

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ (WEC)**

#### **COMPONENTE: ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE UN ARREGLO DE WECs**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**LÓPEZ MOLINA ESTEBAN ANDRÉS**

**esteban.lopez03@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO**

**wilson.guachamin@epn.edu.ec**

**DMQ, mayo 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Esteban Andrés López Molina declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Esteban Andrés López Molina**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Esteban Andrés López Molina, bajo mi supervisión.

---

**Wilson Iván Guachamin Acero**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Esteban Andrés López Molina

Pablo Sebastián Sacán Gavilanez

Wilson Iván Guachamin Acero

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a todas las personas que han sido una fuente constante de apoyo y motivación a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis padres, que son la razón por la cual llego a cumplir este logro, por su amor incondicional, sacrificio y enseñanza. Por ser mi pilar fundamental y por acompañarme en cada paso del camino.

Se lo dedico a mi hermano Sebastián, como muestra de que con perseverancia y responsabilidad los sueños se hacen realidad.

En fin, este proyecto esta dedicado de forma general para las personas que tengan interés por el desarrollo de nuevas tecnologías que son amigables con el medio ambiente.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a mi formación profesional y al desarrollo de este trabajo de titulación.

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la sabiduría, la fortaleza, el valor y la salud necesarios para alcanzar este hito en mi vida.

A mis padres, Marco y María, les doy las gracias por su incondicional apoyo y por nunca faltarme nada. Sus enseñanzas y valores han moldeado mi carácter, inculcándome la perseverancia, el respeto, la resistencia y la empatía.

Agradezco profundamente a mis abuelitos, especialmente a mi abuelita Charo, por sus constantes oraciones, las cuales siempre me han acompañado y dado fuerza.

También extendiendo mi gratitud a mis tíos por sus sabios consejos y palabras de aliento.

Quiero reconocer especialmente a Pablo, mi amigo incondicional y futuro colega. Gracias, Pablo, por siempre ayudarme, brindándome apoyo en los momentos más difíciles. Tu ayuda y amistad han sido fundamentales para superar los obstáculos a lo largo de la carrera.

Agradezco asimismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN y a sus profesores, quienes han forjado nuevos profesionales y contribuido al desarrollo del país.

Deseo agradecer especialmente a mi tutor, el profesor Wilson Guachamin, por su invaluable guía, asesoramiento y paciencia a lo largo de este proyecto. Su experiencia y conocimiento han sido fuente constante de inspiración y aprendizaje.

Finalmente, agradezco a todas las personas que hicieron posible este logro, aunque no las mencione individualmente, ocupan un lugar especial en mi corazón. A mis mejores amigos, primos y familia en general, les doy las gracias por su apoyo constante.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Estado del arte .....	3
2.2 Olas oceánicas y tipos .....	4
2.2.1 Olas regulares .....	4
2.2.2 Olas irregulares .....	5
2.2.3 Espectro de oleaje .....	5
2.2.4 Espectro de respuesta .....	7
2.3 Convertidores de energía de las olas (WEC) .....	7
2.3.1 WEC y clasificación .....	7
2.3.2 Dispositivo WEC optimizado .....	8
2.4 Modelo hidrodinámico .....	9
2.4.1 Parámetros hidrodinámicos .....	9
2.4.2 Ecuación de movimiento del sistema .....	10
2.5 Software Ansys AQWA .....	11
3. METODOLOGÍA .....	12
3.1 Diseño geométrico .....	12
3.1.1 Configuración AQWA-Line .....	13
3.1.2 Configuración AQWA-Librium .....	13
3.2 Simulación numérica .....	14
3.2.1 Configuración AQWA-Drift .....	14
3.2.2 Respuesta hidrodinámica .....	15
3.3 Análisis dinámico .....	17
3.3.1 Espectro de respuesta .....	17
3.4 Comparación entres sistemas hidrodinámicos .....	18
4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	19
4.1 Resultados .....	19
4.1.1 Caso base simulado y analítico .....	19
4.1.2 Caso base y casos optimizados simulados .....	20
4.2 Conclusiones .....	23

4.3	Recomendaciones .....	24
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
6.	ANEXOS .....	27

## RESUMEN

El cambio climático ha generado extensos períodos de sequía tanto a nivel mundial como en Ecuador, impactando la producción de energía eléctrica debido a la fuerte dependencia de las centrales hidroeléctricas. Para abordar este reto, es crucial diversificar la matriz energética del país. Una opción prometedora es la energía undimotriz, una fuente renovable y constante.

El presente proyecto busca estudiar, mediante simulaciones numéricas, el desempeño hidrodinámico del sistema WEC optimizado para la generación de energía. El sistema analizado se compone de un cuerpo flotante y otro sumergido, conectados por un cable. Su diseño se enfoca en el desplazamiento vertical para sincronizar la frecuencia natural del sistema con la de las olas, alcanzando un estado de resonancia que maximice la extracción de energía. A través del software Ansys AQWA, se realiza un análisis hidromecánico para verificar la optimización de los componentes estructurales del sistema, buscando obtener la máxima respuesta dinámica.

El proceso de optimización incluye la configuración de la interfaz numérica del software AQWA, la realización de simulaciones, la verificación de la resonancia del mecanismo con el espectro de oleaje característico del archipiélago de las Islas Galápagos y la comparación de diferentes geometrías optimizadas del sistema WEC.

**PALABRAS CLAVE:** espectro de respuesta, momento espectral cero, periodo pico, WEC, resonancia, optimización, función de transferencia.

## **ABSTRACT**

Climate change has generated extensive periods of drought both globally and in Ecuador, impacting the production of electrical energy due to the high dependence on hydroelectric power plants. To address this challenge, it is crucial to diversify the country's energy matrix. A promising option is wave energy, a constant and renewable source.

This project aims to study, through numerical simulations, the hydrodynamic performance of the optimized WEC system for energy generation. The analyzed system consists of a floating body and a submerged body, connected by a cable. Its design focuses on vertical displacement to synchronize the system's natural frequency with that of the waves, achieving a state of resonance that maximizes energy extraction. Through the state-of-the-art Ansys AQWA software, a hydromechanical analysis is conducted to verify the optimization of the system's structural components, seeking to achieve the maximum dynamic response.

The optimization process includes configuring the numerical interface of the AQWA software, conducting simulations, verifying the mechanism's resonance with the characteristic wave spectrum of the Galapagos Islands archipelago, and comparing different optimized geometries of the WEC system.

**KEYWORDS:** response spectrum, zero spectral moment, peak period, WEC, resonance, optimization, transfer function.

## LISTA DE ABREVIACIONES

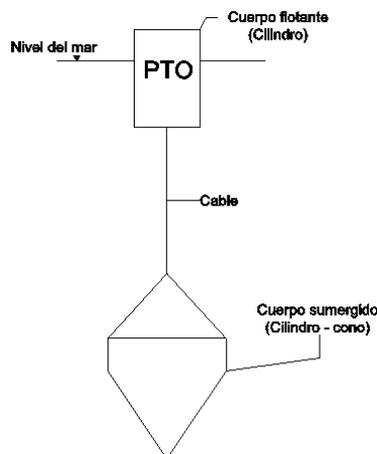
$H_s$ : Altura significativa de ola	$F_{ext}$ : Fuerzas externas que excitan al sistema.
$T_p$ : Periodo pico de espectro de ola	$B$ : Matriz de coeficientes de amortiguamiento
$\omega_p$ : Frecuencia pico de espectro de ola	$k_f$ : Coeficiente de rigidez del cuerpo flotante
$S(\omega)$ : Espectro de olas	$C_f$ : Coeficiente de amortiguamiento del cuerpo flotante
$\alpha$ : Constante de Phillips	$\%C_{PTO}$ : Porcentaje de amortiguamiento crítica para PTO.
$\gamma$ : Relación espectral de energía máxima con respecto al espectro de energía máxima Pierson-Moskowitz	$M_{ts}$ : Masa total del cuerpo sumergido
$\sigma$ : Desviación estándar	$a_s$ : Masa añadida del cuerpo sumergido
$F_{kv}$ : Fuerza Froude-Krylov	$m_s$ : Masa estructural del cuerpo sumergido
$\rho$ : Densidad del fluido	$m_{atrp.s}$ : Masa atrapada del cuerpo sumergido
$g$ : Aceleración gravitacional	$k_s$ : Coeficiente de rigidez del cuerpo sumergido
$\lambda$ : Longitud de ola	$l_{cable}$ : Longitud del cable
$\omega$ : Frecuencia característica de las olas	$E$ : Módulo de Young del cable
$D_f$ : Diámetro del cuerpo flotante	$A_{cable}$ : Área transversal del cable
$t$ : Tiempo	$C_s$ : Coeficiente de amortiguamiento del cuerpo sumergido.
$z$ : Posición en el eje vertical	$C_D$ : Coeficiente de arrastre del cuerpo sumergido
$a_f$ : Masa añadida del cuerpo flotante	$D_s$ : Diámetro del cuerpo sumergido
$m_f$ : Masa estructural del cuerpo flotante	$\dot{z}$ : Velocidad en el eje vertical
$M_{tf}$ : Masa total del cuerpo flotante	$L_{cil}$ : Altura de cilindro del cuerpo sumergido
$H_f$ : Calado	$L_{con}$ : Altura del cono del cuerpo sumergido
$S_R(\omega)$ : Espectro de respuesta	
$RAO(\omega)$ : Operador de amplitud de respuesta (Función de transferencia)	
$m_o$ : Momento espectral cero	
$M$ : Masa equivalente del sistema	
$A^\infty$ : Masa añadida en frecuencia infinita	
$h$ : Función que agrupa el arrastre y la masa añadida	
$K$ : Matriz de rigidez	

# 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El cambio climático ha provocado prolongadas etapas de sequía en Ecuador, afectando significativamente la generación de energía eléctrica debido a la fuerte dependencia de las centrales hidroeléctricas. Para mitigar este desafío, es fundamental diversificar la matriz energética del país. Una opción con potencial futuro es la energía undimotriz por ser un recurso constante y renovable. En respuesta, el presente proyecto pretende evaluar el potencial energético a través de la optimización geométrica de sistema undimotriz (WEC) en el contexto del archipiélago de las Islas Galápagos.

Un sistema undimotriz es un dispositivo diseñado para aprovechar el movimiento de un cuerpo flotante y generar energía. Existen diversos tipos de sistemas undimotrices que capturan la energía cinética y potencial del agua, para transformarla en energía mecánica y luego energía eléctrica mediante dispositivos específicos conocidos como sistemas de toma de potencia (PTO).

El sistema undimotriz objeto de estudio se basa en un concepto innovador, como se ilustra en la Figura 1. Este sistema consta de un cuerpo flotante (cilindro) y un cuerpo sumergido (cono-cilindro) conectados mediante un cable. Su diseño se enfoca exclusivamente en el desplazamiento vertical, con el propósito de ajustar la frecuencia natural del sistema para que coincida con la frecuencia de las olas. Este enfoque busca alcanzar un estado de resonancia que permita maximizar la extracción de energía del mar.



**Figura 1.** Esquema mecanismo WEC. (Fuente: propia)

Este sistema ha sido previamente optimizado por Sácan P. (2024). En este proyecto, se busca verificar mediante un análisis numérico hidromecánico que la optimización de los distintos componentes estructurales conduzca a la máxima respuesta dinámica posible, con ayuda del software del estado del arte Ansys AQWA.

El mecanismo optimizado representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para la generación eléctrica. Su desarrollo y eventual implementación no solo tienen el potencial de contribuir a la generación eléctrica del país, sino también de impulsar la transición hacia fuentes de energía renovable

## **1.1 Objetivo general**

Estudiar mediante simulaciones numéricas el desempeño hidrodinámico de un arreglo WEC.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Configurar la interfaz numérica del software AQWA para construir la geometría del mecanismo multicuerpo de extracción de energía undimotriz (WEC).
- Ejecutar simulaciones con el software AQWA, para obtener datos dinámicos del sistema (WEC).
- Verificar que el mecanismo undimotriz (WEC) entre en resonancia con una frecuencia típica de las olas del perfil costero del archipiélago de las Islas Galápagos.
- Contrastar la geometría del sistema WEC base con los distintos sistemas WEC optimizados.

## **1.3 Alcance**

Este trabajo tiene como meta verificar los resultados de un modelo optimizado desarrollado por Sácan P. (2024) utilizando software del estado del arte como Ansys AQWA. El estudio se centrará exclusivamente en el análisis hidrodinámico del sistema, excluyendo tanto el análisis estructural del mecanismo como la conversión de energía mecánica en energía eléctrica mediante el dispositivo PTO (Power Take-Off).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

El incremento continuo en la demanda energética a nivel mundial ha catalizado la investigación en fuentes renovables, con un particular énfasis en la energía undimotriz, que aprovecha el movimiento de las olas para generar energía utilizable. Este campo de estudio refleja un creciente interés en tecnologías innovadoras capaces de contribuir a la diversificación y sostenibilidad del suministro energético, especialmente en regiones como Ecuador.

En base con esta tendencia, investigadores como Golbaz D. y otros (2021) han elaborado un compendio de las investigaciones realizadas en dispositivos WEC (Wave Energy Converters), abordando diversas técnicas de modelado, que incluyen análisis semi analíticos, flujo potencial tanto lineal como no lineal en dominio del tiempo y la frecuencia. Estos estudios han explorado la optimización de arreglos de dispositivos WEC y dispositivos individuales, con la meta de maximizar la eficiencia en la conversión de energía. Adicional, se ha prestado atención al análisis del comportamiento hidrodinámico de los sistemas WEC en investigaciones previas. Según Riley I. (2018), se ha presentado un análisis de los principios de funcionamiento y clasificación correspondientes, que abarcan dispositivos de columna de agua oscilante, dispositivos oscilantes de cuerpos sólidos y dispositivos de desbordamiento ("overtopping"). Para que estos dispositivos funcionen y sean eficientes, es necesario que el primer modo de vibración del grado de libertad que se pretenda aprovechar, opere en resonancia con las olas de mar.

Recientemente, se ha enfocado la investigación en la resonancia de sistemas WEC bajo la acción de un espectro de olas. Por ejemplo, Babarit (2006) examina la interacción entre los parámetros geométricos del dispositivo y las características de las olas en su respuesta dinámica. Este estudio identifica los factores que pueden influir en la resonancia del sistema, lo que proporciona una comprensión más profunda de los mecanismos que determinan la eficiencia y estabilidad del WEC en relación con las condiciones específicas del oleaje.

Por otra parte, es esencial realizar un análisis detallado del entorno en el que operan estos dispositivos. Por ejemplo, Portilla J. y Guachamin W. (2023) ha llevado a cabo un estudio del espectro de olas presente en las costas del archipiélago de las Islas Galápagos, caracterizando aspectos como la dirección, frecuencia y altura de las olas. Los parámetros derivados de este estudio proveen información vital para el diseño geométrico del mecanismo WEC en el marco de este proyecto de investigación.

En el ámbito del software utilizado para la simulación en la evaluación del desempeño hidrodinámico de los sistemas WEC, investigaciones como la de Ma y otros (2020) han presentado una metodología integral de optimización de estos sistemas, utilizando herramientas computacionales como Ansys AQWA para la modelización y análisis geométrico. Estos estudios han subrayado la importancia de utilizar software especializado para facilitar la simulación precisa de estos sistemas, proporcionando una plataforma eficaz para la exploración y validación de diseños optimizados, lo que contribuye al avance y desarrollo continuo de esta tecnología.

Finalmente, tras revisar el estado actual del arte en el ámbito de los sistemas WEC y energía undimotriz, las investigaciones expuestas han sentado las bases para entender la dinámica de los mecanismos WEC en un entorno marino, por lo que este panorama motiva a desarrollar avances investigativos en este ámbito. Este proyecto propone avanzar en la comprensión y optimización de los sistemas WEC, centrándose específicamente en la validación del modelo geométrico propuesto por Sácan P. (2024). Se buscará verificar si el sistema entra en resonancia y proporciona la mayor energía mecánica entre varias alternativas, utilizando como herramienta el software Ansys AQWA. Esta validación es crucial para confirmar la viabilidad del modelo optimizado, así como para proporcionar una sólida base científica para su aplicación práctica en la generación de energía undimotriz.

## **2.2 Olas oceánicas y tipos**

Conforme a la investigación de Fusco F. (2012), las olas se definen como perturbaciones en la superficie del mar, cuyo origen se atribuye a la interacción entre diversos factores, como el viento, la gravedad y otros fenómenos ambientales. Este proceso conlleva un intercambio dinámico de energía cinética y potencial, dando lugar a la formación de ondas en la superficie del agua. En el contexto específico de la producción de energía undimotriz, se centra la atención en las olas generadas primariamente por la acción de la gravedad, dado su alto potencial energético.

La naturaleza de las olas se puede categorizar en dos principales tipos, olas regulares e irregulares, expuestas a continuación:

### **2.2.1 Olas regulares**

Las olas regulares se distinguen por su comportamiento ideal, caracterizado por la constancia en su periodo y amplitud. Este tipo de ondas exhiben una forma de onda regular y predecible. En términos energéticos asociado, se destaca que la amplitud de estas olas desempeña un

papel significativo en comparación con su periodo. Lo que indica que variaciones en la amplitud pueden influir notablemente en la cantidad total de energía transportada por las olas regulares.

### 2.2.2 Olas irregulares

Biclicki S. (2021) indica que las olas irregulares exhiben una naturaleza estocástica, siendo procesos aleatorios débilmente estacionarios que desafían una descripción determinista. Por consiguiente, su análisis se enfoca en métodos estadísticos para capturar la variabilidad de estas ondas. Para abordar esta complejidad, se introduce un espectro de ondas que permite descomponer la energía de las olas en diferentes componentes espectrales. Esta herramienta proporciona parámetros clave, como la altura significativa ( $H_s$ ) y el periodo pico ( $T_p$ ) de las olas, que constituyen indicadores fundamentales en cuanto al ámbito energético.

### 2.2.3 Espectro de oleaje

Basado en el estudio propuesto por Young I. (2017), señala que es posible simular en el dominio del tiempo sistemas marinos en cualquier condición de oleaje deseado a partir de un espectro de olas. Los espectros de olas permiten relacionar las características principales de las olas con las variables asociadas, como la velocidad del viento, la altura significativa, el periodo pico o la dirección.

#### - Espectro RUIDO BLANCO

Este espectro es un modelo teórico que representa un tipo de oleaje idealizado donde todas las frecuencias de las ondas están presentes con igual intensidad, es decir, es un espectro de energía constante a lo largo de todas las frecuencias (Howard, 2015).

En la Figura 2 (a) se representa este tipo de espectro de oleaje, se caracteriza por excitar frecuencias entre 0,1 [rad/s] hasta 1,7 [rad/s] con una densidad espectral constante de 0,197 [m<sup>2</sup>s/rad].

#### - Espectro JONSWAP

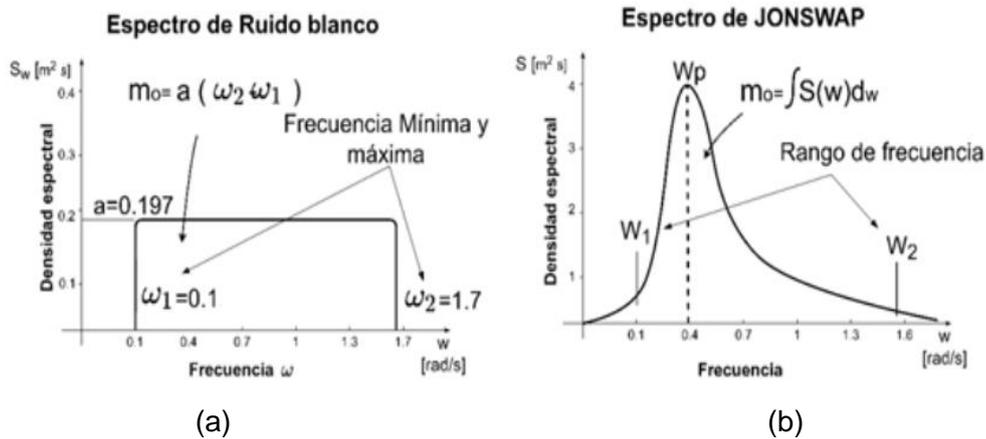
En este trabajo se modela las olas utilizando un espectro de oleaje JONSWAP, se caracteriza por tener una forma específica que refleja las propiedades estadísticas de las olas del mar, la expresión que describe este modelo se muestra en la Ecuación 1.

$$S(\omega) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p \omega)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T_p \omega - 1}{\sigma}\right)^2\right]$$

**Ecuación 1.** Espectro de olas tipo JONSWAP. Fuente: (Hasselmann, 1973)

Donde  $S(\omega)$  es el espectro de oleaje,  $\alpha$  es la constante de Phillips,  $\sigma$  la desviación estándar,  $\gamma$  es la relación espectral de energía máxima con respecto al espectro de energía máxima Pierson-Moskowitz.

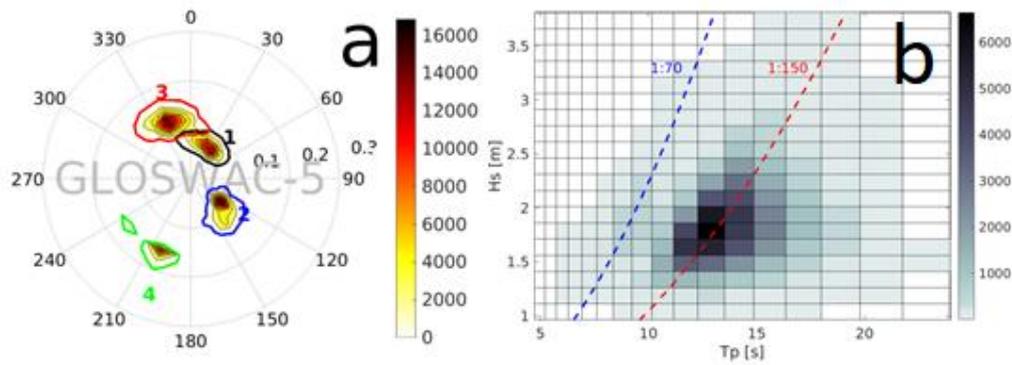
En la Figura 2 (b) se muestra un ejemplo de espectro JONSWAP, pues, se identifica que existe un pico de densidad espectral de aproximadamente 4 [m<sup>2</sup>s/rad], a una frecuencia pico de 0,4 [rad/s].



**Figura 2.** Tipo de espectro de oleaje: (a) Espectro tipo WHITE NOISE y (b) espectro tipo JONSWAP.

Fuente: (Benalcázar & Ribadeneira, 2022)

En la Figura 3 (a), se muestra la intensidad y frecuencia dominante de los diferentes sistemas de oleaje, destacando tres fuentes principales que inciden significativamente en el comportamiento de las olas en el archipiélago de las Galápagos, provenientes del Pacífico Sur, del hemisferio norte y de los vientos alisios del sur. El conocimiento de la dirección del oleaje por sí solo resulta insuficiente. Por ello, en la Figura 3 (b), se presenta la dispersión de las olas y la altura significativa en función del periodo pico. Se observa que existe una mayor prevalencia de olas para una altura significativa ( $H_s$ ) de aproximadamente 1.5 [m] y un periodo pico ( $T_p$ ) que oscila entre los 11 y 14 [s]. En este trabajo se elige el periodo pico ( $T_p$ ) de 11 [s] para el análisis numérico.



**Figura 3.** Espectro de oleaje para Galápagos. (a) Dirección de las olas; (b) dispersión del espectro de olas. Fuente: (Portilla Yandún & Guachamin Acero, 2023)

## 2.2.4 Espectro de respuesta

Con el fin de comparar el desempeño de sistemas hidrodinámicos, se puede utilizar el momento espectral cero que se define como el área bajo la curva del espectro de respuesta. Este parámetro permite comparar el desempeño entre sistemas. El espectro de respuesta se define a partir de la Ecuación 2, mientras que el momento espectral cero se expone en la Ecuación 3.

$$S_R(\omega) = RAO^2(\omega) \cdot S(\omega)$$

**Ecuación 2.** Espectro de respuesta.

Fuente: (Jakob, Morten, Hauge, & Pavlov, 2013)

Donde  $S_R(\omega)$  es el espectro de respuesta del sistema hidrodinámico,  $RAO(\omega)$  es el operador de amplitud de respuesta propia de cada sistema WEC y  $S(\omega)$  es el espectro de oleaje.

$$m_o = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_R(\omega) d\omega$$

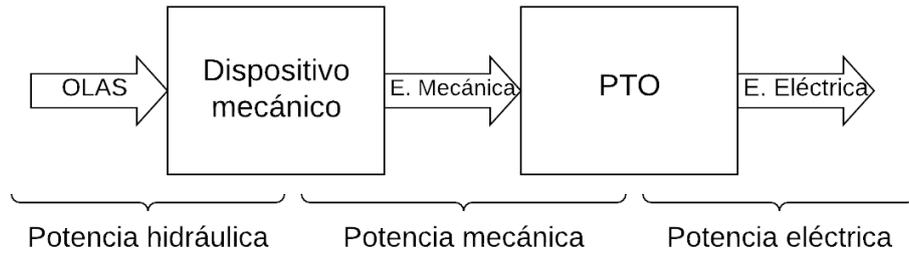
**Ecuación 3.** Momento espectral cero.

Fuente: (Benalcázar & Ribadeneira, 2022)

## 2.3 Convertidores de energía de las olas (WEC)

### 2.3.1 WEC y clasificación

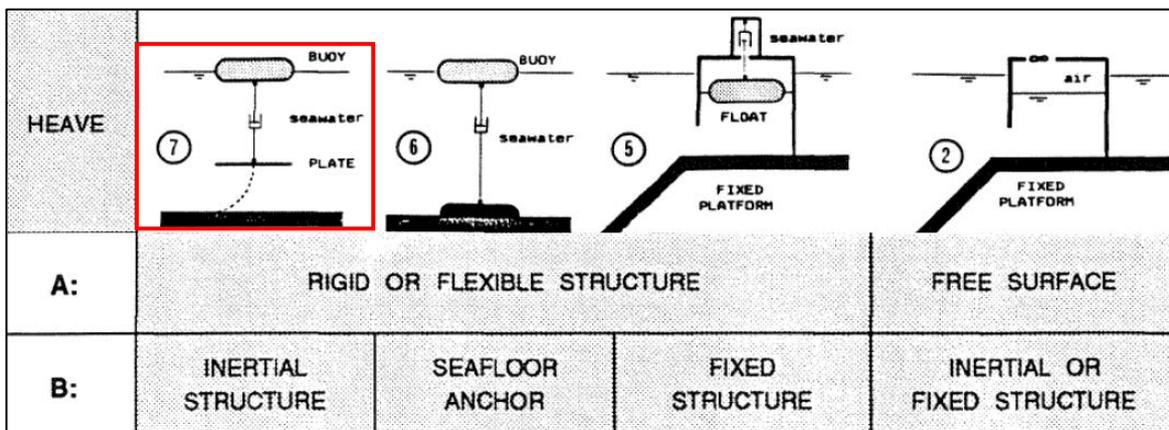
Los Sistemas de Conversión de Energía de las Olas representan una tecnología diseñada para aprovechar la energía cinética y potencial de las olas marinas y convertirla en energía eléctrica utilizable. Como señala Riley I. (2018), este proceso se ilustra en la Figura 4, donde las olas proporcionan la potencia hidráulica inicial. Posteriormente, un dispositivo mecánico extrae esta energía hidráulica y la convierte en energía mecánica. Finalmente, a través de un dispositivo PTO (Power Take Off), la energía mecánica se transforma en energía eléctrica. Este proceso de conversión es esencial para la generación de energía sostenible a partir de las olas del océano (Golbaz, y otros, 2021).



**Figura 4.** Conversión de energía en el sistema WEC. Fuente: (Propia)

Por la forma de aprovechamiento la energía generada por las olas, los dispositivos WEC se clasifican en distintas categorías. Según Golbaz y otros (2021), estas incluyen dispositivos de columna de agua oscilante, dispositivos de cuerpo sólido oscilante y dispositivos de rebosamiento.

En la Figura 5 se presentan diversos ejemplos de dispositivos WEC, cada uno con geometrías particulares, que se desplazan a lo largo del eje vertical.



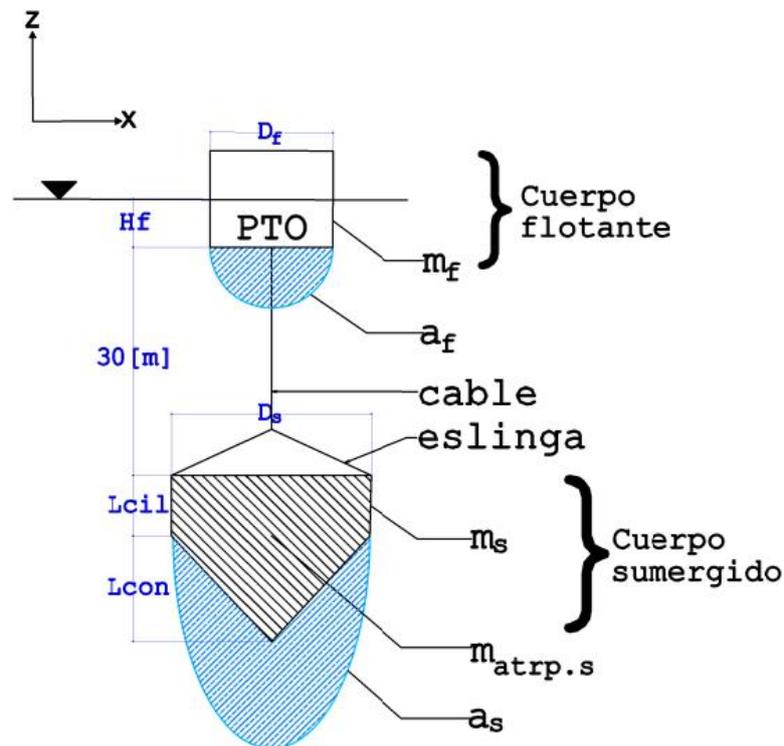
**Figura 5.** Clasificación de dispositivos WEC. Fuente: (Fusco, 2012).

En el contexto de este proyecto, se enfocará en los dispositivos de cuerpo sólido oscilante, en específico los dispositivos de estructura inercial de desplazamiento vertical (heave). Estos dispositivos se caracterizan por su capacidad para moverse en respuesta a las ondas transmitidas por el fluido circundante, lo que resulta en la transferencia de energía al cuerpo oscilante.

### 2.3.2 Dispositivo WEC optimizado

Una vez presentado el mecanismo WEC y su clasificación, en la Figura 6 se muestra un esquema de los modelos optimizados por Sacán P. (2024). Este mecanismo es un dispositivo de cuerpo sólido oscilante el eje vertical, compuesto por dos cuerpos enlazados mediante un cable y eslingas. El cuerpo flotante tiene una geometría cilíndrica, mientras que el cuerpo

sumergido combina una geometría de cono y cilindro. Este dispositivo ha sido optimizado geoméricamente para mejorar su desempeño.



**Figura 6.** Dispositivo WEC. Fuente: (Propia).

El cuerpo flotante contiene en su interior el dispositivo de toma de potencia (PTO), encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Este cuerpo flotante, de geometría cilíndrica, está sometido a las fuerzas provenientes del espectro de olas, así como a las fuerzas producidas por su propia geometría.

A 30 metros de profundidad se encuentra el cuerpo sumergido, que contiene agua en su interior para añadir inercia y reducir la frecuencia natural del sistema. Debido a su geometría combinada de cono y cilindro, este cuerpo experimenta fuerzas de arrastre.

## 2.4 Modelo hidrodinámico

En esta sección se presenta los parámetros hidrodinámicos que caracterizan al dispositivo WEC, con la finalidad de describir su desempeño mediante modelos matemáticos.

### 2.4.1 Parámetros hidrodinámicos

En la tabla 1 se identifican la fuerza de excitación del sistema, las masas que componen el sistema, así como los coeficientes que caracterizan la elasticidad y el amortiguamiento.

**Tabla 1.** Parámetros hidrodinámicos. Fuente: (Propia)

<b>Cuerpo flotante</b>	<b>Fuerza de excitación</b>	Froude Krylov	$F_{kv}(t) = \rho g H_s e^{\frac{2\pi}{\lambda} z} \cos(\omega t) \cdot \pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2$
	<b>Masa total</b>	Masa añadida y masa estructural	$M_{tf} = \left[ \pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 \rho H_f \right] + \left[ \frac{\pi}{6} \rho (D_f)^2 \right]$
	<b>Coefficiente rigidez</b>	Flotabilidad	$k_f = \pi \rho g \left(\frac{D_f}{2}\right)^2$
	<b>Coefficiente amortiguamiento</b>	Dispositivo PTO	$C_f = 2 \sqrt{k_f M_{tf}} \cdot \% C_{PTO}$
<b>Cuerpo sumergido</b>	<b>Fuerza de excitación</b>	Ninguna	-
	<b>Masa total</b>	Masa añadida, masa atrapada y masa estructural	$M_{ts} = a_s + m_s + m_{atrp.s}$
	<b>Coefficiente rigidez</b>	Cable conector	$k_s = \frac{EA_{cable}}{l_{cable}}$
	<b>Coefficiente amortiguamiento</b>	Arrastre linealizado del cuerpo	$C_s = \frac{\rho C_D D_s^2 \dot{z}}{3}$

La terminología de cada ecuación mostrada en la Tabla 1 se puede observar en la lista de abreviaciones.

## 2.4.2 Ecuación de movimiento del sistema

La dinámica del sistema obligado a moverse únicamente en la dirección vertical (Heave) y excitado por las olas que inciden en el cuerpo flotante, se analiza mediante dos enfoques: un análisis dinámico en dominio del tiempo y un análisis en dominio de la frecuencia.

### - Análisis en dominio del tiempo

En el análisis dinámico de un sistema compuesto por varios cuerpos bajo acción de las olas y cargas viscosas, es pertinente realizar un estudio dinámico en el dominio del tiempo para obtener las respuestas dinámicas del sistema no lineal. La caracterización del sistema viene dada por la Ecuación 4.

$$[M + A^\infty] \ddot{x}(t) + \int_0^t h(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau + Kx(t) = F_{ext}(x, \dot{x}, t)$$

**Ecuación 4.** Movimiento en el dominio del tiempo.

Fuente: (Benalcázar & Ribadeneira, 2022)

Donde ( $M$ ) es la masa equivalente del sistema, ( $A^\infty$ ) es la masa añadida,  $h(t - \tau)$  es la función que agrupa el arrastre y la masa añadida, ( $K$ ) es la matriz de rigidez y ( $F_{ext}$ ) so las fuerzas externas que excitan al sistema. La Ecuación 4 permite obtener respuestas dinámicas, con las cuales se puede usar para determinar el RAO linealizado del sistema WEC para el desplazamiento vertical.

## - Análisis en dominio de la frecuencia

Utilizando herramientas matemáticas como la transformada de Fourier, se obtiene la respuesta dinámica en el dominio de la frecuencia. La Ecuación 5 se define como la ecuación de movimiento en el dominio de la frecuencia, se aplica a sistemas lineales en estado estacionario. A partir de la respuesta dinámica  $X(\omega)$  se puede determinar la función de transferencia “Response Amplitude Operator (RAO)”.

$$-\omega^2[M + A(\omega)]X(\omega) + i\omega B(\omega)X(\omega) + KX(\omega) = F_{ext}(\omega)$$

**Ecuación 5.** Movimiento en el dominio de la frecuencia.  
Fuente: (Benalcázar & Ribadeneira, 2022)

Donde se añade la matriz de coeficientes de amortiguamiento ( $B$ ) y masas añadidas ( $A$ ) (Guachamin, Gao y Moan, 2017).

## 2.5 Software Ansys AQWA

Ansys AQWA es un software especializado en el estudio hidrodinámico de sistemas marítimos, emplea métodos numéricos los cuales permiten la simulación entre estructuras marítimas y su entorno como es el oleaje, evaluando la respuesta dinámica del sistema para distintas condiciones de oleaje.

Para el análisis hidrodinámico, es necesario ejecutar tres tipos de archivos:

**AQWA-LINE:** En esta fase se define cada estructura que compone el sistema WEC. Se incluye la masa, inercia y los parámetros geométricos, obteniendo como resultado los coeficientes hidrodinámicos necesarios para la simulación.

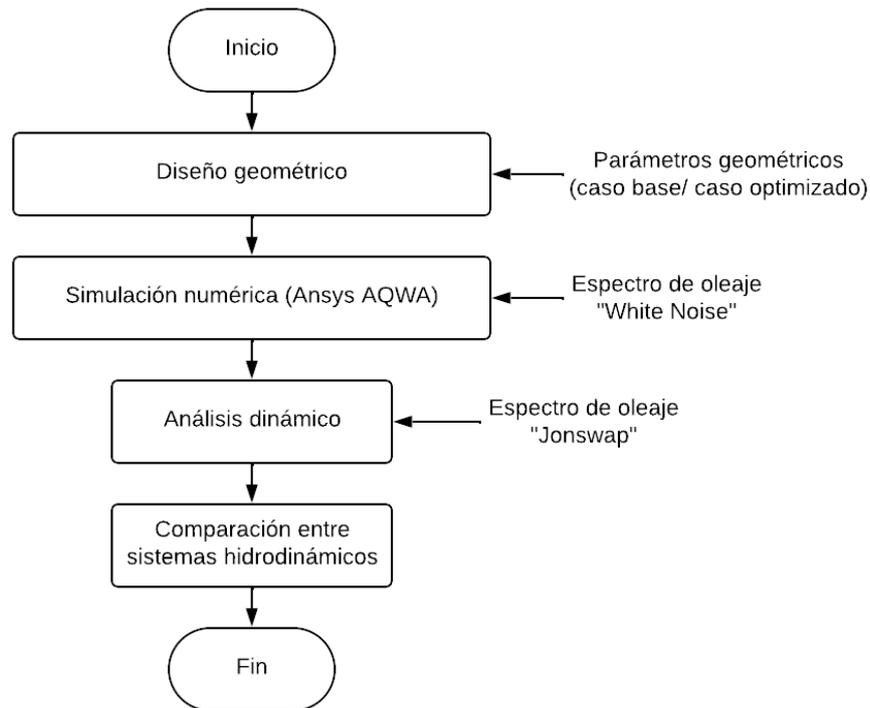
**AQWA-LIBRIUM:** En esta fase, se une todas las estructuras del sistema con sus respectivos coeficientes hidrodinámicos. Se determina la posición del equilibrio del sistema y los distintos modos de vibración.

**AQWA-DRIFT:** Por último para poder tener la simulación del sistema WEC, se define el espectro de olas y el tiempo de simulación requerido. Los resultados obtenidos incluyen posiciones, velocidades y aceleraciones para los distintos grados de libertad del sistema.

Este software realiza la simulación a través de métodos de integración numérica como el método Runge-kutta que se caracteriza por la resolución numérica de ecuaciones diferenciales y la integral de convolución (Ecuación 4). (ANSYS Inc, 2012).

### 3. METODOLOGÍA

En esta sección se explicará el procedimiento utilizado para evaluar el modelo hidrodinámico, considerando tanto el diseño geométrico del sistema como los parámetros que lo caracterizan, tales como la masa, rigidez y amortiguamiento. Además, se analizan el comportamiento del sistema para dos tipos de espectro de oleaje. En la Figura 7 se presenta de forma general el diagrama de flujo utilizado para la evaluación.



**Figura 7.** Diagrama de flujo para simulación.  
Fuente: (Propia).

#### 3.1 Diseño geométrico

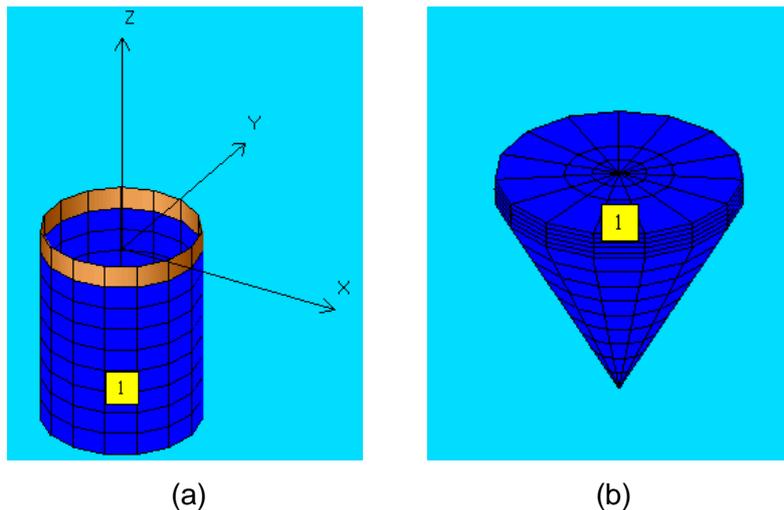
En la Tabla 2 se indica los parámetros geométricos que definen los sistemas WEC optimizados por Sacán P. (2024) y el caso base propuesto en la investigación de Guachamin W. y otros (2024). En la Figura 6 se identifica cada parámetro geométrico del sistema WEC.

**Tabla 2.** Parámetros geométricos de sistemas WEC.  
Fuente: (Propia).

	Parámetro	Notación/ Unidad	Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
<b>Cuerpo flotante</b>	Diámetro	$D_f/[m]$	5	6	6,3	6,51	6,5
	Calado	$H_f/[m]$	6	3	3	2,75	2,75
<b>Cuerpo sumergido</b>	Diámetro	$D_s/[m]$	9	11,3	11	11,75	12,11
	Altura cilindro	$L_{cil}/[m]$	1	1,1	1,1	1,1	1,14
	Altura cono	$L_{con}/[m]$	8	7,7	7,9	6,7	5

### 3.1.1 Configuración AQWA-Line

Con la finalidad de controlar todos los parámetros que intervienen en la simulación y ahorrar recursos computacionales, se decidió diseñar la geometría mediante código numérico. En esta fase se crean archivos con extensión (.DAT) en los que se diseña la geometría, comenzando por definir los nodos de intersección y luego los paneles, que se genera a partir de los nodos establecidos. Los paneles que están en contacto con el fluido se caracteriza como paneles difractantes. La Figura 8 (a) muestra el modelo de paneles del cuerpo flotante y en la Figura 8 (b) evidencia el modelo de paneles del cuerpo sumergido.



**Figura 8.** Paneles del sistema WEC del caso base: (a) Cuerpo flotante y (b) Cuerpo sumergido. Fuente: (Propia).

Posteriormente, se define la masa del elemento, la ubicación del centro de masa mediante un punto y la inercia que caracteriza al elemento. Además, se establece la dirección del espectro de oleaje y se definen parámetros como la densidad del fluido en contacto con el sistema WEC y la profundidad del océano.

Toda esta configuración se realiza en la fase de Ansys AQWA LINE. En el Anexo I se presenta el código numérico utilizado para configurar el cuerpo flotante del sistema en el caso base.

Como resultado de esta fase, el software genera todos los parámetros hidrodinámicos de cada elemento que compone el sistema WEC.

### 3.1.2 Configuración AQWA-Librium

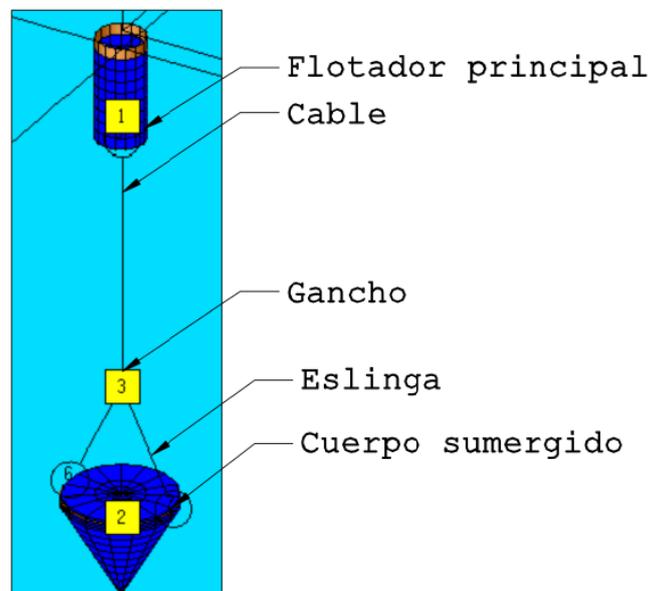
Una vez creado todos los elementos del sistema WEC, esta fase consiste en ensamblar al sistema mediante la creación de nodos y estructuras auxiliares y buscar la posición de equilibrio utilizando un estado de mar.

Se generan los cables que unirán el sistema con el fondo marino para evitar que este se desplace la deriva y se define el arreglo de las eslingas que unen el cuerpo flotante con el cuerpo sumergido.

En este caso, se definió una estructura auxiliar denominada gancho de unión, la cual soporta la junta entre los cuerpos del sistema. Además, en la parte superior del cuerpo sumergido se agregó una estructura denominada "Disco de Morrison", cuyo propósito es simular las fuerzas viscosas y que tiene las mismas dimensiones que el diámetro del cuerpo sumergido.

También se incluyeron los parámetros hidrodinámicos de cada estructura obtenidos en el AQWA-Line para cada elemento.

En la Figura 9 se ejemplifica el sistema WEC (caso base) ensamblado por medio Ansys AQWA-Librium. En esta fase, el sistema encuentra su estado de equilibrio.



**Figura 9.** Modelo numérico de sistema WEC "Caso base". Fuente: (Propia).

En Anexo II se presenta el código numérico utilizado para el ensamblaje del sistema WEC.

## 3.2 Simulación numérica

En esta sección se analiza la configuración del código numérico que se implementara para la simulación en el software, así como la respuesta hidrodinámica del sistema.

### 3.2.1 Configuración AQWA-Drift

En este apartado, se toma el sistema WEC previamente ensamblado y se define los grados de libertad de cada elemento que no requiere análisis. En este caso, se desactiva la rotación alrededor del eje vertical para todas las estructuras debido a su irrelevancia.

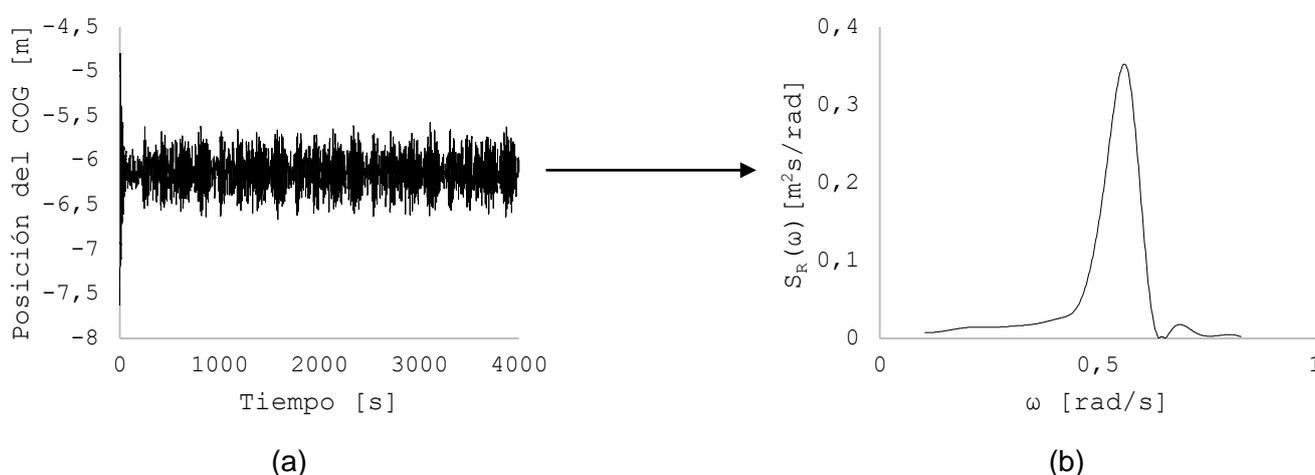
Luego para excitar todas las frecuencias del sistema, se impone un espectro de olas ideal denominado espectro “White Noise” con una altura significativa de ola ( $H_s$ ) de 1,5 [m] y una banda de frecuencia entre 0,1 [rad/s] hasta 1,7 [rad/s]. Finalmente, se establece el tiempo de simulación necesario, para este tipo de análisis se requiere un tiempo mínimo de 3600 segundos para llegar al estado estacionario, en este caso se simuló durante 4000 segundos.

En Anexo III se muestra el código numérico para la simulación en el dominio del tiempo del sistema WEC (caso base).

### 3.2.2 Respuesta hidrodinámica

Al finalizar la simulación, el software proporciona datos como la posición, velocidad y aceleración del centro de gravedad en relación con los distintos grados de libertad. En este estudio, se presta especial atención al comportamiento del centro de gravedad a lo largo del eje vertical (heave).

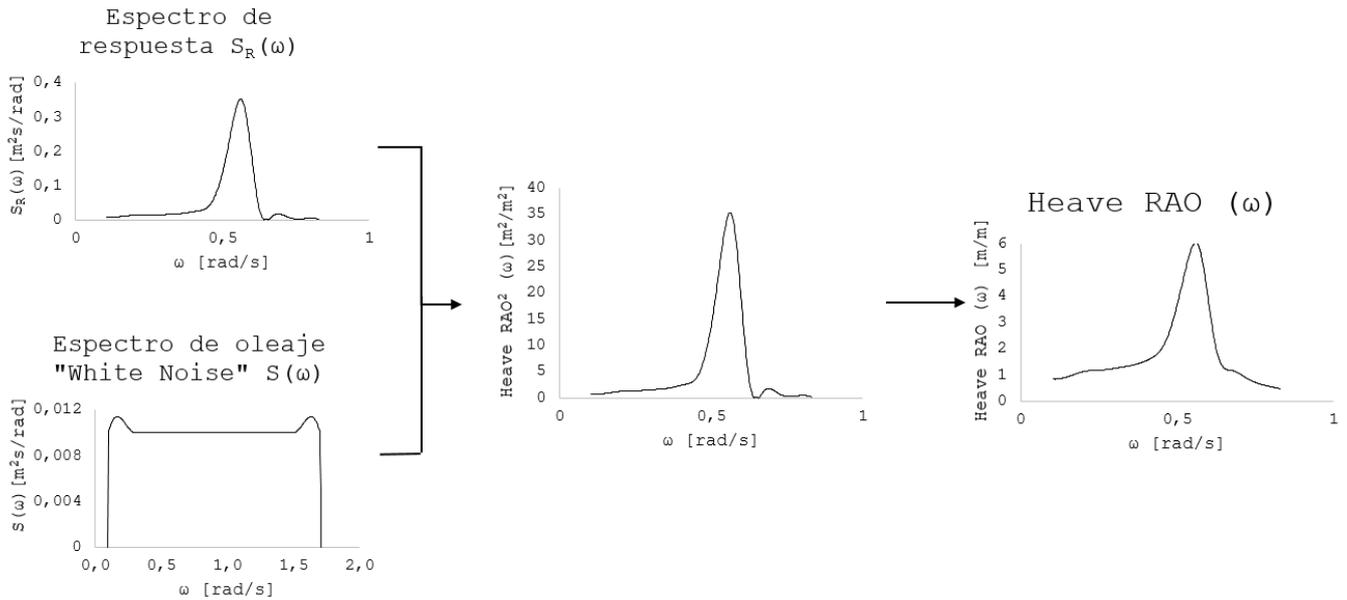
En la Figura 10 (a), se muestra que, a partir del desplazamiento del centro de gravedad en función del tiempo, mientras que en la Figura 10 (b) se muestra al espectro de respuesta del sistema aplicando la transformada de Fourier. Este proceso permite obtener el sistema en el dominio de la frecuencia. Para asegurar la fiabilidad de los datos, se analiza el sistema en estado estable, es decir, se omite la parte inicial (transiente).



**Figura 10.** (a) Espectro de respuesta en el dominio del tiempo. (b) Espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia. Fuente: (Propia).

Una vez obteniendo el espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia, se divide a este espectro entre el espectro de olas “White Noise” y se extrae la raíz cuadrada (Ecuación 2). Este procedimiento tiene como objetivo determinar la función RAO (Response Amplitude Operator)

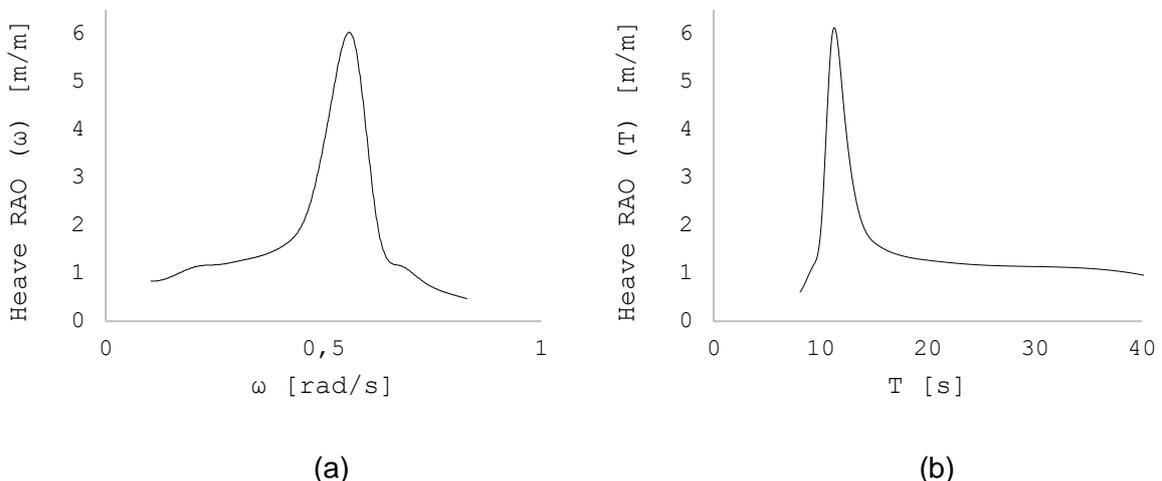
en función de la frecuencia. La Figura 11 ilustra el procedimiento para obtener el operador de respuesta ampliada (RAO) linealizada a partir del espectro de respuesta.



**Figura 11.** Esquema del manejo de datos para la obtención del RAO a partir del espectro de respuesta.

Fuente: (Propia).

Finalmente, se obtiene al operador de respuesta ampliada. Para facilitar el análisis de datos, el operador de respuesta ampliada en función de la frecuencia se convierte en el operador de frecuencia ampliada en función del periodo. Con esta conversión, se puede identificar si el periodo característico del sistema coincide con el periodo pico del perfil costanero del archipiélago de las islas Galápagos. En la Figura 12 se presenta esta equivalencia de resultados.



**Figura 12.** (a) Heave RAO en el dominio de la frecuencia. (b) Heave RAO en el dominio del periodo. Fuente: (Propia).

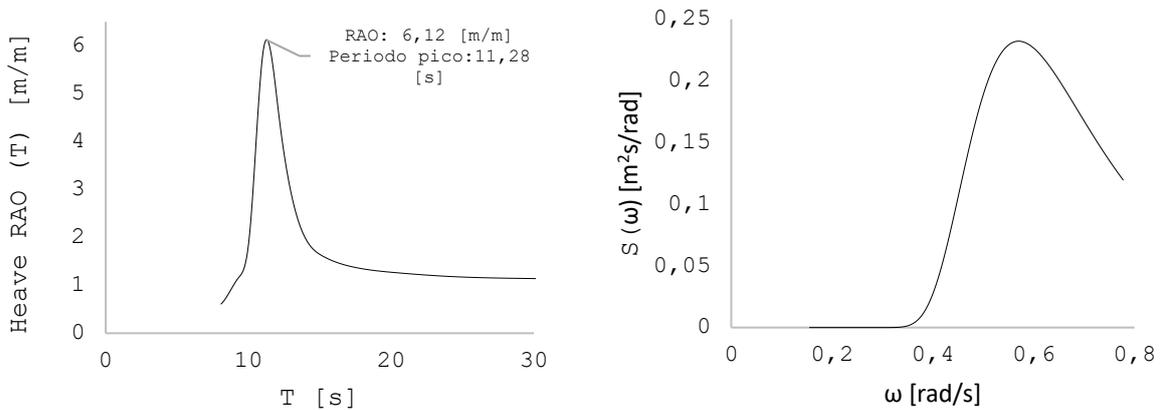
### 3.3 Análisis dinámico

Una vez obtenido el operador de respuesta ampliada, se procede a obtener el espectro de olas característico del perfil costero del archipiélago de las islas Galápagos.

#### 3.3.1 Espectro de respuesta

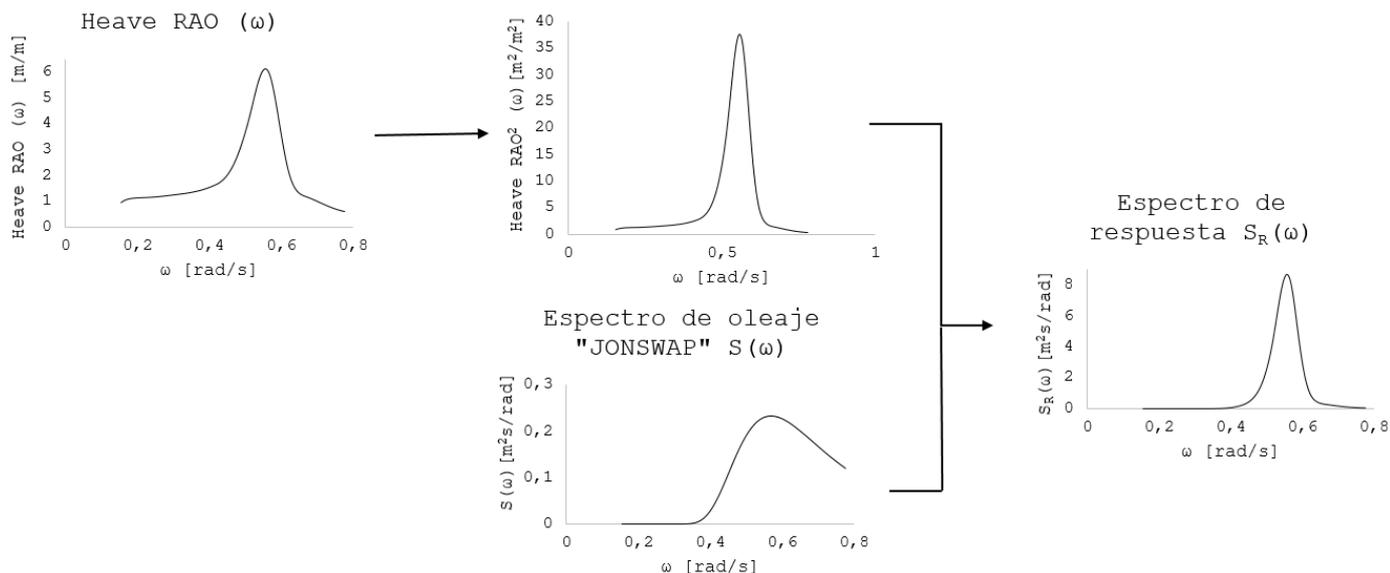
Una vez definido el perfil costero donde se ubicará el sistema WEC, se extraen datos como el periodo pico y la altura significativa de las olas en las Galápagos para caracterizar el espectro de olas "JONSWAP". Según la investigación de Portilla A. y Guachamin W: (2023), la altura significativa es de 1,5 [m] y el periodo pico varía entre 11 y 14 [s].

Para definir el periodo pico con el que se caracterizará el espectro de oleaje, se examina el periodo en el cual el sistema presenta el mayor operador de respuesta ampliada, como se muestra en la Figura 13 (a). Para el caso base, la altura significativa es de 1,5 [m] y un periodo pico de 11,28 [s]. En la Figura 13 (b) se identifica el espectro de ola tipo JONSWAP caracterizado para el mar de las Islas Galápagos para un periodo pico de 11,28 [s] y una densidad espectral de 0,2 [m<sup>2</sup>s/rad].



(a) (b)  
**Figura 13.** (a) Heave RAO del sistema WEC y (b) Espectro de oleaje tipo JONSWAP.  
Fuente: (Propia).

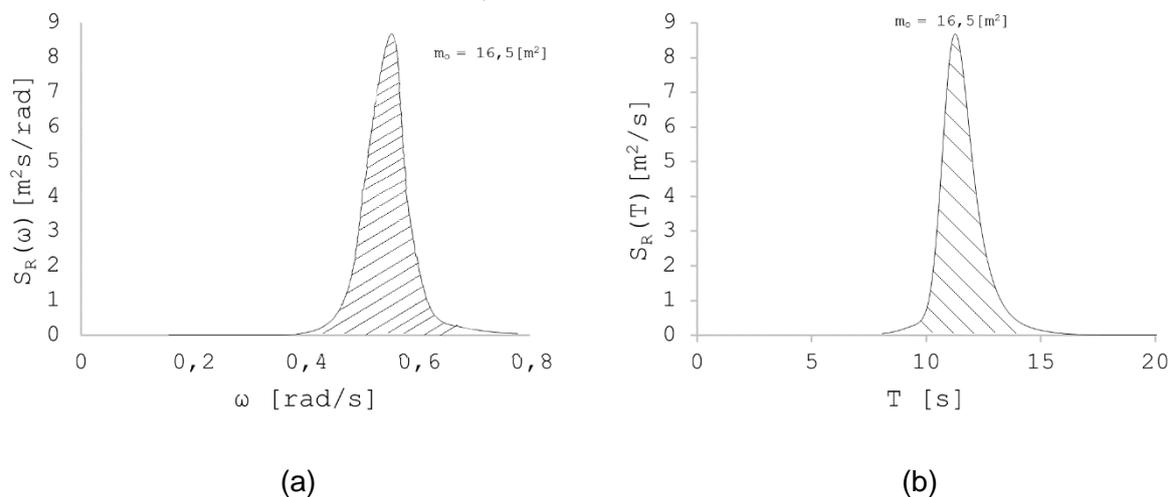
El procedimiento para determinar el espectro de respuesta del sistema WEC se ilustra en la Figura 14. Se elevan al cuadrado los valores del operador de respuesta ampliada y se multiplica por el espectro de oleaje "JONSWAP" caracterizado. Este proceso resulta en el espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia.



**Figura 14.** Esquema del manejo de datos para la obtención del espectro de respuesta a partir del RAO.

Fuente: (Propia)

Finalmente, la Figura 15 presenta una comparación del espectro de respuesta, mostrando tanto el espectro en función del periodo como en función de la frecuencia, para facilitar el manejo y análisis de los datos.



**Figura 15.** (a) Espectro de respuesta del sistema WEC (caso base) en el dominio de la frecuencia y (b) en el dominio del periodo. Fuente: (Propia).

### 3.4 Comparación entre sistemas hidrodinámicos

Una vez obtenido el espectro de respuesta de cada sistema, para realizar una comparación con otros sistemas se debe calcular el momento espectral cero. Este momento espectral se define como el área bajo la curva del espectro de respuesta.

Para hallar este valor, se utilizó la regla de integración trapezoidal. En el caso base, el momento espectral cero es de 16,5 [m<sup>2</sup>] como se identifica en la Figura 15 (a).

## 4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

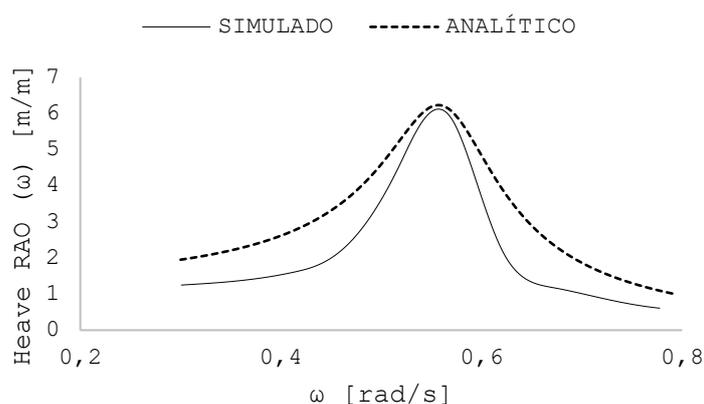
### 4.1 Resultados

En este apartado se llevará a cabo el análisis de dos resultados específicos. En primer lugar, se comparará si existe similitud entre el caso base simulado en este proyecto y el caso base. Posteriormente, se realizará una comparación entre el caso base y los casos optimizados simulados. (Sacán, 2024)

#### 4.1.1 Caso base simulado y analítico

En la sección de metodología, se realizó un análisis del caso base simulado. Además, se tomaron los datos del caso base analítico del proyecto de Sacán P. (2024) para compararlos.

En la Figura 16, se observa una gran similitud al comparar el RAO del caso base simulado con el caso base analítico.



**Figura 16.** RAO's caso base. (Simulación y analítico).  
Fuente: (Propia).

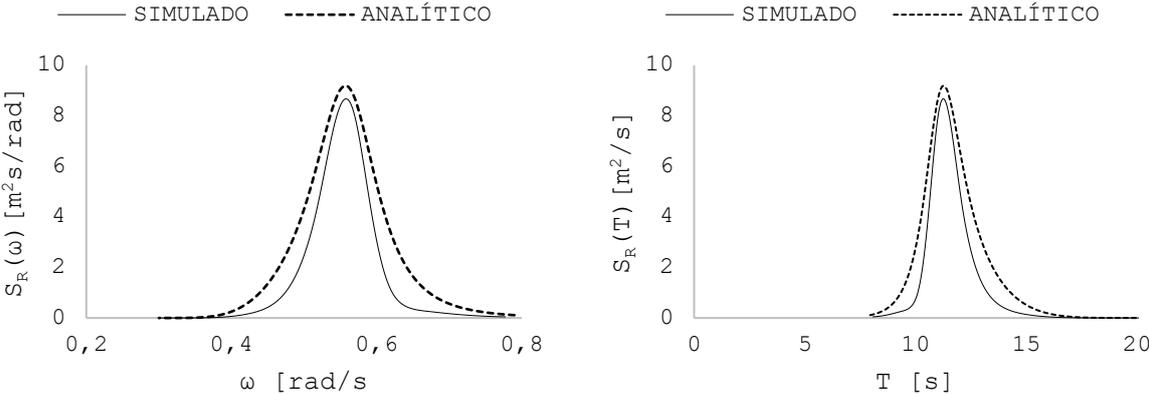
En la Tabla 3 se presentan los parámetros hidrodinámicos que caracterizan al sistema WEC (caso base).

**Tabla 3.** Parámetros hidrodinámicos de sistema WEC (caso base).  
Fuente: (Propia).

	$\omega_p$ [rad/s]	$T_p$ [s]	RAO pico [m/m]
<b>Simulación</b>	0,56	11,28	6,13
<b>Analítico</b>	0,56	11,22	6,23

Se observa que el periodo pico y la frecuencia pico son similares en ambos casos. Además, el periodo pico coincide con el periodo de las olas del perfil costanero de las Galápagos, lo que indica que el sistema WEC entre en resonancia con las olas.

Sin embargo, esta coincidencia no es suficiente que ambos casos son idénticos. Por ello, se calcula el momento espectral cero para ambos casos. Este momento espectral se obtiene del espectro de respuesta. En la Figura 17 se muestra el espectro de respuesta en el periodo y la frecuencia, tanto para el caso base simulado como el caso base analítico.



**Figura 17.** Espectro de respuesta caso base. (Analítico y simulado).  
Fuente: (Propia).

En la Tabla 4, se muestra el momento espectral cero del caso base cuando se tiene un análisis analítico (simplificado) y simulado (real).

**Tabla 4.** Momento espectral cero del caso base. Fuente: (Propia).

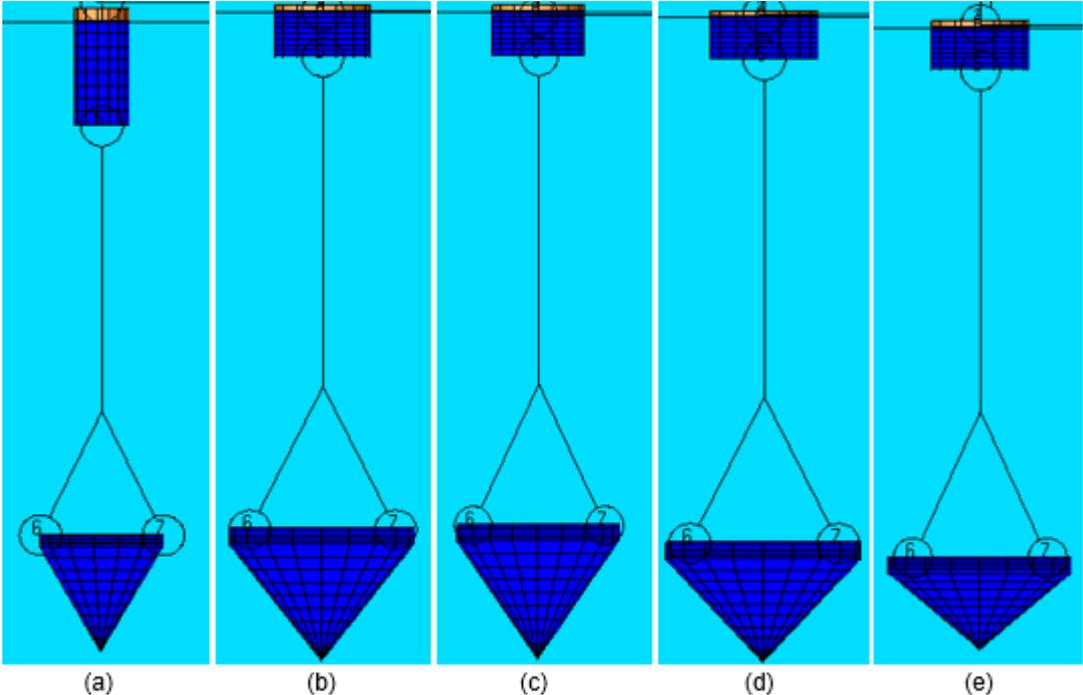
	Momento espectral cero ( $m_o$ ) [m <sup>2</sup> ]
<b>Simulación</b>	16,52
<b>Analítico</b>	18,53

A partir de la Tabla 4 se deduce que el espectro de respuesta y el RAO del caso base simulado y analítico son semejantes, con una diferencia del 12,2%. Este resultado es aceptable para considerar al caso base simulado como referente para los casos optimizados.

### 4.1.2 Caso base y casos optimizados simulados

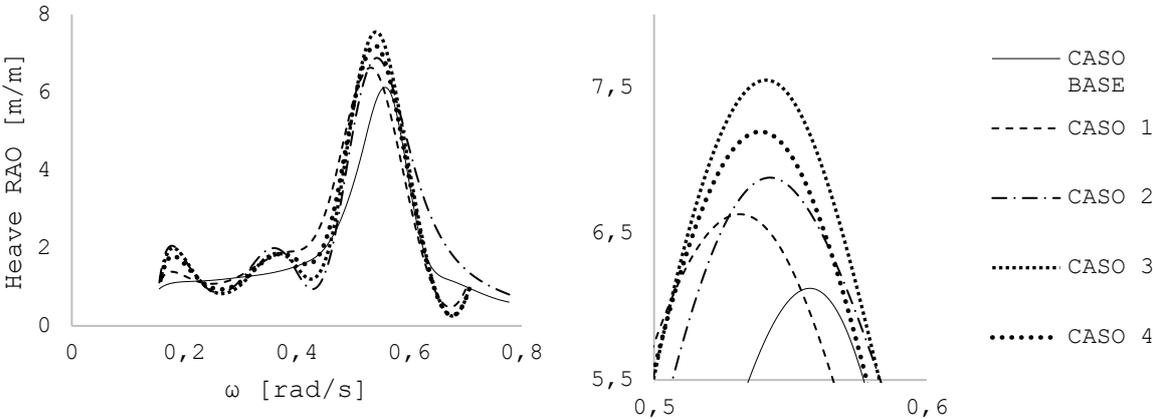
En los casos optimizados propuestos por Sacán P. (2024) se identifican cuatro casos, con algunas particularidades específicas. En la Figura 18 se presentan los distintos casos geométricos: la Figura 18 (a) muestra el caso base, mientras que las Figuras 18 (b), (c), (d) y (e) muestran los casos optimizados. Se observa claramente que los dispositivos WEC optimizados tienen menor calado y mayor diámetro del cuerpo flotante en comparación con el

caso base. Además, en el cuerpo sumergido se identifica un aumento en el diámetro, con la altura del cilindro permaneciendo constante y una disminución en la altura del cono respecto al diseño original.



**Figura 18.** Sistemas WEC: (a) Caso base, (b) Caso optimizado 1, (c) Caso optimizado 2, (d) Caso optimizado 3, (e) Caso optimizado 4  
Fuente: (Propia)

Siguiendo el proceso del caso base propuesto en la metodología, se aplica el mismo procedimiento para las geometrías propuestas por Sacán P. (2024), en la Figura 19 se presenta el operador de respuesta ampliada (RAO) en función del tiempo para los distintos casos optimizados.



**Figura 19.** RAO's caso base y optimizados.  
Fuente: (Propia).

A partir del RAO máximo en cada caso, se determina la frecuencia pico y el periodo pico. En la Tabla 5 se observa que todos los periodos pico son similares al del caso base, además, estos periodos coinciden con el periodo característico del mar del archipiélago de las Islas Galápagos.

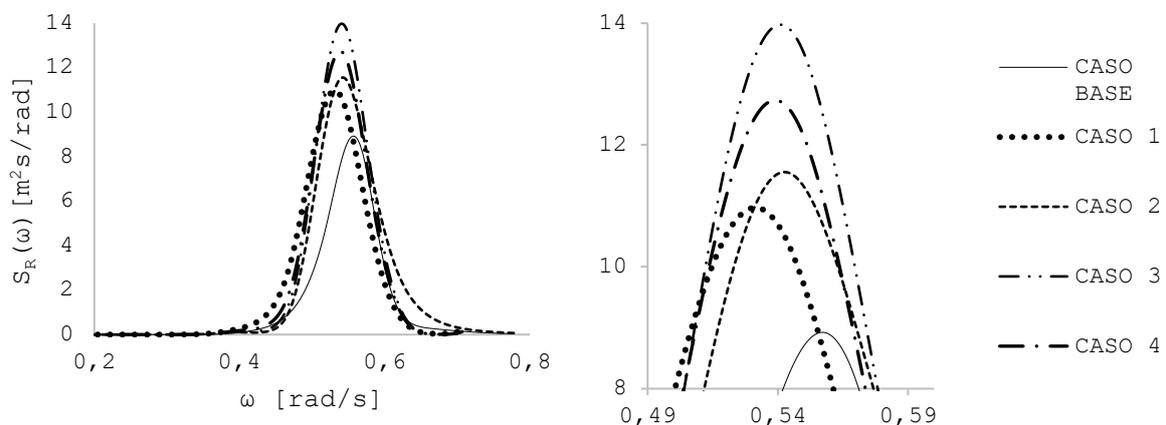
**Tabla 5.** Parámetros hidrodinámicos de los sistemas WEC's.

Fuente: (Propia).

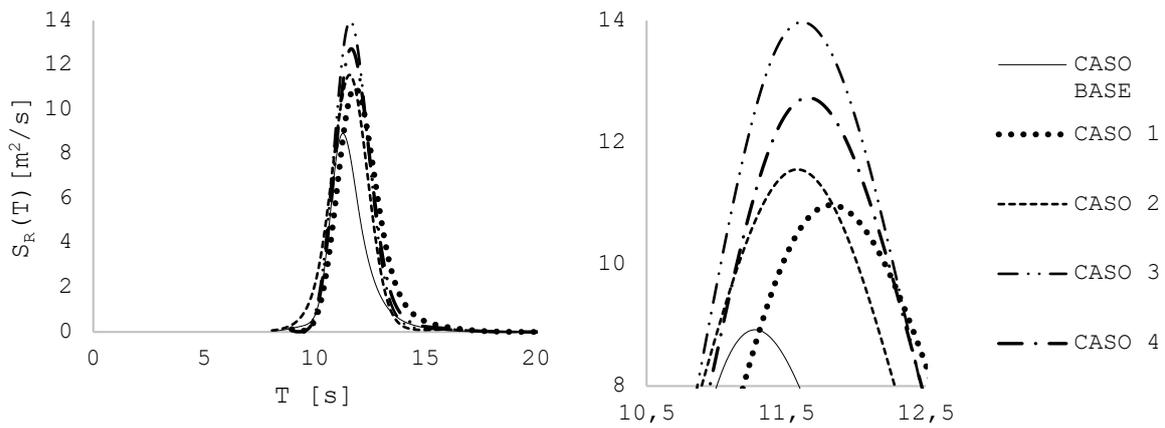
	$\omega_p$ [rad/s]	$T_p$ [s]	RAO pico [m/m]
Caso base	0,56	11,28	6,13
Caso 1	0,53	11,83	6,63
Caso 2	0,54	11,57	6,88
Caso 3	0,54	11,63	7,55
Caso 4	0,54	11,66	7,2

Se observa una diferencia máxima del 4,87% en el periodo pico entre el caso base y el Caso 1, que es el caso con la mayor discrepancia en el periodo pico respecto al caso base. Estos resultados son considerados aceptables para proceder con el análisis comparativo entre los casos optimizados y el caso base.

Para continuar con la obtención del momento espectral cero, en la Figura 20 se presenta el espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia, mientras que en la Figura 21 se muestra el espectro de respuesta en el dominio del periodo. Ambas representaciones son equivalentes. A partir de estas figuras, se puede inferir que el área bajo la curva de los casos optimizados es mayor en comparación con el caso base.



**Figura 20.** Espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia para distintos sistemas WEC. Fuente: (Propia).



**Figura 21.** Espectro de respuesta en el dominio del periodo para distintos sistemas WEC. Fuente: (Propia).

Por el tamaño de las curvas, es evidente que si existe una optimización, para poder cuantificar en la Tabla 6 se expone el momento espectral cero para cada caso.

**Tabla 6.** Momento espectral cero de sistemas WEC. Fuente: (Propia).

	Momento espectral cero ( $m_0$ ) [m <sup>2</sup> ]	Incremento [%]
<b>Caso base</b>	16,52	-
<b>Caso 1</b>	24,95	51,03
<b>Caso 2</b>	24,63	49,09
<b>Caso 3</b>	27,01	63,50
<b>Caso 4</b>	25,95	57,08

Los resultados indican una mejora significativa en el diseño geométrico del sistema undimotriz. Todos los casos optimizados presentan un incremento aproximado del 50% en comparación con el caso base. Sin embargo, el Caso 3 destaca como el sistema con las mejores características geométricas para la extracción de energía undimotriz.

Estos resultados sugieren una nueva conceptualización en el diseño de sistemas undimotrices. En general, se observa que los sistemas más eficientes presentan un calado menor al diámetro del cuerpo flotante, y para el cuerpo sumergido, se recomienda un diámetro mayor que la altura del cono.

## 4.2 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y el alcance propuesto en este proyecto, se concluye de manera satisfactoria el estudio del desempeño hidrodinámico de los distintos sistemas WEC propuestos por Sacán P. (2024).

Estos sistemas WEC fueron evaluados mediante el software Ansys AQWA, y se ha demostrado que han sido optimizados en comparación con el caso base, alcanzando un incremento máximo

de optimización del 63,5%. Los resultados indican que la geometría juega un papel crucial en el desempeño de estos sistemas.

En el cuerpo flotante, el calado se redujo en un 54,5% y el diámetro aumento en un 30,2% respecto al modelo original. En cuanto al cuerpo sumergido, el diámetro se incrementó en un 30,6%, manteniendo constante la altura del cilindro sumergido, mientras que la altura del cono disminuyó en un 16,25%. Estos resultados sugieren que el aumento del diámetro y la disminución del calado en el cuerpo flotante optimizan el área de contacto con las olas, incrementando la excitación sin aumentar significativamente su masa. De igual manera, el aumento de la superficie de arrastre del cuerpo sumergido genera mayor amortiguamiento, permitiendo que el sistema excite adecuadamente sin perder su movilidad.

Todos estos parámetros contribuyeron a un óptimo desempeño de los distintos casos. Sin embargo, es importante considerar posibles impedimentos al llevar estos mecanismos a la práctica, tales como la construcción, logística y selección de materiales. Estos factores representan posibles áreas de estudio para futuros trabajos de investigación e ingeniería.

### **4.3 Recomendaciones**

- Durante el proceso de creación, ensamblaje y simulación del sistema utilizando una interfaz numérica, se recomienda revisar detenidamente el documento "AQWA Reference Manual". Un entendimiento completo del manual es crucial, ya que errores en la configuración de parámetros como masa, nodos, paneles, inercia, espectro de olas o diseño geométrico pueden provocar fallos en la compilación de datos, impidiendo la simulación o generando resultados incorrectos.
- Para la simulación en el dominio del tiempo de cada sistema WEC, se sugiere realizar simulaciones de al menos una hora. Es esencial recolectar datos una vez que el sistema ha alcanzado el estado estacionario, ya que este comportamiento representa de manera más precisa el desempeño del sistema en condiciones reales.
- Dado que el software AQWA Ansys ofrece una cantidad limitada de datos al finalizar la simulación, se recomienda emplear métodos de interpolación para crear una base de datos más extensa. Esto permitirá obtener un conjunto de resultados más robusto y representativo, facilitando un análisis más detallado y preciso.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS Inc. (2012). AQWA Reference manual. Canonsburg.
- Babarit, & Clement, A. (2006). Shape optimization of the SEAREV wave energy converter. Nantes: Ecole Centrale de Nantes.
- Benalcázar, S., & Ribadeneira, B. (2022). Diseño estructural y simulación dinámica de un sistema de compensación de rolido para buques. Quito: Escuela Politécnica Nacional .
- Biclicki, S. (2021). Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated . Polish: Polish Maritime Research.
- Faltinsen. (1993). Sea Loads on Ship and Offshore Structures. Trondheim: Norwegian Institute of Technology.
- Fusco, F. (2012). Real-time Forecasting and Control for Oscilating Wave Energy Devices. National University of Ireland Maynooth, Faculty of Science and Engineering, Ireland.
- Golbaz, D., Asadi, R., Amini, E., Mehdipour, H., Nasiri, M., Majidi, M., . . . Neshat, M. (2021). Ocean Wave Energy Converters Optimization: A Comprehensive Review on Research Directions. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/351656840\\_Ocean\\_Wave\\_Energy\\_Converters\\_Optimization\\_A\\_Comprehensive\\_Review\\_on\\_Research\\_Directions](https://www.researchgate.net/publication/351656840_Ocean_Wave_Energy_Converters_Optimization_A_Comprehensive_Review_on_Research_Directions)
- Guachamin, W., Álvarez Briceño, R., & Bravo, J. (2024). Feasibility study of a method for tuning wave energy converters. Quito, Ecuador: Sustainable Energy Technologies and Assessments.
- Guachamin, W., Gao, Z., & Moan, T. (2017). Numerical study of a novel procedure for installing the tower and rotor nacelle assembly of offshore wind turbines based on the inverted pendulum principle. Journal of Marine Science and Application.
- Hasselmann. (1973). Measurements of Wind-wave Growth and Shell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Herausgegeben vom Deutschen Hydrographischen Institut, Germany.
- Howard, R. (2015). White noise: A time domain basis . Xian, China: International Conference on Noise and Fluctuations.
- Jakob, U., Morten, O., Hauge , E., & Pavlov, A. (2013). Limits of controller performance in the heave disturbance attenuation problem. Control Conference (ECC).
- Ma, Y., Ai, S., Yang, L., Zhang, A., Liu, S., & Zhou, B. (2020). Research on design and optimization of the pitching float wave energy converter. Sun Yat-sen University. Guangzhou, China: School of Marine Engineering an Technology. doi:10.1002/ese3.783
- Portilla Yandún, J., & Guachamin Acero, W. (2023). Wave Spectral Analysis for Designing Wave Energy Converters. Bilbao: 15th European Wave and Tidal Energy Conference.
- Riley, I. (2018). Geometric Optimization of a Heaving Point Absorber Wave Energy Converter. Geogia, U.S.: Georgia Southern University.

Sacán, P. (2024). Desarrollo de una metodología para optimización geométrica de un concepto de convertidor de energía undimotriz (WEC). Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Young, I. (2017). Regular, irregular and the wave spectrum. Camberra: Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering.

## **6. ANEXOS**

**ANEXO I.** Código numérico del cuerpo flotante (AQWA-Line)

**ANEXO II.** Código numérico del sistema WEC ensamblado (AQWA-Librium)

**ANEXO III.** Código numérico de la simulación (AQWA-Drgift)

## ANEXO I

JOB CYLI LINE

TITLE CYL

OPTIONS REST GOON AHD1 END

RESTART 1 3

01 COOR

01NOD5

01STRC 1

\*\* CONE

\* UPPER CILINDER

016000 10 1 2.500 0.000 0.725 0 0 -0.750

R 016000 15 100 0.000 0.000 00.00 0 0 24

\* LOWER CENTER

01 1 2 1 0 0 -6.0 1.00 0 0

R 01 1 15 100 0.000 0.000 000.00 0 0 24

\*Center of mass (node)

01 999 0.000 0.000 -05.000

END

02 ELM1

02ZLWL ( 0.0000)

\* TOP PLATE

02QPPL 1(14)(6000,100)(6001,100)(6101,100)(6100,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6001,100)(6002,100)(6102,100)(6101,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6002,100)(6003,100)(6103,100)(6102,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6003,100)(6004,100)(6104,100)(6103,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6004,100)(6005,100)(6105,100)(6104,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6005,100)(6006,100)(6106,100)(6105,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6006,100)(6007,100)(6107,100)(6106,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6007,100)(6008,100)(6108,100)(6107,100)

02QPPL DIFF 1(14)(6008,100)(6009,100)(6109,100)(6108,100)

02QPPL 1(1)(7400,1)(7401,1)(6001,1)(6000,1)

02QPPL DIFF 1(8)(7401,1)(7402,1)(6002,1)(6001,1)

02TPPL DIFF 1(14)(1,0)(102,100)(2,100)

```

02TPPL DIFF 1(1)(1,1)(2,1)(1402,1)
02QPPL DIFF 1(14)(2,100)(102,100)(6109,100)(6009,100)
02QPPL DIFF 1(1)(1402,100)(2,100)(6009,100)(7409,100)
* CENTER OF GRAVITY / MASS POINT
02PMAS 1(1)(999)(1)(1)
END
03 MATE
03 1 1.200E5 0.000000 0.000000
END
04 GEOM
04PMAS 1 4.193E6 4.455E6 6.814E6 6.193E6 1.414E6 1.113E6
END
05 GLOB
05DPTH 0100.0
05DENS 1025.0
END
06 FDR1
06FREQ 0 43 0.1 1.70
END06DIRN 0 37 -180 180
07 NONE
08 NONE

```

## ANEXO II

JOB BARG LIBR

TITLE       HLV + VSS

OPTIONS REST GOON CRNM END

RESTART 1 5

01 COOR

01NOD5

01STRC 1

\*\* CONE

\* UPPER CILINDER

016000 10 1 2.000 0.000 1.000 0 0 -1

R 016000 15 100 0.000 0.000 00.00 0 0 24

\* LOWER CENTER

01 1 2 1 0 0 -8.0 1.00 0 0

R 01 1 15 100 0.000 0.000 000.00 0 0 24

\*Center of mass (node)

01 999 0.000 0.000 -06.000

\*\*MOORING LINES

\* catenary mooring

0114003 0.00000 0.0000 -0.000

0114004 0.00000 0.0000 -0.000

0114005 0.00000 0.0000 -0.000

0114006 0.00000 0.0000 -0.000

0115003 1000.00 0.0000 -0.000

0115004 -1000.0 0.0000 -0.000

0115005 -0.00000 1000.0 -0.000

0115006 -0.00000 -1000. -0.000

\*\* lifting point for moved structure

01 7316 00.0 0.000 -8.0

\*\*\*\*\*

01STRC 2

01NOD5

\*\* CONE

\* TUPPER CILINDER

01 1 3 1 0 0 -30.0 1.00 0 0  
R 01 1 15 100 0.000 0.000 000.00 0 0 24

\*\*CILINDER

016000 5 1 4.50 0.000 -30.0 0 0 -0.2  
R 016000 15 100 0.000 0.000 00.00 0 0 24

\*\*CONE

013000 9 1 4.5 0.000 -31 -0.5 0 -0.889  
R 013000 15 100 0.000 0.000 00.00 0 0 24

\*\*PUNTA

01 666 0 1 0 0 -39 0 0 0

\*Center of mass (node)

01 999 0.000 0.000 -32.000

\* nodes for lifting points

019100 -4.500 0.0000 -30.00  
019101 0.000 -13.80 -30.00  
019102 4.500 0.0000 -30.00  
019103 0.000 -08.30 -30.00

\* nodes for central disc

019996 0.0 0.0 -30.00  
019999 0.0 0.0 -30.343  
01STRC 3

\*\* NODE FOR THE AUXILIARY BLOCK \*\*

01 999 -0.000 -0.0 -20.00

\*\*\*\*\*

END

02 ELM1  
02ZLWL ( 0.0000)

\* TOP PLATE

02QPPL 1(14)(6000,100)(6001,100)(6101,100)(6100,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6001,100)(6002,100)(6102,100)(6101,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6002,100)(6003,100)(6103,100)(6102,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6003,100)(6004,100)(6104,100)(6103,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6004,100)(6005,100)(6105,100)(6104,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6005,100)(6006,100)(6106,100)(6105,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6006,100)(6007,100)(6107,100)(6106,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6007,100)(6008,100)(6108,100)(6107,100)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6008,100)(6009,100)(6109,100)(6108,100)  
 02QPPL 1(1)(7400,1)(7401,1)(6001,1)(6000,1)  
 02QPPL DIFF 1(8)(7401,1)(7402,1)(6002,1)(6001,1)  
 02TPPL DIFF 1(14)(1,0)(102,100)(2,100)  
 02TPPL DIFF 1(1)(1,1)(2,1)(1402,1)  
 02QPPL DIFF 1(14)(2,100)(102,100)(6109,100)(6009,100)  
 02QPPL DIFF 1(1)(1402,100)(2,100)(6009,100)(7409,100)

\* CENTER OF GRAVITY / MASS POINT

02PMAS 0(1)(999)(1)(1)

END

\*\*\*\*\*

02 ELM2

02ZLWL ( 0.0000)

\* TOP PLATE

02TPPL DIFF 1(14)(1,0)(2,100)(102,100)  
 02TPPL DIFF 1(1)(1,0)(1402,1)(2,1)  
 02QPPL DIFF 1(14)(2,100)(3,100)(103,100)(102,100)  
 02QPPL DIFF 1(1)(2,1)(1402,1)(1403,1)(3,1)  
 02QPPL DIFF 1(14)(3,100)(6000,100)(6100,100)(103,100)  
 02QPPL DIFF 1(1)(3,1)(1403,1)(7400,1)(6000,1)

\*\*CILINDER PLATE

02QPPL DIFF 1(14)(6000,100)(6001,100)(6101,100)(6100,100)  
 02QPPL DIFF 1(1)(7400,1)(7401,1)(6001,1)(6000,1)  
 02QPPL DIFF 1(14)(6001,100)(6002,100)(6102,100)(6101,100)  
 02QPPL DIFF 1(1)(7401,1)(7402,1)(6002,1)(6001,1)

02QPPL DIFF 1(14)(6002,100)(6003,100)(6103,100)(6102,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(7402,1)(7403,1)(6003,1)(6002,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(6003,100)(6004,100)(6104,100)(6103,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(7403,1)(7404,1)(6004,1)(6003,1)

\*\*LINEA DE UNION CILINDRO CONO

02QPPL DIFF 1(14)(6004,100)(3000,100)(3100,100)(6104,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(7404,1)(4400,1)(3000,1)(6004,1)

\*\*CONE PLATE MENOS PUNTA

02QPPL DIFF 1(14)(3000,100)(3001,100)(3101,100)(3100,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4400,1)(4401,1)(3001,1)(3000,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3001,100)(3002,100)(3102,100)(3101,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4401,1)(4402,1)(3002,1)(3001,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3002,100)(3003,100)(3103,100)(3102,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4402,1)(4403,1)(3003,1)(3002,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3003,100)(3004,100)(3104,100)(3103,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4403,1)(4404,1)(3004,1)(3003,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3004,100)(3005,100)(3105,100)(3104,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4404,1)(4405,1)(3005,1)(3004,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3005,100)(3006,100)(3106,100)(3105,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4405,1)(4406,1)(3006,1)(3005,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3006,100)(3007,100)(3107,100)(3106,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4406,1)(4407,1)(3007,1)(3006,1)  
02QPPL DIFF 1(14)(3007,100)(3008,100)(3108,100)(3107,100)  
02QPPL DIFF 1(1)(4407,1)(4408,1)(3008,1)(3007,1)

\*\*PLATEPUNTA

02TPPL DIFF 1(14)(666,0)(3108,100)(3008,100)  
02TPPL DIFF 1(1)(666,0)(3008,1)(4408,1)

\* CENTER OF GRAVITY / MASS POINT

02PMAS 1(1)(999)(1)(1)  
02DISC 0(1)(9999)(9996)(5)  
02MSTR (999)(0,0,0)

END

\*\*\*\*\*

02 ELM3  
02ZLWL (0.0)  
02PMAS (1)(999)(1)(1)  
END02MSTR (999)(0,0,0)

\*\*\*\*\*

03 MATE  
03STRC 1  
03 1 7.388E4 0.000000 0.000000  
03STRC 2  
03 1 2.733E5 0.000000 0.000000  
03STRC 3  
03 1 5.000E3

END

04 GEOM  
04STRC 1  
04PMAS 1 4.193E6 4.455E6 6.814E6 6.193E6 1.414E6 1.113E6  
04STRC 2  
04PMAS 1 6.193E6 6.455E4 6.814E4 6.193E5 6.814E4 5.113E6  
04DISC 5 9.000  
04CONT 5 01.0000 0.100  
04STRC 3  
04PMAS 1 1.0E03 0.0 0.0 1.0E03 0.0 1.0E03

END

05 GLOB  
05DPTH 100.0  
05DENS 1025.0  
END05ACCG 9.810

06 FDR1  
06FILE ALCYL.HYD  
06CSTR1

END06CPDB

06 FDR2  
06FILE ALCONO.HYD

06CSTR1  
END06CPDB

06 FINI  
07 NONE  
08 NONE  
09 NONE  
10 NONE  
11 NONE  
12 CONS

12DACF1 6  
12DACF3 4  
12DACF3 5  
12DACF3 6  
12DACF2 6

END

13 SPEC  
13SEED 2  
13SPDN 0090  
13NSPL 200

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062\_PONER\_ESP  
ECTRO

13UDEF	0.09	0.000
13UDEF	0.1	0.04
13UDEF	0.3	0.04
13UDEF	0.5	0.04
13UDEF	0.7	0.04
13UDEF	0.9	0.04
13UDEF	1.1	0.04
13UDEF	1.3	0.04
13UDEF	1.5	0.04
13UDEF	1.7	0.04
13UDEF	1.71	0.000

END

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274  
767880

14 MOOR

\* catenary mooring HLV

14LINE 114003 015003 1E+4 980

14LINE 114004 015004 1E+4 980

14LINE 114005 015005 1E+4 980

14LINE 114006 015006 1E+4 980

\*\*\* lifting lines from vessel to blocks \*\*\*\*

14LINE 3 999 1 7316 2E+7 022.000

\*\*\* lifting lines from block to cones

14LINE 3 999 2 9100 2E+7 010.500

14LINE 3 999 2 9102 2E+7 010.500

\*\*

END

\* 15 NONE

15 STRT

15POS1 -00.00 00.000 -6.00 -0.00 -0.000 0.000

15POS2 00.00 -00.00 -41.50 -0.000 -0.000 0

15POS3 00.00 -00.00 -28.06 -0.000 -0.000 0.000

END

16 LMTS

16MXNI 1000

END

17 NONE

18 NONE

19 NONE

20 NONE

## ANEXO III

JOB BARG DRIFT WFRQ

TITLE           wec

\*OPTIONS REST CONV END

OPTIONS REST CONV RDEP END

RESTART 4 5    ABwec

09  DRM1

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274  
767880

09FIDD        5.0000E3 5.7300E3 5.0000E3 5.6300E3 3.2700E3 5.2000E3

END

09  DRM2

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274  
767880

09FIDD        5.0000E3 5.7300E3 5.0000E3 5.6300E3 3.2700E3 5.2000E3

END

09  DRM3

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274  
767880

09FIDD        5.0000E3 5.7300E3 5.0000E3 5.6300E3 3.2700E3 5.2000E3

END

\* 09  FINI

10  NONE

11  NONE

12  CONS

12DACF1  6

12DACF3  4

12DACF3  5

12DACF3  6

12DACF2  6

\*\*

END

13  SPEC

13SEED  2

13SPDN 0090

13NSPL 200

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062

13UDEF 0.09 0.000

13UDEF 0.1 0.01

13UDEF 0.3 0.01

13UDEF 0.5 0.01

13UDEF 0.7 0.01

13UDEF 0.9 0.01

13UDEF 1.1 0.01

13UDEF 1.3 0.01

13UDEF 1.5 0.01

13UDEF 1.7 0.01

13UDEF 1.71 0.000

END

\*23456789101214161820222426283032343638404244464850525456586062646668707274  
767880

14 MOOR

\* catenary mooring HLV

\* 14LINE 114003 015003 5E+3 990

\* 14LINE 114004 015004 5E+3 990

\* 14LINE 114005 015005 5E+3 990

\* 14LINE 114006 015006 5E+3 990

\*\*\* lifting lines from vessel to blocks \*\*\*

14LINE 3 999 1 7316 2E+7 022.000

\*\*\* lifting lines from block to cones

14LINE 3 999 2 9100 1.0E+7 010.500

14LINE 3 999 2 9102 1.0E+7 010.500

\*\*

END

15 NONE

16 TINT

16TIME 99999 0.015

```
16TIME 99999 0.015
* 16TIME 99999 0.010
* 16TIME 99999 0.010
* 16TIME 99999 0.010
* 16TIME 99999 0.010
* 16TIME 80999 0.003
END
17 NONE
18 PROP
* 18PRNT6 18
18PTEN1
END
19 NONE
20 NONE
```