fvSchemes

fvSolution

La sección denominada `system/fvSolution` permite definir solucionadores de ecuaciones, tolerancias y algoritmos (Barajas, Lara, & Maza, 2016).

De allí que la herramienta Control de MULES, fue empleada como solucionador de la ecuación VoF mediante las siguientes funciones:

- **nAlphaCorr:** Realiza un bucle con la ecuación de VoF
- **nAlphaSubcycles:** Identifica número de subciclos en la ecuación VoF
- **cAlpha:** Dicha función es empleada como tasa de compresión artificial.
- **MULESCorr:** Esta función activa MULES semi-implícitas.
- **nLimiterIter:** Lleva a cabo el recuento de iteraciones de MULES sobre el limitador.
- **Solucionador, suavizador, tolerancia y relTol:** Indica al solucionador resolver ecuaciones matriciales (suavizadores simétricos de Gauss-Seidel) así como también tolerancias.

Por ende, cada variable resuelta en una ecuación particular, en donde se tuvo que definir el tipo de solucionador, pre acondicionador y parámetros (tolerancia, `relTol`, `maxIter`) que debía utilizar. Por lo general, la última iteración (las variables se resuelven varias veces dentro de un paso de solución) se resuelve con diferentes parámetros (Barajas, Lara, & Maza, 2016).

Por otro lado, se utilizó el algoritmo PIMPLE, el diagrama de flujo es mostrado en la Figura 2.20, para resolver el acoplamiento presión-velocidad en las ecuaciones de Navier-Stokes. Generalmente este algoritmo combina PISO y SIMPLE, en donde se encuentran los parámetros mostrados en la Figura 2.21:

- **momentumPredictor:** Permite cambiar el control para resolver el predictor de impulso.
- **nOuterCorrectors:** Establece el número de veces que el sistema total de ecuaciones se resuelve en pasos de tiempo.
- **nCorrectores:** Indica el número de veces que el algoritmo resuelve la ecuación del corrector de presión y momento en cada paso.
- **nCorrectores ortogonales:** Parámetro que se encarga de especificar soluciones repetidas de la ecuación de presión utilizada para actualizar la corrección explícita no ortogonal.

- **ddtCorr**: Si este parámetro toma el valor de “si”, reduce el desacoplamiento entre presión, velocidad y flujo de velocidad (Greenshields, 2019).

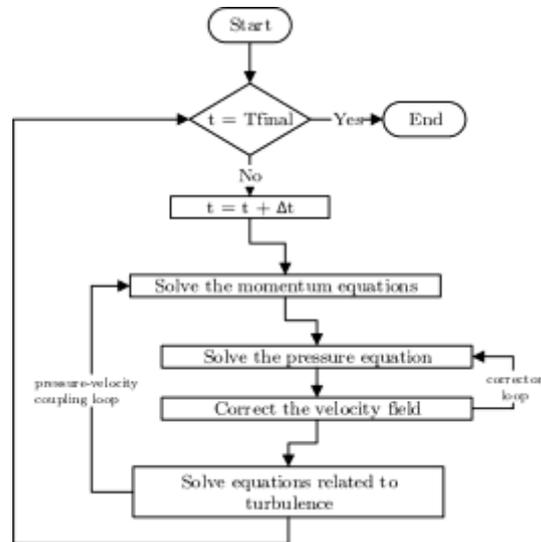


Figura 2.20 Diagrama de flujo del algoritmo PIMPLE (Mukha, 2015)

```

PIMPLE
{
    momentumPredictor    no;
    nOuterCorrectors     3;
    nCorrectors          1;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    correctPhi           yes;
    moveMeshOuterCorrectors yes;
}
  
```

Figura 2.21 Función PIMPLE

setFields

Este archivo es usado para establecer la profundidad inicial del agua, así como el alto y ancho de la columna de agua tal como se muestra en la Figura 2.22.

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       setFieldsDict;
}
// *****

defaultFieldValues
(
  volScalarFieldValue alpha.water 0
);

regions
(
  boxToCell
  {
    box (-100 -100 -100) (100 100 0.5368);
    fieldValues ( volScalarFieldValue alpha.water 1 );
  }

  boxToCell
  {
    box (-100 0.80 -100) (100 100 0.5868);
    fieldValues ( volScalarFieldValue alpha.water 1 );
  }
);

```

Figura 2.22 Archivo setFields

2.2.7 Post procesamiento

2.2.7.1 Visualización de la amplitud del ángulo de balance

Los resultados de la amplitud del ángulo de balance se encuentran almacenados en el directorio *postProcessing/sixDoFRigidBodyState/0* y para poder visualizarlos se utiliza el programa gnuplot. Una vez terminada la simulación se usan los siguientes comandos para ejecutar el programa:

```
> sed 's/[\\(\\)]/ /g' sixDoFRigidBodyState.dat > sixDoFRigidBodyState.dat
```

```
> gnuplot
```

Una vez dentro de gnuplot, como se especifica en 2.2.6, la columna de datos que interesa graficar es la número 8 donde se muestran los valores de la amplitud del ángulo de balance. Se puede verificar esta restricción en las columnas 9 y 10, que representan la rotación en el eje y y en el eje z, donde todos los valores deben ser igual a cero. Se utilizan los siguientes comandos para realizar el gráfico Amplitud de balance vs tiempo:

```

>plot 'sixDoFRigidBodyState.dat' using 1:8 with lines title 'Balance'
>set xlabel "Tiempo [s]"
>set ylabel "Angulo de balance [grados]"

```

2.2.7.2 Paraview

Paraview es una aplicación de código abierto que permite la visualización y el análisis de los resultados numéricos. Para ejecutar Paraview, se abre la carpeta de la simulación en el terminal y se ejecuta el siguiente comando:

```
> paraFoam
```

2.2.7.3 Factor de amortiguamiento

El factor de amortiguamiento es un parámetro que se lo determina de forma experimental aplicando el método del Decremento Logarítmico debido a que analíticamente es complicado de calcular debido a los efectos viscosos (Bhattacharyya, 1978).

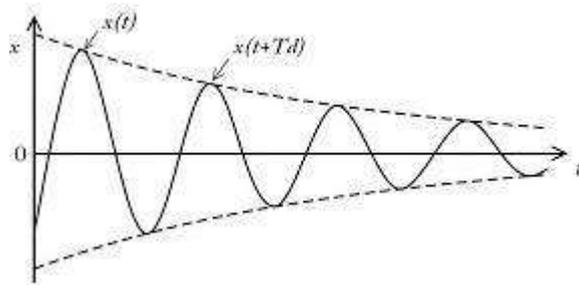


Figura 2.23 Movimiento oscilatorio libre amortiguado

Se considera la oscilación de la estructura flotante como libre amortiguada de un sistema de un grado de libertad al estar restringida solo para el balance.

$$w(t) = e^{-\zeta \omega_n t} A e^{i \omega_d t} \quad (2.4)$$

Donde,

w es la función oscilación que depende del tiempo [°]

ξ es el factor de amortiguamiento.

ω_0 es la frecuencia natural $\frac{rad}{seg}$.

A es la amplitud del movimiento [°].

ω_a es la frecuencia amortiguada $\frac{rad}{seg}$.

Si se considera dos máximos relativos consecutivos de esta función, se toman dos valores separados un intervalo igual a un período de oscilación y se obtiene:

$$\frac{w(t_1)}{w(t_2)} = \frac{e^{-\xi\omega_0 t_1} A e^{i\omega_a t_1}}{e^{-\xi\omega_0(t_1+c_a)} A e^{i\omega_a(t_1+c_a)}} \quad (2.5)$$

Cuando el tiempo se incrementa un período, las funciones armónicas tienen el mismo valor, por lo que la ecuación 2.5 se puede simplificar:

$$\frac{w(t_1)}{w(t_2)} = \frac{e^{-\xi\omega_0 t_1}}{e^{-\xi\omega_0(t_1+c_a)}} = e^{\xi\omega_0 c_a} \quad (2.6)$$

El período amortiguado se define como:

$$r_a = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.7)$$

El decremento logarítmico se define como el logaritmo de la razón de dos amplitudes consecutivas separadas por un período r_a , por lo que finalmente se obtiene:

$$\delta = \ln \frac{w(t_1)}{w(t_2)} = \xi\omega_0 \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.8)$$

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.9)$$

Cuando el factor de amortiguamiento es pequeño, valores menores a 0.01, la ecuación 2.9 se puede simplificar como:

$$\delta \cong 2\pi\xi \quad (2.10)$$

El cálculo del factor de amortiguamiento del sistema se lo realizó aplicando el método de decremento logarítmico con los resultados obtenidos en el archivo "sixDoFRigidBodyState.dat". Para esto se implementó un código en Python (Anexo B) con el objetivo de identificar cada uno de los máximos relativos del conjunto de datos que representa el movimiento oscilatorio. Una vez obtenido estos valores se calculó el logaritmo de la razón entre dos puntos consecutivos como se muestra en la ecuación 2.8, y se calculó el factor de amortiguamiento entre estos dos puntos con la ecuación 2.9. Finalmente, se calculó un promedio de estos valores, su desviación estándar, y se determinó el factor de amortiguamiento promedio para el sistema.

2.2.7.4 Operador de la Amplitud de la Respuesta en Balance

La ecuación de movimiento para balance en un mar regular es la siguiente (Bhattacharyya, 1978):

$$I'_{xx} \frac{d^2\phi}{dt^2} + b \frac{d\phi}{dt} + \Delta GM_t \phi = \Delta GM_t \alpha_M \sin(\mu) \sin(\omega_e t) \quad (2.11)$$

Donde,

I'_{xx} es el momento de inercia de la masa virtual [$kg * m * seg^2$].

b es el coeficiente de amortiguamiento [$kg * m * seg$].

Δ es el desplazamiento del cuerpo [kg].

$r_{m\phi}$ es el radio metacéntrico transversal [m].

α_M es la pendiente de la ola incidente.

μ es la dirección de la ola incidente [$^\circ$].

ω_e es la frecuencia de encuentro $\frac{rad}{seg}$.

El período de oscilación puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k'_{xx} x^2}{g * GM_t}} \quad (2.12)$$

Donde,

k'_{xx} es el radio de giro (en el rango de $0.33B < k'_{xx} < 0.45B$) [m].

El cociente entre el coeficiente de amortiguamiento b y el crítico es lo que se denomina Factor de Amortiguamiento, siendo una cantidad adimensional.

A partir de la ecuación de movimiento, se puede obtener el operador de amplitud de respuesta que es una función de transferencia que describe la respuesta de un objeto para una ola regular de amplitud unitaria en un rango de frecuencias (Bonaschi, 2012)

En primer lugar, se determinó el factor de magnificación mediante la siguiente ecuación empírica (Bhattacharyya, 1978):

$$\mu_{\phi\phi} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Lambda^2)^2 + 4\xi^2\Lambda^2}} \quad (2.13)$$

$$\Lambda = \omega_e / \omega_{\phi\phi} \quad (2.14)$$

Donde,

Λ es conocido como el factor de ajuste (Relación entre la frecuencia de encuentro y la natural).

$\omega_{\phi\phi}$ es la frecuencia natural de balance $\frac{rad}{seg}$.

ω_e es la frecuencia de encuentro $\frac{rad}{seg}$.

La frecuencia de encuentro se la puede calcular mediante la siguiente formulación:

$$\omega_e = \omega_{ww} \sqrt{1 - \frac{\omega_{ww}}{g} V \cos(\mu)} \quad (2.15)$$

Donde,

ω_{ww} es la frecuencia de la ola $\frac{rad}{seg}$.

g es la gravedad $\frac{m}{seg^2}$.

V es la velocidad del buque $\frac{m}{seg}$.

μ es la dirección de la ola incidente [°].

Para olas de costados, cuando $\mu = 90^\circ$, y como la EMG se encuentra estática la frecuencia de encuentro se puede simplificar:

$$\omega_e = \omega_{ww} \quad (2.16)$$

Finalmente, se calculó el Operador de la Amplitud de la Respuesta en Balance (RAO):

$$RAO = \frac{\phi_a}{\zeta_a} = \frac{\mu \phi \omega_{ww}^2 \text{sen}(\mu) 57.3}{g} \quad (2.17)$$

2.2.7.5 Índice de Malestar por Movimiento

Este parámetro es uno de los principales temas de investigación en la dinámica de buques o cualquier artefacto flotante debido a que mide el confort de los pasajeros a bordo (Bos, 2005). Es un indicador del porcentaje de personas no acostumbradas al movimiento que se marean luego de estar sometidas a una prueba de 2 horas de duración. La aceleración vertical combinado con la frecuencia del movimiento es el parámetro más influyente de este malestar. (Nguyen, 2015).

Las normas ISO 2631-1 estudia el efecto de las vibraciones sobre el confort de los tripulantes, en estas normas se estableció que el porcentaje máximo permisible índice malestar de movimiento, para un tiempo de exposición de 2 horas, es del 20% (Soal, 2014).

El MSI se lo calculó con la fórmula descrita en (Perez, 2005), que estima el porcentaje de tripulantes que vomitaran después de ser expuestos T minutos y sólo es válida para movimiento sinusoidal puro:

$$MSI = 100 \text{erf}(z_a) \text{erf}(z_t) \quad (2.18)$$

$$\text{erf}(z) = \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{1}{2}v^2\right) dv \quad (2.19)$$

Donde,

erf es la función de distribución normal acumulativa hasta x, con media cero y desviación estándar uno.

Los parámetros z_a y z_t se detallan a continuación:

$$z_a = 2.128 \log_{10}(a_{vert}) - 9.227 \log_{10}(\ell) - 5.809 \log_{10}(\ell)^2 - 1.851 \quad (2.20)$$

$$z_t = 1.134 z_a + 1.989 \log_{10}(T) - 2.904 \quad (2.21)$$

Donde,

a_{vert} es el valor RMS de la aceleración vertical [g].

f_e es la frecuencia [Hz].

T es el tiempo de exposición al movimiento en minutos [min].

El valor de RMS se calcula:

$$RMS = \sqrt{m_0} \quad (2.22)$$

Donde,

m_0 es el área bajo la curva del espectro de respuesta [$^\circ$].

El espectro de respuesta es obtenido multiplicando el espectro de las olas y el RAO elevado al cuadrado.

$$S_{resp}^+(\omega_e) = S_{olas}^+(\omega_e) * RAO^2 \quad (2.23)$$

El espectro de las olas es determinado mediante la formulación de Pierson-Moskowitz (Bhattacharyya, 1978) de acuerdo con el estado de mar de interés como se presenta a continuación:

$$S_{olas}^+(\omega_e) = \frac{8.1 \times 10^{-5}}{\omega_e^5} g^2 e^{-0.74 \frac{g}{V \omega_e}} \quad (2.24)$$

Donde,

V es la velocidad del viento $\frac{m}{seg}$.

g es la gravedad $\frac{m}{seg^2}$.

ω_e es la frecuencia de encuentro $\frac{rad}{seg}$.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones numéricas y de su procesamiento para cumplir con cada uno de los objetivos planteados. En primer lugar, se presentan los datos de entrada de la simulación numérica junto con la matriz de simulación. Luego, se determinó el espectro de mar para el lugar de operación de la Estación móvil (Palma Real) con las condiciones establecidas en el capítulo anterior. También, se presentan los resultados de la amplitud del ángulo de balance y la posición de la superficie libre para cada simulación. Finalmente, con la información numérica obtenida y con la aplicación de formulaciones empíricas se determina el espectro de respuesta y el índice de malestar por movimiento.

3.1 Datos de entrada de la simulación.

En la simulación, se trabajó con un dominio computacional definido por un cubo de 1 m de lado, como se muestra en la Figura 3.1, por lo que fue necesario escalar el prototipo y el factor de escala usado fue de 50. En la Tabla 3.1 se presentan las dimensiones del modelo que fueron usadas en OpenFOAM y el modelo se lo puede observar en la Figura 3.2.

Tabla 3.1 Características del modelo

	Prototipo	Modelo
Lambda	50	
Eslora entre perpendiculares [m]	15.5	0.31
Eslora de flotación [m]	15.5	0.31
Manga [m]	13	0.26
Puntal [m]	2.8	0.06
Calado [m]	1.850	0.037

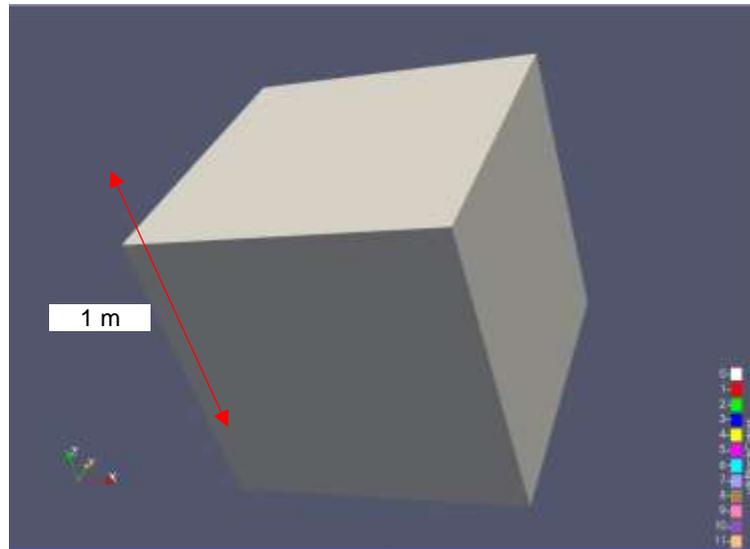


Figura 3.1 Dominio Computacional de la simulación

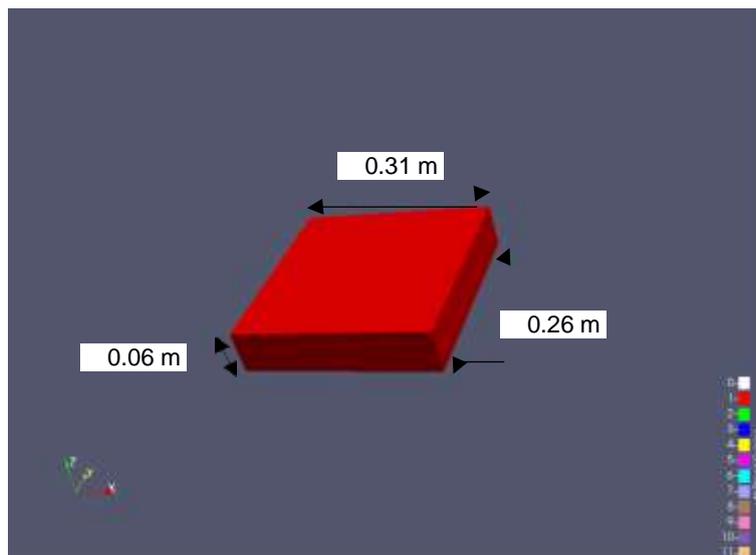


Figura 3.2 Modelo de la EMG en la simulación

3.1.1 Matriz de simulación

En total se realizaron 12 simulaciones considerando tres diferentes posiciones del centro de gravedad vertical y cuatro diferentes anchos de columna de agua como se puede observar en la Figura 3.3. Los valores se los presenta en la Tabla 3.2:

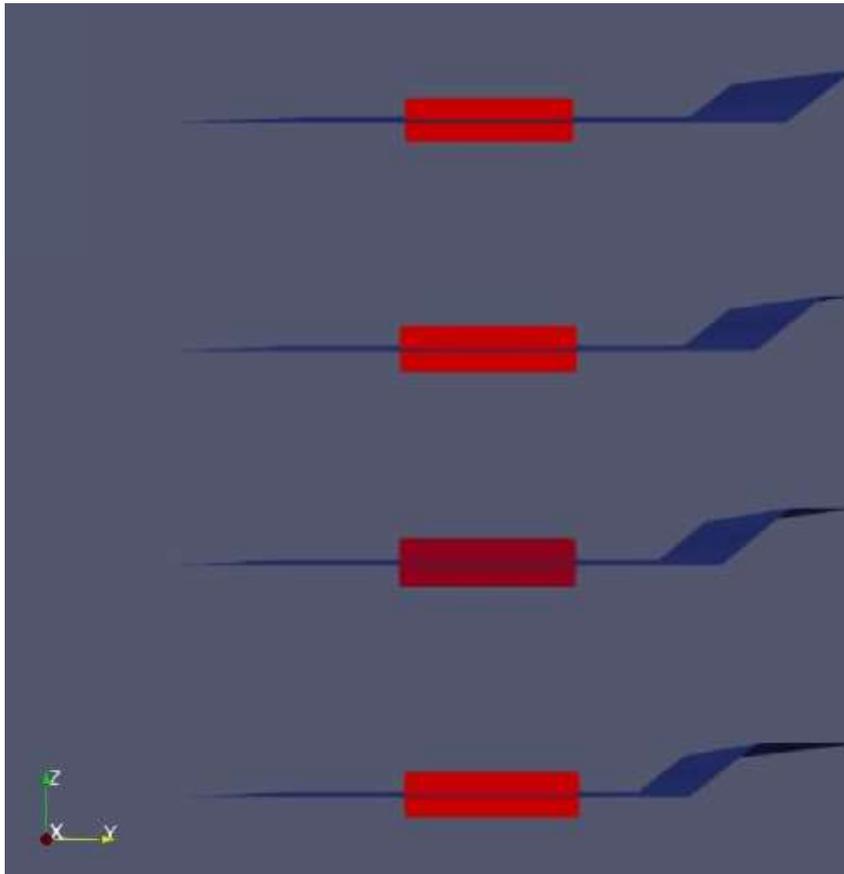


Figura 3.3 Anchos de ola utilizados en la simulación

Tabla 3.2 Matriz de simulación del modelo

KG [m]	Ancho de ola [m]			
1.0	2.5	5.0	7.5	10.0
1.5	2.5	5.0	7.5	10.0
2.0	2.5	5.0	7.5	10.0

3.2 Convergencia de malla

La convergencia de la malla va a ser analizada para la condición: $KG=1.5$ m y para cuando el ancho de ola es igual a 2.5 m. Se seleccionaron 3 mallas: gruesa, intermedia y fina, siendo la malla fina la que mayor cantidad de elementos o celdas presenta en el dominio computacional.

De la Figura 3.4 a la Figura 3.6, se modificó el número de divisiones de la malla en las tres direcciones, que es lo que está dentro del rectángulo azul, y de esta forma se obtuvo un aumento en la cantidad de elementos.

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0)
    (1 0 0)
    (1 1 0)
    (0 1 0)
    (0 0 1)
    (1 0 1)
    (1 1 1)
    (0 1 1)
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 20 30) simpleGrading (1 1 1)
);

```

Figura 3.4 Archivo blockMeshDict para malla gruesa

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0)
    (1 0 0)
    (1 1 0)
    (0 1 0)
    (0 0 1)
    (1 0 1)
    (1 1 1)
    (0 1 1)
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (40 40 60) simpleGrading (1 1 1)
);

```

Figura 3.5 Archivo blockMeshDict para malla intermedia

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0)
    (1 0 0)
    (1 1 0)
    (0 1 0)
    (0 0 1)
    (1 0 1)
    (1 1 1)
    (0 1 1)
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (60 60 90) simpleGrading (1 1 1)
);

```

Figura 3.6 Archivo blockMeshDict para malla fina

En la Tabla 3.3 se presentan las características de cada una de las mallas, la malla más fina al tener la mayor cantidad de elementos, es la simulación que más tiempo llevará.

Tabla 3.3 Características de las mallas

Malla	Fina	Intermedia	Gruesa
#Celdas	322.560	95.520	11.928
#divisiones en x	60	40	20
#divisiones en y	60	40	20
#divisiones en z	90	60	30

De la Figura 3.7 a la Figura 3.9, se muestra una vista de perspectiva del mallado generado.

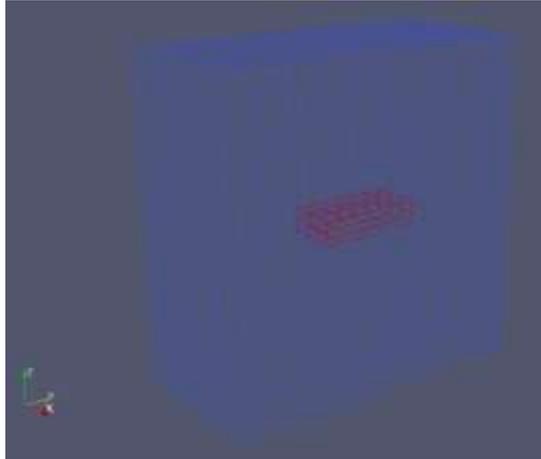


Figura 3.7 Vista perspectiva de la malla gruesa

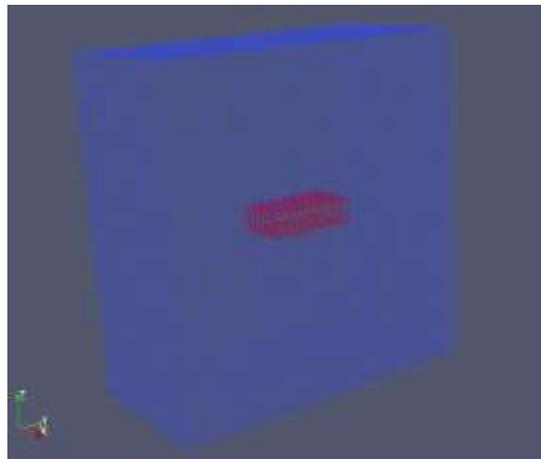


Figura 3.8 Vista perspectiva de la malla intermedia

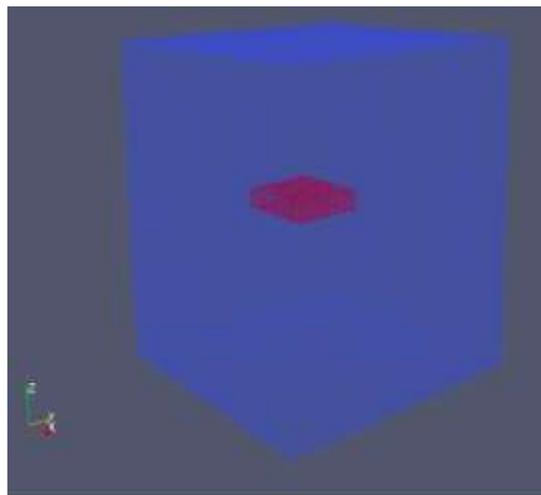


Figura 3.9 Vista perspectiva de la malla fina

3.2.1 Resultados de la convergencia

Para el proceso de convergencia se realizó el cálculo del período de oscilación con la ecuación 2.22 y cuyo cálculo de detalla en la Tabla 3.4. Este valor es el que se va a contrastar con el valor obtenido numéricamente.

Tabla 3.4 Cálculo del período de oscilación

I [m⁴]	2837.792
Desplazamiento [m³]	372.775
BMT [m]	7.612613
KB [m]	0.925
KG [m]	1.5
GMT [m]	7.037613
T [seg]	8.85

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados numéricos del período de oscilación y su comparación con el cálculo teórico previamente realizado.

Tabla 3.5 Resultados del período de oscilación para los distintos mallados

Malla	Fina	Intermedia	Gruesa
#Celdas	322560	95520	11928
T numérico [seg]	8.60	8.46	8.40
% Error	2.83	4.41	5.09
Tiempo simulación [min]	720	140	20

Se realizó el postprocesamiento de los resultados de las simulaciones numéricas gracias a la implementación del código de Python descrito en el Anexo B. En el código se identificaron los máximos absolutos y el tiempo en el que ocurrían, de esta manera se logró determinar el período para el cual ocurrió cada pico y finalmente un período promedio de oscilación del modelo. El mayor error obtenido es con la malla gruesa con un 5.09%, mientras que el menor error es del 2.83%. Sin embargo, se puede observar que el tiempo de simulación es 36 veces mayor para la malla fina que para la gruesa. Los porcentajes de error son menores al 10% y como era de esperarse, a mayor cantidad de elementos, mejoró la precisión de los resultados y de la misma forma aumentó considerablemente el tiempo de simulación.

3.3 Espectro de mar

De acuerdo con los datos obtenidos en la Figura 2.1 y Figura 2.2 se estableció que el estado de mar 3, Beaufort 4 es el característico de Palma Real, Esmeraldas. En la Tabla 3.3 se presentan las características del respectivo estado de mar.

Tabla 3.6 Características del estado de mar 3

V [nudos]	20
V [m/s]	10.29
Hsig [m]	2.23

Posteriormente, se procedió a calcular el espectro de mar para todo el rango de frecuencias con la ecuación 2.23. El resultado se muestra a continuación:

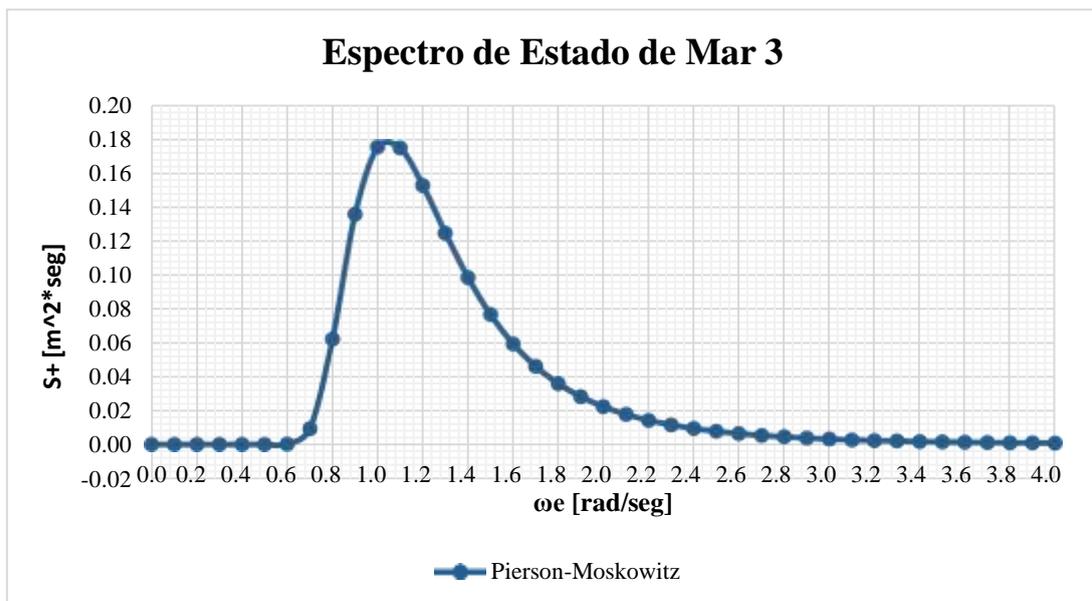


Figura 3.10 Espectro de mar, estado 3, Beaufort 4 de Palma Real, Esmeraldas

3.4 Amplitud de balance

A continuación, la Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4 y la Figura 3.5 presentan la amplitud de balance para cada simulación realizada. Se presentan los resultados para cada ancho de ola considerando los tres diferentes centros de gravedad vertical utilizados.

Como era de esperarse, conforme se aumenta el valor del centro de gravedad vertical, aumenta la amplitud del ángulo de balance. Así mismo, cuando se aumentó el ancho de la columna de agua, aumentó la amplitud del ángulo de balance. Se evidencia que este incremento de la amplitud del ángulo de balance es mayor que cuando se aumenta el centro de gravedad vertical.

Con esto se puede llegar a la conclusión de que disminuir solamente el centro de gravedad vertical no será suficiente para disminuir considerablemente la amplitud del ángulo de balance que es como se espera.

3.4.1 Ancho de ola= 2.5 m

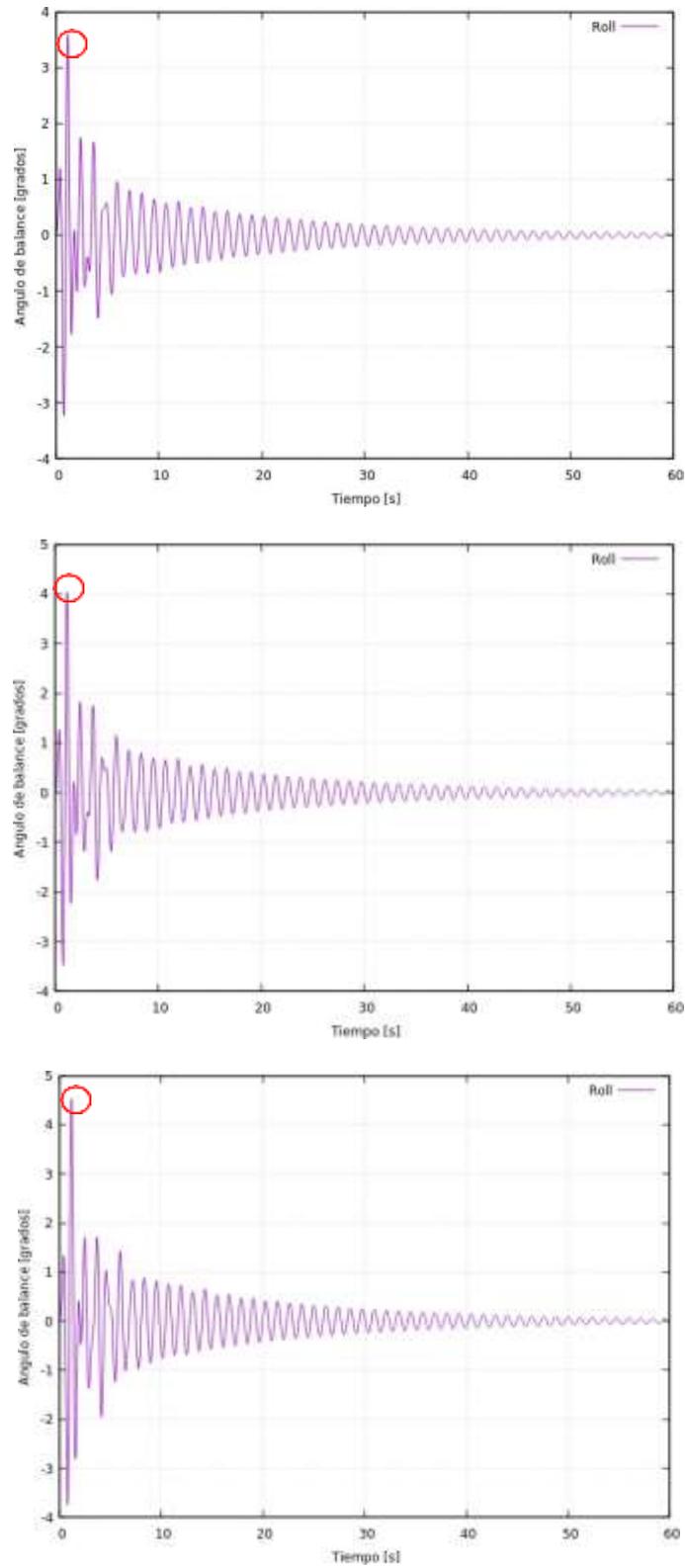


Figura 3.11 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo

3.4.2 Ancho de ola= 5 m

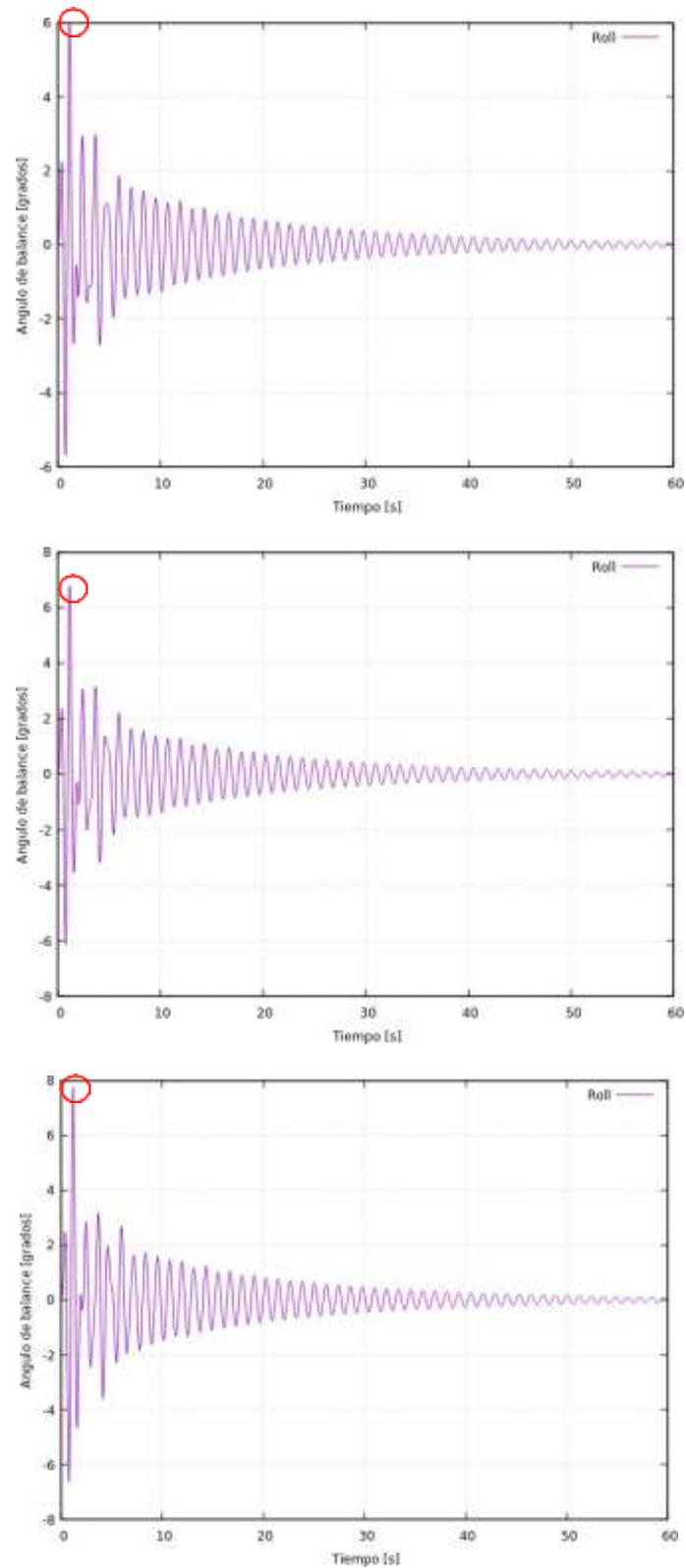


Figura 3.12 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo

3.4.3 Ancho de ola= 7.5 m

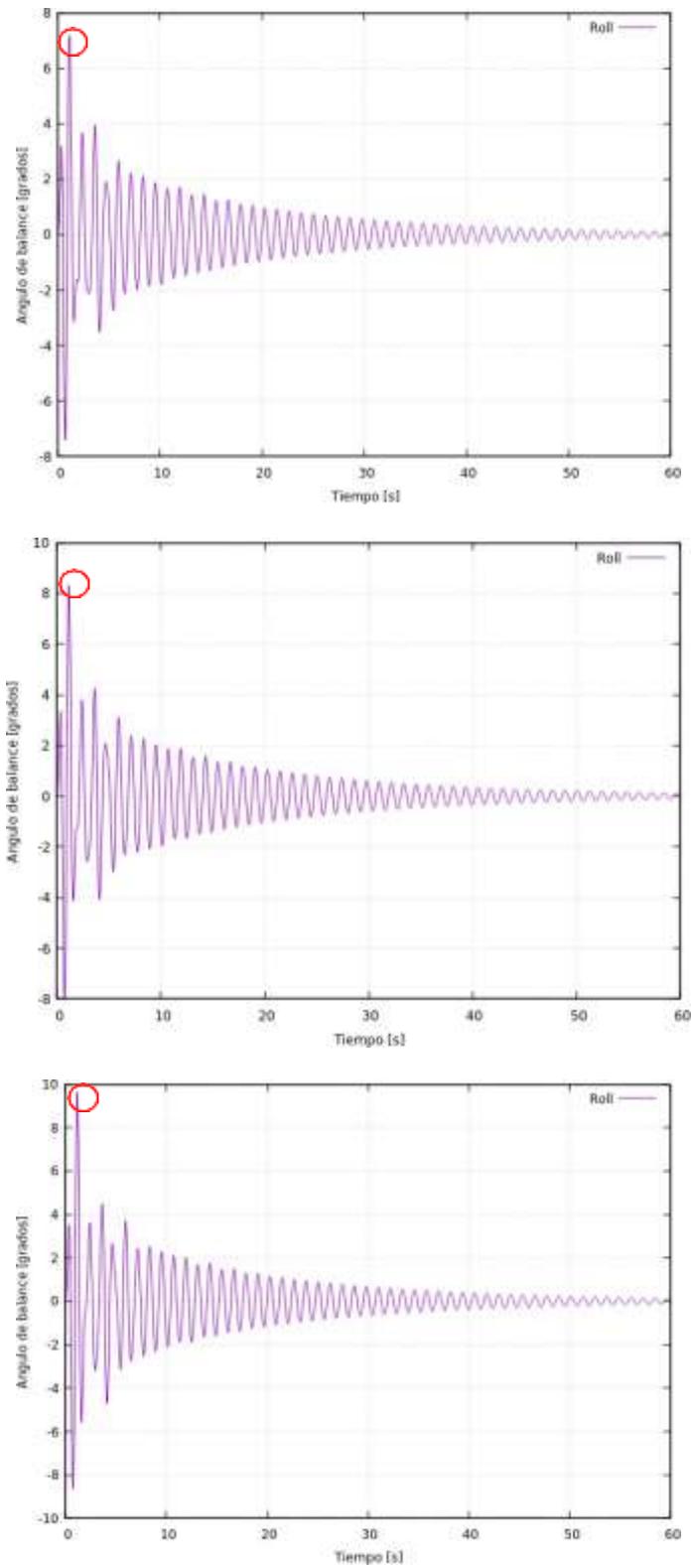


Figura 3.13 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo

3.4.4 Ancho de ola= 10 m

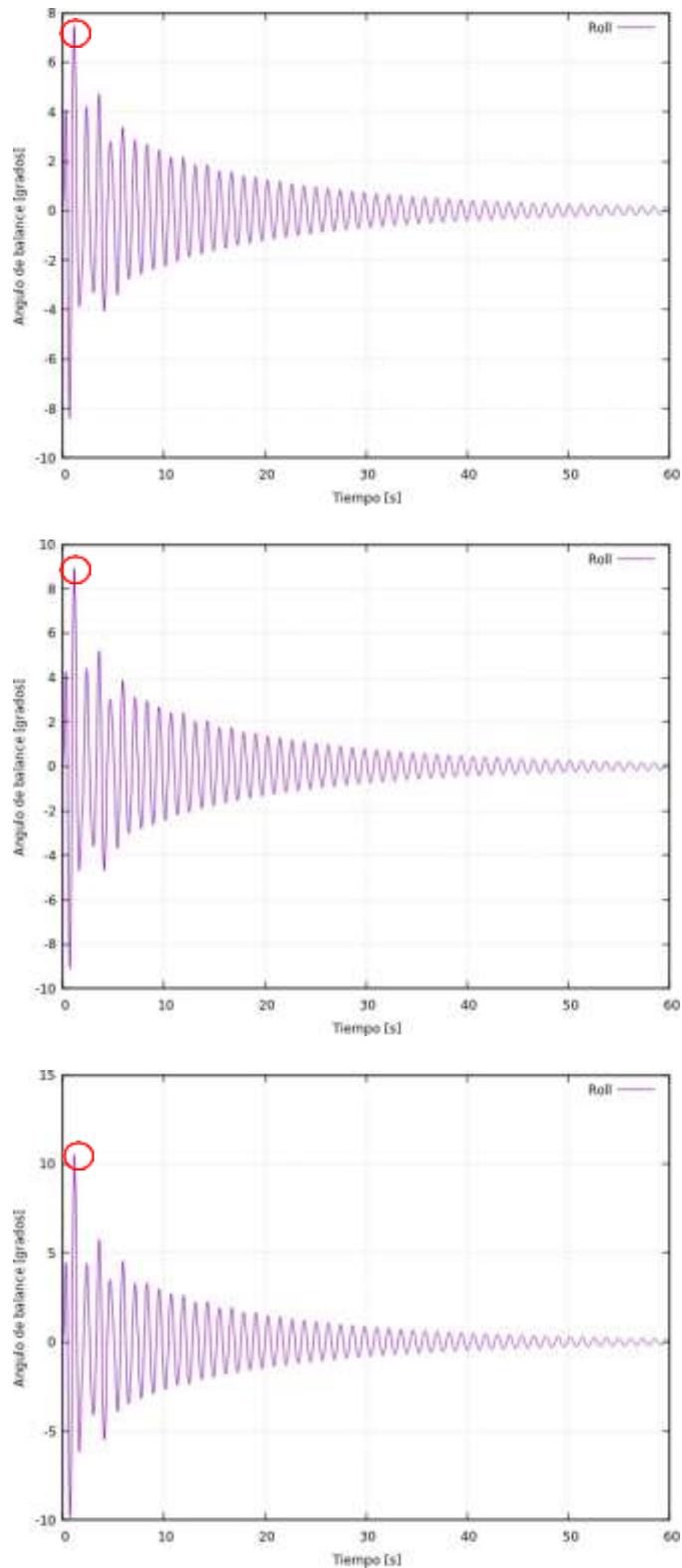


Figura 3.14 Amplitud del ángulo de balance, KG= 1 m, 1.5 m y 2 m del modelo

3.4.5 Resultados finales

En la Tabla 3.4 se presenta el valor máximo de la amplitud del ángulo de balance para cada simulación realizada. Este valor ocurre en el segundo pico como se puede observar en las Figura 3.2 - 3.5, esto quiere decir este ángulo se genera cuando la columna de agua impacta el objeto flotante.

Además, de acuerdo con lo observado en las simulaciones, el agua toca la cubierta de la Estación Móvil cuando el ángulo es mayor a 9 grados, esto implica que cuando el KG= 2 m y el ancho de la columna de agua es igual a 7.5 y 10 m, la cubierta del objeto flotante se inunda en el primer contacto que tiene con la columna de agua. Sin embargo, la situación planteada no es crítica debido a que el amortiguamiento del sistema hace que la amplitud del ángulo de balance disminuya considerablemente a valores entre 5 y 6° al siguiente segundo y, por ende, la simulación pueda seguir corriendo. Con estos resultados, obtiene un rango de amplitud de balance del modelo y se puede determinar el factor de amortiguamiento.

Tabla 3.7 Máxima amplitud del ángulo de balance

	Ancho de columna [m]			
KG [m]	2.5	5	7.5	10
1	3.68°	6.01°	7.26°	7.71°
1.5	4.08°	6.87°	8.22°	8.86°
2	4.54°	7.73°	9.82°	10.45°

3.5 Factor de amortiguamiento

Los resultados de la amplitud del ángulo de balance fueron procesados con la ayuda del código de Python que se presenta en el Apéndice B. Se identificó los máximos relativos para cada período y se calculó el factor de amortiguamiento de acuerdo con la Ecuación 2.8:

Tabla 3.8 Factor de amortiguamiento promedio

	Ancho de columna de agua [m]			
KG [m]	2.5	5	7.5	10
1	0.01015	0.01026	0.01020	0.01004
1.5	0.01028	0.01023	0.01018	0.01019
2	0.00991	0.01003	0.01018	0.01032

En la Tabla 3.6 se puede observar la desviación estándar del factor de amortiguamiento promedio para cada simulación. Los valores son muy cercanos a cero por lo que se puede concluir que los datos tienden a estar cerca al promedio.

Tabla 3.9 Desviación estándar del Factor de amortiguamiento

KG [m]	$\sigma\xi$			
	2.5	5	7.5	10
1	0.000858	0.000783	0.000753	0.000561
1.5	0.001739	0.000974	0.000779	0.000682
2	0.00185	0.001449	0.000789	0.000851

3.6 Periodo de oscilación

El código de Python presentado en el Anexo B, también identificó el tiempo para el cual existía un valor máximo de ángulo de balance, por lo tanto, se pudo calcular el período para cada oscilación. Finalmente se calculó el promedio y la desviación estándar que se presentan en la Tabla 3.7 y en la Tabla 3.8. Como era de esperarse, el período promedio para cada simulación es prácticamente el mismo, 1.19 seg. La desviación estándar es cercana a cero por lo que los valores de los períodos para cada par de puntos de cada simulación tienden a estar cerca del promedio.

Tabla 3.10 Período promedio del balance del modelo

KG [m]	T [seg]			
	2.5	5	7.5	10
1	1.188	1.190	1.191	1.193
1.5	1.188	1.190	1.192	1.193
2	1.190	1.191	1.193	1.194

Tabla 3.11 Desviación estándar del período

KG [m]	σT			
	2.5	5	7.5	10
1	0.010648	0.010929	0.009925	0.009633
1.5	0.0116	0.009997	0.01071	0.009484
2	0.011751	0.009897	0.012302	0.010115

3.7 Superficie libre

El análisis de la posición de la superficie libre para todo el tiempo de la simulación fue realizado con el fin de evidenciar la difracción de las olas. Para lograr esto, se implementó la función probes en el archivo controlDict. Esta función monitorea los valores de cantidades seleccionadas en puntos seleccionados del dominio computacional.

En este caso, se pretendía monitorear la superficie libre, definida como 'alpha.water', en una línea paralela al eje z y con una ubicación definida en 'x' y 'y'. Por este motivo, se colocaron una serie de puntos en la mitad del dominio en dirección x, por delante y por detrás del objeto (cambiando la posición en y) y pero variando su altura en el eje z desde la línea base del objeto hasta su puntal.

Tabla 3.12 Posiciones de evaluación de la superficie libre

	Coordenada en x [m]	Coordenada en y [m]	Coordenadas en z [m]
Posición A	0.5	0.16	[0.52,0.62]
Posición B	0.5	0.69	[0.52,0.62]

El archivo de resultados se lo procesó con la ayuda de un código en Python que se detalla en el APÉNDICE C: SUPERFICIE LIBRE. En este análisis se evidenció que la variación de KG no afecta los resultados por lo que a continuación, se presentan las gráficas de la posición de la superficie libre para cada posición, para cada ancho de columna de agua y para solo una posición del centro de gravedad vertical, KG= 1 m.

Se evidenció que las olas se reflejaban debido a que el dominio computacional no es muy grande. Esto ocasiona que en los primeros diez segundos de la simulación se observen irregularidades en la amplitud del ángulo de balance, justo donde se ocasionan las amplitudes máximas. Además, se puede observar cómo la columna de agua se disipa conforme avanzan los segundos y deja al objeto realizando un movimiento oscilatorio libre. De igual forma como sucedió con la amplitud del ángulo de balance, la altura de la superficie libre aumenta conforma se incrementa

el ancho de la columna de agua. En las gráficas también se evidencia cómo cuando la columna de agua es igual a 7.5 y 10 m, sobrepasa el puntal del objeto y lo inunda.

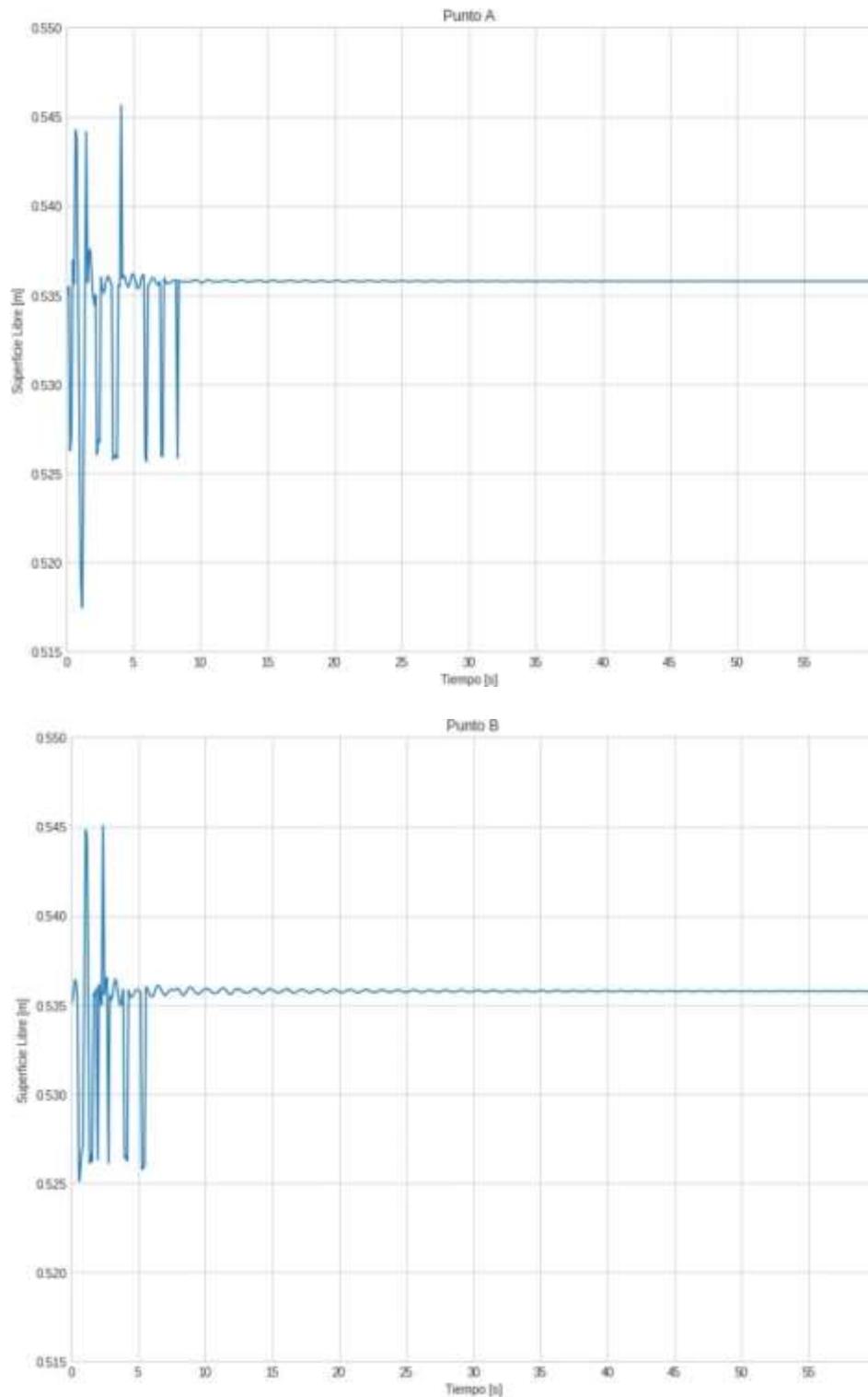


Figura 3.15 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.05 m

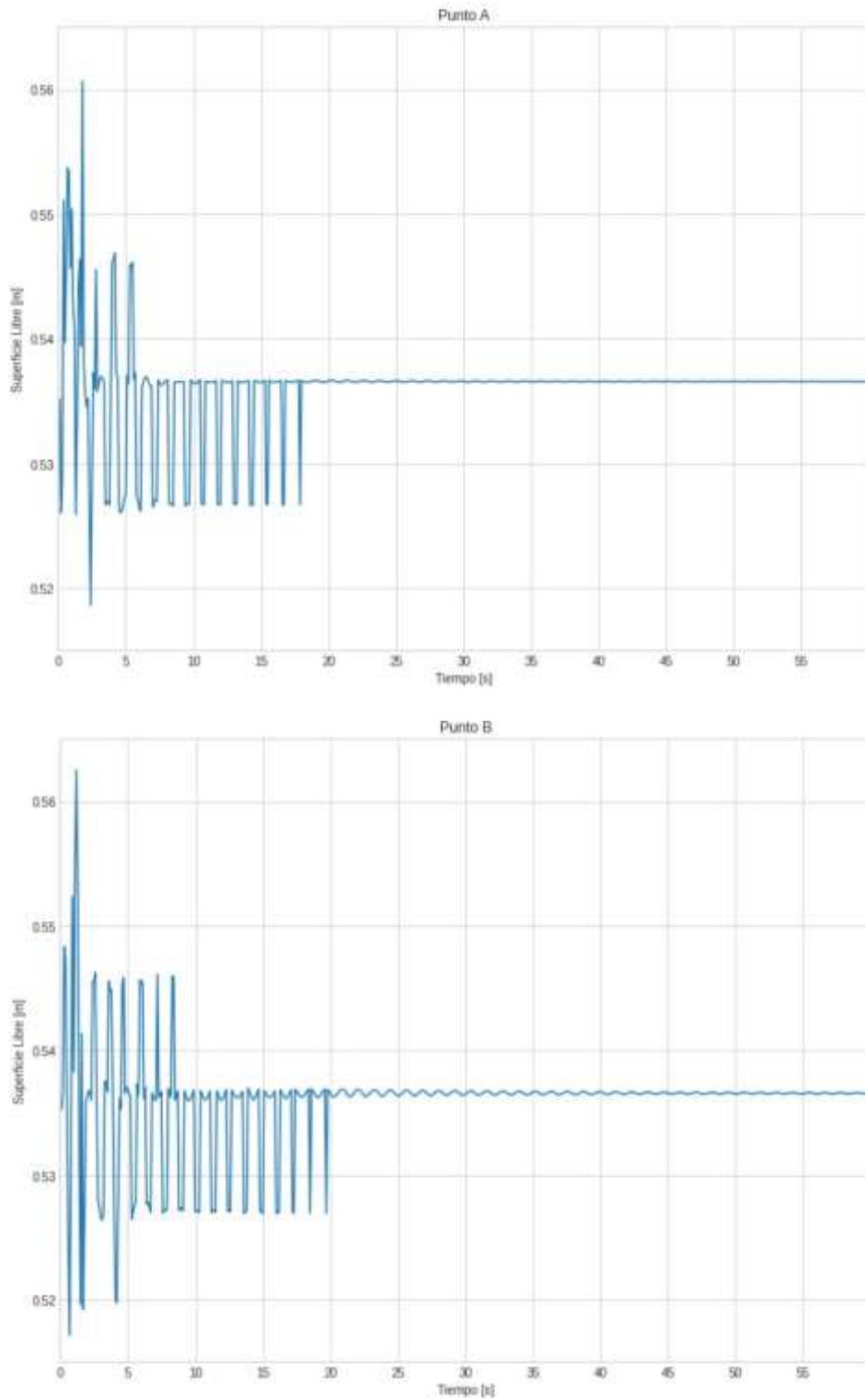


Figura 3.16 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.10 m

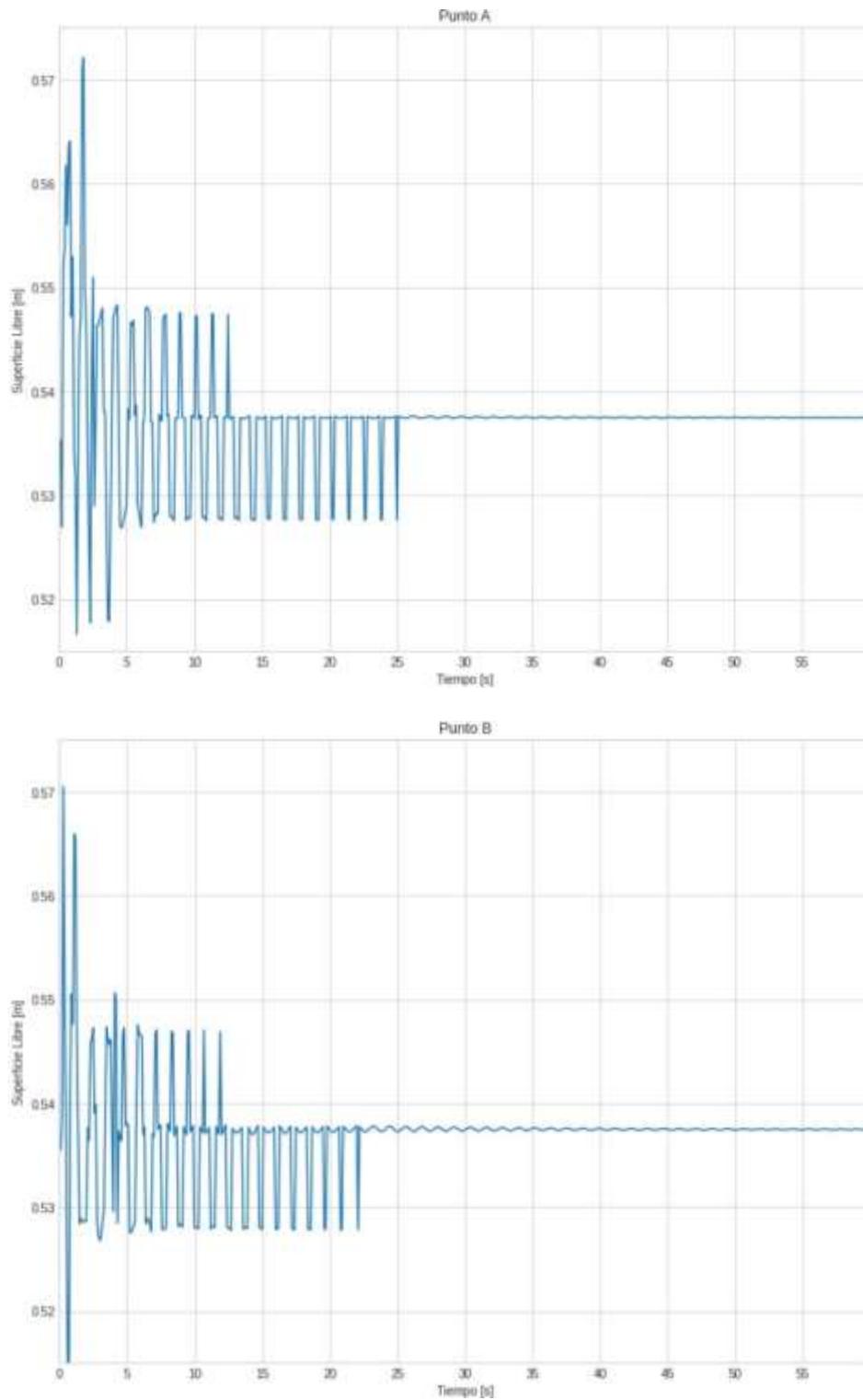


Figura 3.17 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.15 m

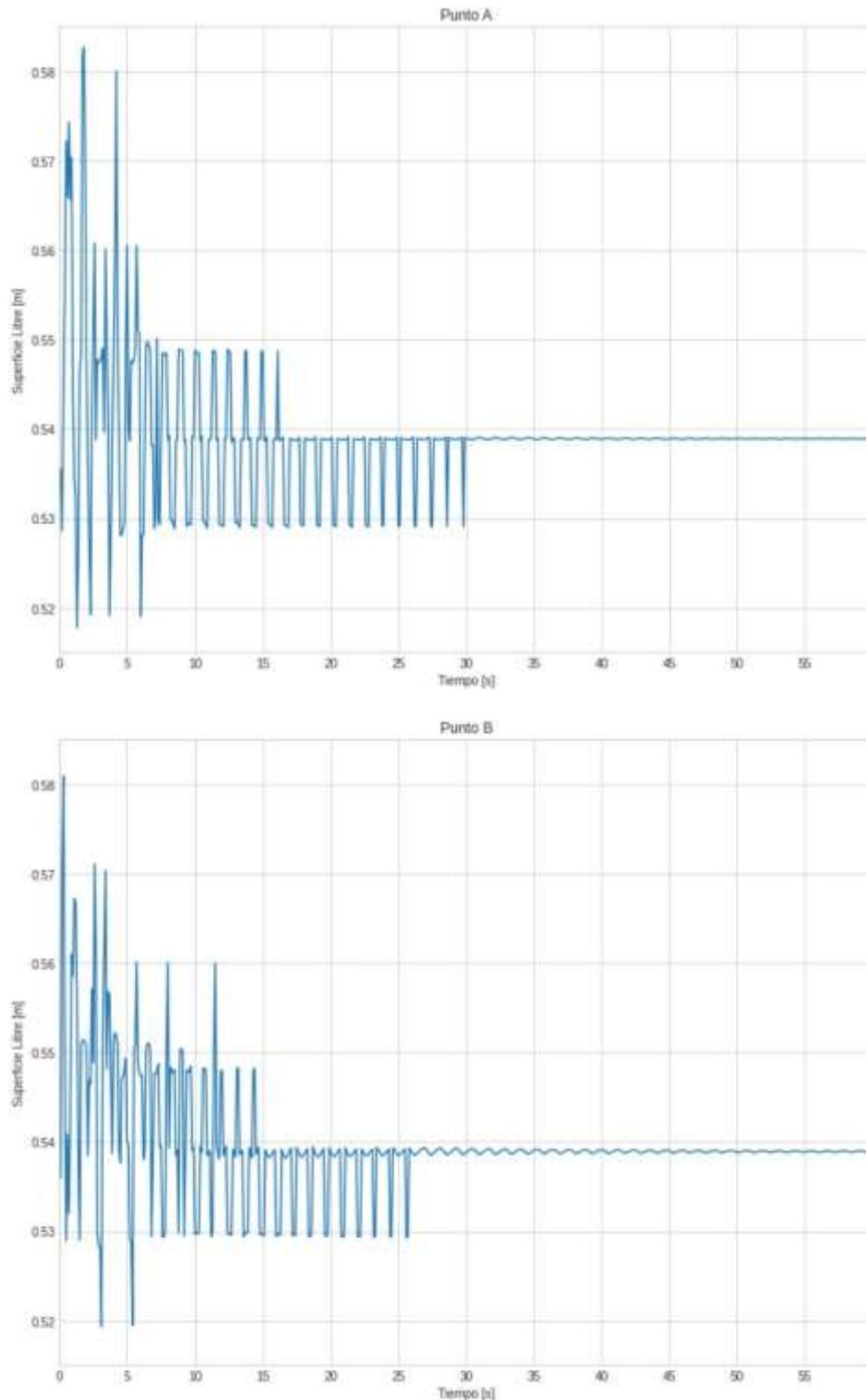


Figura 3.18 Elevación de la superficie libre, ancho de la columna de agua 0.20 m

3.8 RAO

El Operador de la Amplitud de Respuesta en balance ha sido graficado para cada ancho de columna de agua y en la gráfica se presentan los tres distintos KG analizados. Para realizar este cálculo se trabajó con los períodos promedio del balance escalados al prototipo mediante el factor de escala $\lambda^{0.5}$, donde $\lambda = 50$ como se presenta en la Tabla 3.13. Los cálculos posteriores se los puede encontrar en el Anexo C.

Tabla 3.13 Período promedio del balance del prototipo

KG [m]	T [seg]			
	2.5	5	7.5	10
1	8.40	8.42	8.42	8.43
1.5	8.40	8.42	8.43	8.44
2	8.41	8.42	8.43	8.44

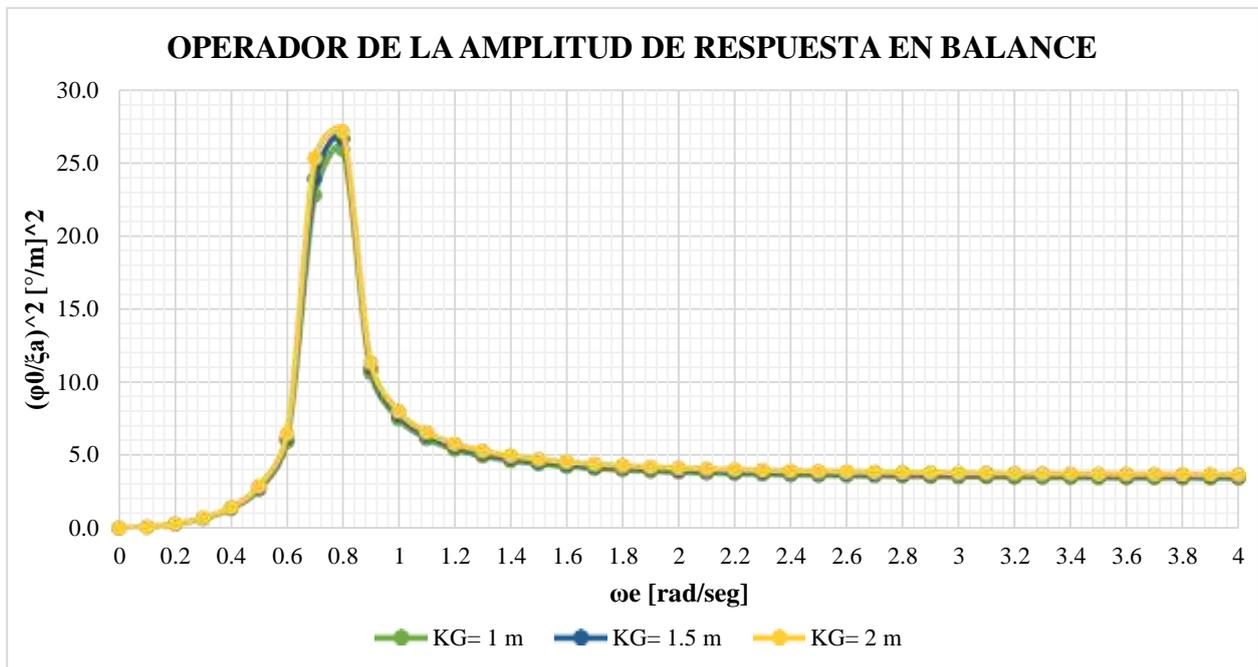


Figura 3.19 RAO, ancho de la columna de agua 0.05 m

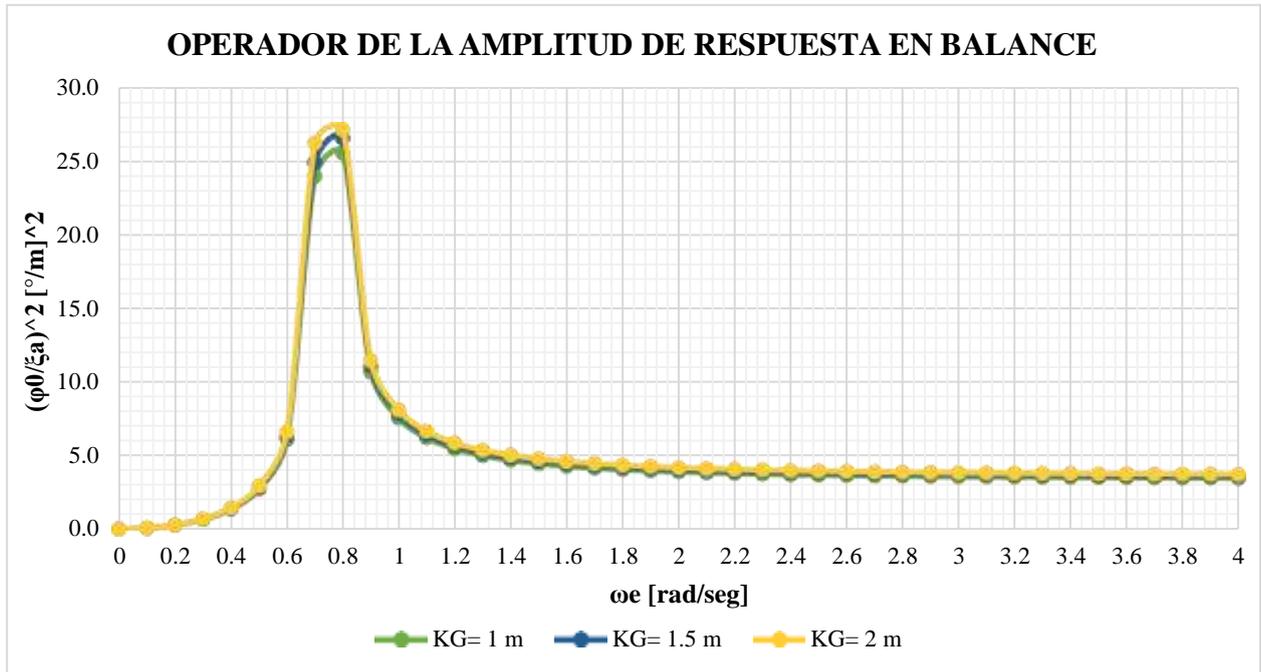


Figura 3.20 RAO, ancho de la columna de agua 0.10 m

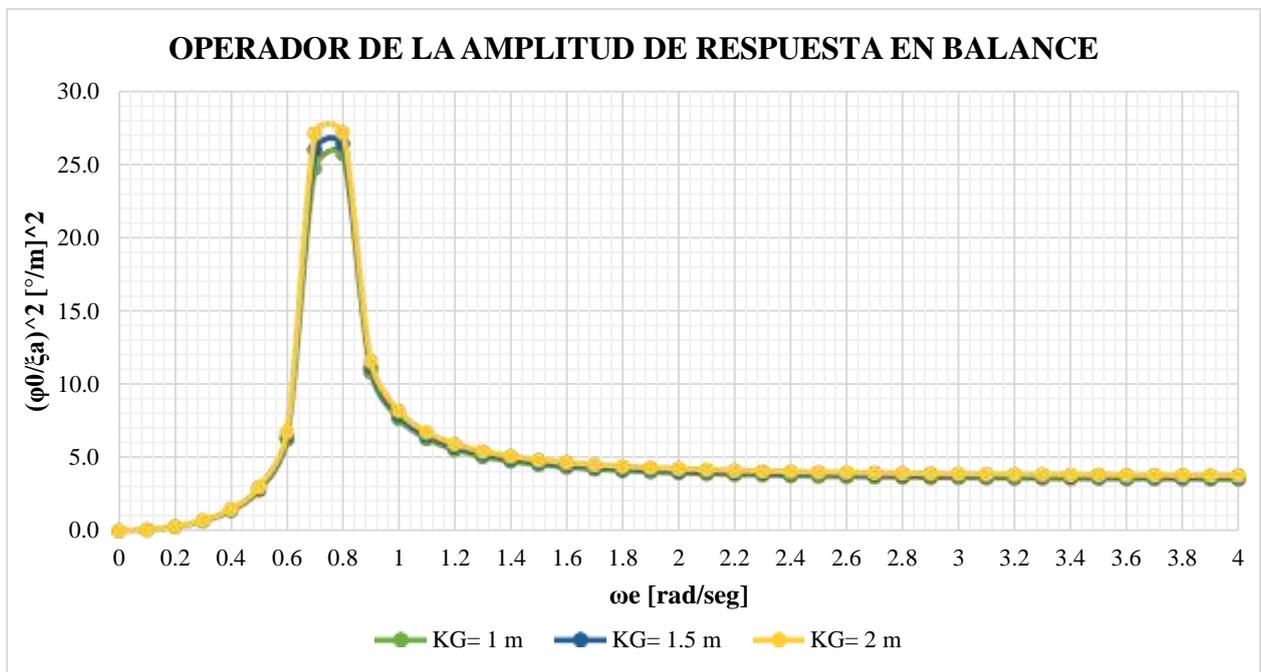


Figura 3.21 RAO, ancho de la columna de agua 0.15 m

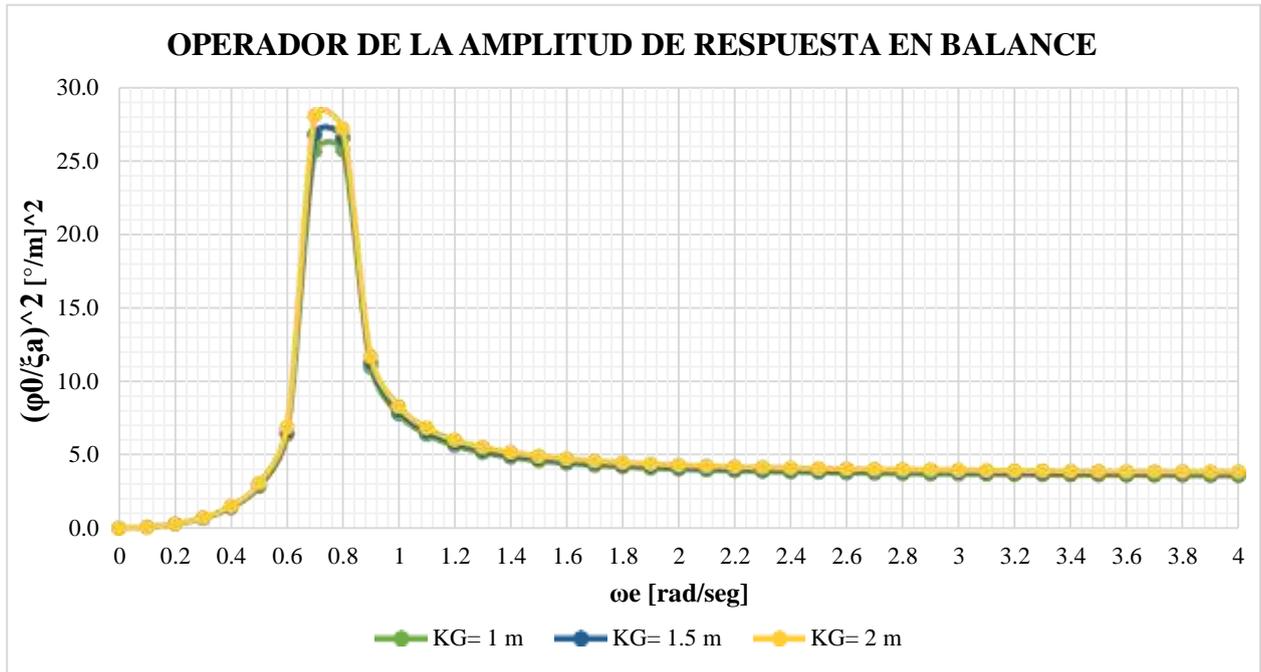


Figura 3.22 RAO, ancho de la columna de agua 0.20 m

En las Figura 3.10 – 3.13 se puede observar cómo a medida que el KG aumenta, también incrementa el valor del RAO. También se observa que a medida que aumenta el ancho de columna de agua, aumenta el valor del RAO.

3.9 Análisis del confort de la tripulación

3.9.1 Espectro de respuesta

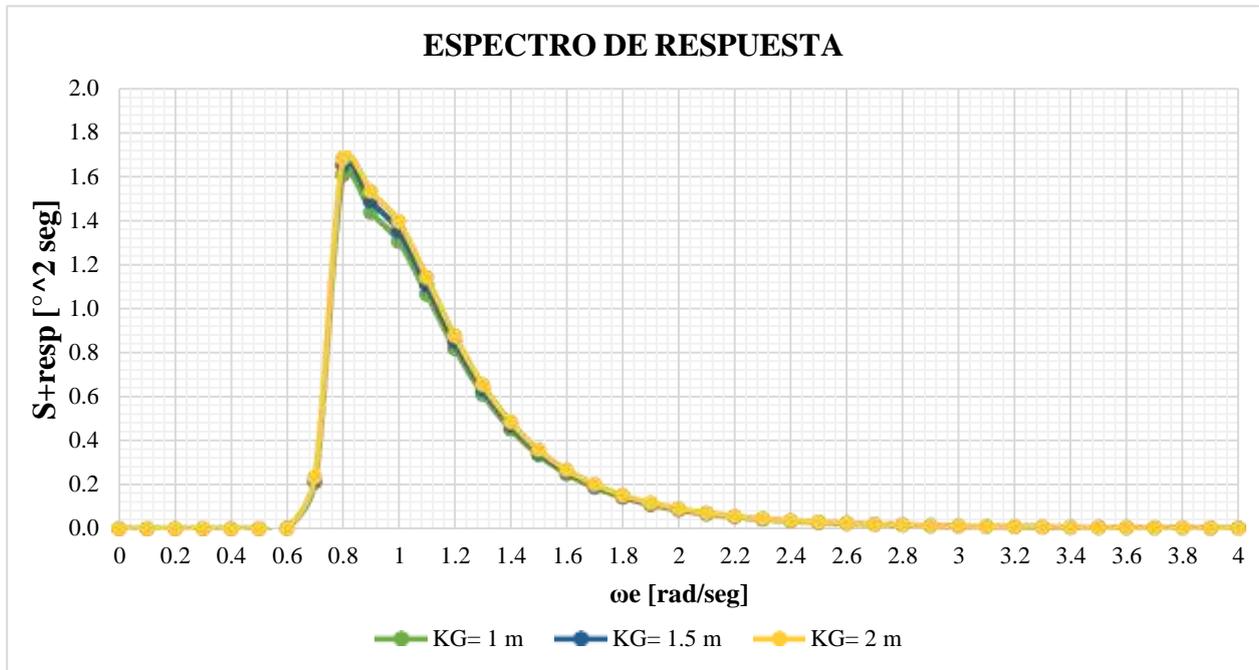


Figura 3.23 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.05 m

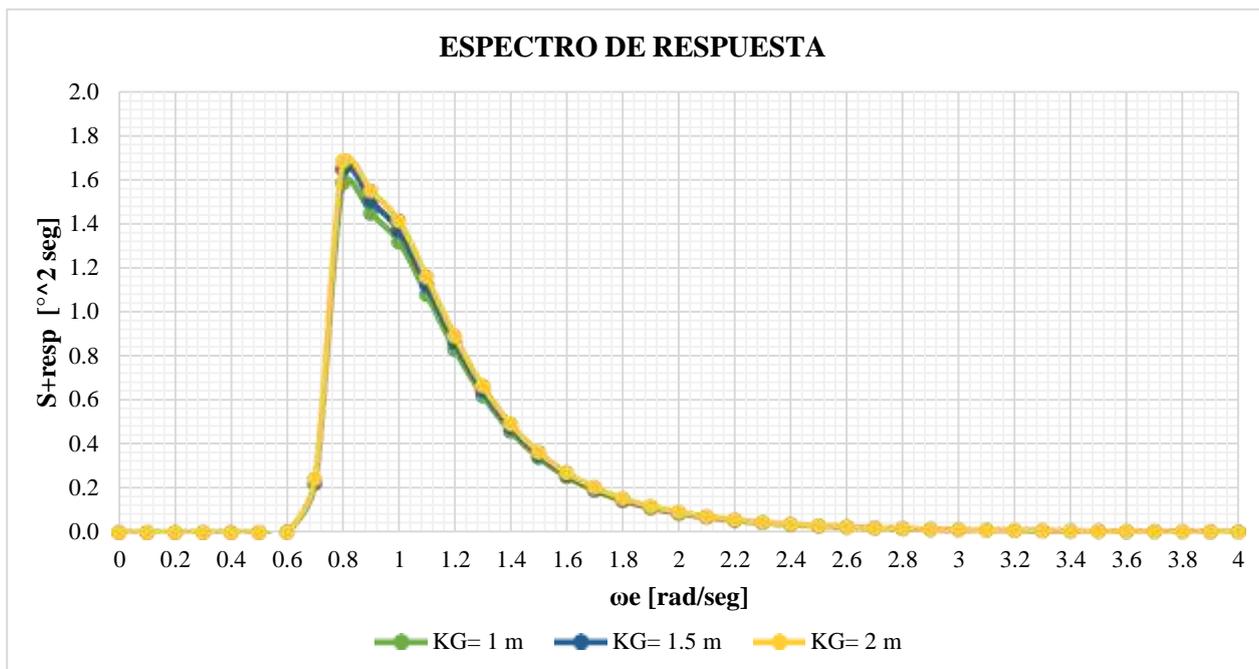


Figura 3.24 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.10 m

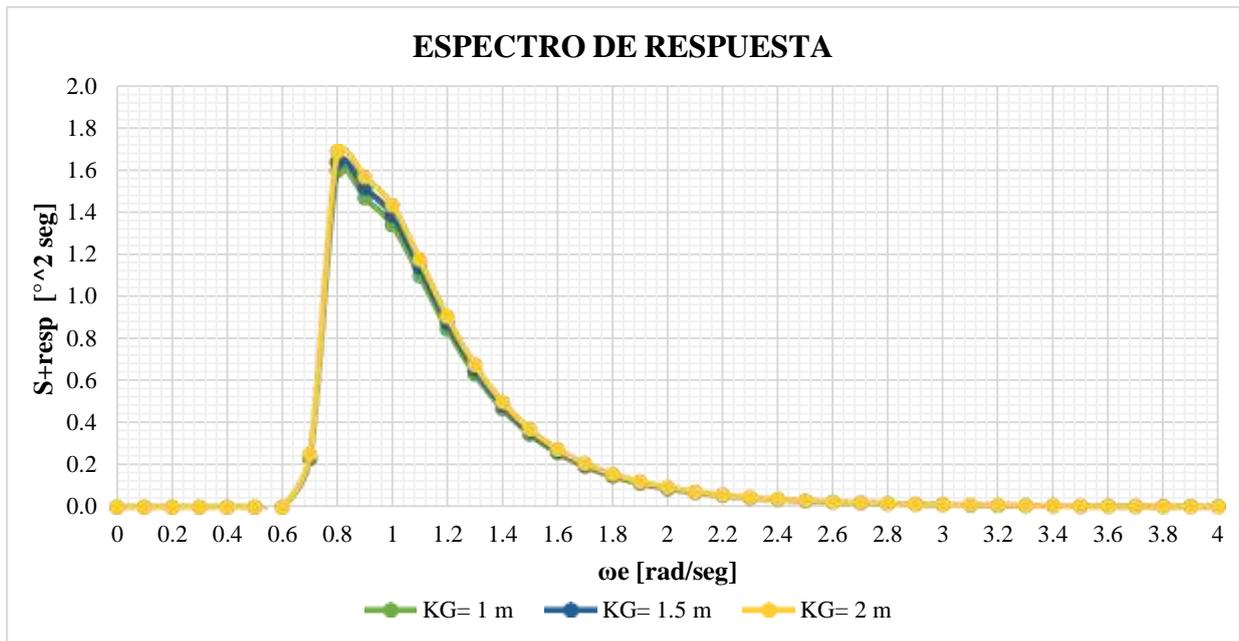


Figura 3.25 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.15 m

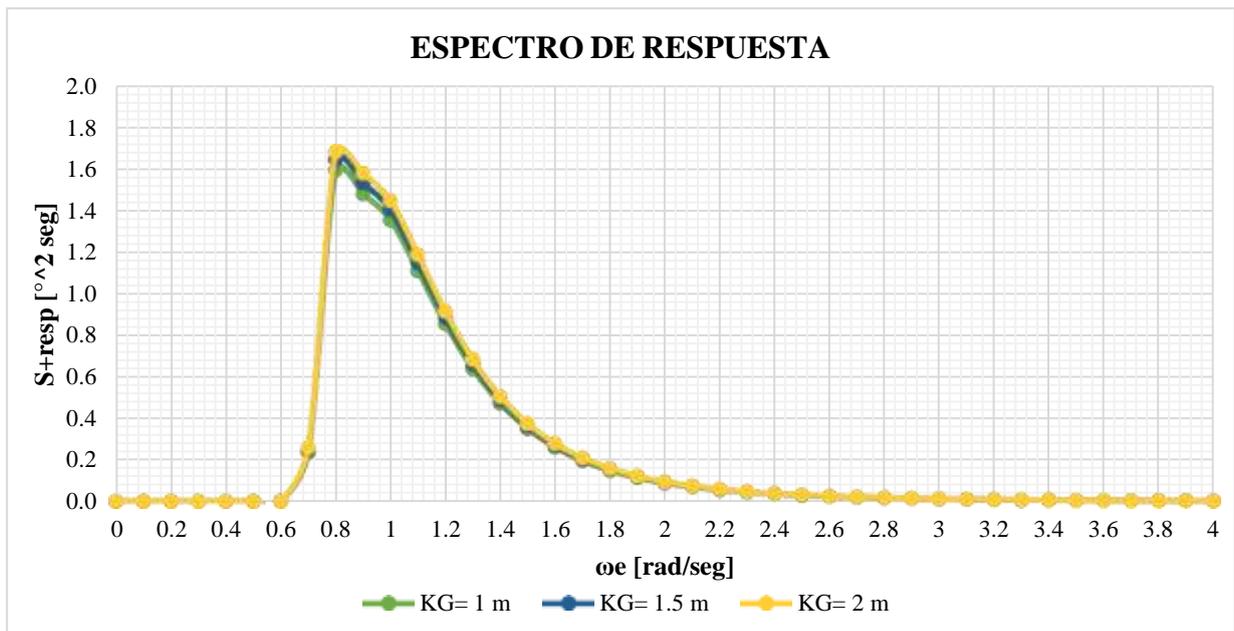


Figura 3.26 Espectro de respuesta, ancho de la columna de agua 0.20 m

3.9.2 MSI

De la Figura 3.27 a la Figura 3.30 se puede observar el Índice de Malestar por Movimiento para los distintos KG y el efecto producido por el aumento de los valores del ancho de columna. En las cuatro figuras se puede observar que el aumento del

KG en la EMG incrementa el Índice de Malestar por movimiento. Además, el aumento en el ancho de columna también aumenta el índice de Malestar por movimiento. Los valores se encuentran en el rango entre 30% y 36%.

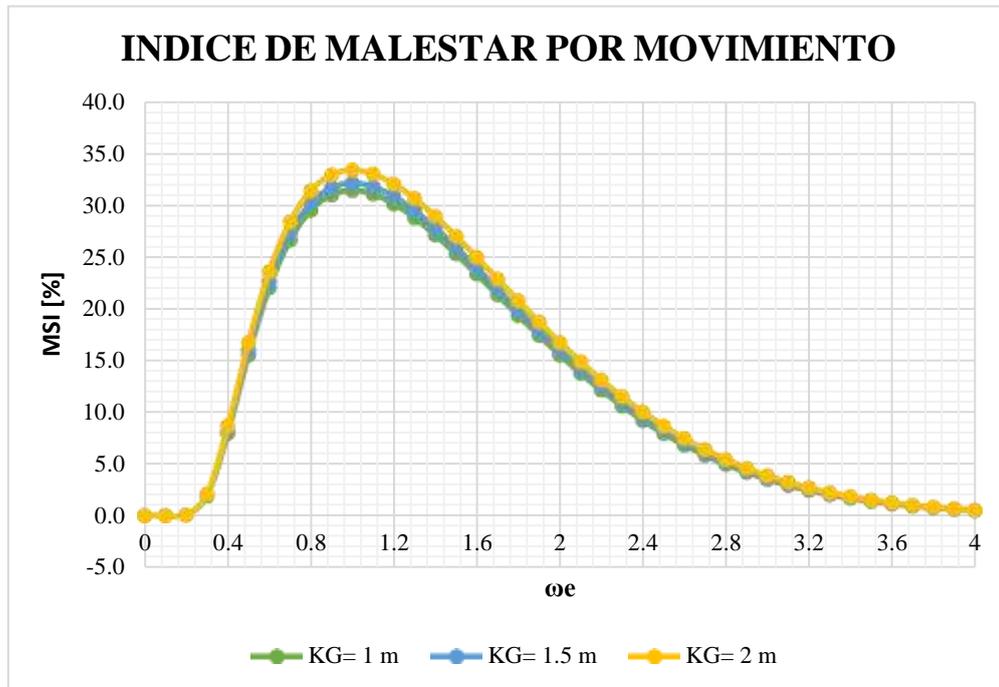


Figura 3.27 MSI, ancho de la columna de agua 0.05 m

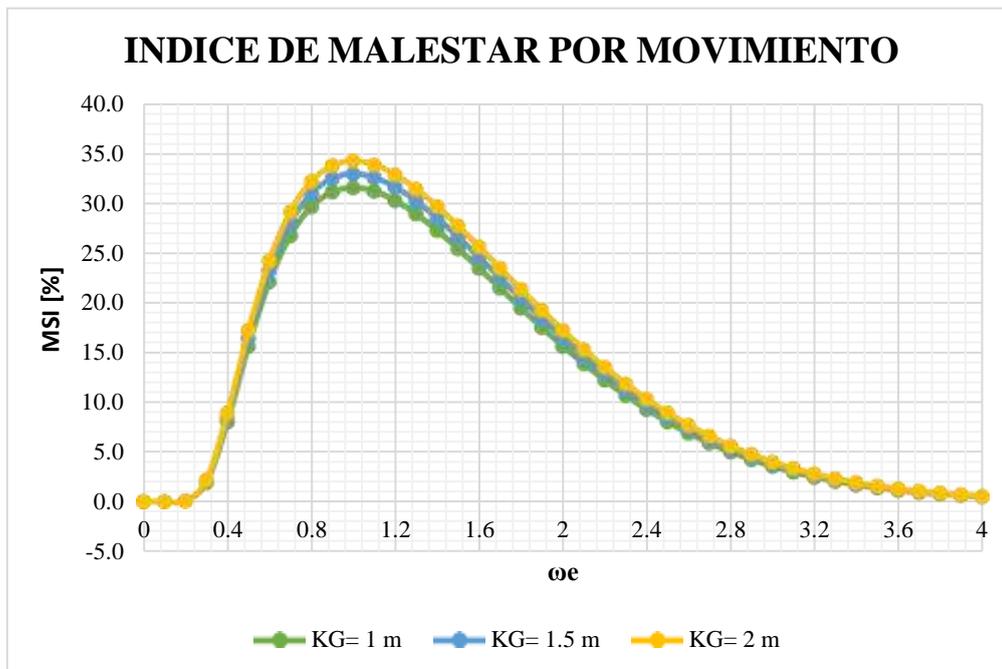


Figura 3.28 MSI, ancho de la columna de agua 0.10 m

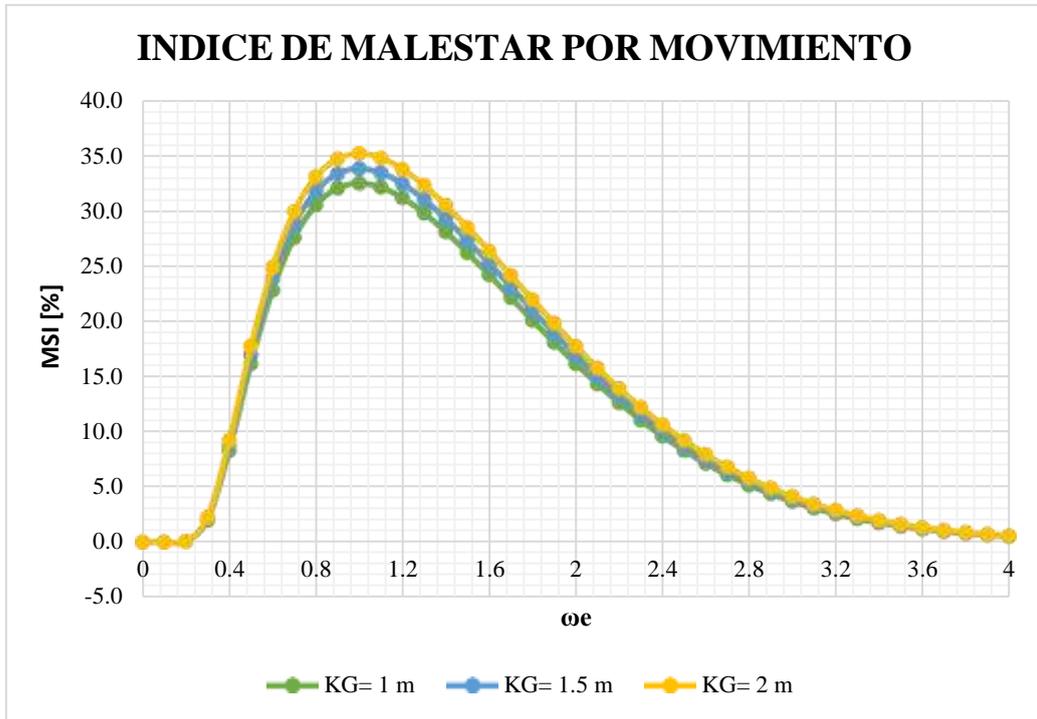


Figura 3.29 MSI, ancho de la columna de agua 0.15 m

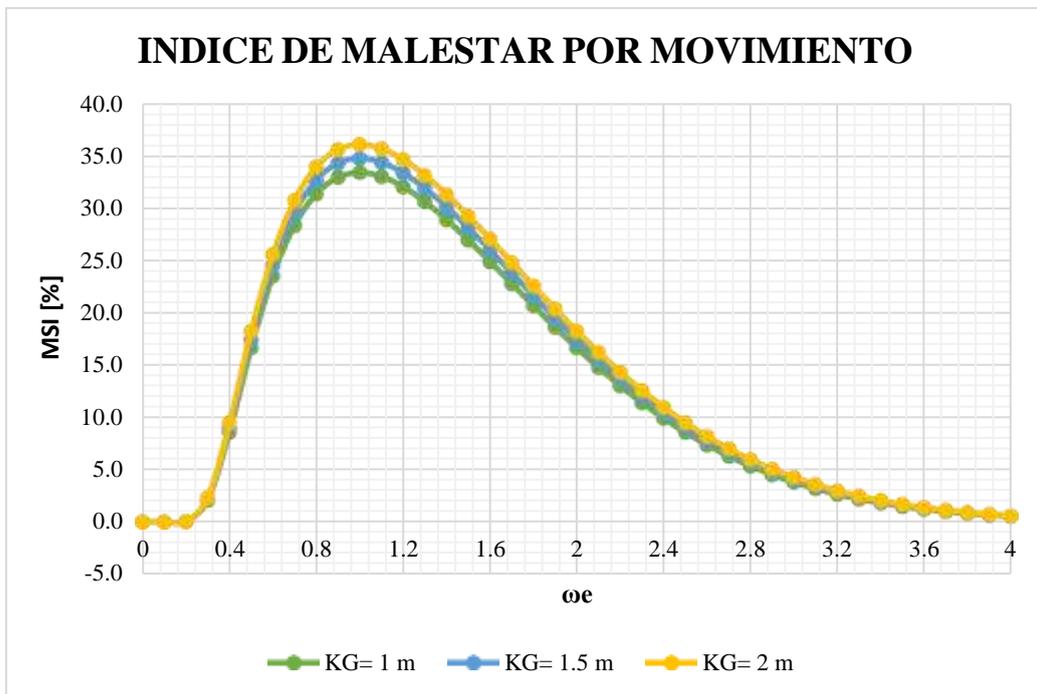


Figura 3.30 MSI, ancho de la columna de agua 0.20 m

3.9.2.1 Resultados finales

Se evaluó el Índice de Malestar por Movimiento para el lugar de operación, Palma Real, tomando en cuenta el valor de frecuencia obtenida de la caracterización del mar. Como se puede observar en la Tabla 3.10, los valores de MSI son mayores a 30% para todas las condiciones analizadas. El mínimo valor es de 30.6% cuando el KG= 1 m y el ancho de la columna de agua es igual a 2.5 m y el máximo valor es de 35.2% cuando el KG= 2 m y el ancho de la columna de agua es de 10 m. Las normas ISO 2631 señalan que el valor de MSI máximo para un tiempo de exposición al movimiento por dos horas es de 20% y se puede observar que ninguna condición cumple con este requerimiento. La disminución del KG de 2 m a 1 m si reduce el porcentaje del MSI en 2% promedio, pero aún sigue estando fuera de las normas establecidas por lo que se deberá buscar una solución que complemente a la reducción del KG.

Tabla 3.14 MSI para Palma Real

KG [m]	Ancho de columna de agua [m]			
	2.5	5	7.5	10
1	30.6 %	30.8 %	31.6 %	32.5 %
1.5	31.3 %	32.1 %	33.2 %	33.9 %
2	32.5 %	33.4 %	34.3 %	35.2 %

3.10 Análisis de presupuesto

A continuación, se presentan los costos asociados para poder realizar el estudio, incluyendo: programas utilizados, tiempo de uso del material informático, tiempo de consulta de personal técnico y universitario. Para el análisis de costos no se ha considerado la posibilidad de contar con los softwares en el computador personal, se ha evaluado el escenario donde se necesita adquirir el servicio y donde sus costos corresponden a los publicados en sus sitios web oficiales de venta. Además, se ha tomado en cuenta los costos de honorarios del personal técnico involucrado en el estudio.

3.10.1 Desglose de costos unitarios

Con el paso del tiempo los activos físicos sufren una depreciación con el paso del tiempo. La amortización se calcula:

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} \quad (3.1)$$

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (3.2)$$

Donde,

a es la amortización.

V_C es el valor de compra en \$.

V_R es el valor residual al término del período de amortización en \$.

n_a es el periodo de amortización en años.

t_h es la tasa horaria en \$/hora.

h es el tiempo de trabajo al año en horas.

El cálculo de la tasa horaria se realizó considerando 30 horas semanales de trabajo y 46 semanas de trabajo sin incluir los feriados.

$$t = 46 \frac{\text{semana}}{\text{año}} \times 30 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} = 1380 \frac{\text{horas}}{\text{años}}$$

Equipo Informático

- Computador personal

Para la realización de este trabajo se contó con un computador personal con las siguientes características:

- Modelo: HP Pavilion Laptop 7265NGW 15-cc610ms
- Procesador: Intel (R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz
- HDD: 505 GB
- RAM: 8.00 GB
- Arquitectura: 64 bits.

El precio de compra V_C se fija en \$950, con un período de amortización a 5 años y el valor residual V_R del 20%.

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} = \frac{950 - 190}{5} = 152 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{152}{1380} = 0.11 \frac{\$}{\text{hora}}$$

Software

- OpenFOAM

Al tratarse de un código abierto o libre (OpenSource), la licencia es gratis.

- Paraview

Al igual que OpenFOAM, es un software de licencia gratuita.

- Paquete de Microsoft Office

El costo de la licencia anual de Microsoft Office es de \$59.99.

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{59.99}{1380} = 0.0043 \frac{\$}{\text{hora}}$$

- GnuPlot

También es un software de licencia gratuita.

Lugar de trabajo

En primer lugar, se considera el costo por alquiler de una oficina de trabajo de \$30 semanales. El estudio ha tenido una duración de 16 semanas, tiempo en el cual se va a considerar el costo de servicios de energía eléctrica por el uso del equipo informático con una tarifa de 0.04 \$/KWh, precio subsidiado por el Estado ecuatoriano. Por último, se va a contemplar un costo mensual del servicio de internet de \$55.

Material de oficina

En este rubro, se va a considerar un cuaderno de apuntes con un valor de \$2.75, un bolígrafo de \$0.75 y un marcador de pizarra de \$1.00.

Personal

- Estudiante universitario

El presente estudio ha sido realizado por un estudiante universitario en un período de 16 semanas con un total de 480 horas.

$$t_h = 6.00 \frac{\$}{hora}$$

- Profesor, Doctor-Ingeniero Naval

La supervisión y el seguimiento del proyecto ha estado a cargo por un Doctor-Ingeniero Naval desarrollando las funciones de tutor.

$$t_h = 50.00 \frac{\$}{hora}$$

3.10.2 Presupuesto total

A continuación, se detallan todos los rubros mencionados anteriormente para la estimación del presupuesto total de este proyecto.

Tabla 3.15 Presupuesto Total del proyecto

Concepto	Periodo (h)	Tasa horaria (\$/h)	Subtotal bruto (\$)	IVA (12%)	Total (\$)
Equipos y software					
Computadora personal	480	0.14	67.20	8.06	75.26
OpenFOAM v7	225	0.00	0.00	0.00	0.00
Paraview 5.6.0	125	0.00	0.00	0.00	0.00
Paquete Microsoft Office	200	0.04	8.00	0.96	8.96
GnuPlot	20	0.00	0.00	0.00	0.00
Subtotales			75.2	9.02	84.22
Personal					
Estudiante universitario	480	6.00	2880.00	345.60	3225.60
Profesor director	32	50.00	1600.00	192.00	1792.00
Subtotales			4480.00	537.60	5017.60
Oficina					
Material oficina			4.50	0.54	5.04
Servicio energía eléctrica	480	0.04	19.02	2.28	21.30
Servicio de internet fijo			220.00	26.40	246.40
Alquiler oficina			480.00	57.60	537.6
Subtotales			723.52	86.82	810.34
			Total Bruto		\$ 5278.70

			Iva (12%)	\$ 633.44
			TOTAL	\$5912.14

El presupuesto total del proyecto es de:

CINCO MIL NOVECIENTOS DOCE Y CATORCE CENTAVOS

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se caracterizó el estado de mar del lugar de operación de la Estación Móvil Guardacostas (Palma Real Esmeraldas) determinando el período, la altura significativa de las olas y la profundidad. Estos parámetros fueron útiles para establecer las condiciones iniciales de la simulación y, para determinar el espectro de mar para la condición más crítica usando la formulación de Pierson-Moskowitz.
- Las simulaciones numéricas fueron realizadas con éxito considerando tres posiciones diferentes de KG= 1 m, 1.5 m y 2 m, una altura de la columna de agua igual a 2 m y cuatro diferentes anchos de columnas de agua. Se aplicó el modelo de turbulencia kEpsilon y las simulaciones fueron realizadas con el solucionador interFoam.
- Se logró simular la oscilación en balance desacoplada del objeto flotante, eliminando el movimiento traslacional en las tres direcciones y restringiendo el movimiento rotacional solamente al eje x usando dynamicMeshDict.
- El factor de amortiguamiento del sistema fue calculado procesando los resultados numéricos y aplicando el método de decremento logarítmico implementando un código en Python. Se evidenció un comportamiento no lineal para las tres diferentes posiciones del centro de gravedad vertical.
- Se determinó el Operador de la Amplitud de la Respuesta en balance evidenciando un incremento de este valor conforme el centro de gravedad aumenta.
- Se evaluó el Índice de Malestar por Movimiento para las tres posiciones de KG= 1 m, 1.5 m y 2 m, donde se obtuvo que en ninguna de las condiciones cumple con el requerimiento de las normas ISO 2631 para un tiempo de exposición de 2 horas.
- Se estimó un costo de \$5912.14 incluidos impuestos de la realización profesional de este estudio numérico mediante un análisis de presupuesto de los costos.

4.2 Recomendaciones

En los trabajos futuros se recomienda:

- Realizar una prueba de inclinación o una prueba de extinción del balance para tener una estimación más real del radio metacéntrico transversal, centro de gravedad vertical y del período de balance con el fin de compararlos con los resultados numéricos.
- Aumentar el dominio computacional de la simulación, para que de esta manera los resultados en los primeros intervalos de tiempo no se vean afectados por la reflexión de la columna de agua.
- Realizar un estudio del efecto de las no linealidades presentes en el movimiento y que afectan al factor de amortiguamiento, con la intención de comparar los nuevos resultados con los obtenidos mediante la aplicación de teoría potencial.
- Sugerir una nueva disposición general para la Estación Móvil Guardacostas con el objetivo de reducir la respuesta en balance y el índice de malestar por movimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, I. (2016). " Theory of Wing Sections" , Dover Publications. *Doenhoff*.
- Bae, Y. H. (2014). Coupled dynamic analysis of multiple wind turbines on a large single floater. *Ocean Engineering*, 175-187.
- Barajas, G., Lara, J., & Maza, M. (2016). *Regular waves interaction with a floating structure*. Universidad de Cantabria , Instituto de Hidraulica Ambiental, Cantabria .
- Bayle , B. (2019). *Toeria de Buque. La Naval*.
- BELYTSCHKO. (2019). Automated Conformal Hexahedral Meshing Constraints, Challenges and Opportunities. Engineering. *Numerical Methods in Engineering*.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicles*.
- Bhinder, M. A. (2011). Assessment of viscous damping via 3d-cfd modelling of a floating wave energy device. . *Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference*, (págs. 5-9). Southampton.
- Bonaschi, G. A. (2012). *Identification of a response amplitude operator for ships*.
- Bos, J. E. (2005). Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view. . *Aviation, space, and environmental medicine*, 1111-1118.
- Browm. (2022). *Open Foam*. Obtenido de <https://www.openfoam.com/>
- Collett, L. S. (1986). Development of the airborne electromagnetic technique. Airborne resistivity mapping. *Geol. Survey Can Paper*, 92.
- Eça, L. (2019). Recent Developments in Surface Grid Generation using GMS for the Surface Definition. *Instituto Superior Técnico*.
- Elbakyan, A. (2013). *Introduction to Naval Architecture (Fifth Edition)*. Obtenido de ScienceDirect Topics: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inclining-experiment#:~:text=are%20measured%20experimentally,-,The%20experiment%2C%20the%20inclining%20experiment%2C%20involves%20causing%20the%20ship%20to,together%20with%20the%20water%20density>.
- Greenshields, C. (2019). OpenFOAM User Guide. *OpenFOAM*.
- Hidalgo, N. &.-O.-P. (2018). Diseño de un robot paralelo para el anaveaje.
- INOCAR. (2022). *Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada*.

- James, H. (2018). Orthogonal Generation Systems. *Handbook of Grid Generation by Thompson, Soni & Weatherill, CRC Press.*
- Janicka, J. &. (2005). Large eddy simulation of turbulent combustion systems. *Proceedings of the Combustion Institute*, 537-547.
- Johanning, L. S. (2007). Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices. *Ocean Engineering*, 1918-1934.
- Jons, R. (2018). *Inclination experiment, Inclining Experiment.*
- Khamayseh, A. (2018). Surface Grid Generation Systems. *Handbook of Grid Generation by Thompson, Soni & Weatherill.*
- Koyama, K. (2018). Comparative Calculations of Propellers by Surface Panel Method – Workshop Organized by 20th Propulsor Committee. *Papers of Ship Research Institute, Supplement No. 15, Tokio, Japón.*
- Lewis, E. V. (1988). Principles of Naval Architecture Vol II: Resistance, Propulsion and Vibration. En E. V. Lewis, *Lewis, E. V.* New York.
- Marquez, R. (2019). Refinamiento y posicionamiento de malla . *El Naval.*
- Moin, P. &. (1998). Direct numerical simulation: a tool in turbulence research. . *Annual review of fluid mechanics*, 539-578.
- Mukha, T. &. (2015). *Large-eddy simulation of turbulent channel flow .*
- Nguyen, T. A. (2015). Study of motion sickness incidence in ship motion. *Science and Technology Development Journal*, 102-109.
- Nicholls-Lee, R. W. (2013). Coupled multi-phase CFD and transient mooring analysis of the floating wave energy converter OWEL. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering .*
- Palm, J. (2014). *Developing computational methods for moored floating wave energy devices.* Suecia.
- Palm, J. E. (2016). Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation. *International Journal of Marine Energy*, 83-99.
- Paredes, M. (2018). Dominios de Fronteras, Seguridad Naval. *El Naval.*
- Penalba Retes, M. M. (2015). Nonlinear Froude-Krylov force modelling for two heaving wave energy point absorbers. *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference.*

- Pérez, J. C. (27 de Septiembre de 2019). Asaltos en el mar agobian a los pescadores de cinco provincias. *El Comercio*.
- Perez, T. (2005). *Course keeping and roll stabilisation using rudder and fins*.
- Rivera Arreba, I. (2017). *Computation of Nonlinear wave loads on floating structures*. Delft University of Technology.
- Rodi, W. (1997). Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 55-75.
- Rodríguez Castillo, C. A. (2000). *Estabilidad transversal de buques pesqueros con trimado libre*.
- Romario, J. (2018). *Creacion de Mallas*. Guatemala.
- Searson, S. a. (1995). Extreme high sea levels around the coast of southern Africa. *South African Journal of Science*, 579-588.
- Soal, K. I. (2014). *Vibration response of the polar supply and research vessel the SA Agulhas II in Antarctica and the Southern Ocean*. Stellenbosch.
- Weber, J. (2012). WEC Technology Readiness and Performance Matrix—finding the best research technology development trajectory. *Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy*. Dublin.

APÉNDICES

APÉNDICE A: BATIMETRÍA

Para la obtención de la batimetría del lugar, se necesitó la digitalización de cartas náuticas y se aplicó la siguiente metodología:

1. Selección de la carta náutica de la zona de interés, una vez fue identificada la carta, se procede al geoprocesamiento a través del software de sistemas de información geográfica QGIS que es de licencia libre. Para georreferenciar la carta se utilizó las herramientas de RASTER > Georreferenciador. Se debió cargar la carta en la nueva pestaña, una vez cargada se consideró un sistema de base, es este caso se utilizó el raster de ESRI Satellite. En el mapa se establecieron al menos 4 puntos de control con los que se realizó la proyección de la carta. Una vez georreferenciada se verificó que los bordes de costa en carta náutica coincidan con los bordes del raster de referencia.

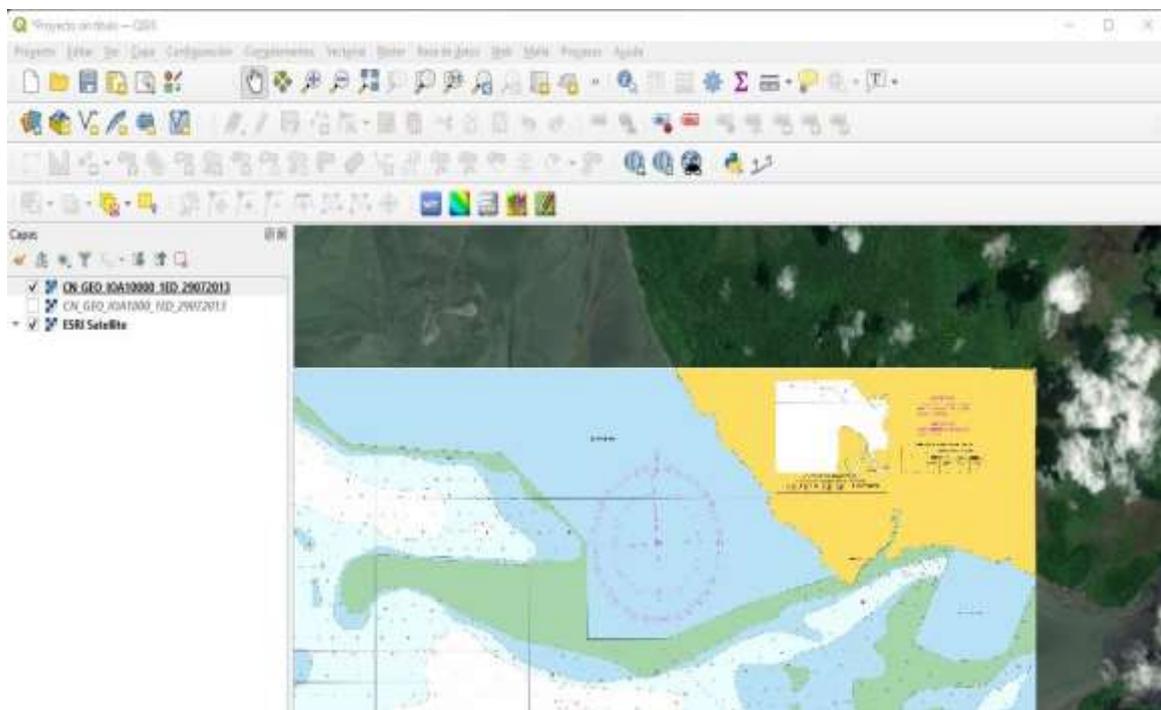


Figura A.1 Geoprocesamiento en QGIS

2. Para la digitalización de la carta náutica creamos una capa de líneas que contiene como atributo la profundidad de los veriles dibujados en la carta náutica.

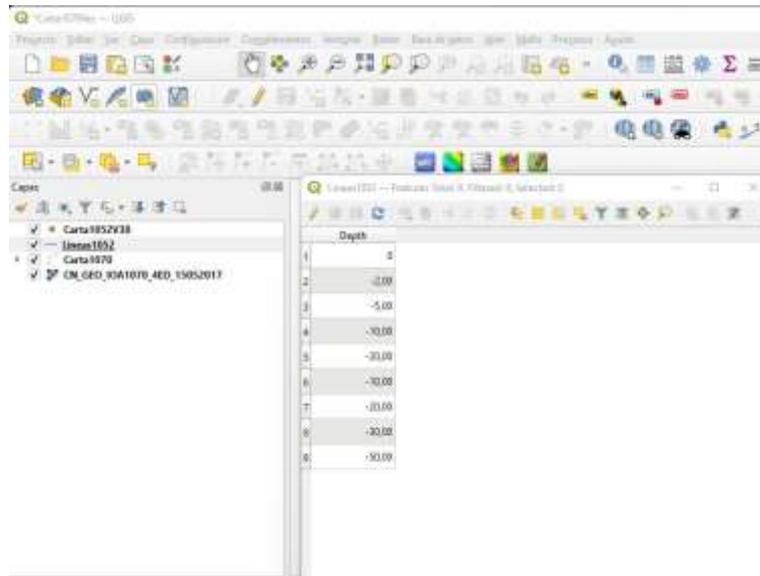


Figura A.2 Capa de líneas

3. Se creó una nueva capa del tipo puntos donde se ubicaron los valores representados en la carta náutica.



Figura A.3 Puntos de la carta náutica

4. A la capa del tipo línea creada en la sección 2, con el complemento QChainage creamos una capa de puntos a lo largo de las líneas que conservan los valores de los veriles.
5. Se procedió a unir las capas generadas en los dos pasos anteriores para obtener la carta completa.

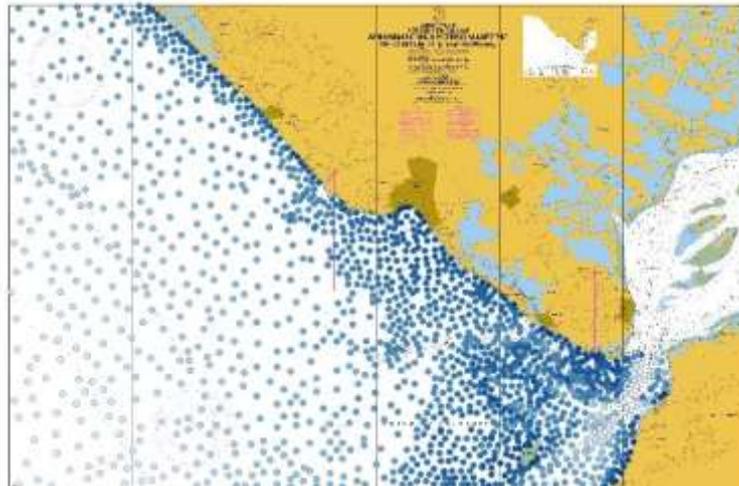


Figura A.4 Carta náutica completa

6. Con los valores digitalizados en puntos y la herramienta interpolación se procedió a crear el ráster.

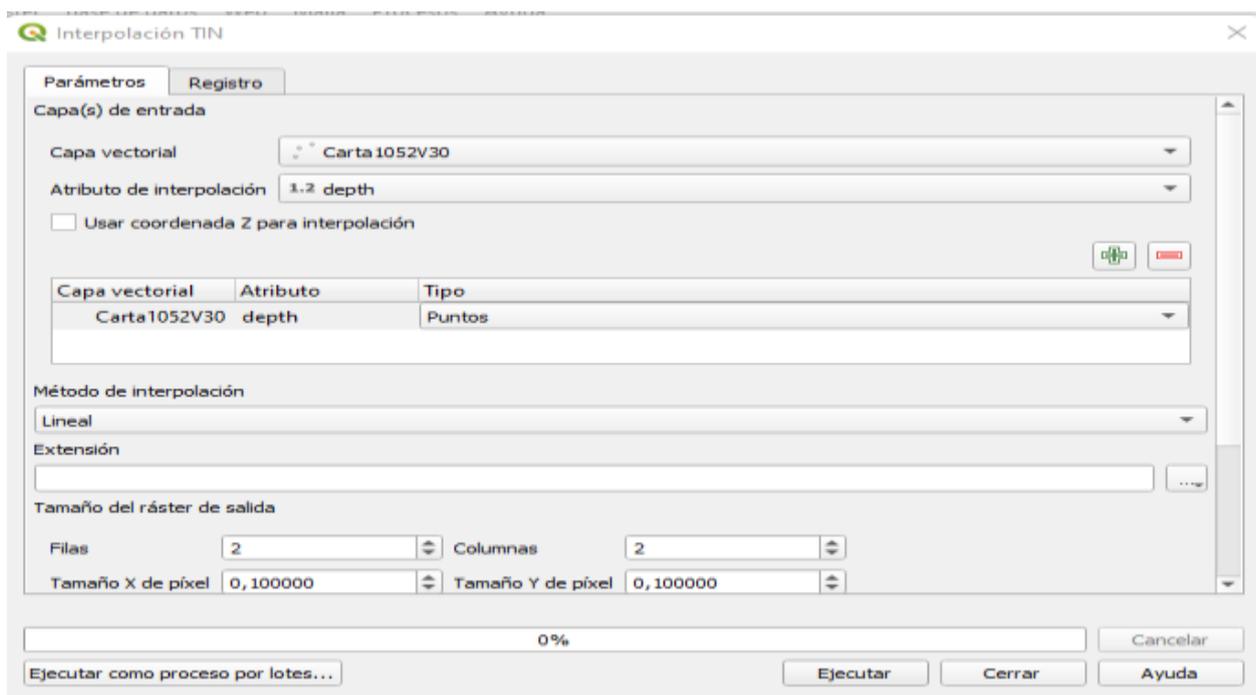


Figura A.5 Creación del ráster

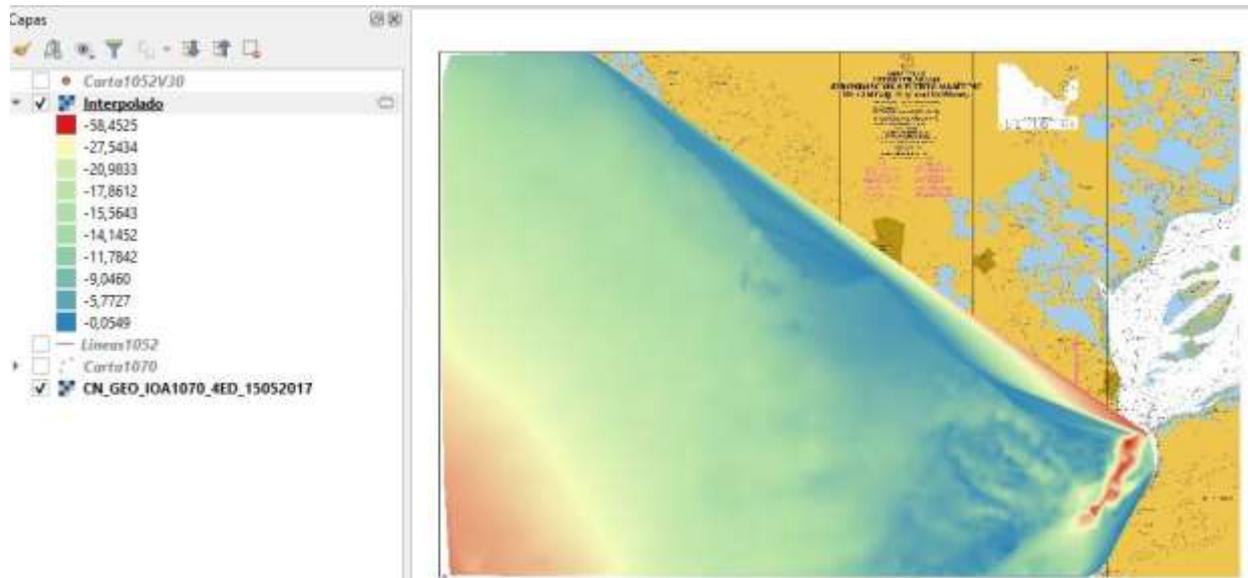


Figura A.6 Ráster

APÉNDICE B: DECREMENTO LOGARÍTMICO

Para el procesamiento de los resultados de amplitud del ángulo de balance y calcular el factor de amortiguamiento por el método de decremento logarítmico, se implementó el siguiente código en Python:

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math as mt
import statistics as st

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

with open("drive/MyDrive/sixDoFRigidBodyState1.dat") as file:
    lines = file.readlines()

mediciones = []
for line in lines[3:]:
    line2=line.replace("\t", " ")
    clean_row = line2.strip().split(" ")
    filtered = list(filter(None, clean_row))
    mediciones.append(filtered)

columnas = ["time"] + ["roll"+str(i) for i in range(1,16) ]

dataframe = pd.DataFrame(mediciones, columns = columnas)

datosroll=dataframe[["time", "roll7"]]

t=np.array(datosroll.time)
x=np.array(datosroll.roll7)
t=t.astype(float)
x=x.astype(float)

peaks=[]
maximos=[]
tmaximos=[]
n=2
for i in range (n,len(x)-n):
    if x[i] == max(x[i-n:i+n]):
        peaks.append(i)
        if x[i]>0.0:
            maximos.append(x[i])
            tmaximos.append(t[i])
```

```

dif=[]
p=10
for i in range (p,len(maximos)):
    diferencia=mt.log(maximos[i-1]/maximos[i])
    dif.append(diferencia)

coefamortiguamiento=[]
promedioc=[]
desvc=[]
for i in range (p,len(dif)+1):
    xi=dif[i-1]/(2*3.141592653589793)
    coefamortiguamiento.append(xi)

promedioc.append(float(st.mean(coefamortiguamiento)))
desvc.append(float(st.pstdev(coefamortiguamiento)))

periodos=[]
promediop=[]
desvp=[]
for i in range (p,len(maximos)):
    tiempo=tmaximos[i]-tmaximos[i-1]
    periodos.append(tiempo)

promediop.append(float(st.mean(periodos)))
desvp.append(float(st.pstdev(periodos)))

Mean= pd.DataFrame({'Factor de Amortiguamiento': promedioc,
                    'Periodo': promediop,
                    'Desviación estandard factor de amortiguamiento': desvc,
                    'Desviación estandard periodo': desvp})
Mean

```

A continuación, se va a mostrar el procesamiento de las amplitudes del ángulo de balance para el primer caso estudiado, donde se tienen las siguientes condiciones: $KG=1$ m y ancho de ola= 2.5 m.

Lo primero que hace el algoritmo es identificar todos los valores máximos absolutos del conjunto de datos que son mostrados gráficamente en la Figura B.1 e imprime la Tabla B.1.

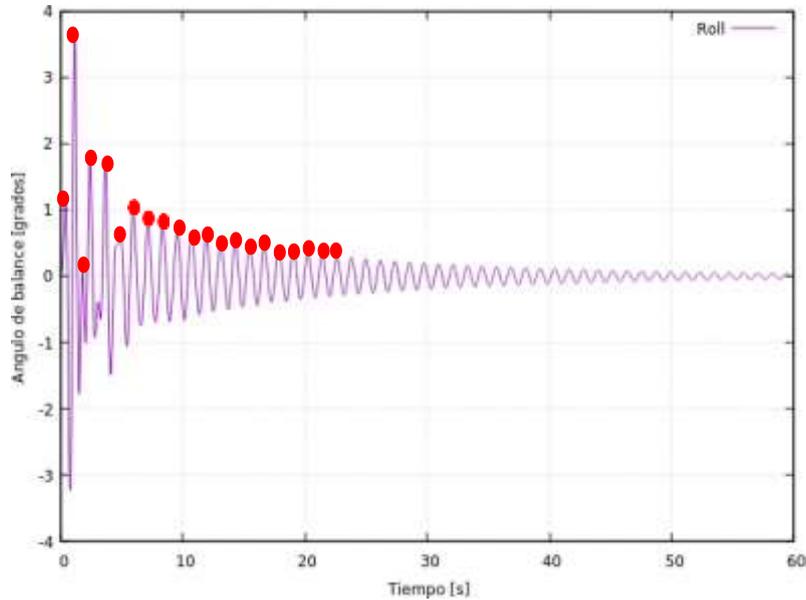


Figura B.1 Identificación de los valores máximos absolutos de la Gráfica de la Amplitud del ángulo de Balance, KG= 1 m y ancho de ola=2.5 m

Tabla B.1 Valores máximos absolutos de Amplitud del ángulo de Balance, KG= 1 m y ancho de ola=2.5 m

xi	Peak								
0	1.200487	11	0.613308	23	0.242895	35	0.111456	47	0.052486
1	3.587695	12	0.497291	24	0.228620	36	0.104600	48	0.049338
2	0.084908	13	0.514549	25	0.212510	37	0.098084	49	0.046439
3	1.749635	14	0.426982	26	0.200411	38	0.092120	50	0.043593
4	1.670816	15	0.440339	27	0.186105	39	0.086482	51	0.04104
5	0.583407	16	0.382952	28	0.175832	40	0.081107		
6	0.961611	17	0.373222	29	0.163651	41	0.076273		
7	0.805450	18	0.336952	30	0.154144	42	0.071508		
8	0.761143	19	0.321388	31	0.143948	43	0.067287		
9	0.648375	20	0.297319	32	0.135257	44	0.063173		
10	0.575063	21	0.278556	33	0.126676	45	0.059352		
11	0.613308	22	0.260334	34	0.118828	46	0.055817		

Para el caso analizado, la Tabla B.1 presentó un total de 51 valores, de los cuales se ignoró los diez primeros valores debido a que, por el ruido de la simulación cuando esta iniciaba, eran aberrantes. Luego, se procedió a calcular la diferencia entre cada máximo consecutivo con la ecuación 2.8 y se calculó el factor de amortiguamiento para cada valor máximo de ángulo de balance aplicando la ecuación 2.10. Finalmente, se determinó el factor de amortiguamiento promedio y su desviación estándar como se muestra en la Tabla B.2.

Tabla B.2 Variación del coeficiente de amortiguamiento

#	$X_i - X_{i+1}$	ξ	ξ_{prom}	$\sigma \xi$
10	0.047292	0.00753	0.01015	0.00086
11	0.077843	0.01239		
12	0.065186	0.01037		
13	0.067655	0.01077		
14	0.069334	0.01103		
15	0.060569	0.00964		
16	0.073072	0.01163		
17	0.058616	0.00933		
18	0.074058	0.01179		
19	0.05678	0.00904		
20	0.07179	0.01143		
21	0.05984	0.00952		
22	0.06843	0.01089		
23	0.06227	0.00991		
24	0.06554	0.01043		
25	0.06395	0.01018		
26	0.06405	0.01019		
27	0.06348	0.01010		
28	0.06431	0.01024		
29	0.06273	0.00998		
30	0.06314	0.01005		
31	0.06417	0.01021		
32	0.06145	0.00978		
33	0.0645	0.01027		
34	0.06084	0.00968		
35	0.06309	0.01004		
36	0.06239	0.00993		
37	0.0614	0.00977		
38	0.06152	0.00979		
39	0.06185	0.00985		
40	0.06054	0.00964		
41	0.06323	0.01006		
42	0.06025	0.00959		

El algoritmo además mostraba el tiempo para el que ocurría un valor máximo por lo que realizando la diferencia entre los tiempos de dos máximos consecutivos se calculaba el período del movimiento. Finalmente se calculó el período promedio y la desviación estándar tal como se muestra en la Tabla B.3

Tabla B.3 Cálculo del período del movimiento

#	t [seg]	T [seg]	T prom [seg]	σT
10	9.54	1.16	1.187619	0.0106479
11	10.7	1.2		
12	11.9	1.2		
13	13.1	1.18		
14	14.28	1.18		
15	15.46	1.18		
16	16.64	1.2		
17	17.84	1.18		
18	19.02	1.2		
19	20.22	1.18		
20	21.4	1.2		
21	22.6	1.18		
22	23.78	1.18		
23	24.96	1.2		
24	26.16	1.18		
25	27.34	1.2		
26	28.54	1.18		
27	29.72	1.18		
28	30.9	1.2		
29	32.1	1.18		
30	33.28	1.2		
31	34.48	1.18		
32	35.66	1.18		
33	36.84	1.2		
34	38.04	1.18		
35	39.22	1.2		
36	40.42	1.18		
37	41.6	1.18		
38	42.78	1.2		
39	43.98	1.18		
40	45.16	1.2		
41	46.36	1.18		
42	47.54	1.18		

APÉNDICE C: EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESPECTRO DE RESPUESTA

El código de Python implementado permitió calcular el período de oscilación del modelo, se lo escaló al prototipo mediante el factor de escala $\lambda^{0.5}$, donde $\lambda = 50$ y se determinó la frecuencia natural del sistema. En la Tabla C.1, se observan estos valores para el primer caso estudiado, donde se tienen las siguientes condiciones: $KG=1$ m y ancho de ola= 2.5 m. En la Tabla 3.13 se muestran los períodos promedios del prototipo de todos los casos analizados.

Tabla C.1 Escala del período de oscilación

T prom modelo [seg]	T prom prototipo [seg]	ω_0 prototipo [rad/seg]
1.188	8.398	0.7482

En la Tabla C.2 se trabaja con un rango de frecuencias de $[0 - 4]$ [rad/seg]. En la segunda columna se calcula el factor de ajuste, razón entre la frecuencia de encuentro ω_e y la frecuencia natural del prototipo ω_0 , según la ecuación 2.13. En la tercera columna se muestran los resultados del factor de magnificación según la ecuación 2.12. En la cuarta columna se presentan los resultados del RAO para el rango de frecuencias según la ecuación 2.16 y finalmente en la quinta columna se muestran los valores del espectro de respuesta según la ecuación 2.22.

Tabla C.2 Cálculos realizados para determinar el espectro de respuesta

ω_w [rad/seg]	ω_e/ω_0	μ_0	RAO [deg/m]^2	Sr [deg2 s]
0	0.00	1.00	0.0	0.0
0.1	0.13	1.02	0.1	0.0
0.2	0.27	1.08	0.3	0.0
0.3	0.40	1.19	0.6	0.0
0.4	0.53	1.40	1.3	0.0
0.5	0.67	1.81	2.6	0.0
0.6	0.80	2.80	5.9	0.0
0.7	0.94	7.93	22.8	0.2
0.8	1.07	6.90	25.9	1.6
0.9	1.20	2.23	10.6	1.4
1	1.34	1.27	7.4	1.3
1.1	1.47	0.86	6.1	1.1
1.2	1.60	0.64	5.4	0.8
1.3	1.74	0.50	4.9	0.6
1.4	1.87	0.40	4.6	0.5
1.5	2.00	0.33	4.4	0.3
1.6	2.14	0.28	4.2	0.2
1.7	2.27	0.24	4.1	0.2
1.8	2.41	0.21	4.0	0.1
1.9	2.54	0.18	3.9	0.1
2	2.67	0.16	3.8	0.1

2.1	2.81	0.15	3.8	0.1
2.2	2.94	0.13	3.7	0.1
2.3	3.07	0.12	3.7	0.0
2.4	3.21	0.11	3.6	0.0
2.5	3.34	0.10	3.6	0.0
2.6	3.48	0.09	3.6	0.0
2.7	3.61	0.08	3.6	0.0
2.8	3.74	0.08	3.5	0.0
2.9	3.88	0.07	3.5	0.0
3	4.01	0.07	3.5	0.0
3.1	4.14	0.06	3.5	0.0
3.2	4.28	0.06	3.5	0.0
3.3	4.41	0.05	3.5	0.0
3.4	4.54	0.05	3.4	0.0
3.5	4.68	0.05	3.4	0.0
3.6	4.81	0.05	3.4	0.0
3.7	4.95	0.04	3.4	0.0
3.8	5.08	0.04	3.4	0.0
3.9	5.21	0.04	3.4	0.0
4	5.35	0.04	3.4	0.0

APÉNDICE D: SUPERFICIE LIBRE

Para el análisis de la superficie libre, se colocaron una serie de puntos por delante y por detrás del objeto a una misma distancia en el eje x y en el eje y pero variando su altura en el eje z. Esto se realizó al agregar la función *probes* en el archivo *controlDict*. El procesamiento de los datos, se lo realizó implementando un código en Python que tuvo como objetivo identificar en qué posición en el eje z se encontraba la superficie libre para luego graficarla en función del tiempo total de la simulación.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
with open("drive/MyDrive/alpha4.water") as file:
    lines = file.readlines()

alturas = []
for line in lines[:22]:
    indexNumbers = line.find("(") + 1
    cleanedData = line.strip()[indexNumbers:-1]
    listOfNumbers = cleanedData.split(" ")
    alturas.append(listOfNumbers)

dataframe_alturas = pd.DataFrame(alturas, columns=["x", "y", "z"])
mediciones = []
for line in lines[24:]:
    clean_row = line.strip().split(" ")
    filtered = list(filter(None, clean_row))
    mediciones.append(filtered)

columnas = ["time"] + [i for i in range(1,23) ]
dataframe = pd.DataFrame(mediciones, columns = columnas).astype('float')

def encontrarPuntosPorTiempo(fila):
    puntosA = fila[1:12]
    indiceMayorAlUmbralA = puntosA[puntosA > 0.5].index[-1]

    puntosB = fila[12:]
    indiceMayorAlUmbralB = puntosB[puntosB > 0.5].index[-1]

    fila["indiceA"] = int(indiceMayorAlUmbralA)
    fila["indiceB"] = int(indiceMayorAlUmbralB)
```

```

    return fila

dataframeWithPoints = dataframe.apply(lambda row: encontrarPuntosPorTiempo
(row), axis = 1)

def interpolarAlturas(fila, dataframe_alturas):

    medicionA1 = fila[int(fila.indiceA)] # MEDICION DEL ULTIMO VALOR MAYOR A
0.5
    medicionA2 = fila[int(fila.indiceA) + 1] # MEDICION DEL PRIMER VALOR MEN
OR A 0.5

    puntoA1 = int(fila.indiceA) - 1 # INDICE PARA BUSCAR LA ALTURA DEL ULTIM
O VALOR MAYOR A 0.5
    puntoA2 = int(fila.indiceA) # INDICE PARA BUSCAR LA ALTURA DEL PRIMER VA
LOR MENOR A 0.5

    medicionB1 = fila[int(fila.indiceB)]
    medicionB2 = fila[int(fila.indiceB) + 1]

    puntoB1 = int(fila.indiceB) - 1
    puntoB2 = int(fila.indiceB)

    alturaA1 = float(dataframe_alturas.iloc[puntoA1].z)
    alturaA2 = float(dataframe_alturas.iloc[puntoA2].z)

    alturaB1 = float(dataframe_alturas.iloc[puntoB1].z)
    alturaB2 = float(dataframe_alturas.iloc[puntoB2].z)

    # INTERPOLAR
    interpolationA=alturaA2+(alturaA1-
alturaA2)*(0.5- medicionA2)/( medicionA1- medicionA2)
    interpolationB=alturaB2+(alturaB1-
alturaB2)*(0.5- medicionB2)/( medicionB1- medicionB2)

    #AGREGAR FILA
    fila["freeSurfaceA"] = float(interpolationA)
    fila["freeSurfaceB"] = float(interpolationB)

    return fila

dataframeWithInterpolation = dataframeWithPoints.apply(lambda row: interpo
larAlturas(row, dataframe_alturas), axis = 1)

dataFreeSurface=dataframeWithInterpolation[["time", "freeSurfaceA", "freeSur
faceB"]]
dataFreeSurface

```

```
dataFreeSurface.head()

from matplotlib import rcParams

rcParams['figure.figsize']=10,8
plt.plot(dataFreeSurface.time,dataFreeSurface.freeSurfaceA,linestyle='solid')
#plt.plot(dataFreeSurface.time,dataFreeSurface.freeSurfaceB,linestyle='solid')

plt.style.use('seaborn-whitegrid')
plt.xlabel('Tiempo [s]')
plt.ylabel('Superficie Libre [m]')
plt.xticks(np.arange(0,60,5))
plt.xlim(0,60)
plt.ylim(0.515,0.585)
plt.title('Punto A')
plt.tight_layout()

from matplotlib import rcParams

rcParams['figure.figsize']=10,8
#plt.plot(dataFreeSurface.time,dataFreeSurface.freeSurfaceA,linestyle='solid')
plt.plot(dataFreeSurface.time,dataFreeSurface.freeSurfaceB,linestyle='solid')

plt.style.use('seaborn-whitegrid')
plt.xlabel('Tiempo [s]')
plt.ylabel('Superficie Libre [m]')
plt.xticks(np.arange(0,60,5))
plt.xlim(0,60)
plt.ylim(0.515,0.585)
plt.title('Punto B')
plt.tight_layout()
```