

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**UNIDAD DE POSGRADO**



**TESIS:**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SISTEMA DE AMARRE DE UNA  
COLUMNA DE AGUA OSCILANTE CON DOS FLOTADORES PARA  
DAR ESTABILIDAD A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

**ELABORADO POR:**

**WALTER DAVID CABANILLAS GUARNIZ**

**ASESOR:**

**DSC. JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ**

**LIMA, PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

*Dedicado a mi madre que me ánimo en todo momento para mi formación como maestro en ciencias, sin su apoyo no lo hubiera logrado.*

**Walter Cabanillas**

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a mi asesor, el DSc. Ing. Juan José Uchuya López, por orientación en la culminación de mi tesis.*

*A los profesores y autoridades de la Universidad Nacional de Ingeniería, a CARELEC por el maravilloso programa de maestría desde que ingresé y a la Biblioteca Central UNI por facilitar un ordenador especializado con la licencia académica del AQWA del Ansys Academic para la simulación numérica.*

*A los amigos, colegas, compañeros de aulas y de trabajo de los cuales he aprendido a ser mejor persona y profesional.*

*A mis padres, hermanos, familiares por ser parte y apoyo fundamental de mi vida.*

*Y a Dios, por todo.*

*“La electricidad es el alma del universo”*

***John Wesley***

## RESUMEN

Uno de los problemas que enfrentan las Columna de Agua Oscilante (OWC) con amarres está relacionado con la estabilidad del sistema en la generación de energía eléctrica. Los amarres, que son las cuerdas o cables utilizados para sujetar y mantener el OWC en su posición, son componentes críticos que deben mantener la estructura en su lugar y permitir su oscilación controlada en respuesta a las olas para generar energía eléctrica. La tesis tiene como objetivo el determinar el sistema de amarre para dar estabilidad a la generación eléctrica en un convertidor de olas de tipo OWC flotante con amarres mediante simulación numérica. Se destaca en el trabajo la relevancia del sistema de amarre y los datos hidroceanográficos en la estabilidad para la generación eléctrica en convertidores de olas, especialmente en el contexto de una OWC flotante. Encontrar un equilibrio en la configuración de los amarres y los efectos oceanográficos aportan en maximizar la eficiencia y viabilidad del sistema, asegurando una generación de energía eléctrica más eficiente y sostenible a partir del aprovechamiento de las olas.

Palabras Clave: Columna de Agua Oscilante, OWC, flotadores, amarres, cuerdas, estabilidad, periodo, amplitud y ola.

## **ABSTRACT**

One of the problems faced by Oscillating Water Columns (OWC) with moorings is related to the stability of the system in the generation of electrical energy. The moorings, which are the ropes or cables used to secure and hold the OWC in position, are critical components that must hold the structure in place and allow its controlled oscillation in response to waves to generate electrical power. The objective of the thesis is to determine the mooring system to provide stability to electrical generation in a floating OWC type wave converter with moorings through numerical simulation. The relevance of the mooring system and hydroceanographic data in stability for electrical generation in wave converters is highlighted in the work, especially in the context of a floating OWC. Finding a balance in the configuration of the moorings and the oceanographic effects contributes to maximizing the efficiency and viability of the system, ensuring more efficient and sustainable generation of electrical energy from the use of waves.

Keywords: Oscillating water column, OWC, floats, moorings, ropes, stability, period, amplitude and wave.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS .....	3
1.1 Antecedentes de la investigación .....	3
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio .....	19
1.3 Formulación del problema .....	22
1.3.1 Problema General .....	22
1.3.2 Problemas Específicos .....	22
1.4 Justificación e importancia .....	22
1.5 Objetivos .....	24
1.5.1 Objetivo General .....	24
1.5.2 Objetivo Específico .....	24
1.6 Hipótesis .....	24
1.6.1 Hipótesis General .....	24
1.6.2 Hipótesis Específico .....	24
1.7 Variables, dimensiones e indicadores .....	24
1.8 Unidad de análisis .....	26
1.9 Fuentes de información .....	26
1.10 Tipo y nivel de investigación .....	26
1.10.1 Tipo de investigación .....	26
1.10.2 Nivel de investigación .....	27
1.11 Método de diseño de la investigación .....	27
1.12 Población y muestra .....	28
1.12.1 Población .....	28
1.12.2 Muestra .....	28

1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	28
1.14 Análisis y procesamiento de datos .....	32
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	33
2.1 Fundamentos de la generación de energía con Columnas de Agua Oscilante ....	33
2.1.1 Principio de funcionamiento de las OWC .....	33
2.1.2 Ventajas y desafíos de la generación eléctrica con OWC .....	34
2.1.3 Aplicaciones actuales y potenciales de las OWC.....	36
2.2 Aspectos mecánicos de las Columnas de Agua Oscilante (OWC).....	37
2.2.1 Diseño y estructura de las OWC.....	37
2.2.2 Tipos de flotadores y su función .....	38
2.2.3 Sistemas de amarre: tipos y características.....	39
2.2.4 Interacciones dinámicas entre la OWC, los flotadores y los sistemas de amarre .....	40
2.2.5 Importancia de los sistemas de amarre en las OWC .....	41
2.2.6 Optimización del diseño mecánico para máxima eficiencia.....	42
2.2.7 Estrategias para optimizar la interacción entre amarres y generación eléctrica .....	43
2.3 Sistema de fondeo.....	44
2.3.1 Cálculos por corriente marina .....	45
2.3.2 Cálculo por viento.....	50
2.4 Sistema de anclaje .....	53
2.5 Marco conceptual .....	57
2.5.1 Sistema de amarre .....	57
2.5.2 Energía eléctrica.....	57
2.5.3 Simulación numérica .....	57
2.5.4 Convertidor de energía .....	57



2.5.5	Orcaflex .....	57
2.5.6	AQWA .....	58
2.5.7	RAO .....	58
2.5.8	Hidroceanografía .....	58
2.5.9	Estabilidad de artefacto o dispositivo naval .....	59
2.5.10	Estabilidad de la generación eléctrica del OWC .....	59
CAPÍTULO III DESARROLLO DE LA TESIS .....		60
3.1	Geometría cilíndrica de la Columna de Agua Oscilante .....	60
3.1.1	Dimensiones principales .....	62
3.2	Simulación por CFD .....	63
3.2.1	Geometría y dominio .....	63
3.2.2	Enmallado .....	64
3.2.3	Configuración de simulación .....	64
3.2.4	Configuración de los amarres .....	66
3.3	Teoría de ondas de Stokes de 2º orden .....	68
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....		71
4.1	Resultados de caso 1 .....	71
4.2	Resultados de caso 2 .....	73
4.3	Resultados de caso 3 .....	74
4.4	Resultados de caso 4 .....	75
4.5	Resultados de caso 5 .....	76
4.6	Resultados de caso 6 .....	78
4.7	Resultados de caso 7 .....	79
4.8	Resultados de caso 8 .....	80
4.9	Resultados de caso 9 .....	81
4.10	Discusión de resultados .....	83
4.11	Contrastación de hipótesis .....	84
4.12	Aporte .....	86

CONCLUSIONES .....	88
RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Configuración experimental del Model Test Basin (AMC MTB) del Australian Maritime College (izquierda), con las dimensiones principales del modelo de columna de agua oscilante flotante (FOWC) mostradas a la derecha. ....	5
Figura 2	Modelo de simulación del sistema FABWEC en AQWA. ....	6
Figura 3	Diseños de amarre ISWEC: (a) C1; (b)C2. ....	7
Figura 4	Proyectos WEC en EE.UU. y Europa. ....	8
Figura 5	Configuración del sistema TPM (Izquierda) y de un TLM (derecha) para los modelos de WEC. ....	9
Figura 6	Descripción geométrica del montaje experimental y la configuración del cable de amarre. ....	10
Figura 7	Entorno de aplicación del software ANSYS AQWA ....	30
Figura 8	Sistema de amarre y de anclaje ....	31
Figura 9	Fuerza lateral de una corriente marina sobre el buque.....	47
Figura 10	Fuerza longitudinal de una corriente marina sobre el buque. ....	47
Figura 11	Rolido de un buque producido por las corrientes marinas. ....	50
Figura 12	Carga lateral del viento sobre un buque. ....	51
Figura 13	Carga longitudinal del viento sobre un buque.....	52
Figura 14	Rolido de un buque producido por el viento.....	53
Figura 15	Esquema de fondeo (boya, cadena y peso muerto). ....	54
Figura 16	Esquema de columna de agua oscilante con amarres ....	61
Figura 17	Dimensiones del columna de agua oscilante.....	62
Figura 18	Dimensiones de los flotadores del OWC ....	63
Figura 19	Modelo 3D del OWC junto a 2 flotadores cúbicos.....	63
Figura 20	Enmallado de columna de agua oscilante y flotadores con elementos de 50mm de tamaño ....	64

Figura 21	Configuración para la simulación.....	65
Figura 22	Configuración de ola regular .....	66
Figura 23	Modelado del OWC con 4 cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola).....	66
Figura 24	Modelado del OWC con 6 cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola).....	67
Figura 25	Modelado del OWC con 8 cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola).....	68
Figura 26	Composición de una onda de Stokes de 2º orden a partir de dos componentes senoidales.....	69
Figura 27	Respuesta Heave del OWC para el caso 1 .....	72
Figura 28	Respuesta Pitch del OWC para el caso 1.....	72
Figura 29	Elevación de Ola para el caso 1 .....	72
Figura 30	Respuesta Heave del OWC para el caso 2 .....	73
Figura 31	Respuesta Pitch del OWC para el caso 2.....	73
Figura 32	Elevación de Ola para el caso 2 .....	74
Figura 33	Respuesta Heave del OWC para el caso 3 .....	74
Figura 34	Respuesta Pitch del OWC para el caso 3.....	75
Figura 35	Elevación de Ola para el caso 3 .....	75
Figura 36	Respuesta Heave del OWC para el caso 4 .....	76
Figura 37	Respuesta Pitch del OWC para el caso 4.....	76
Figura 38	Elevación de Ola para el caso 4 .....	76
Figura 39	Respuesta Heave del OWC para el caso 5 .....	77
Figura 40	Respuesta Pitch del OWC para el caso 5.....	77
Figura 41	Elevación de Ola para el caso 5 .....	77
Figura 42	Respuesta Heave del OWC para el caso 6 .....	78
Figura 43	Respuesta Pitch del OWC para el caso 6.....	78
Figura 44	Elevación de Ola para el caso 6 .....	79

Figura 45	Respuesta Heave del OWC para el caso 7 .....	79
Figura 46	Respuesta Pitch del OWC para el caso 7.....	80
Figura 47	Elevación de Ola para el caso 7 .....	80
Figura 48	Respuesta Heave del OWC para el caso 8 .....	81
Figura 49	Respuesta Pitch del OWC para el caso 8.....	81
Figura 50	Elevación de Ola para el caso 8 .....	81
Figura 51	Respuesta Heave del OWC para el caso 9 .....	82
Figura 52	Respuesta Pitch del OWC para el caso 9.....	82
Figura 53	Elevación de Ola para el caso 9 .....	82
Figura 54	Diagrama de barras comparativo de Heave máximo para cada caso simulado.....	83
Figura 55	Diagrama de barras comparativo de Pitch máximo para cada caso simulado.....	83

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	25
Tabla 2 Valores de AR para distintos tipos de buques.....	49
Tabla A1 Matriz de consistencia .....	94

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis desarrollará la investigación en un convertidor de energía de olas tipo Columna de Agua Oscilante (OWC), conocida en español como columna de agua oscilante, que contará con un anclaje mediante un sistema de amarre tipo flexible. La investigación emplea la simulación numérica aplicando la dinámica de fluidos computacional (en sus siglas en inglés CFD), además de ser un aporte en la línea de Energías Renovables. El trabajo está dividido en cuatro capítulos y las conclusiones, como sigue:

El capítulo 1 “Aspectos generales y metodológicos”, comprende la revisión bibliográfica de artículos científicos y tesis de posgrado relacionadas con el sistema de amarres y dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC). Se realiza una revisión de casos similares, de tratamiento de amarres anclados al lecho marino para entregar estabilidad al dispositivo OWC. Se formulan aspectos metodológicos.

El capítulo 2 “Marco Teórico y Conceptual”, comprende los fundamentos teóricos y conceptuales respecto el tema de investigación, específicamente, los convertidores de energía offshore, el caso el OWC flotante, además de los sistemas de amarres y anclaje. Finalmente, se describe las características de las olas, se conceptualizan el CFD, el software empleado, la estabilidad, entre otros.

El capítulo 3 “Desarrollo de la Tesis”, comprende la obtención de la forma geométrica del OWC, los procedimientos de simulación, la ecuación numérica que la gobierna y datos esperados mediante la simulación numérica.

El capítulo 4 “Análisis de resultados y contrastación de hipótesis”, comprende el estudio de 9 casos de OWC flotante con configuraciones de amarres para una respectiva

amplitud y frecuencia de ola regular. Los resultados deben ser discutidos, generando las conclusiones correspondientes.

Se denomina “Conclusiones”, a la contrastación de las hipótesis respecto de los resultados obtenidos en el capítulo 4, se evalúa si la metodología planteada resuelve el problema principal.

Finalmente, son entregadas las “Recomendaciones” que se desprenden del trabajo desarrollado y las “Referencias bibliográficas” utilizadas, que obedecen a las exigencias mínimas de la Unidad de Posgrado FIM y cumplen con la norma APA.



# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS

En este capítulo se presenta una revisión depurada de artículos indexados y tesis de posgrado relacionados a casos de dispositivos de conversión de energía oceánica amarrados o anclados al lecho marino. Siendo de particular interés los dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC en sus siglas en ingles), pues estos son sujetados por plataformas flotantes amarradas para conseguir una estabilidad en su conversión a energía eléctrica, además de plantear el problema central de la tesis, su descripción, objetivos e hipótesis. Para mayor comprensión de la deducción de los aspectos metodológicos, revisar la matriz de consistencia en el Anexo A.1.

### 1.1 Antecedentes de la investigación

**Miskov et al (2023)**, en su artículo, realizaron sus primeras pruebas de prototipo de convertidor de energía de las olas a escala acondicionando el entorno marino a una situación real. El prototipo era un absorbedor puntual con una boya cilíndrica, un sistema mecánico de toma de fuerza con un contrapeso, amarrado al fondo marino como una plataforma de pata tensada (conocida en siglas en inglés como TLP) con tres tensores iguales. Fueron extensos experimentos que midieron y analizaron numerosas características del prototipo. El trabajo se centró en las fuerzas dinámicas en los cabos de amarre, de los cuales se desprendieron algunos datos inesperados y poco comunes. Es bien sabido que los tensores TLP son propensos a una breve pérdida de tensión (el aflojamiento) y que, tras tales eventos, surgen elevadas fuerzas de rotura de corta duración. Resulta intencional, pero también deberse a la subestimación de las fuerzas

dinámicas, reflejo de ello, durante los experimentos se registraron varios incidentes de este tipo. En algunas tormentas graves, donde los vientos cambian bruscamente, las fuerzas de rotura fueron hasta seis veces superiores a la pretensión del tensor. El documento presenta varias grabaciones de las fuerzas dinámicas y del movimiento de la plataforma durante estos incidentes críticos. En el trabajo se presenta un escenario típico en el que se producen y se aborda un análisis sobre el fenómeno. También se dan algunas explicaciones teóricas y predicciones numéricas de las fuerzas dinámicas de los tensores, comparándolas con los resultados experimentales.

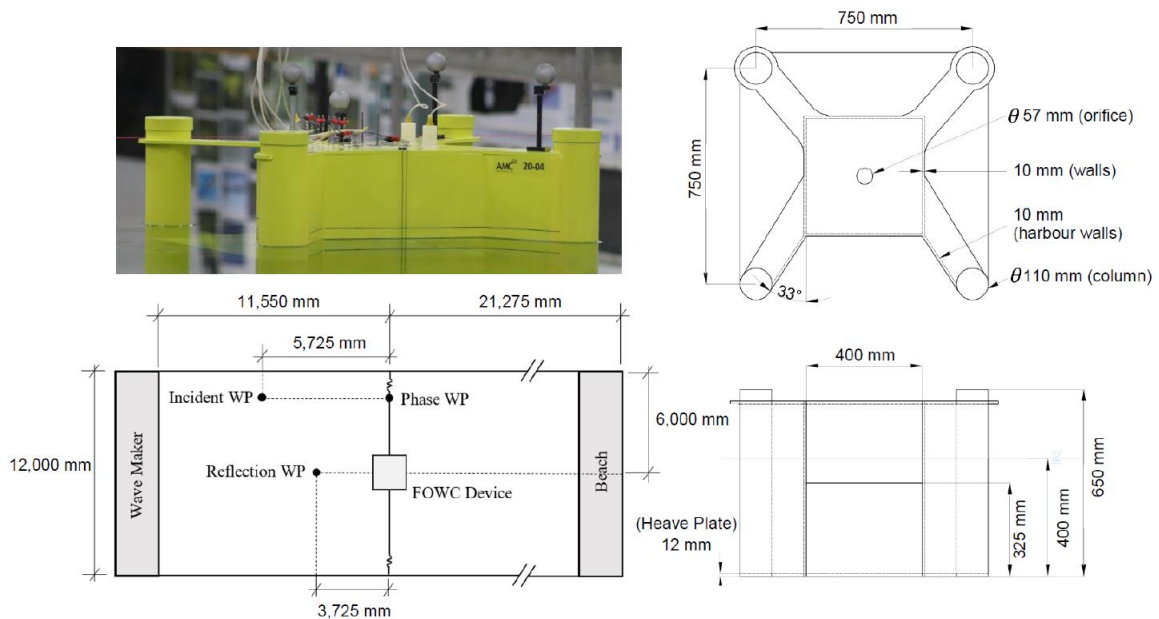
**Dragic et al (2023)**, en su artículo, menciona que la compañía Sigma Energy ha realizado sus primeras pruebas de prototipo de un convertidor de energía undimotriz (llamada en sus siglas en ingles de CME) a escala en un entorno marino real. El prototipo era un absorbedor puntual con una boya circular, un sistema mecánico de toma de fuerza (en sus siglas en ingles de PTO) y un contrapeso, amarrado al fondo marino como una plataforma de pata tensora con tres tensores iguales. Con varios experimentos se evaluaron la potencia y la eficacia del prototipo en el aprovechamiento de energía. Con un registro de 6 puntos, se evaluó la cadencia de la relación de anchura de captura (CWR) desde la absorbida de las ondas a la entregada a la red eléctrica. Asimismo, se determinaron las pérdidas de los principales elementos del sistema PTO, la cuales se definieron, calcularon y clasificaron. Se indicaron las condiciones óptimas de mar y carga que proporcionan los valores máximos de eficiencia. Estas condiciones óptimas se explican físicamente y se discuten en su predicción. Además de los resultados de numerosas pruebas de 20 minutos, el documento presenta los valores medios a largo plazo de las eficiencias, que abarcan todas las pruebas realizadas y tienen en cuenta las probabilidades de diferentes condiciones del mar.

**Pols et al (2021)**, en su artículo, centran su investigación en el modelado de una columna de agua oscilante flotante (en sus siglas en ingles de FOWC) utilizando un código numérico (ANSYS AQWA) basado en la teoría del flujo potencial. Los movimientos de flotación libre predichos por el modelo numérico se validaron con datos experimentales

extrapolados de un dispositivo modelo a escala 1:36 en estados de mar regulares e irregulares, siendo el dispositivo el mostrado en la figura 1.

### Figura 1

*Configuración experimental del Model Test Basin (AMC MTB) del Australian Maritime College (izquierda), con las dimensiones principales del modelo de columna de agua oscilante flotante (FOWC) mostradas a la derecha.*



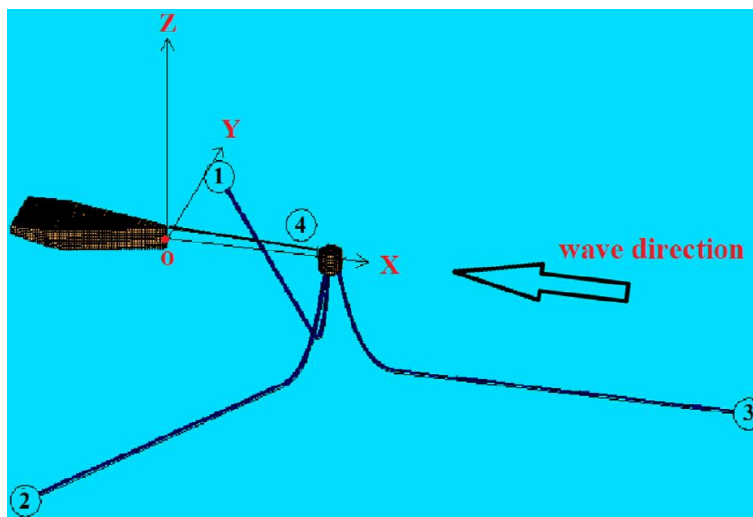
*Nota:* fuente Pols et al (2021)

Tras la validación, se realizó una evaluación de los movimientos del dispositivo cuando se acopló dinámicamente a una disposición de amarre de catenaria de cuatro líneas con diferentes ángulos de ola incidente y estados de mar en condiciones operativas y de supervivencia, incluida la simulación del fallo de una sola línea de amarre. La falta de viscosidad en la modelización numérica llevó a predecir movimientos excesivos cerca de las frecuencias resonantes. Sin embargo, la adición de un coeficiente de amortiguación lineal externo demostró ser un método aceptable para mitigar las discrepancias. Se observó que el ángulo de la onda incidente influencia de forma limitada en las magnitudes de los movimientos de oleaje, cabeceo y oleaje. Además, los resultados obtenidos indicaron que la fuerza de restablecimiento del amarre está controlada por las líneas de amarre de proa bajo las condiciones ensayadas.

**Sun et al (2021)**, en su artículo, proponen un novedoso sistema de convertidor de energía de las olas mediante boyas flotantes (en sus siglas en ingles de FABWEC) que integra la tecnología de captación de energía de las olas mediante absorción multipunto y la tecnología de amarre mediante catenaria monopunto. El contenido de la investigación de este trabajo se centra, principalmente, en la estabilidad y la supervivencia del sistema FABWEC propuesto bajo condiciones nominales. Se realizaron simulaciones numéricas en ANSYS AQWA en la ola de dirección mostrado en la figura 2 y sus validaciones experimentales, para al final comparar los resultados experimentales y simulados.

### Figura 2

*Modelo de simulación del sistema FABWEC en AQWA.*



*Nota:* fuente Sun et al (2021)

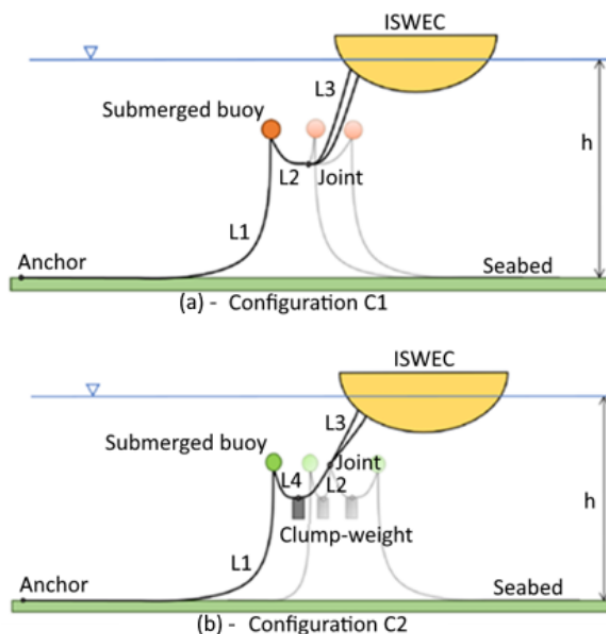
Los resultados muestran que la máxima tensión de amarre se produce cuando el ángulo de inclinación de la cadena de anclaje es de 30 bajo cargas ambientales de 180. En condiciones ambientales extremas el factor de seguridad de la fuerza máxima de amarre es de 9.49, que cumple los requisitos de seguridad reconocidos internacionalmente para el sistema de amarre. El desplazamiento máximo de la plataforma undimotriz en oleaje es de 14.03 m y el ángulo máximo de inclinación es de 6.99. Las curvas de movimiento experimentales coinciden básicamente con los resultados simulados, quiere decir, posición estable y buena capacidad de supervivencia durante los experimentos y la

simulación. Cabe destacar que este estudio proporciona una experiencia beneficiosa para la aplicación práctica y el funcionamiento estable de los convertidores de energía por olas.

**Sirigu et al (2021)**, en su artículo, proponen un diseño adecuado de los sistemas de amarre para los convertidores de energía undimotriz (en sus siglas en ingles de CME) requiere una investigación precisa tanto de las condiciones de funcionamiento como de las condiciones extremas de las olas. Un análisis cuidadoso de estos sistemas para diseñar una configuración de amarre que garantice el mantenimiento de la estación, la fiabilidad, facilidad de mantenimiento y bajo coste, sin afectar a la dinámica del WEC. En este contexto, se ha llevado a cabo una campaña experimental en un prototipo a escala 1:20 del ISWEC (convertidor inercial de energía undimotriz marina), centrada en la influencia de la disposición del amarre en la dinámica del WEC. La influencia de la disposición del amarre sobre las cargas en condiciones de oleaje extremo. Se han diseñado e investigado experimentalmente dos configuraciones de amarre compuestas por múltiples catenarias flojas con boyas sub-superficiales, con o sin contrapesos mostrado en la figura 3.

### Figura 3

*Diseños de amarre ISWEC: (a) C1; (b) C2.*



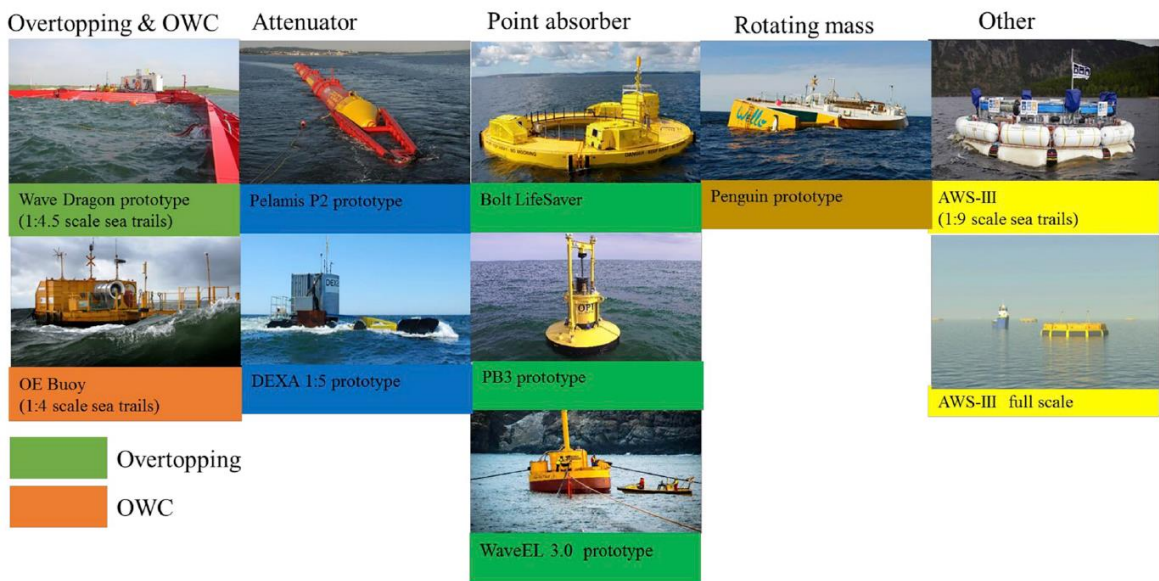
*Nota:* fuente Sirigu et al (2021)

Pruebas en olas regulares, irregulares y extremas para un modelo amarrado del dispositivo ISWEC en la Universidad de Nápoles Federico II. El objetivo fue identificar una

solución de amarre que garantiza tanto el correcto funcionamiento del dispositivo y el transporte de cargas en condiciones de mar extremas, considerando el movimiento de cabeceo y las cargas en la junta rotacional se han considerado indicadores del comportamiento hidrodinámico del dispositivo e impacto de la configuración de amarre en el WEC.

**Xu et al (2021)**, en su artículo, examinan algunos proyectos representativos de convertidores flotantes de energía de las olas (en sus siglas en ingles de CME) en el mundo, incluida la tecnología de captación de la energía de las olas, la historia de su desarrollo, las dimensiones principales y los emplazamientos marinos probados mostrado en la figura 4.

**Figura 4**  
*Proyectos WEC en EE.UU. y Europa.*



*Nota:* fuente Xu et al (2021)

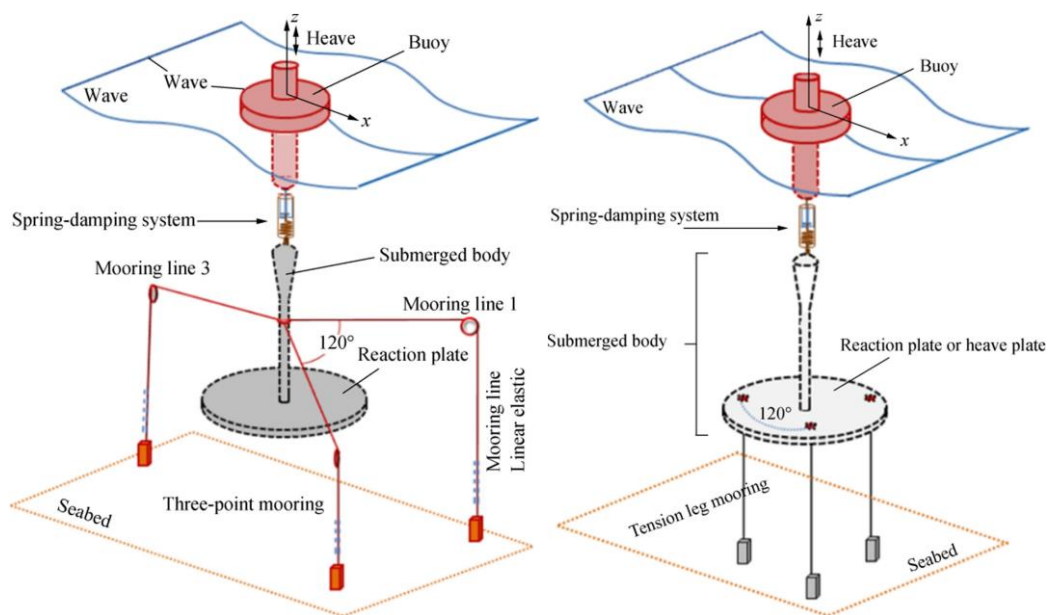
El diseño del sistema propone un procedimiento de diseño del sistema de amarre para el CME, que incluye la introducción de códigos de diseño relacionados y métodos de análisis de amarre. Realiza una revisión exhaustiva del diseño del sistema de amarre en los actuales proyectos de CME. Se presentan diferentes materiales de amarre y recomienda sobre el diseño de amarre los más adecuado en función de las dimensiones y los principios de funcionamiento del CME. Demuestran, además, que el cable sintético

elástico tiene un gran potencial en la aplicación del sistema de amarre de los CME, y el sistema de amarre híbrido podría ser una buena solución para el problema del mantenimiento de la estación del CME.

**Berenjkoob et al (2021)**, en su artículo, se investigó la influencia de dos tipos de sistemas de amarre en el comportamiento hidrodinámico de un convertidor de energía de las olas (en sus siglas en ingles de CME) flotante de dos cuerpos en la figura 5.

### Figura 5

*Configuración del sistema TPM (Izquierda) y de un TLM (derecha) para los modelos de WEC.*



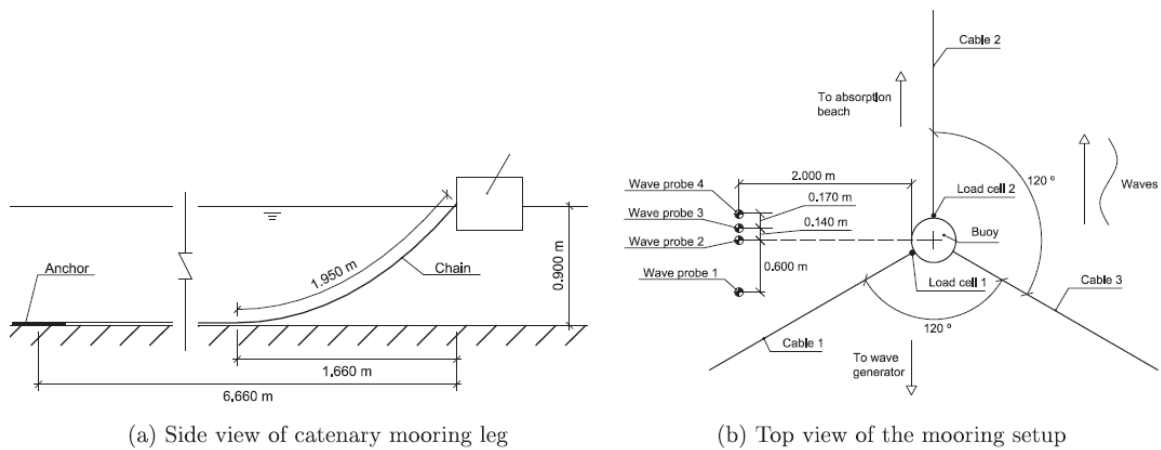
*Nota:* fuente Berenjkoob et al (2021)

También investigó los efectos de los parámetros físicos del sistema de amarre sobre la cantidad de potencia extraíble de las olas incidentes en el dominio de la frecuencia. El convertidor modelado constaba de un cuerpo flotante (una boya), un sumergido con dos sistemas de amarre y un sistema de acoplamiento para dos cuerpos. El sistema de acoplamiento era un sistema de toma de fuerza simplificado que se modeló mediante un modelo lineal de muelle-amortiguador. El sistema de amarre de la pata tensora podía afectar drásticamente al del cuerpo sumergido del modelo y aumentar el desplazamiento relativo entre los dos cuerpos. Los efectos del parámetro de rigidez del sistema de amarre sobre la absorción de potencia superaban a los de la fuerza del tensor de pretensión.

**Palm et al (2021)**, en su artículo, mencionan que los convertidores de energía de las olas (en sus siglas en ingles de CME) flotantes que operan en la región de resonancia se ven fuertemente por las no linealidades que surgen de la interacción entre las olas, del movimiento y las restricciones del amarre. Por lo tanto, para calcular el movimiento restringido del CME se necesita un método que tenga en cuenta estos efectos. En este artículo se presenta un método para análisis de amarre acoplado que utiliza un modelo bifásico de Navier-Stokes (VOF-RANS) y un modelo de elementos finitos de alto orden del amarre. El método se valida con mediciones experimentales de una boya cilíndrica en olas regulares, amarrada con tres cables de amarre catenarios (como es mostrado en la figura 6). En general, los resultados experimentales y computacionales, en lo que respecta a los movimientos de la boya y las fuerzas de amarre, del modelo numérico acoplado recrea con precisión la fuerte dependencia de la altura de ola de los operadores de amplitud de respuesta observados en los experimentos.

**Figura 6**

*Descripción geométrica del montaje experimental y la configuración del cable de amarre.*



*Nota:* fuente Palm et al (2021)

**Chen, H. (2020)**, en su tesis de maestría, se centra en la tecnología de conversión de energía de las olas (WEC) como fuente renovable de energía y los desafíos asociados con el sistema de amarre de estos dispositivos. Se investiga el rendimiento de los sistemas WEC con diferentes sistemas de amarre elástico en términos de vida útil por fatiga y absorción de energía. Se utiliza el caso de estudio WaveEL, un WEC desarrollado por



Waves4Power. El autor resalta que hay una búsqueda de soluciones alternativas para la demanda de energía, específicamente en el desarrollo de tecnologías de energía de las olas. Se destaca que las olas son una fuente de energía renovable con un alto potencial y una mayor constancia y previsibilidad en comparación con la energía solar o eólica. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de energía de las olas aún está en etapas iniciales en comparación con otras fuentes de energía renovable.

Se menciona que más de 250 empresas están invirtiendo en el desarrollo de sistemas de conversión de energía de las olas, y la mayoría de ellos todavía están en etapa de prototipo, requiriendo pruebas intensivas para garantizar su confiabilidad. Se destacan los desafíos asociados con el sistema de amarre de estos dispositivos, especialmente para dispositivos flotantes de absorción puntual, que están diseñados para responder a las fuerzas de las olas y, por lo tanto, estar sujetos a grandes cargas repentinas que reducen la vida útil de los sistemas de amarre y aumentar los costos de diseño. Esto conlleva a una necesidad de desarrollar un sistema de amarre más confiable para los dispositivos de absorción puntual flotantes, que permita grandes movimientos de elevación, pero que también evite daños por fatiga en las líneas de amarre. Se propone el uso de componentes de amarre elásticos (tether) para reducir las cargas y mejorar la fiabilidad de los sistemas de amarre.

Se menciona, a su vez, que hay varias soluciones y desarrollos en los últimos años que buscan abordar el desafío contradictorio de los sistemas de amarre de WEC, incluyendo componentes de amarre elásticos agregados a las líneas de amarre. Se plantea la necesidad de evaluar el impacto de estos componentes en el rendimiento mecánico y de energía de los sistemas de amarre elásticos en dispositivos WEC flotantes de absorción puntual. El objetivo es mejorar el rendimiento y la viabilidad comercial de los sistemas WEC, ya que el movimiento cíclico del WEC bajo cargas oceánicas irregulares produce daño por fatiga en las líneas de amarre. Para abordar esto, se propone la incorporación de componentes de amarre elásticos (tether) que reducen la gama de fuerzas que actúan sobre las líneas de amarre y absorben las cargas repentinas.

El estudio examina dos configuraciones de amarre: un sistema de amarre de 3 patas con boyas flotantes para reducir el estrés en las líneas de amarre y un sistema de amarre de 2 patas con mayor profundidad de diseño para aprovechar la elasticidad de las líneas de amarre.

Se realizan simulaciones hidrodinámicas-estructurales para evaluar el rendimiento de las diferentes configuraciones de amarre bajo condiciones operativas. Se obtienen los movimientos verticales del dispositivo WEC y las fuerzas en las líneas de amarre, que se utilizan para calcular la vida útil por fatiga del sistema de amarre y la energía absorbida por el WEC. Por consiguiente, se describe un estudio sobre sistemas de energía de las olas (WEC) de absorción puntual flotantes y el impacto de la incorporación de componentes de amarre elásticos (tether) en el rendimiento del sistema. Se desarrollaron modelos numéricos para los componentes de amarre elásticos y se realizaron simulaciones de diferentes sistemas de amarre elásticos bajo diversas condiciones de carga. Se compararon los resultados de diferentes configuraciones de amarre con y sin el componente de amarre elástico. Se concluyó que el componente de amarre elástico aumenta la vida útil por fatiga del sistema de amarre sin afectar negativamente el rendimiento de energía del sistema WEC. Además, se llevó a cabo un análisis de costos que sugiere que la implementación del componente de amarre elástico disminuye el costo nivelado de la energía (LCoE) en un 7% a 14%, haciendo que el sistema sea más económicamente viable si el costo total de desarrollo, fabricación, instalación y desmontaje del componente de amarre es menor a 1.37 millones de euros por un sistema WEC. Los resultados muestran que la incorporación del componente de amarre elástico mejora significativamente la vida útil por fatiga del sistema. Esto tiene un gran potencial para hacer que los sistemas WEC sean más comercialmente viables al aumentar su durabilidad y eficiencia en la absorción de energía de las olas.

**Howey, B. (2020)**, en su tesis de doctorado, estudia sobre la posibilidad de reducir los costos de extracción de energía de las olas mediante la interconexión de dispositivos en configuraciones de granjas (arrays). Se abordaron los principios fundamentales de

funcionamiento de la tecnología OWC (Columna de Agua Oscilante) y se proporcionó una descripción de los procedimientos de construcción y validación utilizados para crear un modelo físico y numérico a escala. Se explicó la técnica de calibración del orificio utilizada para aproximar posteriormente las condiciones de flujo del PTO (Power Take-Off) a escala del modelo, y se brindó la justificación para el uso de un régimen de flujo incompresible.

El enfoque en comprender los principios operativos clave de la tecnología OWC es fundamental para diseñar y optimizar estos dispositivos con miras a su aplicación en el mundo real. Comprender cómo estos dispositivos capturan la energía de las olas y la convierten en energía utilizable es esencial para mejorar su rendimiento y eficiencia. La construcción y validación minuciosa del modelo físico y numérico a escala es de suma importancia para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Al replicar meticulosamente las características clave del dispositivo OWC en una escala menor, se realizan experimentos que proporcionen información valiosa sobre el comportamiento y rendimiento del sistema.

La técnica de calibración del orificio utilizada para aproximar las condiciones de flujo del PTO del modelo representa un paso crítico en el proceso. Una calibración precisa permite establecer una correlación confiable entre el comportamiento del modelo y la respuesta del PTO del mundo real. Esto garantiza que los experimentos realizados en el modelo a escala proporcionen datos significativos y aplicables para el sistema OWC real. Asimismo, la justificación para emplear un régimen de flujo incompresible refuerza la validez de los resultados del modelo. Esta elección se basa en un razonamiento sólido y asegura que los experimentos se mantengan consistentes con el comportamiento de un dispositivo OWC real. Al optar por un régimen de flujo incompresible, los investigadores se centran en parámetros relevantes que afectan directamente el rendimiento del OWC sin introducir complejidades innecesarias.

Se ha realizado una discusión crítica acerca de los orígenes de las condiciones ambientales probadas, el diseño físico, los métodos de medición y las calibraciones, y se han cuantificado los niveles de incertidumbre para analizar los resultados que caracterizan

tanto el dispositivo individual como las interacciones hidrodinámicas dentro del arreglo. Las pruebas de decaimiento y los resultados de RAO (Respuestas de Amplitud de Frecuencia) para olas regulares han demostrado diferencias insignificantes debido a la interacción hidrodinámica del conjunto. Sin embargo, con la ayuda del modelo numérico, se ha atribuido una disminución brusca en la configuración del conjunto a una onda estacionaria en la cuenca. Esto sugiere que, en un escenario de mar abierto, no se esperaría ver tales disminuciones en la respuesta de elevación o rendimiento. Se midió una mejora máxima en el rendimiento del 10% debido a los efectos del conjunto, que sirvió como referencia a partir de la cual se compararon los conjuntos interconectados. Los resultados de las pruebas de decaimiento y de RAO para olas regulares mostraron que los conjuntos interconectados tienen una frecuencia natural de elevación más alta que el caso de dispositivos individualmente amarrados. Esto generó un beneficioso desfase de fase de la columna de agua en relación con el dispositivo y, por lo tanto, un rendimiento máximo mejorado en un 211%. Se encontraron resultados similares en las pruebas realizadas en estados operativos del mar. Se observó que la mejora en el rendimiento no estaba relacionada con el nivel de interconexión, sin embargo, sí afectaba la distribución de la potencia dentro del conjunto. La atenuación de la potencia entre la parte frontal y trasera de los conjuntos se mostró inversamente proporcional al nivel de interconexión para las configuraciones probadas. Los resultados se contextualizaron al predecir el rendimiento anual de energía para cada conjunto en Leixões, Portugal, donde se demostró que los conjuntos interconectados proporcionan un aumento del 75%.

Se concluye que las interconexiones alteraron la frecuencia resonante del sistema, generando una diferencia de fase beneficiosa entre la columna de agua y el dispositivo. Aunque el rendimiento general del array no se vio afectado significativamente por el nivel de interconexión, hubo una variación espacial en la distribución de la energía dentro del array. Además, se encontró que las líneas de interconexión mostraban resultados beneficiosos en términos de fatiga en condiciones operativas, pero en estados marítimos extremos algunas líneas experimentaron cargas extremas que requerirían materiales más

resistentes y posiblemente mayores costos. El estudio demuestra el potencial beneficioso de los arrays de WEC interconectados, lo que sugiere que es una opción prometedora para futuras investigaciones en la reducción de costos de extracción de energía de las olas.

**Lopez-Chavez, R. A. (2022)**, en su tesis de doctorado, describe el aumento de la demanda mundial de energía requiere el uso de recursos renovables para reducir la huella de carbono. Entre las tecnologías limpias para generar energía se encuentran la eólica, solar y la energía marina. La energía de las olas es una opción con un enorme potencial teórico, pero los convertidores de energía de las olas (WECs) aún no han alcanzado un nivel comercial y de diseño deseado debido a su alto costo y etapa actual de desarrollo. Analiza la confiabilidad de los WECs para comparar diferentes tipos de convertidores y identificar los componentes más críticos con mayor tasa de fallos. Aunque tiene un gran potencial, aún no se ha desarrollado completamente debido a barreras como el alto costo de inversión en comparación con otras fuentes de energía renovable. Uno de los principales desafíos es el costo de operación y mantenimiento de los convertidores de energía de las olas. Muchos convertidores se encuentran en fases experimentales sin una sólida propuesta comercial debido a la necesidad de una mejor comprensión de los principios de funcionamiento disponibles. Se requieren despliegues a gran escala y consolidación tecnológica para demostrar con éxito esta tecnología.

Hay diferentes tipos de convertidores de energía de las olas diseñados para distintas ubicaciones, como la costa, cercanos a la costa y en aguas profundas. Aunque la diversidad tecnológica permite aprovechar este recurso en varias ubicaciones, no hay un consenso sobre una tecnología en particular, lo que ha llevado a una evolución lenta de la tecnología de energía de las olas. Empresas como Pelamis Wave Power, Aquamarine y Wavegen han intentado tener éxito en el campo, pero han tenido dificultades debido a problemas de confiabilidad y altos costos de capital y operación. Los desafíos principales de la energía de las olas han sido identificados y agrupados en el proyecto SI Ocean y listados por Mueller. Estos desafíos incluyen la previsibilidad, la fabricabilidad, la facilidad de instalación, la operabilidad, la supervivencia, la confiabilidad y la asequibilidad. La

confiabilidad de los componentes es un aspecto transversal que aborda estos desafíos. Sin embargo, la falta de datos operativos entre los diferentes principios de funcionamiento presenta su propio desafío. Aunque es difícil obtener datos, utilizar otras fuentes y adaptarlos para desarrollar un análisis que identifique componentes críticos que requieren un análisis más detallado ayudará al desarrollo y despliegue de WECs a gran escala.

Para ello, se han desarrollado WECs genéricos y se han adaptado tasas de fallos de otras industrias (por ejemplo, petróleo y gas, y eólica) al entorno de los WECs. Luego, se ha calculado la tasa de fallos del sistema completo. La investigación ha revelado que el sistema hidráulico PTO es el tipo de PTO con la tasa de fallos más alta, principalmente debido a su mayor número de componentes, mientras que el accionamiento directo es el subconjunto con la tasa de fallos más baja. Asimismo, se encontró que la tasa de fallos del subconjunto de estructura es considerablemente menor cuando el WEC está instalado en la costa, ya que se utilizan materiales como el concreto que no están expuestos a condiciones extremas como en alta mar. Además, estos convertidores no requieren sistemas de amarre y su estructura es menos compleja, lo que disminuye la tasa de fallos general. En base al análisis de criticidad y modos de fallo, se identificó que los sistemas hidráulicos tienen componentes con un valor de criticidad más alto, lo que sugiere que si estos componentes fallan, la generación de electricidad se detiene y se requiere un mantenimiento urgente. Por otro lado, un PTO más simple, como el accionamiento directo, tiene un menor número de componentes con valores de criticidad más altos, lo que indica una menor tasa de fallos y componentes menos críticos.

Se concluye que el análisis desarrollado en esta tesis se realiza con fines de comparación; los datos utilizados fueron obtenidos de bases de datos con valores adquiridos en un entorno diferente al de funcionamiento de los convertidores de energía de las olas (WECs). Es fundamental contar con una base de datos disponible con valores de tasas de falla de componentes que operen en un entorno real para llevar a cabo un análisis más realista. Después de comparar todos los convertidores de energía de las olas en esta tesis, se demostró que los subsistemas más críticos son el PTO hidráulico y las

estructuras que operan en alta mar. Los PTO de transmisión directa tienen una tasa de falla mucho menor que los PTO hidráulicos. Al comparar los PTO hidráulicos y de transmisión directa genéricos, se encontró una diferencia de hasta el 50%. Los convertidores de mayor tasa de falla fueron el atenuador, el absorbedor de punto hidráulico y los convertidores de oscilación de ola.

Un PTO más simple (en términos del número de subensamblajes) tiene un impacto significativo en la tasa de falla total. En general, se encontró que los PTO hidráulicos tienen hasta un 100% más de subensamblajes identificados y al menos un 25% más. Aunque esto varía de un convertidor a otro, esta tendencia se encontró en todos los WECs analizados. La correcta ubicación y diseño del WEC es crítica, ya que los componentes y materiales afectan la confiabilidad general. Los WEC instalados en la costa tienen tasas de falla y componentes críticos significativamente más bajos que aquellos desplegados en alta mar. Esta investigación presenta algunas limitaciones, ya que los datos provienen de bases de datos que no representan exactamente el entorno operativo de los WECs y se realizó en WECs genéricos, por lo que los resultados varían para convertidores específicos. Sin embargo, se demuestra que los convertidores con menos componentes y sin PTO hidráulicos tienen estadísticamente una mayor probabilidad de sobrevivir en condiciones marinas severas o cuando operan en la costa tienen menos riesgo.

**Chen, M. (2019)**, en su tesis de doctorado, estudia sobre la estimación del amortiguamiento inducido por líneas de amarre en estructuras flotantes utilizadas en la exploración de petróleo y gas en aguas profundas. Se destaca la importancia de la fuerza de amortiguación de los sistemas de amarre para frenar el movimiento de deriva de la estructura flotante y se menciona que se prefiere el análisis acoplado para calcular la respuesta del sistema de amarre en estructuras offshore. El objetivo del estudio es lograr una mejor comprensión de la estimación del amortiguamiento inducido por las líneas de amarre. Se identifica que las fuerzas de arrastre normales a las líneas de amarre, debido al movimiento de estas a través del agua, son la principal fuente de amortiguamiento hidrodinámico de las líneas. Se desarrolla un método de disipación de energía basado en

la respuesta dinámica de las líneas de amarre obtenida mediante Orcaflex. La validación del método se realiza a través de pruebas con dos tipos de líneas de amarre en aguas poco profundas y aguas profundas, mostrando un buen acuerdo con los resultados publicados, pero con algunas excepciones.

Se realiza un análisis no dimensional debido a la complejidad del amortiguamiento inducido por las líneas de amarre. Los efectos se dividen en tres grupos: los relacionados con cambios geométricos de las líneas, los relacionados con las fuerzas de arrastre directamente y los efectos de rigidez y fricción del lecho marino, que se consideran insignificantes. Para investigar experimentalmente el comportamiento de la cadena en movimiento en el agua, se realizan pruebas de modelo de las características de amortiguación de una sola línea de cadena a través de pruebas de oscilación con diferentes parámetros. Se investigan las variaciones del coeficiente de arrastre con diferentes números de Reynolds y KC, mostrando una disminución del coeficiente con el aumento del número de KC, excepto en casos de bajo KC. Se identifica que los segmentos de cadena cerca del fairlead y el área de toque con el fondo son los más sensibles al coeficiente de arrastre.

La validación del método se realiza comparando los resultados de pruebas experimentales con simulaciones numéricas. Se logra un buen acuerdo entre los cálculos numéricos y las mediciones experimentales, lo que indica que el método propuesto se aplica para estimar el amortiguamiento de las líneas de amarre. También se estudian los efectos de la amplitud y frecuencia de la oscilación. Para concluir, la importancia del estudio de amortiguamiento en líneas de amarre para estructuras flotantes en aguas profundas. Se destaca la necesidad de un análisis acoplado para estimar los movimientos de la estructura flotante y calcular la respuesta del sistema de amarre. La complejidad del amortiguamiento inducido por las líneas de amarre es influenciada por varios factores, incluyendo las configuraciones de las líneas y las condiciones ambientales.

Se comparan métodos de análisis cuasiestáticos y de análisis dinámicos en el dominio temporal para evaluar el amortiguamiento inducido por las líneas de amarre. Se



investigan las relaciones entre los parámetros y el amortiguamiento de las líneas de amarre en diferentes situaciones, como oscilaciones de baja y alta frecuencia en aguas poco profundas y aguas profundas. Se llevan a cabo pruebas experimentales para estudiar la variación del amortiguamiento inducido por las líneas de amarre con diferentes excitaciones, incluyendo oscilaciones de baja frecuencia, oscilaciones de baja frecuencia superpuestas con movimientos armónicos de baja frecuencia y oscilaciones de baja frecuencia superpuestas con movimientos aleatorios de baja frecuencia. Se analiza la influencia de la velocidad de corriente en el amortiguamiento de las líneas de amarre. Además, se realiza una comparación entre los resultados de las pruebas experimentales y las simulaciones numéricas. Se destaca la importancia del coeficiente de arrastre para calcular la fuerza en la línea de amarre y se presenta una fórmula para estimar el coeficiente de arrastre en diferentes situaciones de oscilación.

En resumen, el estudio muestra la complejidad del amortiguamiento inducido por las líneas de amarre y la influencia de varios factores en este fenómeno. Se resaltan las relaciones entre los parámetros y el amortiguamiento de las líneas de amarre, lo que contribuye a una mejor comprensión de este proceso para aplicaciones en ingeniería offshore.

## **1.2 Identificación y descripción del problema de estudio**

La energía undimotriz como fuente de energía limpia y fiable es hoy un tema activamente estudiado en la búsqueda de una sociedad ecológicamente sostenible. En 2014, el consumo mundial de energía eléctrica fue de 19800 TWh/año, con un recurso mundial de energía de las olas de la misma magnitud. Sin embargo, las estimaciones del potencial de energía undimotriz técnicamente disponible a escala mundial suelen situarse entre 2000 y 4000 TWh/año. El asunto en cuestión es que es técnicamente disponible pero cómo se define. La industria de la energía de las olas aún está evolucionando, y las estimaciones del coste de la energía a largo plazo son, por tanto, volátiles. Esto hace difícil determinar qué zonas soportan instalaciones comerciales de energía undimotriz. Los

futuros avances tecnológicos y/o cambios socioeconómicos podrían permitir el uso de una porción mayor (o menor) del recurso total de energía undimotriz.

Según el informe anual de 2015 de Ocean Energy Systems prevé 337 GW de potencia instalada procedente de la energía oceánica (incluidas las olas, las corrientes mareomotrices gradientes de salinidad y energía térmica oceánica) para 2050. La contribución de la energía de las olas y mareomotriz solo en Europa debería ser de 100 GW. En junio de 2016, la capacidad instalada de energía undimotriz en Europa era de 5MW, con otros 7MW procedentes de las corrientes marinas. Solo observando Europa, queda mucho camino por recorrer, más aún que en Perú este tipo de iniciativas es nula. Sin embargo, la actual hoja de ruta actual del Foro de Energía Oceánica sugiere que el despliegue industrial de dispositivos de energía undimotriz se acelerará a partir del año 2030. La energía undimotriz es el sistema energético que contribuye en la transformación de la sociedad para que deje de depender de los combustibles fósiles. Se debe tener en cuenta la energía de las olas como una fuente de energía complementaria, combinarse con otras de la familia de las energías renovables: solar, eólica y mareomotriz. mareomotriz, sin olvidar la consolidada industria hidroeléctrica.

Los amarres son un componente clave para la viabilidad técnica de los proyectos de energía undimotriz. De hecho, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) incluye los amarres/fundaciones duraderos y rentables entre las seis áreas prioritarias de mejora tecnológica para el sector de la energía undimotriz. Los amarres de un convertidor de energía undimotriz deben cumplir las mismas exigencias que otras estructuras marinas. Una estructura instalada permanentemente (con vida útil de 25 años) y diseñarse para resistir la ola máxima prevista en 100 años, que corresponde a olas de más de 20 m de altura en algunos lugares. Los convertidores de energía de las olas (en sus siglas en ingles WEC) suelen instalarse en profundidades de agua de < 100 m, por lo que la altura de ola de diseño es potencialmente una parte sustancial de la profundidad del agua. A esto hay que añadir las cargas de las corrientes oceánicas y las variaciones de las mareas en el lugar de instalación. Es evidente que un WEC amarrado

estará sometido a grandes influencias de las olas en condiciones extremas. Los amarres necesitarán la suficiente flexibilidad para soportar grandes desplazamientos, o bien tener la suficiente resistencia para soportar las cargas hidrodinámicas a la vez que limitan el movimiento estructural.

La tarea de diseñar el mejor amarre se reduce entonces a encontrar el mejor compromiso entre flexibilidad y resistencia del material para los casos de carga de diseño. Además de la función de mantenimiento de la estación, los amarres desempeñan un papel fundamental en el diseño de muchas oceánicas, ya que influyen en la amplitud de la respuesta hidrodinámica. Por lo tanto, el diseño del amarre está estrechamente relacionado con la eficiencia de la producción de energía y se debe tener en cuenta en una fase muy temprana del diseño y desarrollo del concepto de oceánicas. Las consideraciones sobre el diseño del amarre se tratarán con más detalle en el duro entorno de alta mar donde representa un reto para el diseño de amarres, así como también en empresas maduras como la industria del petróleo y el gas. Los estudios sobre los fallos muestran que la mayoría de los fallos se producen en los diez primeros años de funcionamiento. Otro estudio de los incidentes de amarre, centrada en la plataforma continental noruega entre 2000 y 2013, muestra que el 54% de los 26 incidentes marítimos investigados se debieron a la rotura de cabos de amarre. El informe enumera a continuación las causas técnicas más comunes de los fallos de los cables:

- Exceso de carga en las líneas debido a cargas dinámicas bruscas o a condiciones meteorológicas inesperadas.
- Fracturas por fatiga en las cadenas.
- Daños en las líneas de fibra.

Respecto a las cargas de rotura, éstas se producen en los cables por varias razones. Sin embargo, suelen estar asociadas a la holgura del cable y el chasquido repentino que se produce al volver a tensar el cable. Existen informes de cargas bruscas que causan daños también en pruebas de campo de energía undimotriz. En la norma

actual, DNV-GL recomienda que se eviten las condiciones de holgura y chasquido o se mantengan por debajo de una probabilidad mínima de ocurrencia. Es sugerible reevaluarse para las aplicaciones de energía undimotriz, donde el rango dinámico esperado de la respuesta de movimiento del casco es mayor que en estructuras convencionales como buques o plataformas. Un enfoque alternativo es tratar las cargas repentinas como cualquier otra carga, pero evaluarlas con herramientas para predecir correctamente su aparición, magnitud y duración. Poder predecir y mitigar las cargas de rotura en el procedimiento de iteración del diseño sería muy beneficioso en la búsqueda de un sistema de amarre óptimo para los Convertidores de energía de olas (WEC) a energía eléctrica.

### **1.3 Formulación del problema**

#### **1.3.1 Problema General**

¿Permitirá el sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante con dos flotadores dar estabilidad a la generación eléctrica?

#### **1.3.2 Problemas Específicos**

Así también, los problemas específicos se formulan con las siguientes

1. ¿Cuál es la geometría óptima para una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y qué tipos de amarres son más adecuados para dar estabilidad del sistema durante la generación eléctrica?
2. ¿Cómo se mide y predice el comportamiento del movimiento vertical (Heave) y el balanceo (Pitch) de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y diferentes tipos de amarres bajo la influencia de cambios hidroceanográficos, utilizando técnicas de simulación numérica para dar estabilidad a la generación eléctrica?

### **1.4 Justificación e importancia**

La simulación numérica del sistema de amarre para convertidores de energía de las olas a eléctrica de tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) es un área de investigación

importante debido a su potencial para impulsar la eficiencia y fiabilidad en la generación de energía renovable proveniente del océano.

Se justifica por la necesidad de desarrollar y optimizar sistemas de amarre para convertidores OWC en la búsqueda de fuentes de energía sostenible y limpia. Los convertidores OWC aprovechan el movimiento del oleaje para generar electricidad, siendo una prometedora alternativa energética. Sin embargo, la estabilidad y la eficiencia de estos convertidores están intrínsecamente ligadas al diseño del sistema de amarre, que debe resistir las fuerzas marítimas cambiantes y mantener la integridad estructural del convertidor para asegurar una generación eléctrica confiable y constante.

Es importante la simulación numérica pues se presenta como una herramienta fundamental en este ámbito, ya que permite modelar y evaluar virtualmente distintas configuraciones de amarre en condiciones marítimas variadas. Esto posibilita analizar cómo diferentes diseños de amarre afectan la estabilidad, el rendimiento y la eficiencia en la generación de electricidad a partir de las olas. Al realizar simulaciones, se exploran múltiples escenarios y ajustar parámetros de diseño para optimizar la respuesta del sistema de amarre, minimizando los impactos adversos en la generación eléctrica.

También es importante la simulación numérica en el ahorro tiempo y costos asociados comparado con pruebas físicas en entornos marinos reales. Ofrece la flexibilidad de modificar variables y condiciones de forma controlada, permitiendo un análisis detallado de cómo cada componente del sistema de amarre influye en la estabilidad y eficiencia del convertidor OWC.

El avance en esta investigación no solo tiene implicaciones en la producción de energía renovable, sino también en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la dependencia de fuentes no renovables. Además, contribuye al desarrollo tecnológico en el campo de las energías renovables, posicionando a la energía de las olas como una alternativa más viable y competitiva en el panorama energético global.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar el sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores para dar estabilidad a la generación eléctrica.

### **1.5.2 Objetivo Específico**

Como objetivos específicos, se tienen:

1. Caracterizar la geometría de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y tipos de amarres para aplicación de simulación numérica.
2. Evaluar el comportamiento del Heave y Pitch de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y tipos de amarres afectada por los cambios hidroceanográficos mediante simulación numérica.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis General**

El sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores dará estabilidad a la generación eléctrica.

### **1.6.2 Hipótesis Específico**

Como objetivos específicos, se tienen:

1. La geometría caracterizada de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores, junto con tipos específicos de amarres, influye significativamente en dar estabilidad a la generación eléctrica, según la simulación numérica.
2. El comportamiento del Heave y Pitch de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores influye en la estabilidad de generación eléctrica en respuesta a cambios hidroceanográficos mediante simulación numérica.

## **1.7 Variables, dimensiones e indicadores**

A continuación, la operacionalización de las variables.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
<b>Variable dependiente (Y):</b> Y1: Estabilidad de la generación eléctrica	Es una característica para asegurar el funcionamiento confiable y seguro del sistema de conversión de energía oceánica a eléctrica de la OWC flotante con amarres.	Es la medición cualitativa por observación de la simulación de la condición de estabilidad de la OWC con dos flotadores y configuración de amarre para obtener los menores indicadores de Heave y Pitch para garantizar la mejor conversión de energía oceánica a eléctrica.	Configuración de amarre	<ul style="list-style-type: none"> <li># de cuerdas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4, 6 y 8 cuerdas.</li> </ul>
<b>Variable independiente (X):</b> X1: Simulación numérica de sistema de amarre de OWC con dos flotadores	Es la simulación numérica del conjunto del sistema de conversión de energía oceánica OWC con dos flotadores y las configuraciones de amarres sometido a olas incidentes que afectan la estabilidad del OWC y, por ende, la conversión y generación eléctrica del sistema.	La medición cuantitativa de desplazamientos verticales en el OWC no superiores a 2 metros y ángulos de inclinación no mayores a 2 grados bajo condiciones de cambios de amplitud y longitud de ola.	Desplazamiento angular de cabeceo OWC con dos flotadores y amarres  Desplazamiento vertical de la OWC  Ola  Simulación numérica de amarre	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pitch</li> <li>Heave</li> <li>Amplitud de la ola</li> <li>Velocidad de ola</li> <li>Tipo de plataforma flotante</li> <li>Tipo de enmallado</li> <li>Característica de cuerda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grados</li> <li>Metros</li> <li>Metros</li> <li>Metros/segundo</li> <li>Nominal: Tipo</li> <li>Nominal: Tipo</li> <li>Resistencia infinita</li> </ul>

## **1.8 Unidad de análisis**

El presente trabajo analizará un convertidor de olas tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) con forma de cilindro inspirado de Wang, H., & Falzarano, J. (2017), con dos flotadores cúbicos a criterio del suscrito, que será anclado mediante un sistema de amarre tipo flexible.

## **1.9 Fuentes de información**

Las fuentes de información son:

- Esquemas referenciales de convertidor de ola tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) y sistemas de amarres de la literatura de U.S. Army Corps of Engineers et al (2005).
- Norma de Naval Facilities Engineering Command-NAVFAC.
- Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings.
- Normas Técnicas Hidrográficas № 24.
- Teoría de onda de Stoke de 2° orden.
- Manual de uso del Software AQWA de Ansys.

## **1.10 Tipo y nivel de investigación**

### **1.10.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada basada en ingeniería marina y computacional. Esta investigación emplea modelos matemáticos y software especializado para simular condiciones oceánicas y evaluar virtualmente el comportamiento del sistema de amarre. Se enfoca en analizar la interacción entre las fuerzas del oleaje y el diseño del amarre, considerando configuraciones y condiciones ambientales variables. Esta investigación busca optimizar el diseño del amarre para garantizar la estabilidad estructural y ventajas favorables en el aprovechamiento de la energía eléctrica del convertidor de energía de las olas, permitiendo una generación eléctrica eficiente y confiable en entornos marítimos desafiantes.



### **1.10.2 Nivel de investigación**

El nivel de investigación sería exploratoria, debido a la novedad y complejidad del tema. Este tipo de investigación es apropiado cuando se aborda un área poco estudiada o emergente, como es el caso de la tecnología OWC combinada con dos flotadores y su sistema de amarre. Actualmente, hay escasa literatura específica sobre cómo diferentes sistemas de amarre afectan la estabilidad y eficiencia de estas configuraciones, lo que requiere una investigación inicial para identificar comportamientos clave y relaciones.

El propósito de esta investigación exploratoria es obtener una comprensión preliminar del comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de ola. Se realizarán revisiones de literatura, simulaciones numéricas y caracterización de la geometría del sistema para observar los efectos de diferentes tipos de amarres. Esto ayudará a identificar patrones, formular hipótesis y establecer un marco para investigaciones futuras más detalladas. Al caracterizar la interacción entre los flotadores y los sistemas de amarre, se busca sentar las bases para optimizar la estabilidad y eficiencia de la generación eléctrica en sistemas OWC, ofreciendo una base sólida para estudios posteriores más específicos y exhaustivos.

### **1.11 Método de diseño de la investigación**

El método de diseño cuantitativo y cualitativo para la simulación numérica del sistema de amarre de convertidores de energía de las olas tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y con sistema de amarre tipo flexible en la estabilidad de conversión de energía oceánica e involucra un enfoque integral.

El diseño cuantitativo implica el uso de modelos matemáticos y herramientas de simulación numérica para cuantificar y analizar aspectos específicos del sistema de amarre. Esto incluye la evaluación precisa de parámetros técnicos, como tensiones y características hidrodinámicas, a través de simulaciones detalladas. Se investigan factores cuantificables, como la resistencia del amarre y su capacidad para absorber cargas

dinámicas oceánicas, con el fin de maximizar la estabilidad y el rendimiento del convertidor OWC.

Por otro lado, el enfoque cualitativo se concentra en aspectos más subjetivos o no cuantificables del diseño del amarre. Esto incluye consideraciones de diseño y estabilidad basadas en la observación, la viabilidad práctica y la adecuación a condiciones marinas reales. Se evalúan criterios cualitativos como la adaptabilidad del amarre a distintas condiciones climáticas.

## **1.12 Población y muestra**

### **1.12.1 Población**

La población de la investigación es la Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y con sistema de amarre tipo flexible de la literatura de U.S. Army Corps of Engineers et al (2005).

### **1.12.2 Muestra**

La muestra de la investigación es la Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y con sistema de amarre tipo flexible.

## **1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para el análisis se necesitará fuentes de información como los tipo de convertidores de energía oceánica, se enfocará en el convertidor de olas tipo columna de agua y se utilizarán las normativas como: Naval Facilities Engineering Command-NAVFAC; Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings; Programa ANSYS AQWA y; Normas Técnicas Hidrográficas № 24.

ANSYS AQWA es un software de simulación y análisis especializado en la dinámica de fluidos que se enfoca en estudiar el comportamiento y las interacciones de estructuras marinas y submarinas en entornos acuáticos. AQWA es un módulo de ANSYS, una suite de programas de simulación de ingeniería líder en la industria.

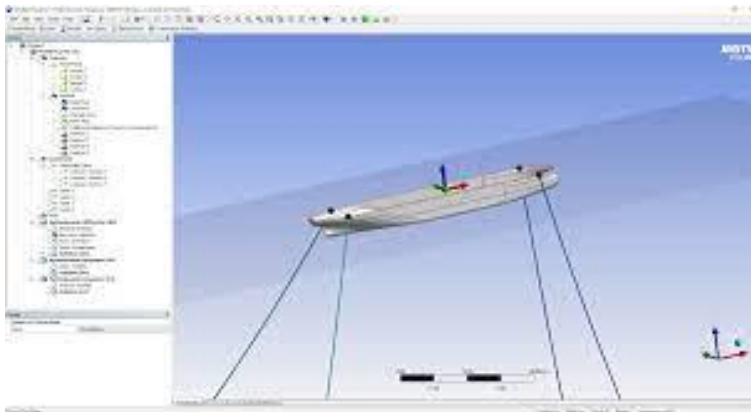
El software ANSYS AQWA es ampliamente utilizado en la industria offshore, ingeniería marina, energías renovables marinas y otras aplicaciones relacionadas con estructuras en el agua. Permite a los ingenieros y diseñadores evaluar y predecir cómo las olas, las corrientes y las fuerzas hidrodinámicas afectan el rendimiento y la integridad de las estructuras marinas.

Algunas de las capacidades y características clave del software ANSYS AQWA incluyen:

1. Análisis de hidrodinámica lineal y no lineal: AQWA realiza análisis en régimen lineal y no lineal, lo que permite modelar el comportamiento de estructuras tanto para condiciones de mar tranquilo como para condiciones de oleaje intenso y cargas dinámicas.
2. Efectos de interacción: AQWA simula la interacción de estructuras marinas con olas, corrientes y otros fenómenos ambientales, lo que permite evaluar la respuesta de la estructura en situaciones complejas y realistas.
3. Análisis de respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia: El software permite estudiar la respuesta temporal y frecuencial de las estructuras marinas, permitiendo comprender su comportamiento en diferentes situaciones y eventos.
4. Estudios de fatiga y confiabilidad: AQWA realiza análisis de fatiga y confiabilidad, lo que ayuda a evaluar la vida útil y la seguridad de las estructuras sometidas a condiciones marinas cambiantes y extremas.
5. Evaluación de cargas y fuerzas hidrodinámicas: El software permite calcular las cargas y fuerzas que actúan sobre las estructuras marinas, lo que es esencial para el diseño y dimensionamiento adecuado.

## Figura 7

### *Entorno de aplicación del software ANSYS AQWA*



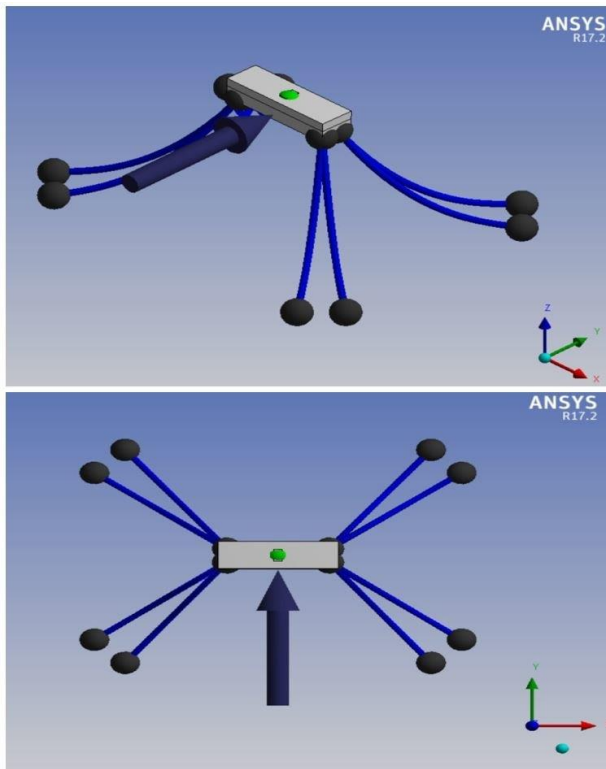
*Nota:* fuente ANSYS AQWA

ANSYS AQWA es una herramienta valiosa para la industria marina y offshore, ya que proporciona información detallada y precisa para el diseño y análisis de estructuras que operan en entornos acuáticos. Al simular y predecir el comportamiento de las estructuras en diferentes condiciones ambientales, AQWA contribuye a mejorar la seguridad, la eficiencia y la durabilidad de las operaciones marinas y submarinas.

El ANSYS AQWA tiene aplicaciones en Sistemas de tuberías verticales, Transporte, instalación y desmantelamiento, Amarres y rendimiento global, Tendido de tuberías y oleoductos, Energías renovables y Sistemas remolcados; además de otras, como acuicultura, estructuras atirantadas, puentes flotantes, defensa, energías renovables marinas, tendido de cables en fábricas y cargas sísmicas.

**Figura 8**

*Sistema de amarre y de anclaje*



*Nota:* fuente ANSYS AQWA

Por otro lado, se realizará una caracterización del sistema de amarre, el cual consistirá caracterizando las geometrías del sistema de amarre, y elementos de anclaje, cadena principal, cadena de desgaste, cadena tendida y peso muerto son elaboradas geometrías en 3D CAD para inserción en el software ANSYS AQWA. Además, de estas características son añadidas sus fichas técnicas, considerando niveles de esfuerzos que podría soportar. Además, en esta sección es insertado la geometría de la embarcación en 3D CAD.

También, son introducidos en el software los datos meta-oceánicos o hidroceanográficos, los cuales serán organizados considerando datos transformados y valores predominantes. Posteriormente estos datos serán insertados en el programa ANSYS AQWA, para el estudio dinámico. Para una correcta simulación son necesarios los siguientes datos meta-oceánicos.

- Batimetría de la zona de estudio.
- Velocidad y dirección del viento.

- Velocidad y dirección de corrientes marinas.
- Dirección, frecuencia de las olas.
- Mareas.
- Oleaje.

#### **1.14 Análisis y procesamiento de datos**

Se realizará un análisis in situ para observar un comportamiento que se asemeje a la realidad y evitar posibles daños que la integridad de los diversos agentes envueltos en este estudio. Se debe realizar un análisis hidrodinámico, estático y dinámico, el cual involucra la utilización de modelos matemáticos. Para este estudio se utilizará el software ANSYS AQWA que contempla dichos análisis de la siguiente forma.

Análisis hidrodinámico, se utilizará el programa ANSYS AQWA, para el cálculo de los RAOs según las características técnicas del sistema de amarre y anclaje. Los RAOs (Respuestas de Amplitud de Frecuencia) obtenidos son dados para los 6 grados de libertad. Para este análisis es utilizado la geometría en 3D CAD de la embarcación.

Análisis estático, se utilizarán los RAOs obtenidos los cuales serán introducidos en el ANSYS AQWA para el análisis de equilibrio de fuerzas del sistema de amarre y anclaje (SAA), determinando la viabilidad de los elementos de anclaje.

Análisis dinámico, con el sistema SSA verificado son incorporados los datos meta-oceánicos en este análisis. Los datos mencionados serán evaluados en el dominio del tiempo juntamente con el sistema SSA. El tiempo determinado debe disponerse según el tiempo de operación que sea determinado en el proyecto.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

En este capítulo se mencionará los fundamentos teóricos respecto la generación de energía con Columnas de Agua Oscilantes (OWC), aspectos mecánicos de esta tecnología, el sistema de fondeo y sus respectivos cálculos, el sistema de anclaje y sus respectivos cálculos, y conceptos relacionados al trabajo de investigación, como son: el sistema de amarre, la energía eléctrica, la simulación numérica, el convertidor de energía, el software AQWA, la RAO, la Hidroceanografía y la estabilidad de buques en amarre.

#### **2.1 Fundamentos de la generación de energía con Columnas de Agua Oscilante**

La generación de energía mediante Columnas de Agua Oscilante (OWC, por sus siglas en inglés) es una tecnología prometedora en el campo de las energías renovables. Este método aprovecha el movimiento de las olas del mar para generar electricidad, utilizando principios de mecánica de fluidos y conversión energética que han sido objeto de investigación y desarrollo en las últimas décadas. En este apartado, se abordarán los principios de funcionamiento de las OWC, sus ventajas y desafíos, así como las aplicaciones actuales y potenciales de esta tecnología en la generación de energía renovable.

##### **2.1.1 Principio de funcionamiento de las OWC**

El sistema OWC consiste en una estructura parcialmente sumergida que alberga una columna de agua en su interior. El movimiento de las olas provoca la oscilación de esta columna, lo que a su vez desplaza el aire contenido en la parte superior de la cámara.

Este desplazamiento de aire es canalizado a través de una turbina de aire que está conectada a un generador eléctrico.

El proceso de generación de energía se desglosa en los siguientes pasos:

1. Oscilación de la Columna de Agua

- Las olas entrantes elevan la columna de agua dentro de la cámara, comprimiendo el aire en la parte superior.
- Cuando la ola retrocede, la columna de agua desciende, creando una succión que extrae el aire.

2. Desplazamiento del aire

- El aire comprimido y succionado pasa a través de una turbina bidireccional (generalmente una turbina Wells) que gira en la misma dirección independientemente del flujo de aire, asegurando una conversión eficiente de la energía.

3. Generación eléctrica

- La turbina está conectada a un generador que convierte la energía mecánica en electricidad.
- La electricidad generada es luego acondicionada y transmitida a la red eléctrica.

Este método de generación de energía se basa en la disponibilidad de olas, haciendo que la ubicación y las características del sitio sean factores para la eficiencia y viabilidad del sistema.

### **2.1.2 Ventajas y desafíos de la generación eléctrica con OWC**

#### **Ventajas**

1. Fuente de energía renovable

- Las olas son una fuente constante y predecible de energía renovable, especialmente en regiones costeras con alta actividad de olas.



## 2. Bajo impacto ambiental

- Comparado con otros métodos de generación de energía, las OWC tienen un impacto ambiental relativamente bajo, ya que no emiten gases de efecto invernadero ni contaminantes.

## 3. Compatibilidad con otras actividades marinas

- Las estructuras OWC coexisten con otras actividades marinas como la pesca y el turismo, dependiendo de su diseño y ubicación.

## 4. Potencial de integración con otras tecnologías

- Los sistemas OWC son integrados con otras formas de energías renovables marinas, como la energía eólica offshore, para aumentar la eficiencia global de la generación de energía.

## **Desafíos**

### 1. Dependencia de las condiciones del mar

- La eficiencia del sistema OWC depende en gran medida de las condiciones del mar. En regiones con baja actividad de olas, la generación de energía es insuficiente.

### 2. Costos de instalación y mantenimiento

- Los costos iniciales de instalación y los costos de mantenimiento de las estructuras marinas pueden ser elevados. La corrosión y el desgaste por el ambiente marino son desafíos técnicos significativos.

### 3. Impacto en la vida marina

- Aunque relativamente bajo, existe un impacto potencial en la vida marina y los ecosistemas costeros, que debe ser evaluado y mitigado.

### 4. Desafíos tecnológicos

- La optimización del diseño de la turbina y la estructura de la cámara es para maximizar la eficiencia. La investigación y desarrollo continuo es necesario para superar los desafíos técnicos y mejorar la fiabilidad del sistema.

### **2.1.3 Aplicaciones actuales y potenciales de las OWC**

#### **Aplicaciones actuales**

##### **1. Plantas piloto y demostrativas**

- Existen varias plantas piloto y demostrativas alrededor del mundo que están evaluando la viabilidad de las OWC. Ejemplos incluyen la planta de Mutriku en España y el proyecto de Islay LIMPET en Escocia.

##### **2. Integración con redes eléctricas**

- En algunas regiones, la electricidad generada por las OWC se está integrando en la red eléctrica local, proporcionando una fuente adicional de energía renovable.

#### **Aplicaciones potenciales**

##### **1. Proyectos a gran escala**

- Con avances en la tecnología y la reducción de costos, las OWC tienen el potencial de ser desplegadas a gran escala, especialmente en áreas con alta actividad de olas.

##### **2. Sistemas híbridos**

- La combinación de OWC con otras tecnologías de energía renovable, como la energía eólica offshore y la energía solar, mejora la eficiencia y la estabilidad de la generación de energía.

##### **3. Desarrollo de infraestructura costera**

- Las OWC son integradas en proyectos de infraestructura costera, como rompeolas y espigones, proporcionando una doble función de protección costera y generación de energía.

##### **4. Comunidades remotas y aisladas**

- Las OWC son particularmente útiles en comunidades remotas y aisladas que dependen de generadores diésel costosos y contaminantes, proporcionando una alternativa sostenible y económica.

## **2.2 Aspectos mecánicos de las Columnas de Agua Oscilante (OWC)**

El diseño y la estructura mecánica de las Columnas de Agua Oscilante (OWC) son fundamentales para su eficacia en la generación de energía a partir del movimiento de las olas. En este apartado, se abordarán en detalle los componentes mecánicos esenciales de las OWC, los tipos de flotadores y sistemas de amarre, así como las interacciones dinámicas entre estos elementos.

### **2.2.1 Diseño y estructura de las OWC**

Las OWC están compuestas por varios componentes mecánicos clave que colaboran para convertir la energía de las olas en electricidad. Los principales elementos de diseño y estructura incluyen:

#### **1. Cámara de OWC**

- La cámara es una estructura parcialmente sumergida que alberga una columna de agua en su interior. Esta cámara está diseñada para maximizar la captura del movimiento de las olas, permitiendo que la columna de agua oscile en sincronía con las olas.
- El material de construcción debe ser resistente a la corrosión y a las fuerzas mecánicas del entorno marino, comúnmente empleándose acero inoxidable, concreto reforzado o materiales compuestos avanzados.

#### **2. Columna de Agua**

- La columna de agua es el elemento central que oscila dentro de la cámara. Su movimiento vertical se ve influenciado por las olas entrantes y salientes, generando variaciones de presión en la cámara de aire superior.
- La altura y el diámetro de la columna de agua son parámetros que afectan la eficiencia del sistema, y su diseño debe adaptarse a las características específicas del sitio de instalación.

### 3. Cámara de Aire

- La cámara de aire se encuentra en la parte superior de la columna de agua. Este espacio está sellado y conectado a una turbina de aire.
- El diseño de la cámara de aire debe garantizar una presión constante y adecuada para accionar la turbina de manera eficiente.

### 4. Turbina de Aire

- La turbina es un componente crítico que convierte la energía mecánica del aire en movimiento en energía rotacional. Las turbinas Wells son las más utilizadas en las OWC debido a su capacidad para operar con flujos de aire bidireccionales.
- La eficiencia de la turbina depende de su diseño aerodinámico, el cual debe minimizar las pérdidas de energía y maximizar la conversión de energía.

#### **2.2.2 Tipos de flotadores y su función**

Los flotadores permiten la estabilidad y la eficiencia de las OWC. Estos dispositivos ayudan a mantener la estructura en posición y a gestionar las fuerzas generadas por las olas. Los tipos de flotadores más comunes incluyen:

##### 1. Flotadores cilíndricos

- Son estructuras simples y robustas, diseñadas para flotar en la superficie del agua y proporcionar estabilidad lateral a la OWC.
- Su diseño cilíndrico permite una distribución uniforme de las fuerzas de las olas, reduciendo el riesgo de vuelco.

##### 2. Flotadores esféricos

- Estos flotadores tienen una forma esférica que permite una mayor maniobrabilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones de olas.
- Son ideales para ubicaciones con olas altamente variables, ya que pueden rodar y girar con las olas, minimizando el estrés en la estructura.

### 3. Flotadores elípticos

- Los flotadores elípticos combinan características de los cilíndricos y esféricos, proporcionando estabilidad y adaptabilidad.
- Su forma elíptica permite una mayor área de contacto con el agua, mejorando la capacidad de flotación y estabilidad.

### 4. Flotadores cúbicos

- Los flotadores cúbicos tienen una forma de cubo perfecta.
- Los tamaños varían según la aplicación, pero suelen diseñarse para tener dimensiones que faciliten su manejo y ensamblaje.
- Debido a su forma, los flotadores cúbicos son fácilmente apilados o unidos entre sí para formar estructuras mayores. Esta modularidad permite una mayor flexibilidad en el diseño y la implementación de sistemas flotantes.

#### **2.2.3 Sistemas de amarre: tipos y características**

Los sistemas de amarre son esenciales para anclar las OWC en su lugar, garantizando su estabilidad y operación eficiente. Los tipos de amarres más utilizados incluyen:

#### 1. Amarres de Cadena

- Consisten en cadenas pesadas que se anclan al fondo marino y se conectan a la estructura de la OWC. Estos amarres son robustos y soportan grandes fuerzas de tracción.
- Las cadenas permiten un cierto grado de movimiento, lo que ayuda a absorber las fuerzas de las olas sin transferir todo el estrés a la estructura.

## 2. Amarres de Cables Sintéticos

- Utilizan cables de materiales sintéticos avanzados, como el polietileno de alta densidad (HDPE) o el aramida, que ofrecen alta resistencia y durabilidad.
- Los cables sintéticos son más livianos que las cadenas y proporcionan mayor flexibilidad, lo que es beneficioso en condiciones de olas cambiantes.

## 3. Amarres Elásticos

- Estos sistemas utilizan elementos elásticos, como muelles o materiales elastoméricos, que se estiran y contraen para absorber las fuerzas de las olas.
- Los amarres elásticos son ideales para reducir las cargas de impacto en la estructura de la OWC, mejorando su vida útil y desempeño.

### **2.2.4 Interacciones dinámicas entre la OWC, los flotadores y los sistemas de amarre**

La interacción dinámica entre la OWC, los flotadores y los sistemas de amarre es compleja y depende de varios factores, incluyendo la altura de las olas, la frecuencia de las olas, y las características del sitio. Estas interacciones se analizan en términos de:

#### 1. Heave (Movimiento vertical)

- El heave se refiere al movimiento vertical de la OWC causado por las olas. Los flotadores y los sistemas de amarre deben diseñarse para minimizar el impacto negativo del heave en la estructura.
- Los flotadores ayudan a estabilizar la OWC, reduciendo el movimiento vertical excesivo, mientras que los sistemas de amarre aseguran que la estructura se mantenga en su posición deseada.

## 2. Pitch (Movimiento de inclinación)

- El pitch es el movimiento de inclinación hacia adelante y hacia atrás de la OWC. Este movimiento es inducido por olas desiguales o fuerzas de viento.
- La disposición y diseño de los flotadores son para controlar el pitch, asegurando que la turbina de aire funcione de manera eficiente sin interrupciones.

## 3. Roll (Movimiento de balanceo)

- El roll es el movimiento de balanceo lateral de la OWC. Las fuerzas de las olas y las corrientes inducen este movimiento, afectando la estabilidad de la estructura.
- Los sistemas de amarre deben proporcionar suficiente rigidez lateral para minimizar el roll, mientras que los flotadores deben estar dispuestos de manera simétrica para distribuir las fuerzas uniformemente.

### 2.2.5 Importancia de los sistemas de amarre en las OWC

Los sistemas de amarre son fundamentales para:

#### 1. Estabilidad estructural

- Los amarres aseguran que la OWC permanezca en su posición prevista, resistiendo las fuerzas de las olas, corrientes y vientos. Una estructura bien amarrada reduce el riesgo de desplazamiento o vuelco.

#### 2. Reducción de esfuerzos dinámicos

- Los amarres ayudan a absorber y distribuir las fuerzas dinámicas actuantes sobre la OWC, minimizando el estrés en la estructura y prolongando su vida útil.

### 3. Optimización de la captura de energía

- Al mantener la OWC en una posición estable, los amarres facilitan un movimiento de la columna de agua más predecible y eficiente, mejorando la conversión de energía de las olas en energía eléctrica.

#### **2.2.6 Optimización del diseño mecánico para máxima eficiencia**

La optimización del diseño mecánico de las OWC involucra la evaluación y mejora de cada componente y su interacción con los demás. Algunas estrategias de optimización incluyen:

##### 1. Simulación y modelado numérico

- Las herramientas de simulación y modelado numérico, como el Análisis de Elementos Finitos (FEA) y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), son esenciales para predecir y analizar el comportamiento dinámico de la OWC bajo diferentes condiciones.
- Estas simulaciones ayudan a identificar los puntos débiles en el diseño y a probar diferentes configuraciones sin necesidad de construir prototipos físicos.

##### 2. Pruebas experimentales

- Las pruebas en tanques de olas y en entornos marinos reales son para validar los modelos numéricos y asegurarse de que las OWC funcionen según lo previsto.
- Las pruebas experimentales proporcionan datos valiosos sobre la respuesta dinámica de la estructura y la efectividad de los flotadores y sistemas de amarre.

##### 3. Mejora de materiales

- La investigación y desarrollo de nuevos materiales, como compuestos avanzados y aleaciones resistentes a la corrosión, mejora la durabilidad y rendimiento de las OWC.



- Los materiales avanzados reducen el peso de la estructura y aumentar su resistencia a las fuerzas dinámicas del entorno marino.

#### 4. Diseño modular

- Un enfoque modular permite la adaptación y personalización de las OWC para diferentes sitios y condiciones. Los módulos intercambiables facilitan el mantenimiento y la actualización de componentes específicos sin necesidad de reemplazar toda la estructura.
- El diseño modular también facilita la escalabilidad del sistema, permitiendo aumentar o reducir la capacidad de generación según las necesidades.

### **2.2.7 Estrategias para optimizar la interacción entre amarres y generación eléctrica**

Para optimizar la interacción entre los sistemas de amarre y la generación eléctrica en una OWC, se implementan varias estrategias:

#### 1. Diseño y simulación avanzada

- Modelado Numérico: Utilizar herramientas de simulación numérica como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Análisis de Elementos Finitos (FEA) para predecir y analizar el comportamiento dinámico de la OWC y los sistemas de amarre bajo diferentes condiciones.
- Optimización de Diseño: Realizar iteraciones de diseño basadas en los resultados de las simulaciones para mejorar la estabilidad y eficiencia del sistema.

#### 2. Materiales innovadores

- Materiales Compuestos: Incorporar materiales compuestos avanzados que ofrecen alta resistencia y durabilidad, reduciendo el peso y mejorando la resistencia a la corrosión.

- Elastómeros de Alta Resistencia: Utilizar elastómeros avanzados que proporcionen una mayor capacidad de absorción de impactos y una vida útil prolongada.

### 3. Configuración modular

- Diseño Modular de Amarres: Implementar un diseño modular en los sistemas de amarre que permita una fácil adaptación y reemplazo de componentes específicos según las necesidades del entorno marino.
- Flexibilidad de Configuración: Permitir ajustes en la configuración de los amarres para adaptarse a cambios en las condiciones hidroceanográficas y maximizar la captura de energía.

### 4. Monitoreo y Mantenimiento Proactivo

- Sistemas de Monitoreo: Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para vigilar el estado de los amarres y la estructura de la OWC, detectando cualquier anomalía que afecta la generación eléctrica.
- Mantenimiento Predictivo: Utilizar técnicas de mantenimiento predictivo basadas en los datos de monitoreo para realizar intervenciones antes de que ocurran fallos críticos, asegurando una operación continua y eficiente.

## 2.3 Sistema de fondeo

El sistema de fondeo de un buque se refiere al conjunto de equipos, procedimientos y técnicas utilizadas para anclar la embarcación de manera segura y estable en una posición específica en el agua. El ancla es una pieza fundamental de este sistema y se conecta al barco a través de la cadena o el cabo de fondeo.

El ancla es una estructura metálica con dos o más brazos curvos que se entierran en el lecho marino o en el fondo del cuerpo de agua. La elección del tipo de ancla dependerá del tamaño del buque, el tipo de fondo marino y las condiciones climáticas del área donde se llevará a cabo el fondeo.

El proceso de fondeo comienza con el arriado del ancla desde el costado del buque. Una vez en el agua, la cadena o cabo se va liberando gradualmente para permitir que el ancla se desplace hacia el fondo. El ancla se asentará en el lecho marino y, al aplicar tensión en la cadena, se asegura su agarre al suelo. La cantidad de cadena o cabo desplegado dependerá de la profundidad del agua y de las condiciones ambientales.

Es importante tener en cuenta factores como la dirección y la velocidad del viento, la corriente marina y la profundidad del agua para calcular la cantidad de cadena necesaria y evitar el arrastre del ancla. El uso de boyas también ayuda a marcar la posición del ancla y permitir su fácil recuperación.

El sistema de fondeo sirve para mantener la estabilidad y seguridad del buque durante diversas operaciones, como cargar y descargar mercancías, realizar trabajos de mantenimiento o esperar en áreas de espera. Un anclaje adecuado asegura que el buque permanezca en su posición y no se desplace, lo que podría representar un riesgo para la embarcación y su tripulación, así como para otras embarcaciones cercanas.

Basado por la U.S. Army Corps of Engineers et al (2005), se tiene el siguiente desarrollo sobre el sistema de fondeo.

### **2.3.1 Cálculos por corriente marina**

#### **a) Carga lateral actuante en el buque por la corriente marina**

Es la carga generada por la corriente del mar en sentido ortogonal a la línea central o de crujía del buque.

$$F_{yc} = \frac{1}{2} \rho_w \cdot V_c^2 \cdot L_{wl} \cdot T \cdot C_{yc} \cdot \sin(\theta_c) \quad (1)$$

$$C_{yc} = C_0 + (C_1 - C_0) \cdot \left(\frac{T}{d}\right)^k \quad (2)$$

$$C_0 = 0.22 \cdot \sqrt{x} \quad (3)$$

$$x = \frac{L_{wl}^2 \cdot A_m}{B \cdot V} \quad (4)$$

$$A_m = C_m \cdot B \cdot T \quad (5)$$

Donde:

$F_{yc}$ : Carga lateral de corriente, en libras.

$\rho_w$ : densidad de masa del agua = 2 slugs por pie cúbico de agua de mar.

$V_c$ : velocidad de corriente, en pies por segundo.

$L_{wl}$ : eslora de la línea de flotación del buque, en pies.

$T$ : calado del buque, en pies

$B$ : Ancho máximo del buque en la línea de flotación.

$C_{yc}$ : coeficiente de arrastre de fuerza de corriente lateral

$\theta_c$ : Ángulo de la corriente.

$C_0$ : Coeficiente de fuerza de resistencia para grandes profundidades. Cuando  $\frac{T}{d} \approx 0$ , este coeficiente es calculado a partir de la Ecuación (3).

$C_1$ : Coeficiente de fuerza de resistencia para pequeñas profundidades. Para  $\frac{T}{d} = 1$  y corrientes de 1.5 m/s o menores, se recomienda  $C_1 = 3.2$ .

$k$ : Exponente adimensional.

$k = 3$  Para buques de carga, portaviones y submarinos.

$k = 2$  Para los casos restantes.

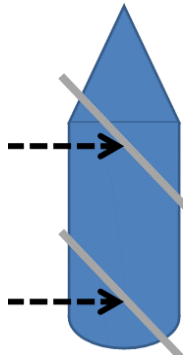
$A_m$  y  $C_m$ : Área y constante de la sección transversal sumergida en la sección media del buque, respectivamente.

$V$ : Volumen sumergido del buque.

$d$ : Profundidad del agua.

**Figura 9**

*Fuerza lateral de una corriente marina sobre el buque.*



*Nota: fuente internet*

**b) Carga longitudinal actuante en el buque por la corriente marina**

Carga generada por la corriente en sentido paralelo a la línea central del buque que pasa por la quilla.

$$F_{xc} = F_{xform} + F_{xfric} + F_{xprop} \quad (6)$$

**Figura 10**

*Fuerza longitudinal de una corriente marina sobre el buque.*



*Nota: fuente internet*

**b.1) Debido a la forma del buque**

$$F_{xform} = \frac{1}{2} \rho_w \cdot V_c^2 \cdot B \cdot T \cdot C_{xcb} \cdot \cos(\theta_c) \quad (7)$$

Donde:

$C_{xcb}$ : Coeficiente longitudinal, convenientemente es utilizado el valor de 0.1.

**b.2) Debido a la fricción de la capa límite**

$$F_{\text{xfric}} = \frac{1}{2} \rho_w \cdot V_c^2 \cdot S \cdot C_{\text{xca}} \cdot \cos(\theta_c) \quad (8)$$

$$S = 1.7 \cdot T \cdot L_{wl} + \left( \frac{D}{T \cdot \gamma_w} \right) \quad (9)$$

$$C_{\text{xca}} = \frac{0.075}{\left( (\log_{10} R_N) - 2 \right)^2} \quad (10)$$

$$R_N = \left| \frac{V_c \cdot L_{wl} \cdot \cos(\theta_c)}{v} \right| \quad (11)$$

Donde:

$C_{\text{xca}}$ : Coeficiente de fricción lateral en la dirección longitudinal.

S: Área de la superficie mojada.

D: Desplazamiento del buque.

$\gamma_w$ : Densidad por peso del agua.

v: Viscosidad cinemática del agua.

$R_N$ : Número de Reynolds.

b.3) Debido a la resistencia del agua en la hélice

$$F_{\text{xprop}} = \frac{1}{2} \rho_w \cdot V_c^2 \cdot A_p \cdot C_{\text{prop}} \cdot \cos(\theta_c) \quad (12)$$

$$A_p = \frac{A_{\text{TPP}}}{0.838} \quad (13)$$

$$A_p = \frac{L_{wl} \cdot B}{A_R} \quad (14)$$

Donde:

$A_p$ : Área de las láminas de la hélice.

$A_{\text{TPP}}$ : Área total proyectada de la hélice.

$A_R$ : Área adimensional para hélices.

$C_{\text{prop}}$ : Coeficiente de resistencia de la hélice, un valor conveniente es 1.

D: Desplazamiento del buque.

$\gamma_w$ : Densidad por peso del agua.

v: Viscosidad cinemática del agua.

$R_N$ : Número de Reynolds.

Coficiente de Resistencias de hélice.

**Tabla 2**

*Valores de  $AR$  para distintos tipos de buques*

BUQUE	$A_R$
Destroyer	100
Crucero	160
Portador	125
Carga	240
Tanque	270
Submarino	125

Nota: fuente U.S. Army Corps of Engineers et al (2005)

**c) Momento de rolo actuante en el buque por la corriente marina**

Es el momento que la corriente genera en el buque sobre el eje z según las coordenadas locales de este.

$$M_{XYC} = F_{YC} \left( \frac{e_C}{L_{WL}} \right) L_{WL} \quad (15)$$

Donde:

$M_{XYC}$ : Momento de guiñada de la corriente, en libras de pie

$F_{YC}$ : carga de corriente lateral, en libras

$\left( \frac{e_C}{L_{WL}} \right)$ : relación de la excentricidad de la carga de corriente lateral medida a lo largo

del eje longitudinal del buque desde el centro del buque hasta la eslora de la línea de flotación del buque

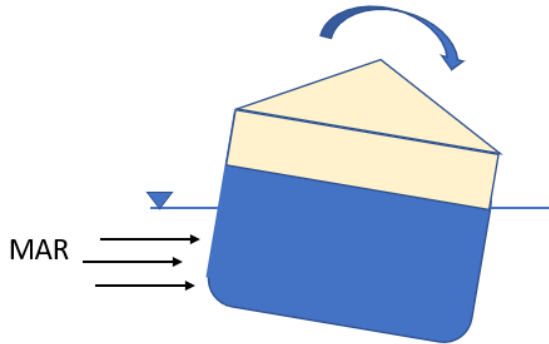
$e_C$ : excentricidad de  $F_{YC}$

$L_{WL}$ : eslora de la línea de flotación del buque, en pies

El valor de  $\left( \frac{e_C}{L_{WL}} \right)$  se da en función del ángulo de corriente,  $\theta_C$  y el tipo de buque.

**Figura 11**

*Rolado de un buque producido por las corrientes marinas.*



*Nota:* fuente internet

### **2.3.2 Cálculo por viento**

#### **a) Carga lateral actuante en el buque por el viento**

Es la componente de la fuerza que ejerce el viento en dirección perpendicular a la línea central que pasa por la quilla del buque, esta dirección será el eje “Y”.

$$F_{YW} = \frac{1}{2} \rho_A V_W^2 A_Y C_{YW} F_{YW}(\theta_W) \quad (16)$$

Donde:

$F_{YW}$ : carga de viento lateral, en libras

$\rho_A$ : Densidad de masa del aire = 0,00237 slugs por pie cúbico a 68°F

$V_W$ : Velocidad del viento, en pies por segundo

$A_Y$ : área lateral proyectada del barco, en pies cuadrados

$C_{YW}$ : coeficiente de arrastre de fuerza de viento lateral

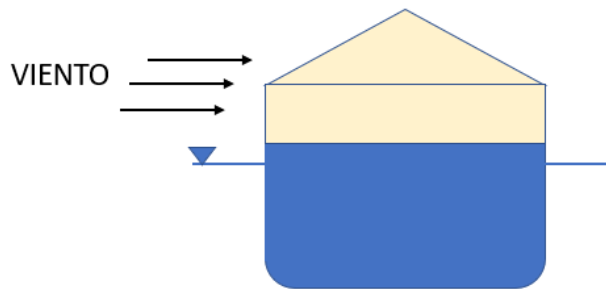
$F_{YW}(\theta_W)$ : función de forma para carga lateral

$\theta_W$ : ángulo de viento



**Figura 12**

*Carga lateral del viento sobre un buque.*



*Nota:* fuente internet

**b) Carga longitudinal actuante en el buque por el viento**

Es la fuerza provocada por el viento en sentido paralelo al eje central del buque, este eje será "x".

$$F_{xW} = \frac{1}{2} \rho_A V_W^2 A_x C_{xW} F_{xW}(\theta_W) \quad (17)$$

Donde:

$F_{xW}$ : carga de viento longitudinal, en libras

$\rho_A$ : Densidad de masa del aire = 0,00237 slugs por pie cúbico a 68°F

$V_W$ : Velocidad del viento, en pies por segundo

$A_x$ : área longitudinal proyectada del barco, en pies cuadrados

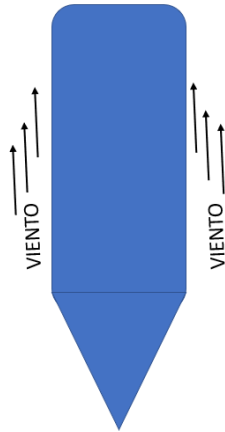
$C_{xW}$ : coeficiente de arrastre longitudinal de la fuerza del viento

$F_{xW}(\theta_W)$ : función de forma para carga longitudinal

$\theta_W$ : ángulo de viento

**Figura 13**

*Carga longitudinal del viento sobre un buque.*



*Nota:* fuente internet

**c) Momento de rolido actuante en el buque por el viento**

El momento de rolido producido por el viento, el cual es producto de la fuerza del viento transversal y su distancia desde el centro de gravedad de un buque. Según el sistema de coordenadas locales de un buque, este momento se produce sobre el eje "Z". El momento de rolido del viento se determina a partir de la siguiente ecuación.

$$M_{XYW} = \frac{1}{2} \rho_A V_W^2 A_Y L C_{XYW}(\theta_W) \quad (18)$$

Donde:

$M_{XYW}$ : Momento de guiñada de viento, en libras de pie

$\rho_A$ : Densidad de masa del aire = 0,00237 slugs por pie cúbico a 68°F

$V_W$ : Velocidad del viento, en pies por segundo

$A_Y$ : área lateral proyectada del barco, en pies cuadrados

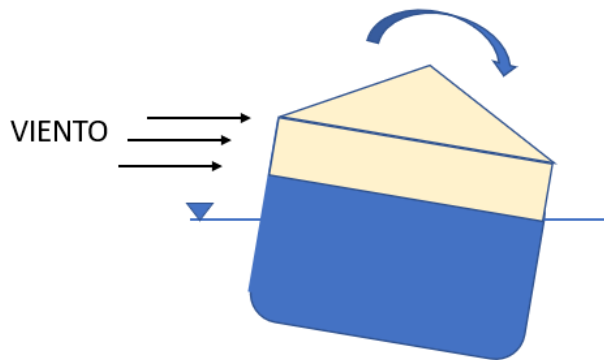
$L$ : eslora del barco

$C_{XYW}(\theta_W)$ : coeficiente de momento de guiñada normalizado

$\theta_W$ : ángulo de viento

**Figura 14**

*Rolado de un buque producido por el viento.*



*Nota:* fuente internet

## **2.4 Sistema de anclaje**

El sistema de anclaje de una embarcación es un conjunto de equipos, dispositivos y procedimientos diseñados para asegurar que la embarcación permanezca estacionaria y segura en una posición específica en el agua. El sistema está compuesto principalmente por el ancla, una pesada estructura metálica con brazos curvos que se hunde en el lecho marino o en el fondo del cuerpo de agua.

El ancla se conecta a una embarcación mediante una cadena o un cabo de fondeo, y el proceso de anclaje comienza cuando el ancla es arriada desde el costado de la embarcación hacia el agua. A medida que una embarcación avanza, se libera gradualmente la cadena o el cabo, permitiendo que el ancla se desplace hacia el fondo. Una vez que el ancla alcanza el fondo, la tensión en la cadena o cabo asegura que el ancla quede firmemente sujeta al suelo.

La cantidad de cadena o cabo desplegado durante el anclaje depende de la profundidad del agua y las condiciones ambientales, como la dirección y velocidad del viento y la corriente marina. Es esencial calcular la longitud adecuada para evitar el arrastre del ancla y mantener la estabilidad del buque.

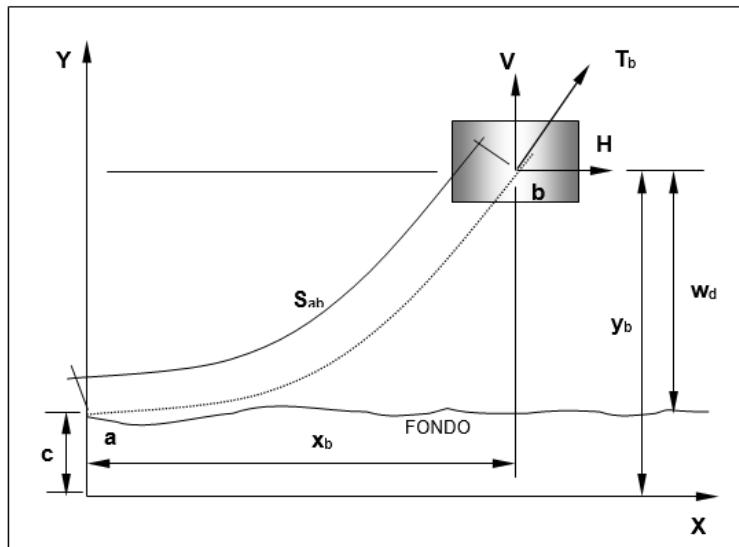
El sistema de anclaje sirve para diversas operaciones marítimas, como detenerse en un punto específico para cargar y descargar mercancías, realizar trabajos de mantenimiento o esperar en áreas de espera. Un anclaje seguro y efectivo garantiza que

el buque permanezca en su posición y no se desplace, lo que minimiza los riesgos de colisiones y otros incidentes, asegurando la seguridad tanto de la embarcación como de su tripulación.

En resumen, fondear una embarcación consiste en amarrar la embarcación al fondo marino mediante una cadena o cabo utilizando un ancla o un muerto. El tipo de fondeo con peso muerto y boya permite fondear una embarcación de forma segura. El peso del muerto es hecho de hormigón.

**Figura 15**

*Esquema de fondeo (boya, cadena y peso muerto).*



*Nota:* fuente internet

**a) Peso muerto para fondeos intermedios y amarres flojos**

$$M \geq K \frac{T_{h_0} \delta}{g(\delta - \rho_w) \tan \phi} \quad (19)$$

Donde:

M: Masa del muerto en kilogramos, Kg.

K: Coeficiente de seguridad, convencionalmente igual a 1.5.

$T_{h_0}$ : Tensión horizontal de amarre en el punto de unión con el muerto en Newtons.

$\delta$ : Densidad media del muerto en Kg/m<sup>3</sup>, 2400 Kg/m<sup>3</sup> para hormigón armado y 7800 Kg/m<sup>3</sup> para hierro fundido.

g: Aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>.

$\rho_w$ : Densidad del agua en Kg/m<sup>3</sup>, 1024 Kg/m<sup>3</sup> para el agua salada.

$\nu$ : Viscosidad cinemática del agua.

$R_N$ : Número de Reynolds.

## b) Cálculo de las boyas de amarre

Equilibrio estático:

$$\sum F_{\uparrow} = \sum F_{\downarrow}$$
$$E = V_b + w_{BOYA} + T_b \quad (20)$$
$$D = \sqrt{\frac{(V_b + w_{BOYA} + T_b)}{6 * g * \rho_{LIQUIDO} * H_{SUMERGIDA}}}$$

Empuje Hidrostático:

$$E = g * \rho_{LIQUIDO} * V_{SUMERGIDO}$$

Volumen sumergido de un cilindro:

$$V_{SUMERGIDO} = \frac{2}{3} \pi * \frac{D^2}{4} * H_{SUMERGIDA}$$

La distancia desde el origen (0,0) a la intersección del eje "Y", está dada por:

$$c = H / w_a$$

siendo ( $w_a$ ), el peso unitario de la cadena en el agua, es decir:

$$w_a = w \cdot d_{agua}$$

La distancia vertical ( $y_b$ ), está dada por:

$$y_b = c + w_d$$

La longitud de la Cadena ( $S_{ab}$ ), será:

$$S_{ab} = (y_b^2 - c^2)^{0.5}$$

$$S_{ab} < S_{ACTUAL}$$

La Tensión en la Boya ( $T_b$ ), será:

$$T_b = w_a \cdot y_b$$

Por lo que la fuerza vertical actuante en la Boya ( $V_b$ ), será:

$$V_b = w_a \cdot S_{ab}$$

**c) Reserva de flotabilidad**

$$R_B = U - \frac{M_b + m_c * L}{\rho_w} \quad (21)$$

U: Volumen total del flotador, en m<sup>3</sup>

M<sub>b</sub>: Masa de la boya, en kg.

W: Masa sumergida por unidad de longitud de la cadena, en kg/m.

L: Longitud de cadena necesaria, en m.

ρ: Densidad del agua, en kg/ m<sup>3</sup>

R<sub>b</sub>: Reserva de flotabilidad, en m<sup>3</sup>

**d) Cálculo de cadena**

Datos de entrada:

θ<sub>a</sub>: Angulo que forma el muerto con la Cadena

W<sub>d</sub>: Profundidad de Agua

H: Carga máxima de rotura

W: Masa sumergida por unidad de longitud de la cadena, en kg/m.

Procedimientos de cálculo:

1.  $V_a: H * tg\theta_a$
2.  $S_a: V_a / W$
3.  $C: H / W$
4.  $Y_a: \sqrt{S_a^2 + C^2}$
5.  $Y_b: Y_a + W_d$
6.  $S_b: \sqrt{Y_b^2 - C^2}$
7.  $S_{ab}: S_b - S_a$
8.  $T_b: W * Y_b$

## **2.5 Marco conceptual**

### **2.5.1 Sistema de amarre**

Conjunto de elementos flexibles ligados a un flotador, los cuales les proporciona estabilidad y ayuda en su operación a mar abierto. Estos elementos de amarre utilizan comúnmente boyas, cadenas, pesos muertos (sinkers), anclas.

### **2.5.2 Energía eléctrica**

Energía generada desde un proceso de transformación mecánica a través de un convertidor de energía renovable, esto es, energía mareomotriz.

### **2.5.3 Simulación numérica**

Proceso mediante un cálculo numérico donde se realiza la aproximación de un sistema continuo en un sistema discreto, son empleados métodos como, elementos finitos, volúmenes finitos, partículas discretas, elementos de contorno, etc. La finalidad es evaluar un problema que es multifísico, y obtener una solución aproximada. Casi siempre, este proceso comprende un pre processing, un solver y un postprocessing.

### **2.5.4 Convertidor de energía**

Dispositivo para transformar energía mecánica en energía eléctrica. Para el caso mareomotriz, son flotadores anclados al fondo marino, mediante elementos de amarre tensados o flexibles. Convencionalmente los dispositivos aprovechan la energía de las olas, corrientes y mareas. Siendo observados geometrías simples y complejas. Una de las geometrías más simples que se citan son las boyas, que mediante su movimiento de vaivén son utilizados como elementos de acumulación de energía.

### **2.5.5 Orcaflex**

OrcaFlex es un programa de software de análisis dinámico de propósito general adecuado para una amplia gama de aplicaciones de análisis dinámico global. La generalidad, potencia y flexibilidad de OrcaFlex permiten modelizar una amplia gama de sistemas, y se utiliza habitualmente en el análisis de las siguientes aplicaciones:

- Análisis estáticos extremadamente rápidos y robustos.
- Dominio temporal no lineal (implícito y explícito).
- Dominio lineal de la frecuencia (1º y 2º orden).
- Análisis buque-línea totalmente acoplado.
- Estadística de valores extremos.
- Análisis modal, VIV, de holgura y de interferencias.
- Análisis de fatiga regular, de flujo de lluvia y espectral.
- Comprobación de códigos de Pipelay y Riser.
- Modelización del comportamiento posterior al contacto.

#### **2.5.6 AQWA**

Anslys AQWA WAVE es un programa de enlace entre el cálculo de difracción de Anslys AQWA y un modelo de elementos finitos. Toma los resultados en forma de presiones y movimientos para direcciones y frecuencias de onda dadas y los aplica automáticamente como presiones y aceleraciones a un modelo de elementos finitos de Anslys structural mechanics o Anslys ASAS. Las diferencias de densidad de malla entre los dos modelos se tienen en cuenta automáticamente.

#### **2.5.7 RAO**

Relación entre la amplitud de elevación de la superficie de las olas en un lugar de referencia y la amplitud de respuesta del buque, así como el desfase entre ambas.

#### **2.5.8 Hidroceanografía**

Es la ciencia que estudia el comportamiento del océano respecto corrientes, oleaje, vientos, entre otros fenómenos. Estos estudios permiten caracterizar zonas costeras con datos batimétricos, perfiles de velocidad de vientos, corrientes, presiones, entre otros, de manera de evaluar los riesgos, la factibilidad y la viabilidad de implementar proyectos costeros.



### **2.5.9 Estabilidad de artefacto o dispositivo naval**

La comprensión de la estabilidad de un artefacto naval de superficie se divide en dos partes. En primer lugar, la estabilidad intacta. Este campo de estudio trata de la estabilidad de un artefacto naval de superficie cuando se mantiene la integridad de su casco y ningún compartimento o tanque estanco sufre daños o se inunda libremente de agua de mar.

En segundo lugar, la estabilidad con avería. El estudio de la estabilidad con avería de un artefacto naval de superficie incluye la identificación de los compartimentos o tanques sometidos a avería e inundados por el agua de mar, seguida de una predicción de las condiciones de asiento y calado resultantes.

### **2.5.10 Estabilidad de la generación eléctrica del OWC**

Es la estabilidad de la generación eléctrica del OWC es la condición en el que la configuración de amarres, la fijación y la estabilidad del OWC

En el contexto de un OWC con sistema de amarre para OWC con dos flotadores, la estabilidad de la generación eléctrica de OWC se refiere a la capacidad del sistema de amarre y del convertidor OWC con dos flotadores para mantener una posición y funcionamiento adecuados bajo diversas condiciones marítimas para mantener la integridad estructural del convertidor y su conexión segura al sistema de amarre, resistiendo fuerzas externas como olas, corrientes y variaciones en las mareas. La simulación numérica evalúa y predice cómo el diseño del sistema de amarre, sus materiales, configuraciones y métodos de fijación afectan la estabilidad del convertidor OWC flotante. Se busca asegurar que el sistema de amarre permita al convertidor permanecer anclado y alineado correctamente para maximizar la captura de energía de las olas y garantizar una conversión a energía eléctrica continua, minimizando movimientos no deseados que afecten negativamente la eficiencia y la confiabilidad en la producción de energía eléctrica a partir de las olas.

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DE LA TESIS**

En este capítulo, se presentará el sistema de toma de fuerza (Power Take Off - PTO) diseñado para convertir la fuerza neumática en electricidad mediante el uso del Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column - OWC) con dos flotadores con amarres al lecho marino. Se abordarán diversos aspectos, entre ellos, la geometría cilíndrica del OWC inspirado del artículo de Wang, H., & Falzarano, J. (2017), los flotadores utilizados en forma de cubos a criterio del suscrito, la matemática empleada en el análisis y el modelado en CFD (Computational Fluid Dynamics).

#### **3.1 Geometría cilíndrica de la Columna de Agua Oscilante**

La geometría de una columna de agua oscilante con amarres varía según el diseño específico del dispositivo y las condiciones del entorno marino. Sin embargo, para darte una idea general, te proporcionaré una descripción común de cómo podría ser la geometría de este tipo de sistema.

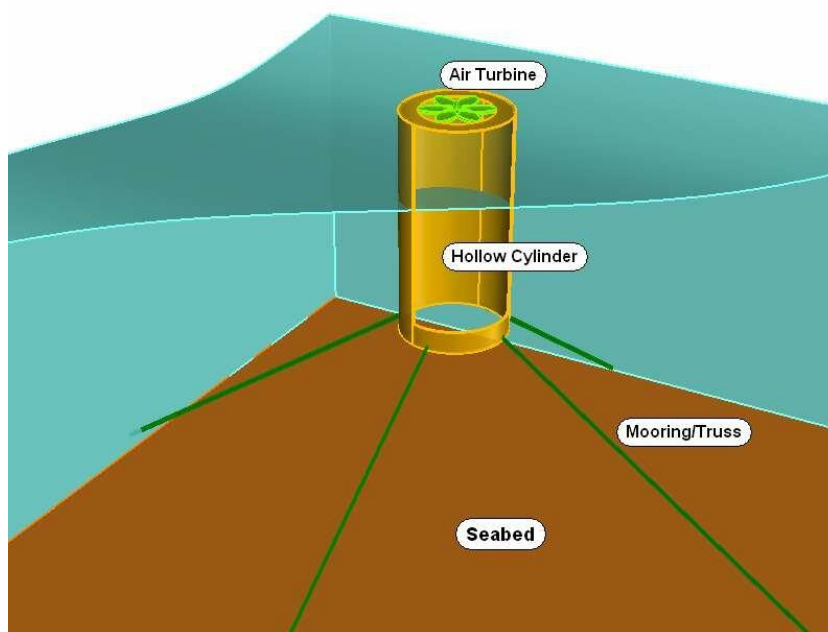
La columna de agua oscilante con amarres generalmente consiste en los siguientes elementos principales:

1. **Recinto:** Es una estructura cerrada ubicada en la costa o en el mar, diseñada para capturar y contener las olas que llegan. El recinto tiene una forma rectangular, cuadrada o cilíndrica, dependiendo del diseño y los requisitos específicos del proyecto.

2. Abertura hacia el mar: En el recinto, hay una abertura que se enfrenta hacia el mar, a través de la cual ingresan las olas. Esta abertura está diseñada para permitir que el agua entre y salga del recinto.
3. Columna de agua: Dentro del recinto, se encuentra una columna de agua que está en comunicación con la abertura hacia el mar. Cuando las olas entran en el recinto, la columna de agua se eleva y desciende en respuesta al movimiento de las olas.
4. Amarres: Los amarres son conexiones que sujetan la columna de agua a estructuras sólidas fijadas al lecho marino o a una plataforma flotante. Los amarres son cables o resortes que permiten un movimiento controlado y restringido de la columna de agua. Estos amarres ayudan a mantener la columna de agua en una posición más estable y predecible.
5. Turbina o generador: En la parte superior de la columna de agua, suele haber un dispositivo generador de energía, como una turbina o un generador, que aprovecha el flujo de aire inducido por el movimiento oscilante de la columna de agua para generar electricidad.

**Figura 16**

*Esquema de columna de agua oscilante con amarres*



*Nota: fuente Wang, H., & Falzarano, J. (2017)*

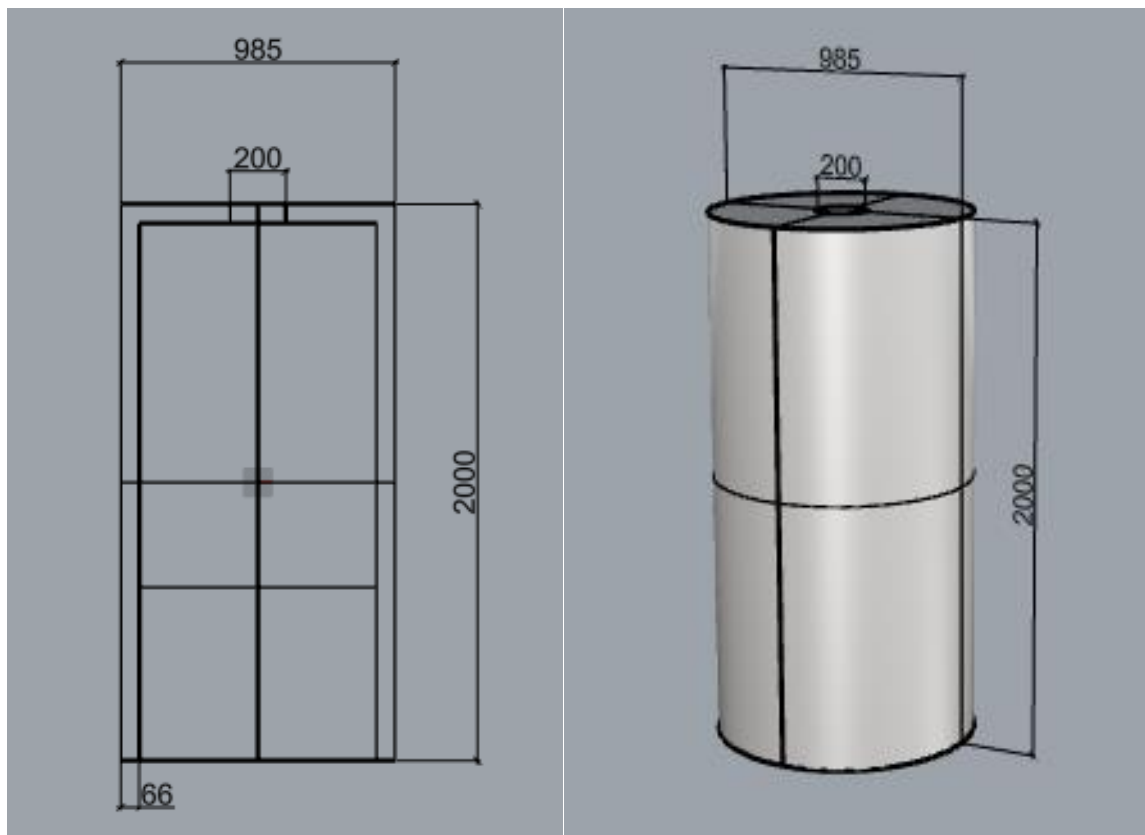
La geometría cilíndrica específica de la columna de agua oscilante con amarres dependerá del tamaño del sistema, la potencia de generación deseada y otros factores técnicos y ambientales. Los diseñadores y los ingenieros suelen llevar a cabo estudios detallados y análisis para optimizar la geometría y el rendimiento del sistema Columna de Agua Oscilante (OWC) en función de los objetivos específicos del proyecto y las condiciones del sitio.

### 3.1.1 Dimensiones principales

Las dimensiones principales de la Columna de Agua Oscilante (OWC) que tiene forma de cilindro y es inspirado del trabajo de Wang, H., & Falzarano, J. (2017) se muestra en la figura 17, y las dimensiones principales de los dos flotadores cúbicos se muestran en la figura 18.

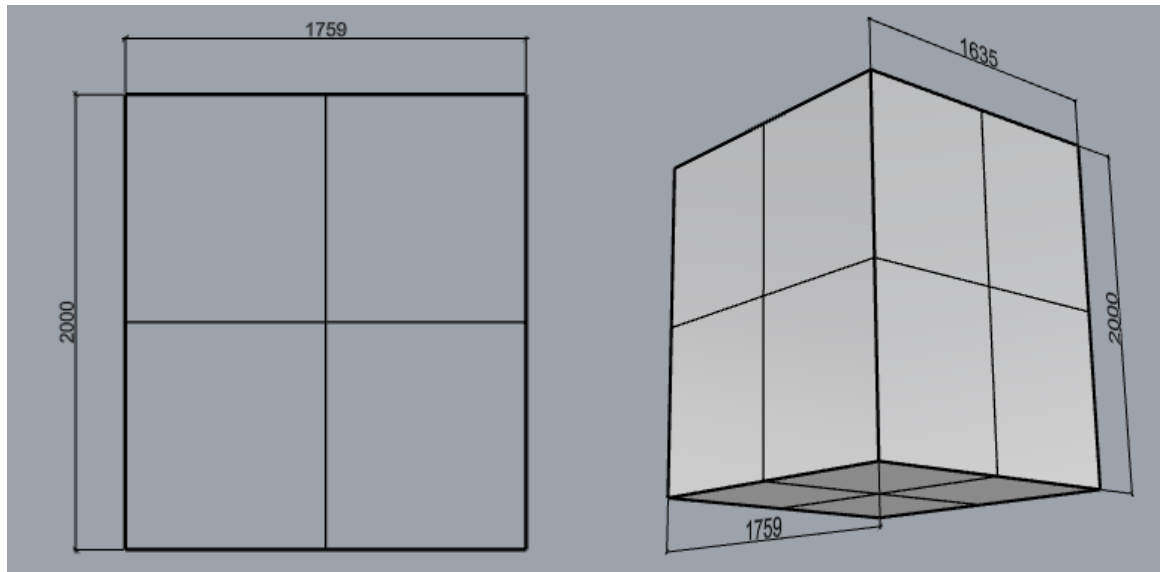
**Figura 17**

*Dimensiones del columna de agua oscilante*



**Figura 18**

*Dimensiones de los flotadores del OWC*



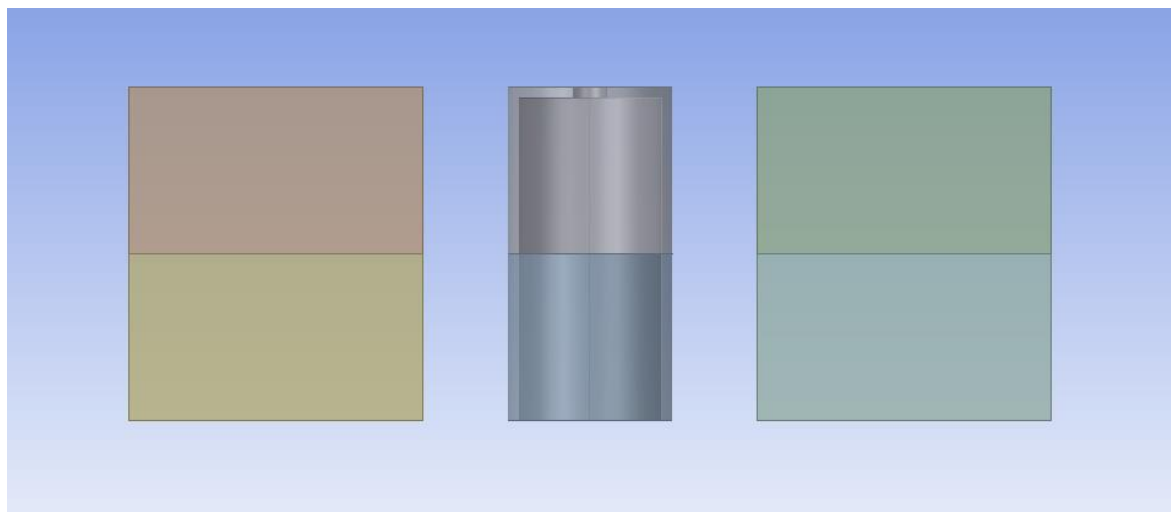
### 3.2 Simulación por CFD

#### 3.2.1 Geometría y dominio

Para la simulación por CFD, realizada en ANSYS Academic – AQWA, será sobre una superficie 3D de la combinación del OWC cilíndrico y dos flotadores para emplearse el tipo de análisis comparativo, como se aprecia en la figura 19.

**Figura 19**

*Modelo 3D del OWC junto a 2 flotadores cúbicos*

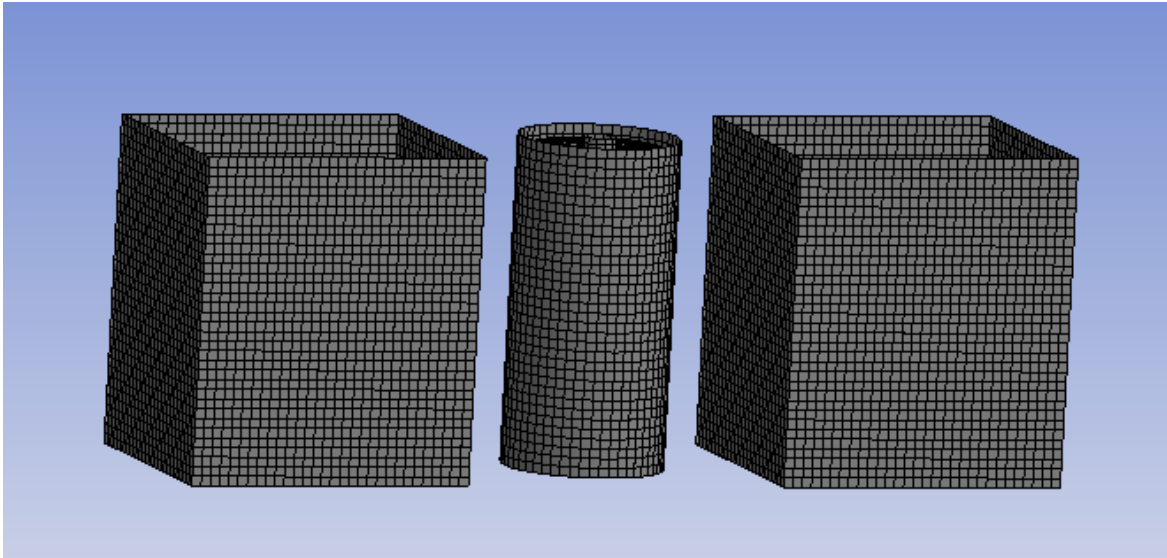


### 3.2.2 Enmallado

El enmallado del dominio es de tipo cuadrangular utilizado en casos bidimensionales, conocidas como mallas estructuradas, y se muestra en la figura 20.

**Figura 20**

*Enmallado de columna de agua oscilante y flotadores con elementos de 50mm de tamaño*

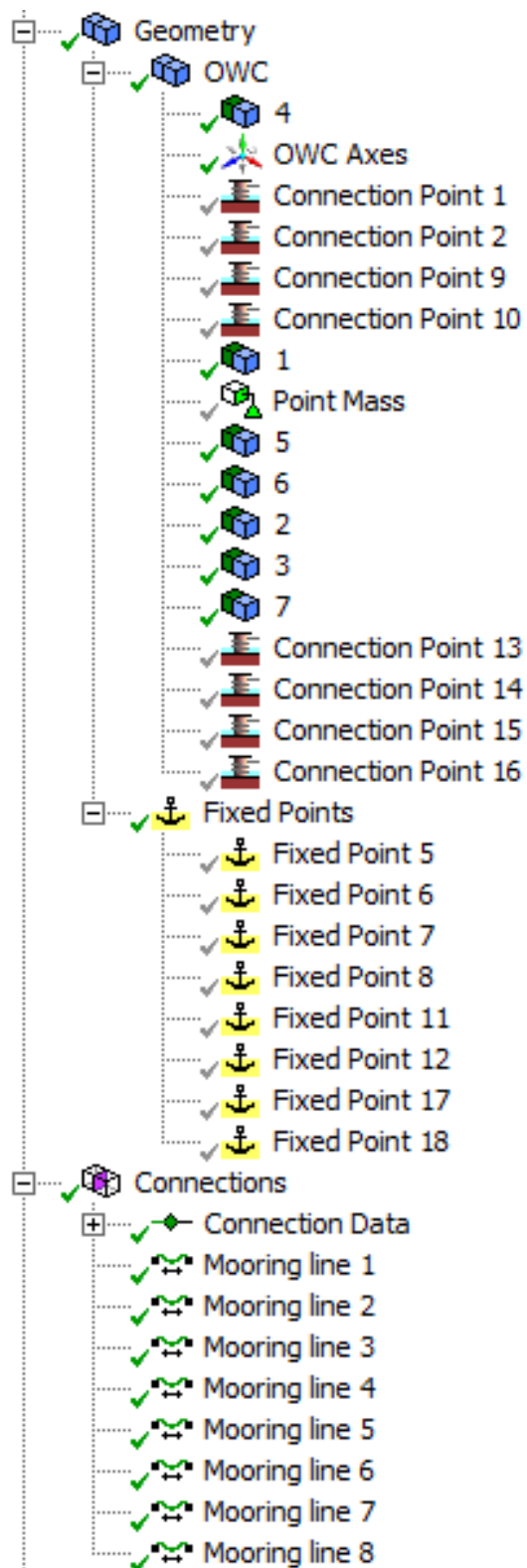


### 3.2.3 Configuración de simulación

La configuración para la simulación consta de puntos de conexión (Connection Point) ubicados dentro de la Columna de Agua Oscilante (OWC), puntos fijos (fixed points) ubicados en el fondo marino y cuerdas no lineales catenarias (Mooring line) las cuales unirán cada connection Point con sus respectivos Fixed Points (en el ejemplo, figura 21, se muestra el caso para 8 amarres)

**Figura 21**

*Configuración para la simulación*

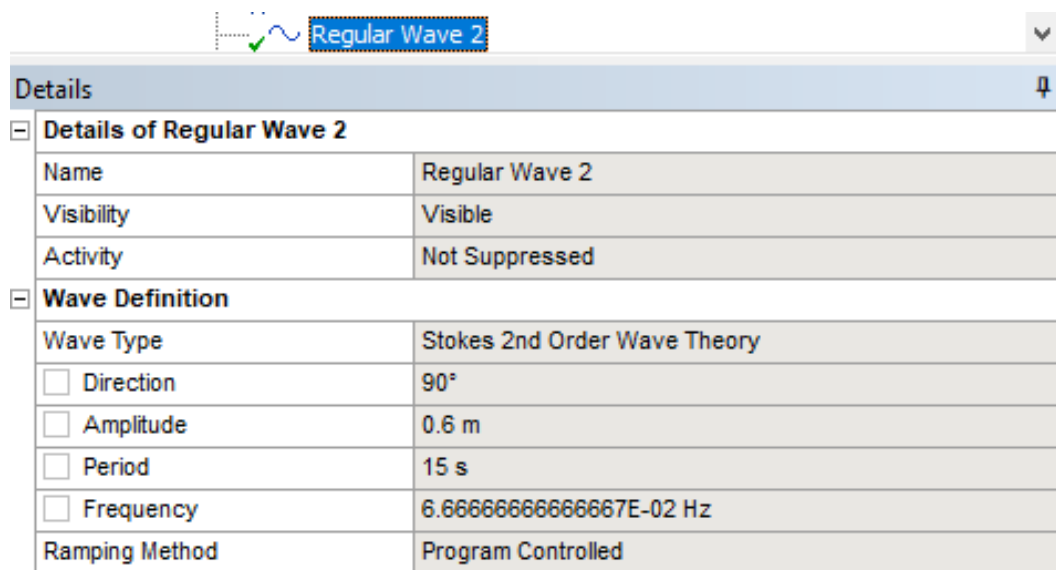


### 3.2.4 Configuración de los amarres

La configuración de los amarres para la Columna de Agua Oscilante (OWC) flotante se dará en tres clases, de 4 amarres, de 6 amarres y de 8 amarres, amarres de cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo con sentido de ola regular de tipo Stokes de 2° orden, con una respectiva dirección de ola (ver figura 22)

**Figura 22**

*Configuración de ola regular*

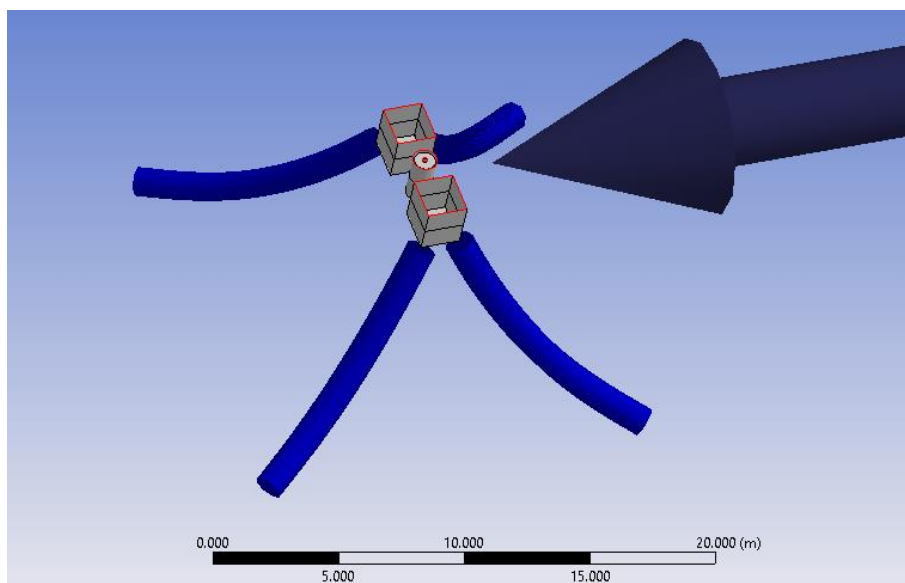


Details of Regular Wave 2	
Name	Regular Wave 2
Visibility	Visible
Activity	Not Suppressed

Wave Definition	
Wave Type	Stokes 2nd Order Wave Theory
<input type="checkbox"/> Direction	90°
<input type="checkbox"/> Amplitude	0.6 m
<input type="checkbox"/> Period	15 s
<input type="checkbox"/> Frequency	6.66666666666667E-02 Hz
Ramping Method	Program Controlled

**Figura 23**

*Modelado del OWC con 4 cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola)*

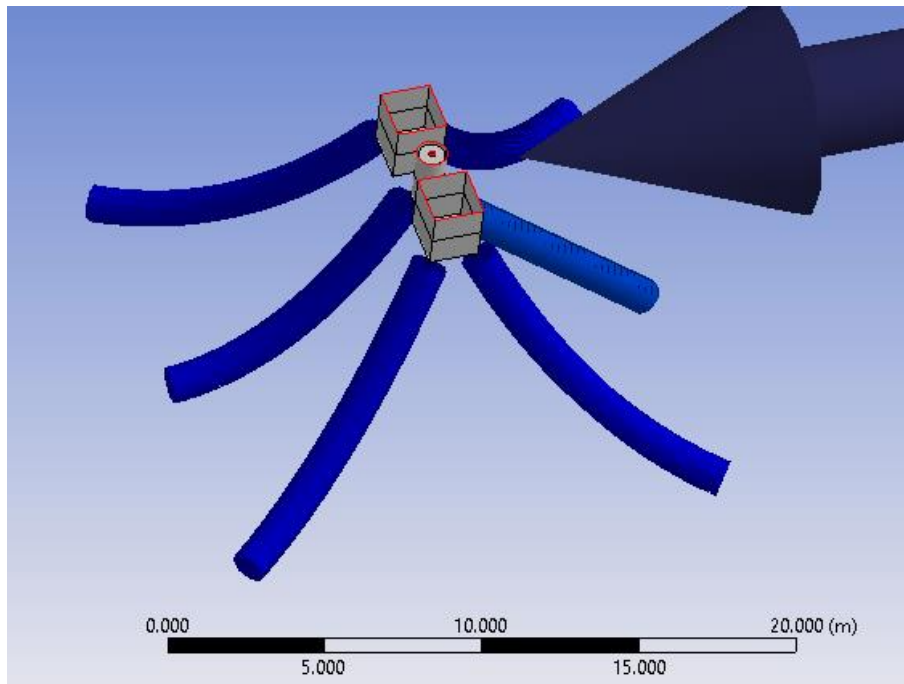




Continuación, se representan los amarres configurados en las figura 23, 24 y 25, respectivamente a 4, 6 y 8 amarres. Vale la pena resaltar que los amarres en las figuras presentan una forma con una anchura en su diámetro, eso es representativo propio del programa para visualizar el comportamiento del amarre de tipo catenaria, así como la flecha grande azul indicando la incidencia de la ola regular de tipo Stokes de 2° orden. Estos artificios son usados en modelamiento y simulación numérica para observar mejor el fenómeno o tener una mejor amplitud de las variaciones u ocurrencias u comportamiento de un elemento.

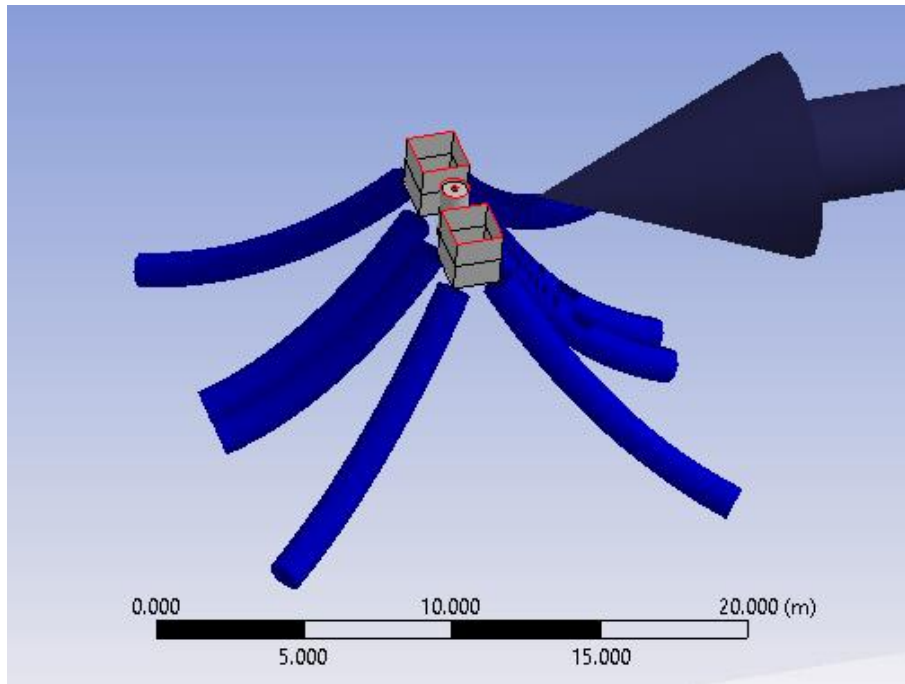
#### **Figura 24**

*Modelado del OWC con 6 cuerdas tipo catenarias fijas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola)*



### Figura 25

*Modelado del OWC con 8 cuerdas tipo catenarias fijadas en el fondo (La flecha azul indica el sentido de la ola)*



### 3.3 Teoría de ondas de Stokes de 2º orden

Stokes, considerado un pionero en la teoría de olas no lineales, realizó un importante avance en 1847 al describir los cambios que se introducían en su teoría en comparación con la teoría lineal propuesta por Airy. Estos cambios se hacen evidentes en la morfología de la ondulación, donde las diferencias entre ambas teorías se vuelven apreciables.

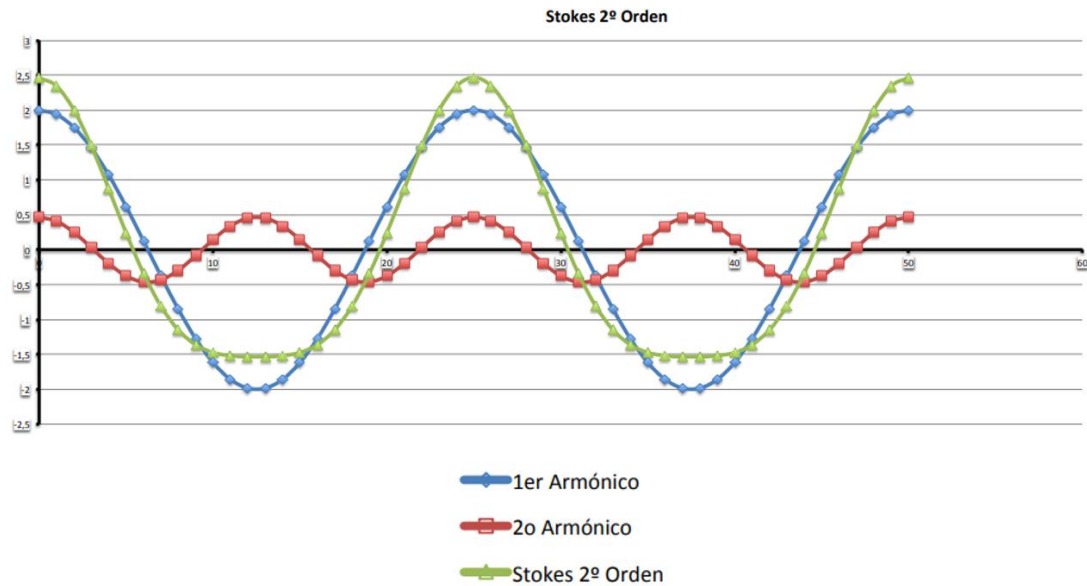
En la teoría lineal, las olas se describen como ondas sinusoidales simples, con crestas y depresiones uniformes. Sin embargo, en la teoría no lineal de Stokes, las ondas presentan crestas más pronunciadas y estrechas, mientras que las depresiones son más someras y anchas. Esto se debe a que la teoría no lineal considera interacciones y efectos no tenidos en cuenta en la teoría lineal, lo que lleva a una morfología más compleja y realista en las olas.

Un concepto importante introducido por Stokes es la descomposición de la onda de segundo orden en dos ondas senoidales acopladas. Este mecanismo de acoplamiento de

ondas senoidales se aplica en representaciones más complicadas que resultan de la superposición de ondas básicas senoidales para obtener modelos más precisos y detallados de los fenómenos que ocurren en la naturaleza.

**Figura 26**

*Composición de una onda de Stokes de 2º orden a partir de dos componentes senoidales*



Este enfoque de representación más compleja es esencial para entender fenómenos naturales complejos, como el comportamiento del mar durante tormentas o tsunamis. Al permitir la combinación de múltiples ondas senoidales y su interacción, la teoría de Stokes y otras teorías no lineales proporcionan una base sólida para el estudio y la comprensión de las olas en diversos entornos, y su aplicación en el diseño y análisis de sistemas como la Columna de Agua Oscilante (OWC) mencionado anteriormente. La combinación de estas teorías avanzadas con herramientas de modelado como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite abordar fenómenos complejos y mejorar el conocimiento de las olas y su comportamiento en el vasto escenario marino.

El desarrollo de Stokes se basó en un sumatorio de una serie de términos dependientes del parámetro de expansión de la perturbación ( $\epsilon = k \cdot a$ ), de tal modo que se modelaba una función distinta en función del número de términos, pudiéndose expresar el potencial de velocidad según la siguiente ecuación.

$$\phi = \epsilon \phi_1 + \epsilon^2 \phi_2 + \dots + \epsilon^n \phi_n \quad (1)$$

Donde  $\phi_1$  se corresponde con el término de la teoría lineal,  $\phi_2$  con el término de la teoría de segundo orden de Stokes, y así sucesivamente. La ecuación de superficie de segundo orden de Stokes se corresponde con el sumatorio de dos términos senoidales como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$y = a \cos(mx) + Ka^2 \cos(2mx) \quad (2)$$

Donde:

$$m = \frac{2\pi}{L}$$

$$K = \frac{\pi}{L} \left[ \frac{\left( e^{\frac{2\pi d}{L}} + e^{-\frac{2\pi d}{L}} \right) \cdot \left( e^{\frac{4\pi d}{L}} + e^{-\frac{4\pi d}{L}} + 4 \right)}{2 \left( e^{\frac{2\pi d}{L}} - e^{-\frac{2\pi d}{L}} \right)^3} \right] \quad (3)$$

$$a = \frac{h}{2}$$

Correspondiéndose  $d$  con la profundidad,  $L$  con la longitud de onda y  $h$  con la altura de la ola.

Como la teoría de Ondas de segundo orden de Stokes es la escogida para la presente simulación se procede a introducir todos los datos anteriormente indicados en AQWA (en Hydrodynamic Response) dentro de Ansys. La ventaja de usar AQWA es que su interfaz gráfica solo requiere datos de entrada como longitudes, alturas de ola y puntos de amarre dentro de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y el fondo marino, una vez introducidas todas estas variables, se plotean los resultados mostrados en el Capítulo IV.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

Para la aplicación de la simulación numérica en el Columna de Agua Oscilante (OWC) con amarre, se detallarán 9 casos del comportamiento del OWC flotante con flotadores respecto la amplitud de la ola y número de cuerdas como amarre:

- Caso 1: Amplitud de Ola 0.2m con 4 cuerdas como amarre
- Caso 2: Amplitud de Ola 0.4m con 4 cuerdas como amarre
- Caso 3: Amplitud de Ola 0.6m con 4 cuerdas como amarre
- Caso 4: Amplitud de Ola 0.2m con 6 cuerdas como amarre
- Caso 5: Amplitud de Ola 0.4m con 6 cuerdas como amarre
- Caso 6: Amplitud de Ola 0.6m con 6 cuerdas como amarre
- Caso 7: Amplitud de Ola 0.2m con 8 cuerdas como amarre
- Caso 8: Amplitud de Ola 0.4m con 8 cuerdas como amarre
- Caso 9: Amplitud de Ola 0.6m con 8 cuerdas como amarre

Para cada caso, el periodo de olas regulares es de 15 segundos, además la comparativa se enfocará en la respuesta del Heave (posición vertical del OWC) y Pitch (Ángulo de cabeceo) a fin de conocer que tanto oscila el OWC para diferentes condiciones de ola y amarres.

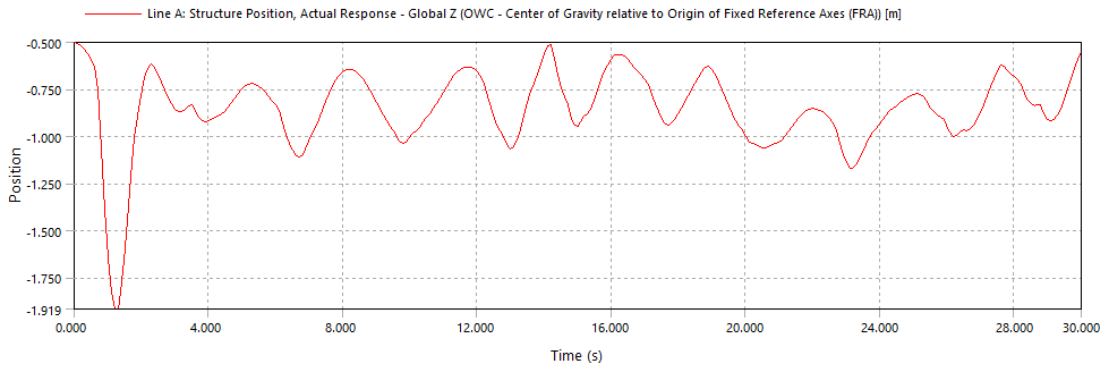
#### **4.1 Resultados de caso 1**

A continuación, se presentarán los resultados de caso 1 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.2 m y con 4 cuerdas como amarre. Se

visualizará la respuesta del Heave y Pitch del OWC y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos.

**Figura 27**

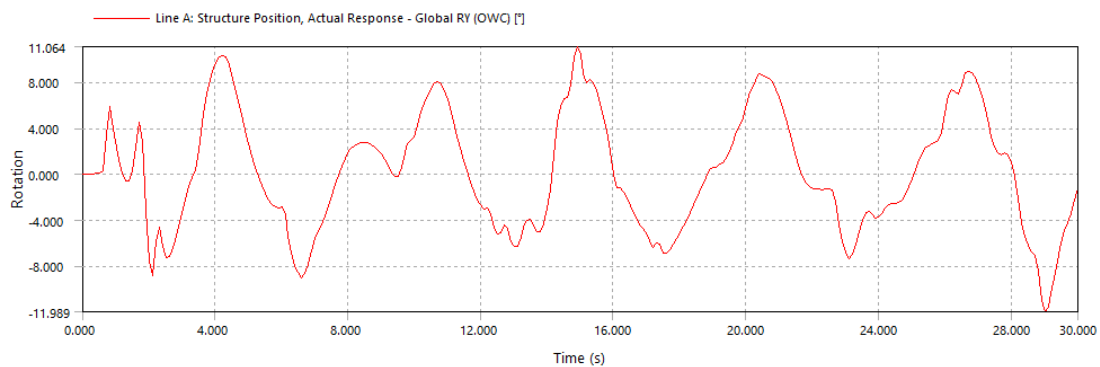
*Respuesta Heave del OWC para el caso 1*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 28**

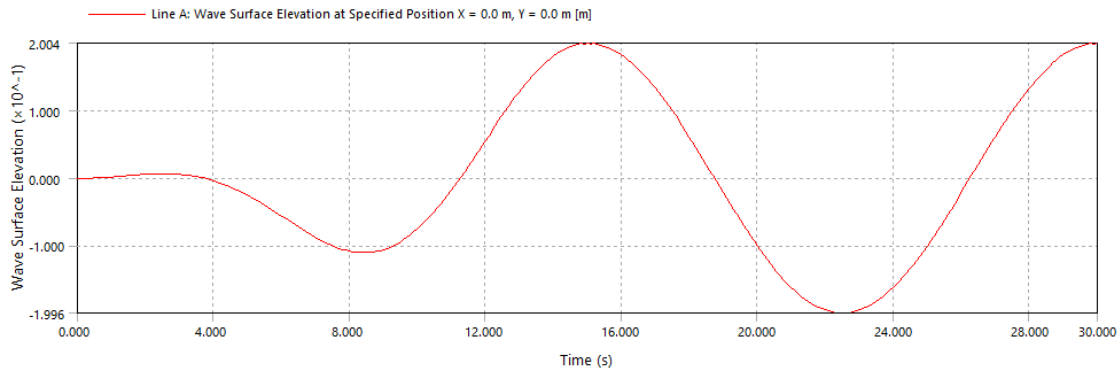
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 1*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 29**

*Elevación de Ola para el caso 1*



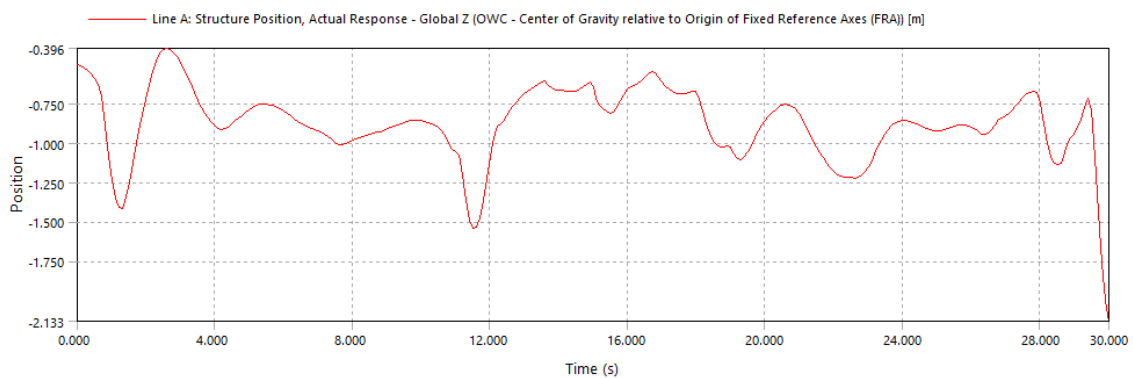
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

## 4.2 Resultados de caso 2

A continuación, se presentarán los resultados de caso 2 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.4 m y con 4 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch del OWC y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 30**

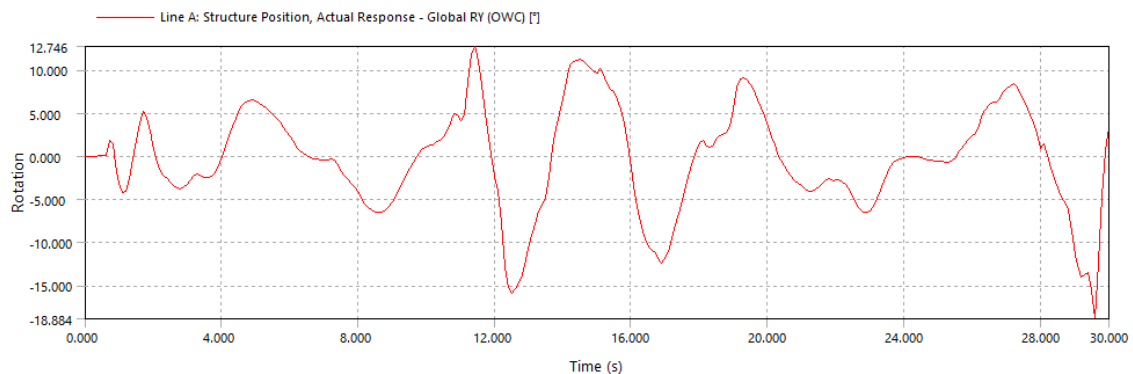
*Respuesta Heave del OWC para el caso 2*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 31**

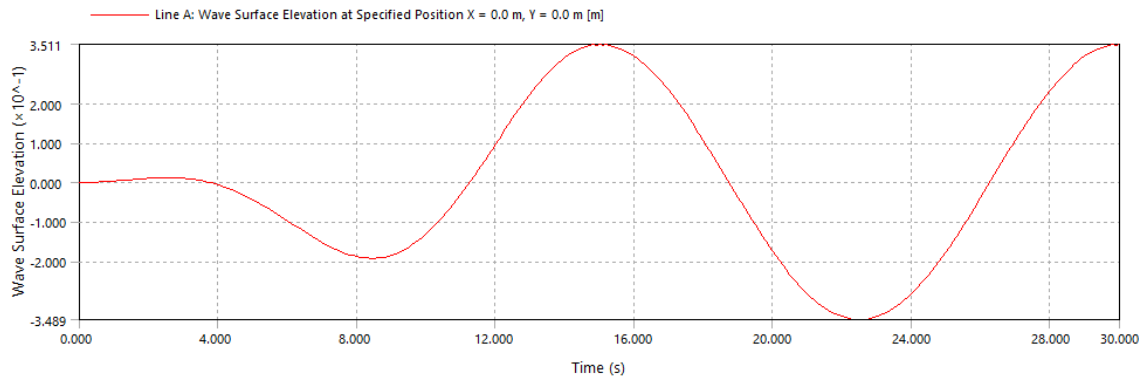
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 2*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 32**

*Elevación de Ola para el caso 2*



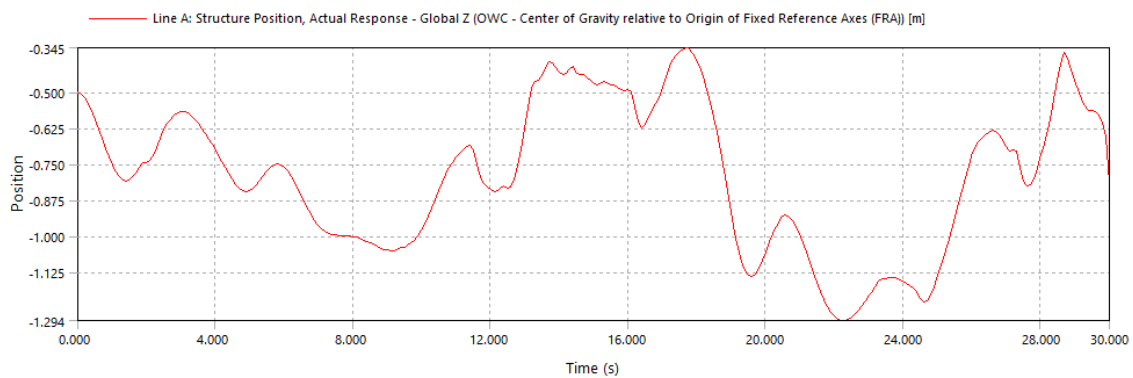
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

### 4.3 Resultados de caso 3

A continuación, se presentarán los resultados de caso 3 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.6 m y con 4 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch del OWC y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 33**

*Respuesta Heave del OWC para el caso 3*

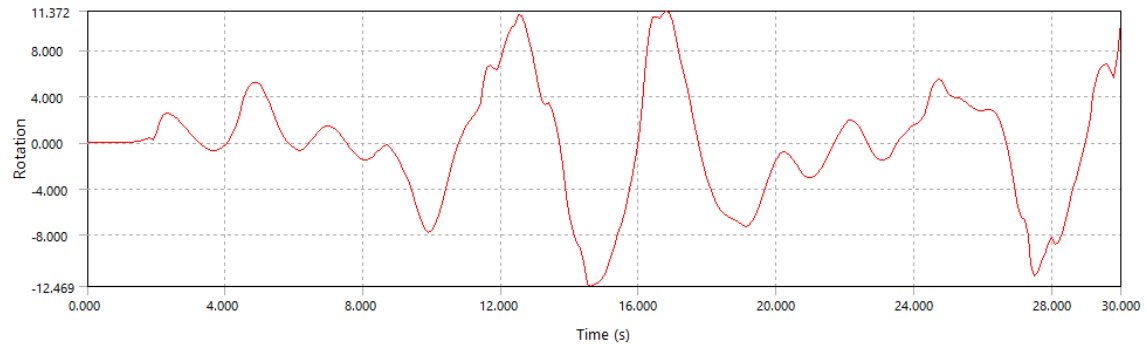


*Nota:* fuente Ansys – AQWA



**Figura 34**

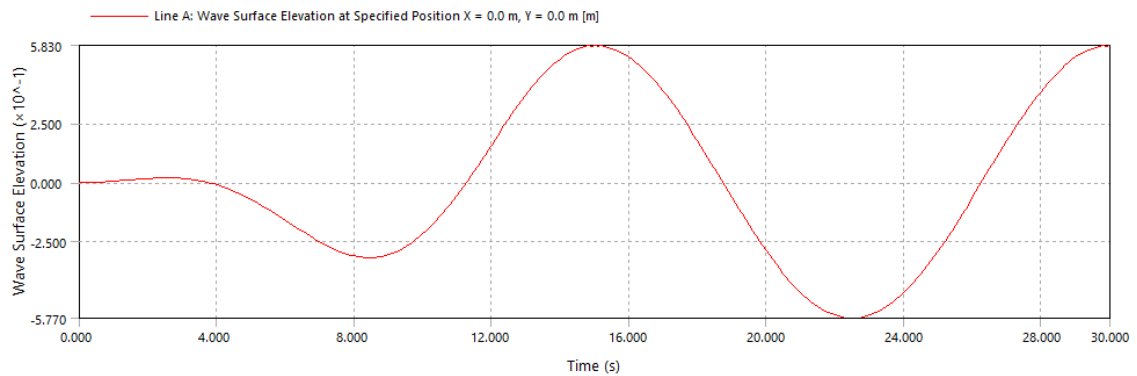
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 3*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 35**

*Elevación de Ola para el caso 3*



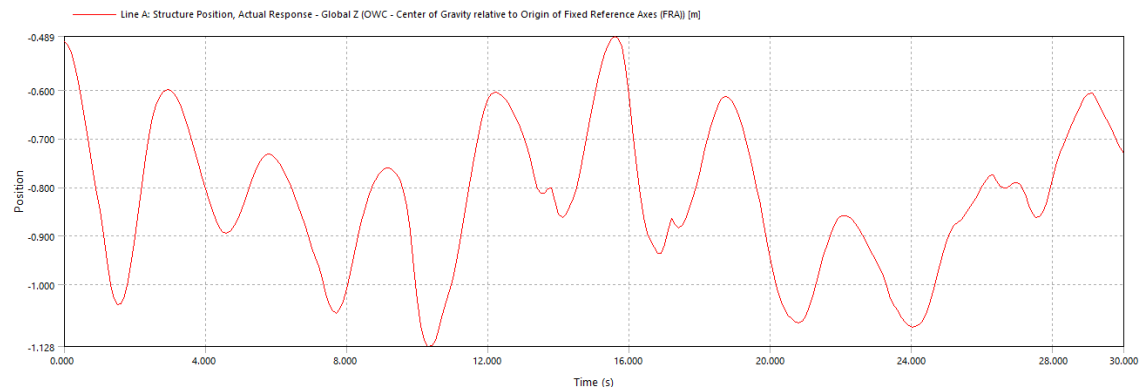
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

#### **4.4 Resultados de caso 4**

A continuación, se presentarán los resultados de caso 4 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.2 m y con 6 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 36**

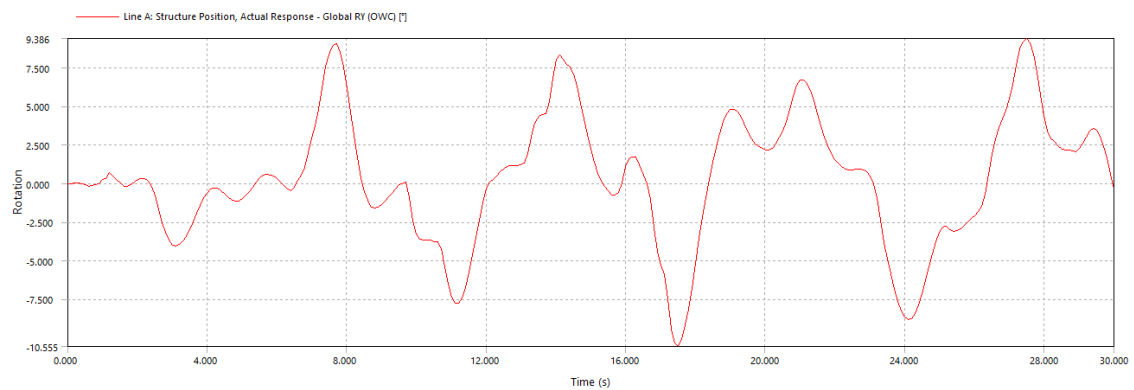
*Respuesta Heave del OWC para el caso 4*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 37**

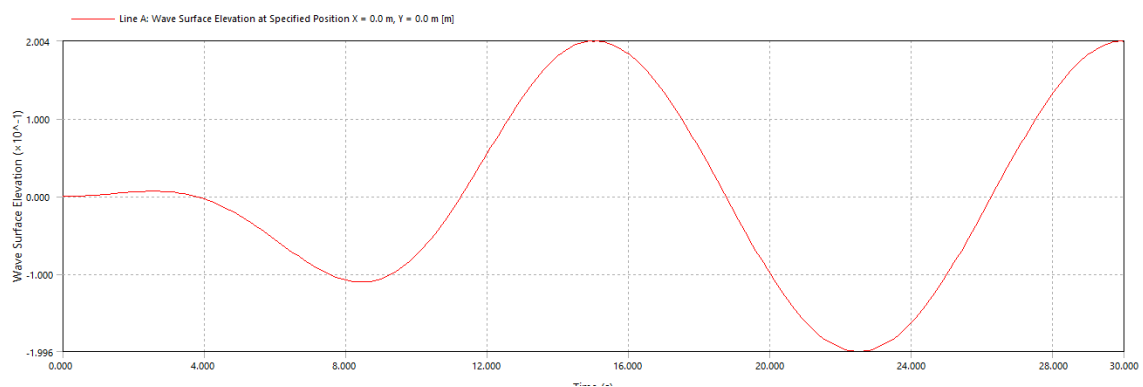
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 4*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 38**

*Elevación de Ola para el caso 4*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

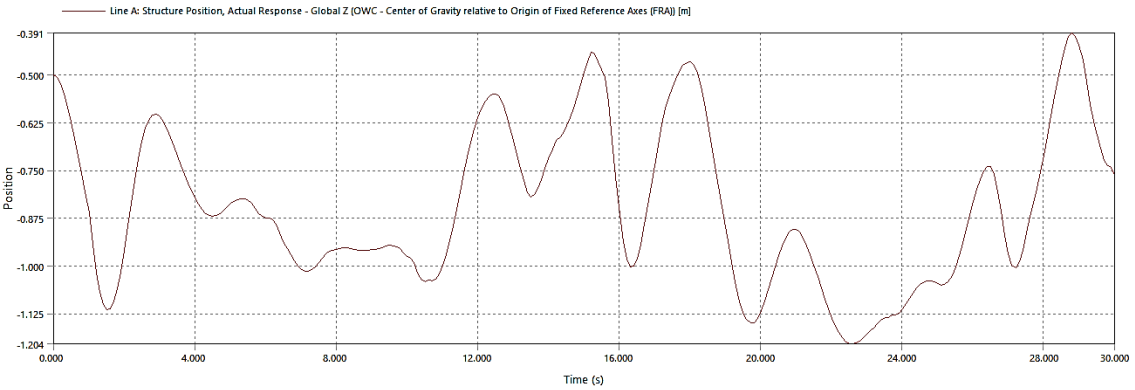
#### **4.5 Resultados de caso 5**

A continuación, se presentarán los resultados de caso 5 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.4 m y con 6 cuerdas como amarre. Se

visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 39**

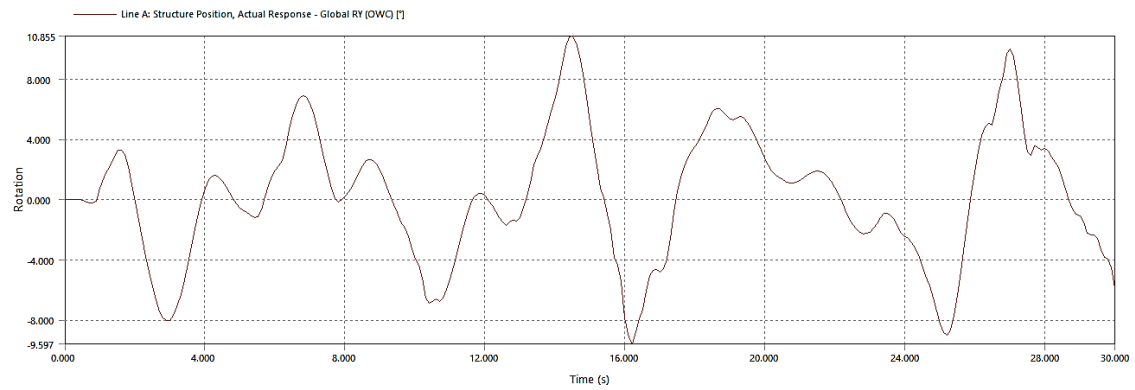
*Respuesta Heave del OWC para el caso 5*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 40**

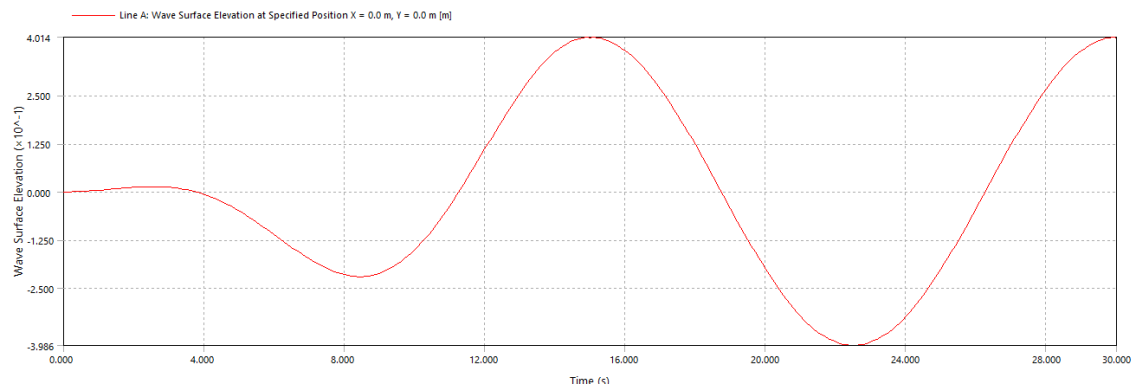
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 5*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 41**

*Elevación de Ola para el caso 5*



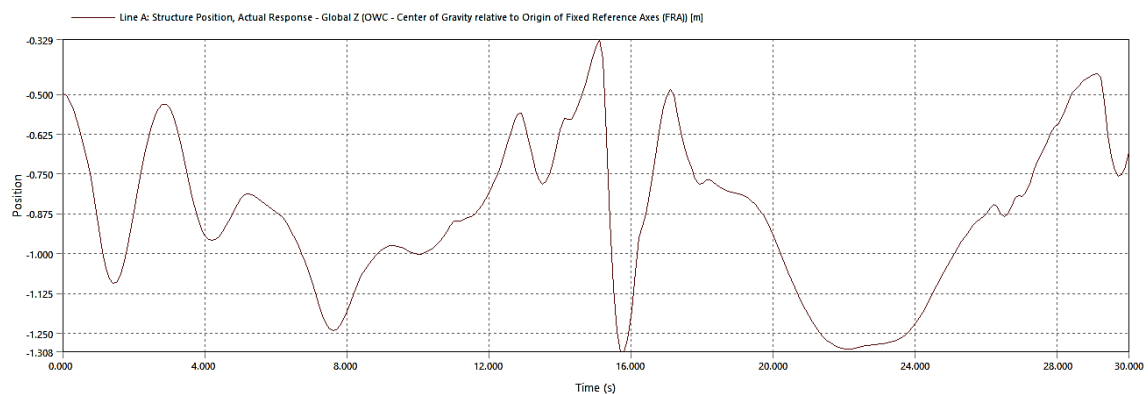
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

## 4.6 Resultados de caso 6

A continuación, se presentarán los resultados de caso 6 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.6 m y con 6 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 42**

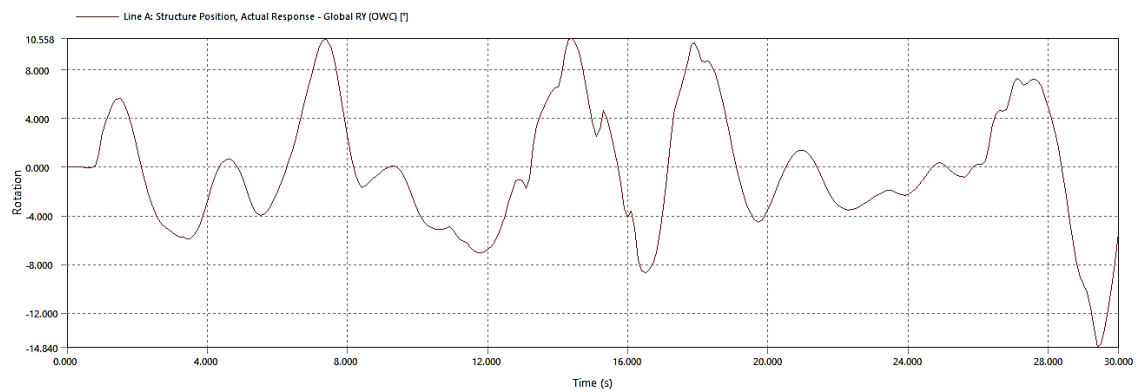
*Respuesta Heave del OWC para el caso 6*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 43**

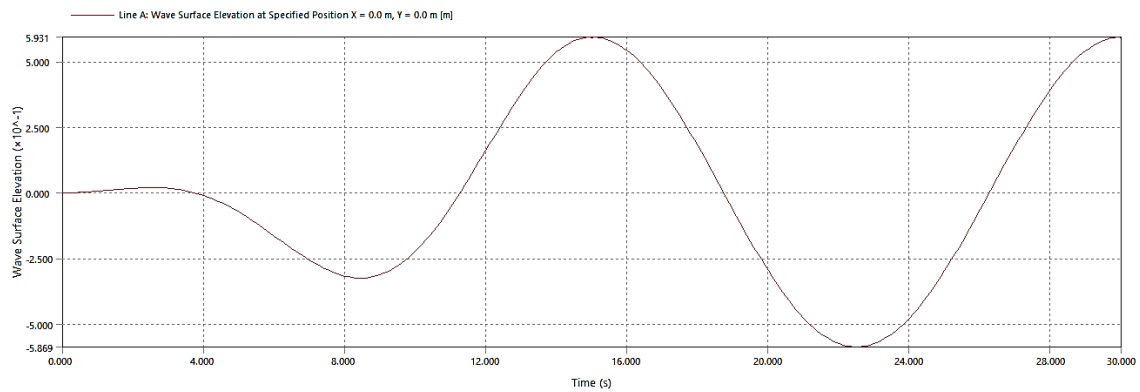
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 6*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 44**

*Elevación de Ola para el caso 6*



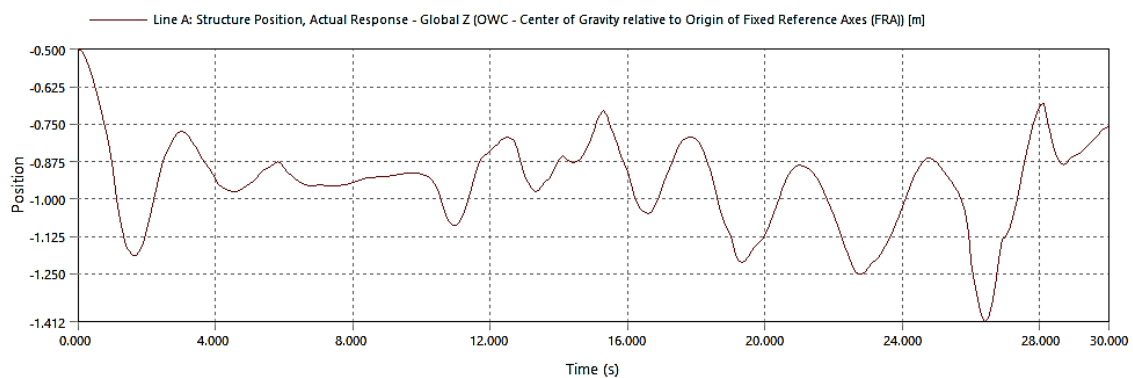
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

#### 4.7 Resultados de caso 7

A continuación, se presentarán los resultados de caso 7 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.2 m y con 8 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 45**

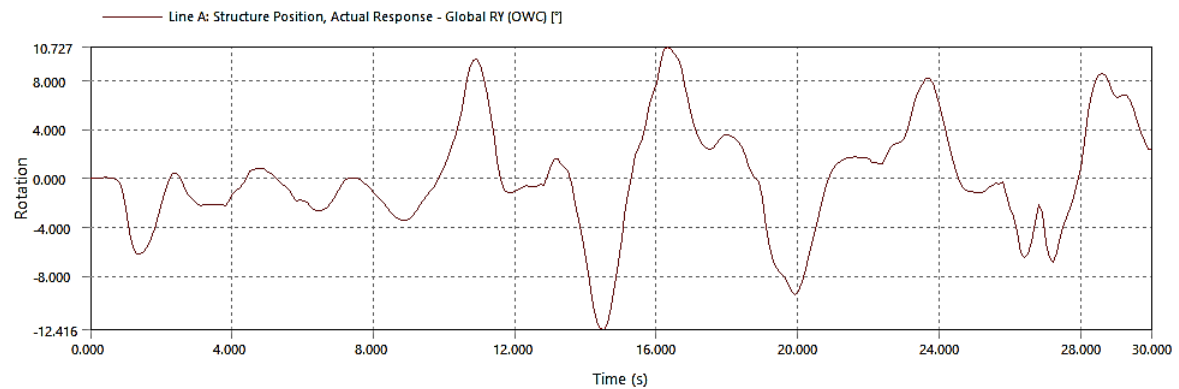
*Respuesta Heave del OWC para el caso 7*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 46**

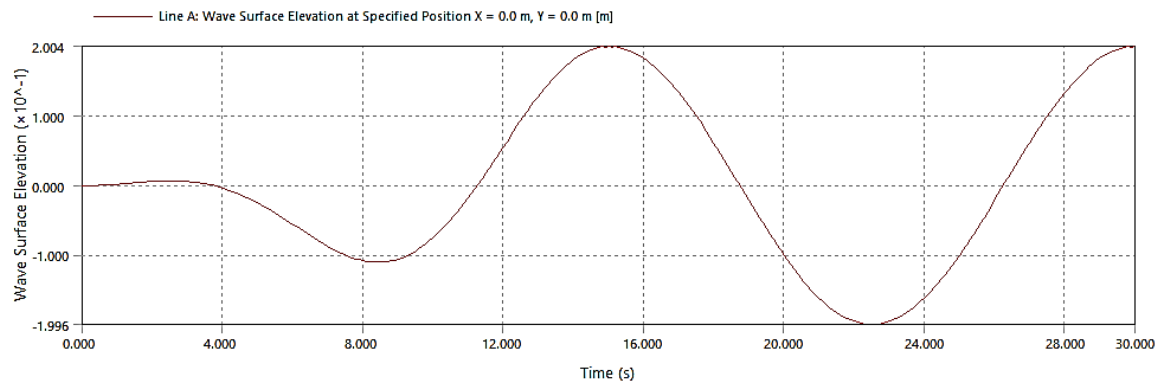
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 7*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 47**

*Elevación de Ola para el caso 7*



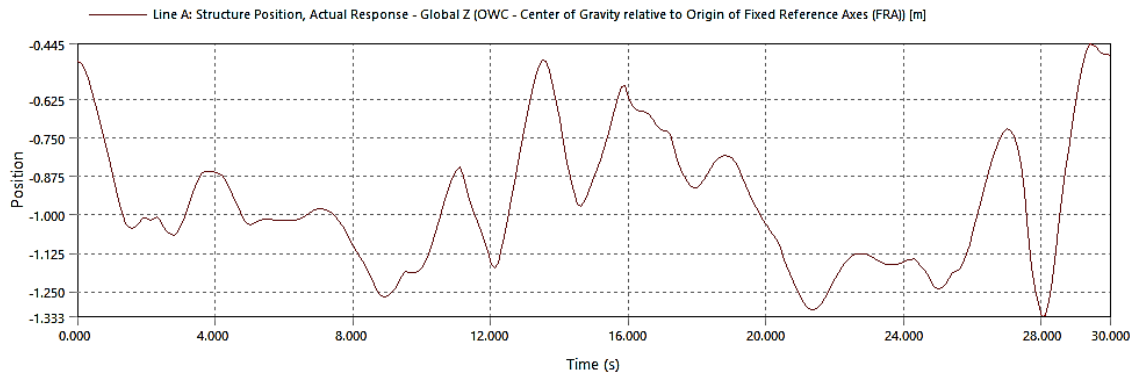
*Nota:* fuente Ansys – AQWA

#### **4.8 Resultados de caso 8**

A continuación, se presentarán los resultados de caso 8 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.4 m y con 8 cuerdas como amarre. Se visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 48**

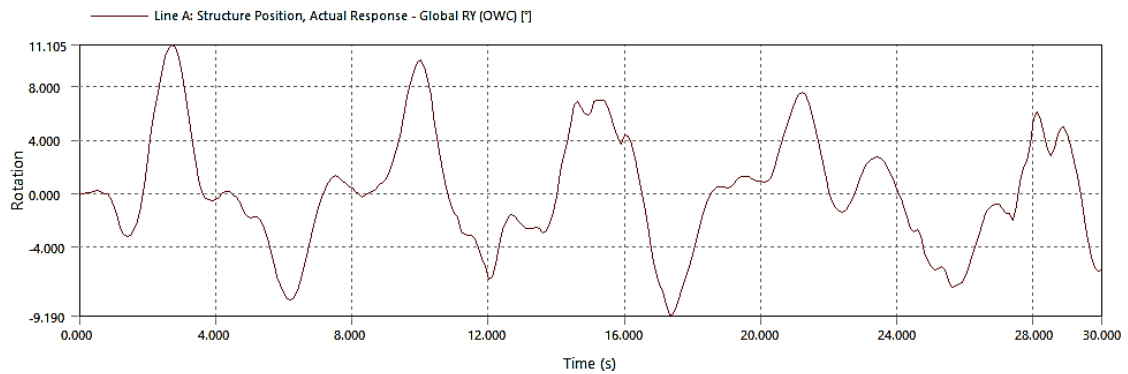
*Respuesta Heave del OWC para el caso 8*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 49**

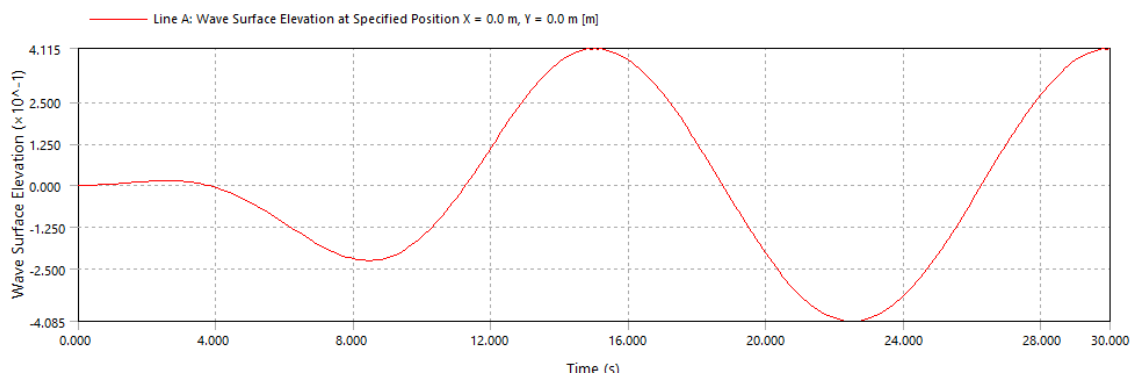
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 8*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 50**

*Elevación de Ola para el caso 8*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

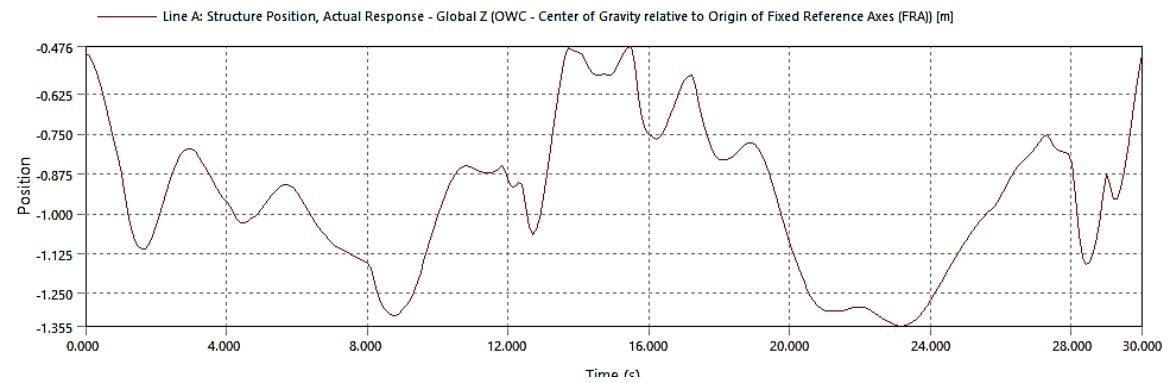
## 4.9 Resultados de caso 9

A continuación, se presentarán los resultados de caso 9 con desarrollo de la ola regular con periodo de 15 segundos, amplitud 0.6 m y con 6 cuerdas como amarre. Se

visualizará la respuesta del Heave y Pitch de la Columna de Agua Oscilante (OWC) y la elevación de la ola regular para un periodo de 15 segundos para una aplicación de simulación numérica utilizando el ANSYS AQWA. en la simulación.

**Figura 51**

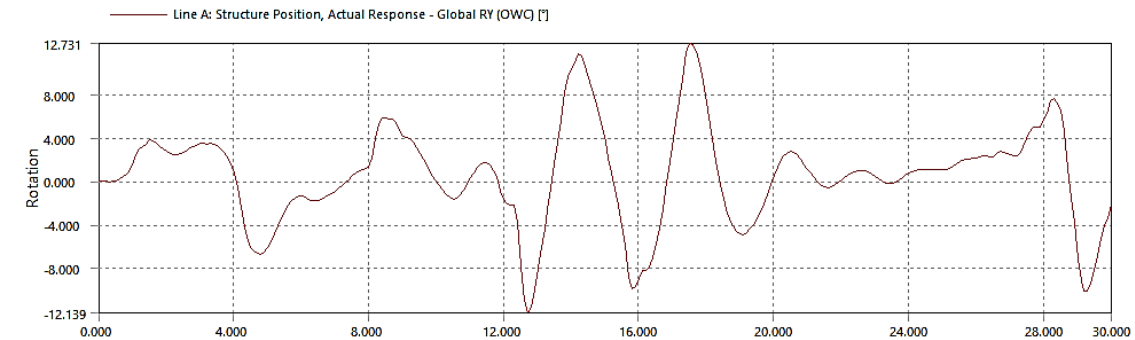
*Respuesta Heave del OWC para el caso 9*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

**Figura 52**

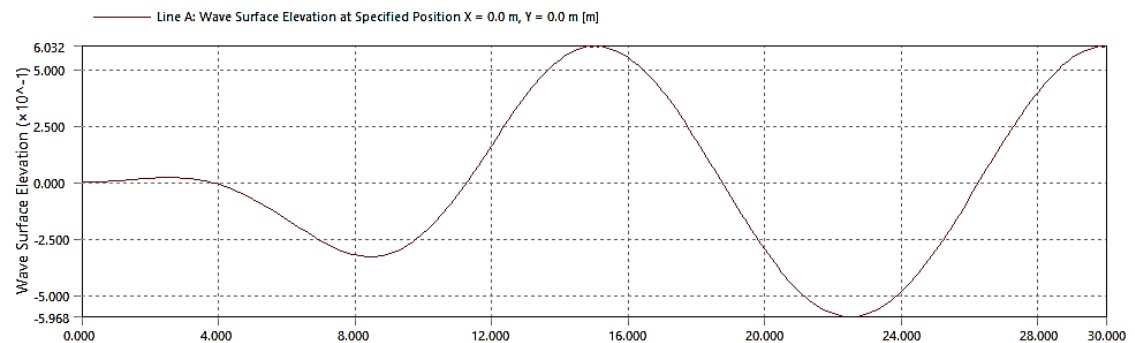
*Respuesta Pitch del OWC para el caso 9*



*Nota:* fuente Ansys – Aqwa

**Figura 53**

*Elevación de Ola para el caso 9*



*Nota:* fuente Ansys – AQWA

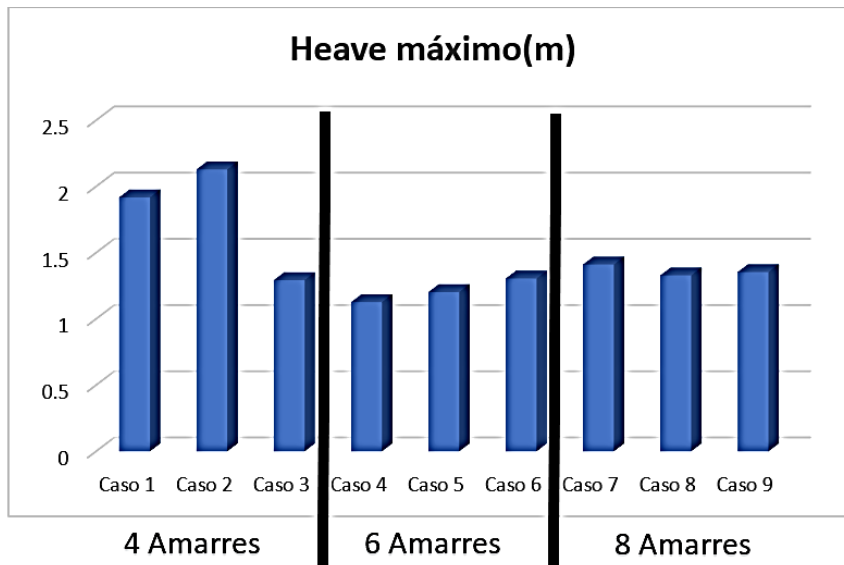


#### 4.10 Discusión de resultados

Se evidencia en los resultados de los 9 casos y en la figura 54 y 55, diagrama de barras del Heave y Pitch, respectivamente, el Heave máximo ocurre en el caso 2 con 4 amarres y el mínimo en el caso 4 con 6 amarres, el Pitch máximo ocurre de la misma forma.

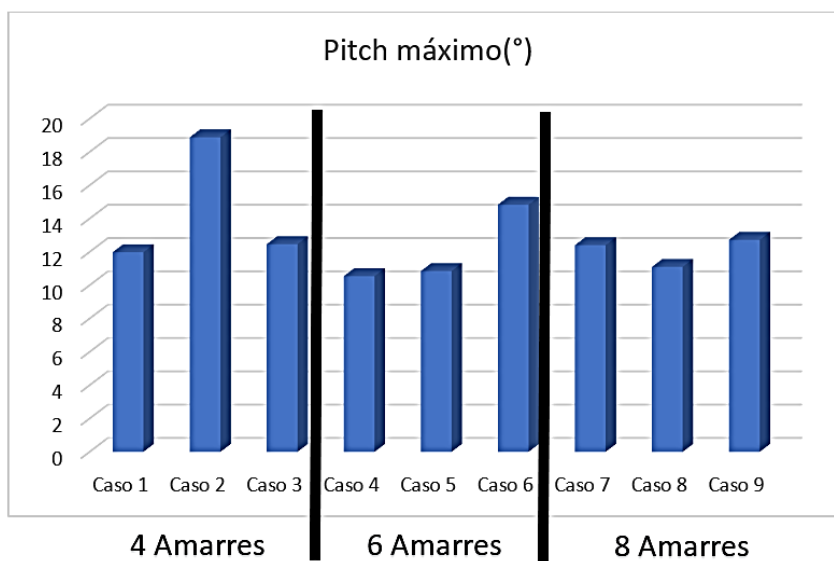
**Figura 54**

*Diagrama de barras comparativo de Heave máximo para cada caso simulado*



**Figura 55**

*Diagrama de barras comparativo de Pitch máximo para cada caso simulado*



Considerando que el objetivo del presente estudio es proponer una configuración que genere respuestas lo menos perturbadas posibles por parte de la Columna de Agua Oscilante (OWC) para diferentes tipos de olas, los casos 4, 5 y 6 que contienen 6 cuerdas con catenarias generan las respuestas más pequeñas respecto los otros casos tanto para Heave como Pitch, ello se debe a que dos de sus amarres son rectos y pasan exactamente por el centro (para las otras configuraciones los amarres son diagonales pero ninguno se amarra al centro del OWC).

La variación de respuesta para las configuraciones de 6 amarres y 8 amarres es mínima por lo que se deduce que si se aumentan más amarres la respuesta de Heave o Pitch no tendrá cambios significativos. Por otro lado, la configuración de 4 amarres posee las respuestas más altas (menos convenientes), lo cual indica que los amarres con cuerdas en posiciones rectas poseen mejor desempeño que cuando se amarran en diagonal.

A pesar de las diferentes amplitud de olas y número de amarres, la elevación olas generado alrededor del OWC mantiene sus valores constantes.

Según el presente estudio existen algunos casos donde existen picos muy elevados de Heave y de Pitch, al ser un escenario poco frecuente, es preferible que los valores sean comparados en un estado estacionario donde estos picos de comportamiento estén presentes.

El tiempo computacional promedio para cada simulación se sitúa alrededor de 5 a 6 horas utilizando un ordenador con una capacidad de 64 GB de RAM, 20 núcleos y 40 hilos a 2.3 GHz de frecuencia. Además, se necesita un espacio de aproximadamente 50 GB en el disco duro para almacenar los resultados. Estos requisitos ponen de manifiesto el elevado nivel de recursos computacionales que demandan las simulaciones en 3D.

#### **4.11 Contrastación de hipótesis**

La hipótesis planteada afirma que "El sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores dará estabilidad a la generación eléctrica". Según la información proporcionada, los resultados de las simulaciones indican que diferentes

configuraciones de amarre impactan la respuesta del convertidor de olas para la estabilidad de generación eléctrica. Las configuraciones con 6 cuerdas y amarres rectos, dos de los cuales pasan por el centro de la Columna de Agua Oscilante (OWC), generan respuestas más pequeñas en Heave y Pitch. Esto sugiere que la disposición de los amarres influye en la estabilidad del sistema. Se observa que la variación entre configuraciones de 6 y 8 amarres es mínima, insinuando que añadir más amarres no produce cambios significativos en la respuesta.

Además, se destaca que las configuraciones con menos amarres diagonales, como la de 4 amarres, presentan respuestas más altas y menos deseables. Estos hallazgos respaldan la idea de que los amarres con cuerdas rectas podrían tener un mejor desempeño que los diagonales. A pesar de diferentes amplitudes de olas y amarres, la elevación de olas alrededor del OWC permanece constante.

Los recursos computacionales requeridos para las simulaciones en 3D son significativos, indicando la complejidad y el esfuerzo necesario para analizar estas configuraciones de amarre. En resumen, los resultados experimentales respaldan la hipótesis al mostrar que el diseño del sistema de amarre impacta la estabilidad del convertidor de olas, afectando la respuesta de Heave y Pitch, lo que subraya la importancia del diseño del amarre para mejorar la estabilidad de conversión de energía oceánica en eléctrica.

Sobre la contrastación de las hipótesis específicas, se tienen:

1. **Hipótesis 1:** La geometría caracterizada de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores, junto con tipos específicos de amarres, influye significativamente en dar estabilidad a la generación eléctrica, según la simulación numérica.

**Contrastación:** Las simulaciones numéricas ofrecen herramientas precisas para evaluar el impacto de diferentes configuraciones de sistemas de amarre en la estabilidad y eficiencia de la conversión de energía en convertidores de olas tipo OWC. Los resultados de las simulaciones sugieren que el número y disposición de los amarres influyen en la

estabilidad de generación eléctrica. La configuración de 6 cuerdas con catenarias muestra respuestas más estables, lo que respalda la hipótesis sobre la influencia de la geometría de amarre en la estabilidad del sistema OWC.

2. **Hipótesis 2:** El comportamiento del Heave y Pitch de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores influye en la estabilidad de generación eléctrica en respuesta a cambios hidroceanográficos mediante simulación numérica.

**Contrastación:** Los resultados indican que las variaciones en los tipos de amarres afectan la respuesta del sistema ante diferentes condiciones de olas. Se observa que ciertas configuraciones proporcionan respuestas más estables incluso ante cambios en las condiciones hidroceanográficas, lo que respalda la hipótesis sobre la influencia de los tipos de amarres en la estabilidad de generación eléctrica bajo estas circunstancias.

#### **4.12 Aporte**

La Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores es un dispositivo que aprovecha la energía de las olas del mar para generar electricidad. Funciona mediante una columna de agua ubicada en un recinto con una abertura hacia el mar. Cuando las olas golpean el recinto, el nivel del agua dentro de la columna oscila hacia arriba y hacia abajo, creando un flujo de aire que mueve una turbina y genera electricidad.

El concepto de "amarres" en esta configuración hace referencia a la conexión de la columna de agua con estructuras sólidas fijadas al lecho marino o a una plataforma flotante. Estos amarres son cables, resortes o incluso estructuras más complejas que permiten un movimiento controlado y restringido de la columna de agua.

Los amarres proporcionan varios beneficios al sistema OWC:

1. **Mayor eficiencia:** Al limitar el movimiento de la columna de agua, se logra una mayor coherencia y uniformidad en la generación de energía, lo que aumenta la eficiencia general del sistema.

2. Menor impacto ambiental: Al restringir el movimiento de la columna de agua, se reducen las fuerzas mecánicas y las cargas sobre la estructura del OWC, lo que disminuye el riesgo de daños a la fauna marina y el hábitat circundante.
3. Estabilidad: Los amarres ayudan a mantener el sistema OWC en su posición óptima, lo que garantiza un rendimiento constante y predecible a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones del mar.
4. Facilidad de mantenimiento: Al controlar el movimiento de la columna de agua, se facilita el acceso para realizar tareas de mantenimiento y reparación de manera más segura y eficiente.

Es importante destacar que la implementación de amarres en un sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores también se presentan algunos desafíos, como la necesidad de un diseño estructural adecuado para soportar las fuerzas de los amarres y las condiciones del entorno marino. Sin embargo, en general, esta configuración mejora significativamente el rendimiento y la viabilidad del OWC como una fuente de energía renovable y sostenible que aprovecha la fuerza de las olas para generar electricidad.

## CONCLUSIONES

El estudio respalda la hipótesis general de que el sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores dará estabilidad a la generación eléctrica. Los análisis en la Columna de Agua Oscilante (OWC) flotante muestran que la configuración de los amarres impacta el comportamiento del sistema. Los resultados indican que, al aumentar el número de cuerdas de amarre, se logra reducir el movimiento vertical (Heave) y la inclinación (Pitch) de la columna de agua en el OWC flotante. Esto sugiere que una mayor cantidad de amarres ofrece un mejor control del sistema, contribuyendo a una mayor estabilidad en la conversión de energía oceánica a eléctrica. Se enfatiza la importancia de encontrar un equilibrio en la configuración de los amarres, evitando un exceso que satura el sistema y afectar su respuesta. Los casos con 6 cuerdas de amarre (casos 4, 5 y 6) muestran mejoras en la estabilidad sin necesidad de utilizar una cantidad excesiva de amarres.

En conclusión, una configuración óptima de amarres, como se evidencia en los casos mencionados, da la estabilidad suficiente para la conversión de energía oceánica a eléctrica en el OWC flotante. Este diseño logra una respuesta controlada y eficiente a las condiciones del oleaje y a las fuerzas hidrodinámicas, optimizando así la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

Como conclusiones específicas, se tienen:

1. La estabilidad de generación eléctrica se ve afectada por la configuración de los amarres en el OWC con dos flotadores. La búsqueda de estabilidad de generación eléctrica en estos sistemas es para aprovechar la velocidad del aire generada por la diferencia de presión interna en la columna de aire del OWC.

Los amarres juegan un papel esencial para mantener un movimiento controlado de la columna de agua, especialmente en ambientes oceánicos con condiciones cambiantes y mayor energía mareomotriz.

2. La estabilidad de generación eléctrica se ve influenciada por los datos hidroceanográficos. En aguas consideradas profundas caracterizada por la profundidad y mayor amplitud y periodo de olas, plantean riesgos para los amarres y dispositivos convertidores. La consideración de datos hidroceanográficos al diseñar y operar los OWC es esencial para asegurar una operación confiable y segura, dimensionando adecuadamente los amarres para resistir condiciones extremas.

## RECOMENDACIONES

Como recomendaciones se tienen:

- Realizar una validación de los resultados obtenidos con una prueba en canal de prueba hidrodinámicas de un modelo a escala del modelo propuesto de esta tesis.
- Realizar evaluaciones de velocidad de salida de aire para más diámetros de agujero de salida de aire del OWC flotante sujeto por amarres y encontrar una función correlacional de la velocidad de salida con el diámetro, siempre que se cuide el tiempo exigido de preprocesamiento y procesamiento de la simulación.
- Realizar un estudio de correlación de velocidad de salida de aire con la amplitud y periodo de ola para un tipo de amarre, sin embargo, esto demandará muchas configuraciones y procesamientos.
- Realizar un estudio complementario evaluando la variación de la profundidad de los amarres respecto al OWC, sometida en las configuraciones de 4, 6 y 8 amarres.
- Realizar un estudio de la influencia de la estabilidad en el generador eléctrico y su eficiencia.



## BIBLIOGRAFÍA

- Berenjkoob, M. N., Ghiasi, M., & Soares, C. G. (2019). Performance of Two Types of Mooring Systems in the Heave Motion of a Two-body Floating Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Application*. doi:10.1007/s11804-019-00082-w
- Chen, H. (2020). A comparison of elastic mooring systems for floating wave energy converters. (Master Thesis). Chalmers University of Technology. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12380/301232>
- Chen, M. (2019). The assessment of mooring line damping for offshore structures. (Doctoral Dissertation). University of Strathclyde. <https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/8336h204q>
- Dragić, M., Hofman, M., Tomin, V., & Miškov, V. (2023). Sea trials of Sigma wave energy converter – Power and efficiency. *Renewable Energy*, 206, 748–766. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.055>
- Howey, B. (2020). A physical and numerical study of an interconnected wave energy array. (Doctoral Dissertation). University of Plymouth. <http://hdl.handle.net/10026.1/15773>
- Lopez-Chavez, R. A. (2022). Reliability analysis of wave energy converters. (Doctoral Dissertation). University of Edinburgh. <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/38876>
- Miškov, V., Dragić, M., Tomin, V., & Hofman, M. (2023). Sea trials of Sigma wave energy converter – slacking and snapping of TLP mooring lines. *Marine Structures*, 89(103378), 103378. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103378>

- Palm, J., Eskilsson, C., Paredes, G. M., & Bergdahl, L. (2016). Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation. *International Journal of Marine Energy*, 16, 83–99. doi:10.1016/j.ijome.2016.05.003
- Pols, A., Gubesch, E., Abdussamie, N., Penesis, I., & Chin, C. (2021). Mooring Analysis of a Floating OWC Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 228. doi:10.3390/jmse9020228
- Sirigu, S. A., Bonfanti, M., Begovic, E., Bertorello, C., Dafnakis, P., Giorgi, G., ... Mattiazzo, G. (2020). Experimental Investigation of the Mooring System of a Wave Energy Converter in Operating and Extreme Wave Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 180. doi:10.3390/jmse8030180
- Sun, P., Liu, S., He, H., Zhao, Y., Zheng, S., Chen, H., & Yang, S. (2021). Simulated and experimental investigation of a floating-array-buoys wave energy converter with single-point mooring. *Renewable Energy*, 176, 637–650. doi:10.1016/j.renene.2021.05.084
- U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Department of the Air Force, & Office of the Deputy Under Secretary of Defense. (2005). Design: Moorings - unified facilities criteria (UFC). ISBN: 1466296119
- Wang, H., & Falzarano, J. (2017). Energy balance analysis method in oscillating type wave converter. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 3(3), 193–208. <https://doi.org/10.1007/s40722-017-0081-y>
- Xu, S., Wang, S., & Guedes Soares, C. (2019). Review of mooring design for floating wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 595–621. doi:10.1016/j.rser.2019.05.027

## **ANEXO A**

### **MATRIZ DE CONSISTENCIA**

En este anexo se presenta la matriz de consistencia en forma de tabla.

**Tabla A1**

*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Permitirá el sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante con dos flotadores dar estabilidad a la generación eléctrica?	Determinar el sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores para dar estabilidad a la generación eléctrica.	El sistema de amarre de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores dará estabilidad a la generación eléctrica	<u>V. Dep:</u> <i>Estabilidad de la generación eléctrica</i>	Configuración de amarre	• # de amarre	<b>Tipo y nivel de Investigación:</b> Tipo Aplicada  Nivel exploratorio  <b>Unidad de análisis:</b> Convertidor de olas tipo OWC cilíndrico inspirado de Wang, H., & Falzarano, J. (2017) con dos flotadores cúbicos con configuración de amarre  <b>Procesamiento de datos:</b> Simulación numérica CFD – Ansys AQWA
<u>Específicos:</u>	<u>Específicos:</u>	<u>Específicos:</u>	<u>V. Ind 1:</u>			
1. ¿Cuál es la geometría óptima para una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y qué tipos de amarres son más adecuados para dar estabilidad del sistema durante la generación eléctrica? 2. ¿Cómo se mide y predice el comportamiento del movimiento vertical (Heave) y el balanceo (Pitch) de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y diferentes tipos de amarres bajo la influencia de cambios hidroceanográficos, utilizando técnicas de simulación numérica para dar estabilidad a la generación eléctrica?	1. Caracterizar la geometría de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y tipos de amarres para aplicación de simulación numérica. 2. Evaluar el comportamiento del Heave y Pitch de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores y tipos de amarres afectada por los cambios hidroceanográficos mediante simulación numérica.	1. La geometría caracterizada de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores, junto con tipos específicos de amarres, influye significativamente en dar estabilidad a la generación eléctrica, según la simulación numérica. 2. El comportamiento del Heave y Pitch de una Columna de Agua Oscilante (OWC) con dos flotadores influye en la estabilidad de generación eléctrica en respuesta a cambios hidroceanográficos mediante simulación numérica.	<u>V. Ind 1:</u> <i>Simulación numérica de sistema de amarre de OWC con dos flotadores</i>	Desplazamiento angular de cabeceo OWC con dos flotadores y amarres  Desplazamiento vertical de la OWC  Ola  Simulación numérica de amarre	• Pitch  • Heave  • Amplitud de la ola • Velocidad de ola  • Tipo de plataforma flotante • Tipo de enmallado • Característica de cuerda	