

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Prueba de concepto experimental de un Convertidor de Energía de las Olas
(WEC) para las Islas Galápagos

INGE-2327

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Steeven Josue Carrion Bustamante

José Anibal Barba Lopez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi madre y a mi padre, mi principal motor de impulso y mi motivo por el cual me supero todos los días. Desde que era un niño siempre tuve la visión de llegar lejos, y no hubiese podido dar un solo paso sin su amor y confianza. También se lo dedico a mis hermanos, Bryan, Dustin y Nahomi, quienes han estado conmigo en cada parte del proceso y me han brindado su apoyo incondicional. De igual forma a mis perritas, Cloe y Winny, quienes mediante sus travesuras me han motivado a no rendirme.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a quienes ya no están físicamente pero siempre estarán en mi corazón, a Paquito, a mi Dorita y a mi Codie, donde quiera que se encuentren... ¡Lo Logramos!

- **Steeven Josue Carrión Bustamante.**

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis queridos padres, fuente inagotable de amor y sabiduría, cuyo inquebrantable apoyo ha sido el faro que guió cada paso de mi trayectoria académica. A mi hermana, cómplice de mis sueños y confidente incansable, le agradezco por su constante escucha y aliento incondicional. A toda mi familia, cuyo respaldo ha sido el cimiento de mis logros. A mis amigos, quienes han compartido risas, desafíos y momentos inolvidables, agradezco por su amistad leal que ha perdurado hasta el último capítulo de esta travesía académica. Este logro no solo es mío, sino de cada uno de ustedes que ha dejado una huella imborrable en mi camino.

- **José Anibal Barba López.**

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar esta meta. A mi Mamima y a Pato, quienes estuvieron junto a mí siempre, a mis amigos, familiares y personas que, en su momento, me brindaron su aliento y me impulsaron a seguir luchando.

Quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Rubén Paredes, quien me enseñó el valor de la paciencia y mostró el camino de la innovación científica, demostrándome que el mundo se puede mejorar a través de la investigación.

Un sincero agradecimiento al Dr. Patrick Townsend, quien fue mi maestro, mentor y mi amigo durante todo el proceso académico, permitiéndome contribuir con la industria naval a través de su enseñanza, confianza y sabiduría.

Finalmente, quiero agradecer a la Ing. Myriam Mejía H., sin su ayuda, apoyo y cariño, este trabajo no hubiese sido posible.

- **Steeven Josue Carrion Bustamante.**

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por ser mi guía a lo largo de este viaje académico. Agradezco sinceramente a todas las personas que contribuyeron de manera invaluable a la realización de esta tesis. Mi director de tesis merece un agradecimiento especial por su orientación experta, paciencia y apoyo constante. A mis profesores y colegas, gracias por enriquecer significativamente el desarrollo de este trabajo con sus conocimientos. A mi familia, les estoy agradecido por su inquebrantable respaldo emocional. Reconozco el valioso aporte de mis amigos y aquellos que me brindaron apoyo y aliento, siendo fundamentales para superar desafíos. Este logro no habría sido posible sin la colaboración y respaldo de todos ustedes.

- **José Anibal Barba Lopez.**

Declaración Expresa

Nosotros, Steeven Josue Carrion Bustamante y José Anibal Barba López, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 27 de enero del 2024.

Steeven J. Carrion B.

José A. Barba L.

Evaluadores

Tadea M. Quintuña, MSc

Profesor de Materia

Rubén J. Paredes, PhD

Tutor de proyecto

Resumen

La exploración de nuevas formas para aprovechar la energía ha llevado al desarrollo de tecnologías centradas en fuentes renovables, como el uso de convertidores de energía de las olas (WEC). Este proyecto presenta los resultados de las pruebas experimentales de concepto de un prototipo WEC utilizando un dispositivo sumergido de sintonización pasiva para la absorción de energía de las olas en las Islas Galápagos, que está siendo desarrollado por investigadores de la EPN, USFQ, y ESPOL. Para ello, se utilizó un modelo a escala 1:100, con el que se realizaron pruebas hidrostáticas en un tanque de 11x4x0,8[m], donde se evaluó la altura metacéntrica (GMT), el decaimiento logarítmico, y el coeficiente de amortiguamiento. Luego, se realizaron pruebas hidrodinámicas en un canal hidráulico de 10x0,32x0,35[m], donde se determinó el Operador de Amplitud de Respuesta del balance (RAO) en olas regulares. De los resultados se observó que, el GMT se reduce de 4.068[cm] a 1.249[cm], de igual forma la frecuencia natural, pasando de 5.836[rad/s] a 1.02[rad/s]. Concluyendo que, con el dispositivo sumergido se puede 'sintonizar' la frecuencia natural del prototipo en un amplio rango de frecuencias de oleaje y este concepto puede ser aplicado a otros WECs que tengan cuerpos flotantes.

Palabras Clave: energía, undimotriz, frecuencia, inercia, sintonizador

Abstract

The exploration of new ways to harness energy has led to the development of technologies focused on renewable sources, such as the use of wave energy converters (WEC). This project presents the results of experimental proofs of concept of a WEC prototype using a passively tuned submerged device for wave energy absorption in the Galapagos Islands, which is being developed by researchers from EPN, USFQ, and ESPOL. For this, a 1:100 scale model was used, with which hydrostatic tests were carried out in a 11x4x0.8[m] tank, where the metacentric height (GMT), the logarithmic decay, and the damping coefficient were evaluated. Then, hydrodynamic tests were carried out in a 10x0.32x0.35[m] hydraulic channel, where the balance Response Amplitude Operator (RAO) in regular waves was determined. From the results, it was observed that the GMT is reduced from 4.068[cm] to 1.249[cm], as is the natural frequency, going from 5.836[rad/s] to 1.02[rad/s]. Concluding that, with the submerged device, the natural frequency of the prototype can be 'tuned' in a wide range of wave frequencies and this concept can be applied to other WECs that have floating bodies.

Keywords: energy, wave, frequency, inertia, tuning

Índice General

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	VII
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XV
Capítulo 1.....	16
1. Introducción.....	17
1.1. Descripción del Problema.....	19
1.2. Justificación del Problema.....	20
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo general – usar el objetivo declarado en el poster.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4. Marco teórico.....	21
1.4.1. Teoría de Olas gravitacionales.....	21
1.4.2. Compensador pasivo de balance.....	22
1.4.3. Convertidores de energía por oleaje (WEC).....	24
1.4.4. Características de oleaje en las islas Galápagos.....	25
1.4.5. Potencia energética de las olas.....	26
1.4.6. Batimetría General.....	27
1.4.7. Zonas ideales para la implementación.....	28

Capítulo 2.....	32
2. Metodología.....	33
2.1. Condición de Oleaje local.....	34
2.2. Construcción de prototipo WEC.....	36
2.3. Sitios de pruebas.....	38
2.4. Descripción de equipos.....	40
2.5. Diseño de experimento.....	41
2.6. Experimento de inclinación.....	43
2.6.1. Diseño de pesos para el experimento de inclinación.....	44
2.7. Prueba de decaimiento libre.....	46
2.8. Análisis dimensional de modelo y olas.....	48
2.9. Respuesta en olas regulares.....	48
2.9.1. Teoría simplificada para generadores de olas planas en aguas poco profundas.....	49
2.9.2. Número de ola.....	50
2.9.3. Frecuencia de la ola.....	50
2.9.4. Proceso experimental.....	50
2.9.5. Propiedades de las olas.....	52
2.10. Análisis de datos.....	53
2.11. Análisis económico.....	55
Capítulo 3.....	57
3. Resultados y Análisis.....	58
3.1 Resultados de la prueba de inclinación.....	58

3.1.1	Prueba de inclinación para configuraciones con lastre	58
3.2.	Resultados de la prueba de decaimiento logarítmico.....	62
3.2.1.	Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones con lastre.....	62
3.3.	Resultados de la prueba de respuesta en olas regulares.....	65
3.3.1.	Calibración de olas regulares con generador tipo flap de FIMCM.....	65
3.3.2.	Respuesta en olas	67
3.3.3.	Comparación de resultados	68
3.3.4.	Rangos de frecuencia para el RAO	72
3.5.1.	Fase preliminar.....	76
3.5.2.	Matriz Potencia	77
3.2.1.	Capacidad de Generación de energía.....	78
3.2.2.	Capacidad de Generación de energía.....	78
	Capítulo 4.....	79
4.	Conclusiones y Recomendaciones	80
4.1.	Conclusiones	80
4.2.	Recomendaciones.....	81
	Bibliografía	82
	APÉNDICES	89
	APÉNDICE A.....	90
4.3.	Construcción de prototipos, dispositivos sintonizadores y pesos móviles.....	90
	APÉNDICE B	92
4.4.	Resultados de la prueba de inclinación	92

4.4.1.	Prueba de inclinación para configuraciones sin lastre	92
4.4.2.	Prueba de inclinación para configuraciones con lastre	96
	APÉNDICE C	100
4.5.	Resultados de la prueba de decaimiento logarítmico	100
4.5.1.	Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones sin lastre	100
4.5.2.	Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones con lastre.....	104
	APÉNDICE D	108
4.6.	Resultados para la prueba de olas regulares	108
4.6.1.	Respuesta en olas	108
4.6.1.1.	Barcaza Sola.....	108
4.6.1.4.	Barcaza + WEC + Medusa.....	110
4.7.	Resultados del RAO	111
4.7.1.	RAO para configuraciones sin lastre	111
4.7.2.	RAO para configuraciones con lastre	116
	APÉNDICE E	123
4.8.	Tabla de Amortización	123
4.9.	Perfil Económico.....	127
	APÉNDICE F.....	128
4.10.	Código fuente del script	128

Abreviaturas

WEC	Wave Energy Converter
PTO	Power Take Off
LCOE	Levelized Cost of Electricity
TRL	Technology Readiness Levels
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
EPN	Escuela Politécnica Nacional
USFQ	Universidad San Francisco de Quito
OMI	Organización Marítima Internacional
FS	Flopper Stopper
GMT	Altura metacéntrica transversal
KMT	Distancia vertical desde la quilla al metacentro
KG	Altura del centro de gravedad
RAO	Response Amplitude Operator

Simbología

W	Vatios
h	Hora
m	Metros
cm	Centímetros
mm	Milímetros
TWh	Teravatios hora
MWh	Megavatios hora
KWh	Kilovatios hora
KW/m	Kilovatios por metro de ola
ton	Toneladas
Kg	Kilogramos
g	Gramos
Hz	Hertz
min	Minutos
\$/ton	Dólares por tonelada
\$/KW	Dólares por Kilovatio
HH	Horas Hombre
H_s	Altura significativa de ola
T	Periodo de ola
L	Longitud de ola
S	Carrera

Índice de figuras

Figura 1.1 <i>Perfil de una onda sinusoidal</i>	22
Figura 1.2 <i>Movimientos de un buque en 6 grados de libertad</i>	23
Figura 1.3 <i>Elementos de un compensador pasivo</i>	23
Figura 1.4 <i>Esquema de conversión de energía undimotriz</i>	24
Figura 1.5 <i>Clasificación de los WECs por operación</i>	25
Figura 1.6 <i>Ocurrencia de oleaje en las Galápagos</i>	26
Figura 1.7 <i>Mapa promedio general de potencia del oleaje en la zona del Pacífico Ecuatorial</i>	26
Figura 1.8 <i>Variaciones mensuales de potencia de oleaje en sitios específicos</i>	27
Figura 1.9 <i>Batimetría de las Galápagos</i>	28
Figura 1.10 <i>Diagrama de áreas de alto valor ecológico</i>	29
Figura 1.11 <i>Diagrama de tráfico marítimo en las Galápagos</i>	30
Figura 1.12 <i>Posibles zonas para la extracción de la energía undimotriz</i>	31
Figura 2.1 <i>Flujograma de la prueba experimental de concepto</i>	33
Figura 2.2 <i>Espectros de olas y sistema de oleaje para las Galápagos (a) sistemas de olas; (b) altura significativa, H_s; (c) variación de H_s por mes; (d) Espectro típico para la isla Isabela [41]</i>	35
Figura 2.3 (a) <i>Diseño esquemático de un concepto WEC basado en la sintonización de balance [41]; (b) Modelo 3D del prototipo</i>	37
Figura 2.4 <i>Dispositivos sintonizadores de inercia con y sin medusa</i>	38
Figura 2.5 <i>Tanque de pruebas "Experimental II" [42]</i>	39
Figura 2.6. <i>Laboratorio de Hidráulica, (a) centro de control; (b) canal hidráulico [43]</i>	40
Figura 2.7 <i>Acelerómetro XSENS MTi-300</i>	41
Figura 2.8 <i>Posiciones en donde se evaluó el WEC</i>	43

Figura 2.9 <i>Diagrama de movimientos del experimento de inclinación</i>	43
Figura 2.10 <i>Experimento de inclinación, (a) TE01A-L; (b) TE01B-L; (c) TE01C; (d) TE01D</i>	46
Figura 2.11 <i>Modelo buque atunero (sin quilla)</i>	47
Figura 2.12 <i>Prueba de decaimiento libre, (a) TE02-A; (b) TE02-D</i>	48
Figura 2.13 <i>Teoría del generador de olas planas</i>	49
Figura 2.14 <i>Campo de velocidades de una ola progresiva plana en profundidad finita [50]</i>	50
Figura 2.15 <i>Respuesta en olas, (a) TE01A-L; (b) TE01B-L; (c) TE01C-L; (d) TE01D-L</i>	51
Figura 2.16 <i>Método manual para medición física de la ola, 1.1 Hz</i>	52
Figura 2.17 <i>Método para medición física de la ola utilizando software, 1.1 Hz [51]</i>	53
Figura 2.18 <i>Interfaz del software MT Manager</i>	54
Figura 2.19 <i>Muestra del script de python</i>	55
Figura 2.20 <i>Desglose del coste de capital de un WEC [52]</i>	56
Figura 3.1 <i>Movimiento de pesos del sistema TE01-A-L</i>	59
Figura 3.2 <i>Regresión lineal del sistema TE01-A-L</i>	60
Figura 3.3 <i>Movimiento de pesos del sistema TE01-D-L, extremos</i>	61
Figura 3.4 <i>Regresión lineal del sistema TE01-D-L, WEC en los extremos</i>	61
Figura 3.5 <i>Oscilación libre del sistema TE02-A-L</i>	63
Figura 3.6 <i>Variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-A-L</i>	63
Figura 3.7 <i>Oscilación libre del sistema TE02-D-L, extremos</i>	64
Figura 3.8 <i>Variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L, extremos</i> ..	65
Figura 3.9 <i>Relación de frecuencias Flap vs Ola</i>	66
Figura 3.10 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-A-L, frecuencia del flap: 0.60[Hz]</i>	67
Figura 3.11 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-D-L, frecuencia del flap: 0.50[Hz]</i>	68

Figura 3.12 <i>RAO para la barcaza: sola vs. Estructura</i>	69
Figura 3.13 <i>RAO para la barcaza: Sola vs. WEC+medusa en los extremos</i>	70
Figura 3.14 <i>RAO para la barcaza con WEC: extremos vs. centros</i>	71
Figura 3.15 <i>RAO para la barcaza con WEC+medusa: extremos vs. centros</i>	71
Figura 3.16 <i>RAO para la barcaza: WEC vs. WEC+medusa, ambos en los extremos</i>	72
Figura 3.17 <i>Rango de frecuencias para configuraciones sin lastre</i>	73
Figura 3.18 <i>Rango de frecuencias para configuraciones con lastre</i>	74
Figura 3.19 <i>Matriz potencia del proyecto</i>	77
Figura 3.20 <i>Gráfica de punto de equilibrio</i>	78
Figura A.1 <i>Primeras impresiones de los prototipos</i>	90
Figura A.2 <i>Impresión 3D de los dispositivos sintonizadores</i>	90
Figura A.3 <i>Confección de los pesos movibles</i>	91
Figura A.4 <i>Pesos calibrados</i>	91
Figura B.1 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-A</i>	92
Figura B.2 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-A</i>	92
Figura B.3 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-B</i>	93
Figura B.4 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-B</i>	93
Figura B.5 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C</i>	94
Figura B.6 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C</i>	94
Figura B.7 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-D</i>	95
Figura B.8 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-D-L</i>	95
Figura B.9 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-B-L</i>	96
Figura B.10 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-B-L</i>	96
Figura B.11 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C-L, WEC en los centros</i> ...97	
Figura B.12 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C-L</i>	97

Figura B.13 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C-L, WEC en los extremos</i>	98
Figura B.14 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C-L</i>	98
Figura B.15 <i>Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-D-L, WEC en los centros</i>	99
Figura B.16 <i>Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-D-L</i>	99
Figura C.1 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-A-L</i>	100
Figura C.2 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-A-L</i>	100
Figura C.3 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-D-L, WEC en los extremos</i>	101
Figura C.4 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L</i>	101
Figura C.5 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-B</i>	102
Figura C.6 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-B</i>	102
Figura C.7 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C</i>	103
Figura C.8 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C</i>	103
Figura C.9 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-B-L</i>	104
Figura C.10 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-B-L</i>	104
Figura C.11 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C-L, WEC en los centros</i>	105
Figura C.12 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C-L</i>	105
Figura C.13 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C-L, WEC en los extremos</i>	106
Figura C.14 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C-L</i>	106
Figura C.15 <i>Gráfica oscilación libre del sistema TE02-D-L, WEC en los centros</i>	107

Figura C.16 <i>Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L</i>	107
Figura D.1 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-A, frecuencia del flap: 0.60 Hz</i>	108
Figura D.2 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-B, frecuencia del flap: 0.50 Hz</i>	108
Figura D.3 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-B-L, frecuencia del flap: 0.50 Hz</i>	109
Figura D.4 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-C, frecuencia del flap: 0.50 Hz</i>	109
Figura D.5 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-C-L, frecuencia del flap: 0.50 Hz</i>	110
Figura D.6 <i>Respuesta en olas para el sistema TE03-D, frecuencia del flap: 0.50 Hz</i>	110
Figura D.7 <i>RAO para el sistema TE03-A</i>	111
Figura D.8 <i>Análisis de Fourier para el sistema TE03-A</i>	111
Figura D.9 <i>RAO para el sistema TE03-B</i>	112
Figura D.10 <i>Análisis de Fourier para el sistema TE03-B</i>	112
Figura D.11 <i>RAO para el sistema TE03-C</i>	113
Figura D.12 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-C</i>	113
Figura D.13 <i>RAO para el sistema TE03-D</i>	114
Figura D.14 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-D</i>	114
Figura D.15 <i>RAO para la barcaza: sola vs. estructura</i>	115
Figura D.16 <i>RAO para la barcaza: sola vs. WEC</i>	115
Figura D.17 <i>RAO para la barcaza: WEC vs. WEC + Medusa</i>	116
Figura D.18 <i>RAO para el sistema TE03-A-L</i>	116
Figura D.19 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-A-L</i>	117
Figura D.20 <i>RAO para el sistema TE03-B-L</i>	117
Figura D.21 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-B-L</i>	118
Figura D.22 <i>RAO para el sistema TE03-C-L</i>	118
Figura D.23 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-C-L</i>	119

Figura D.24 <i>RAO para el sistema TE03-C-L</i>	119
Figura D.25 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-C-L</i>	120
Figura D.26 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L</i>	120
Figura D.27 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L</i>	121
Figura D.28 <i>RAO para el sistema TE03-D-L</i>	121
Figura D.29 <i>Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L</i>	122
Figura F.1 <i>Código fuente de Python</i>	128

Índice de tablas

Tabla 1.1 <i>Promedio de potencia de oleaje</i>	27
Tabla 2.1 <i>Diagrama de dispersión para las islas Galápagos (-1.8°N, 269°W),</i>	36
Tabla 2.2 <i>Dimensiones principales del prototipo escalado y real</i>	37
Tabla 2.3 <i>Dimensiones principales de los dispositivos sintonizadores de inercia tipo cono</i> 38	
Tabla 2.4 <i>Dimensiones principales del tanque de pruebas "Experimental II" [42]</i>	39
Tabla 2.5 <i>Propiedades principales del canal hidráulico del Laboratorio de Hidráulica [44]</i>	40
Tabla 2.6 <i>Características principales del MTi-300 [39]</i>	41
Tabla 2.7 <i>Tabla de codificación de pruebas del prototipo con y sin lastre</i>	42
Tabla 2.8 <i>Esquema de pruebas dinámicas para el prototipo, parámetros</i>	51
Tabla 3.1 <i>Frecuencia de la ola teórica vs. experimental</i>	66
Tabla 3.2 <i>Resultados del proceso experimental a 20° de temperatura del agua</i>	75
Tabla 3.3 <i>Costo de construcción preliminar del proyecto</i>	76
Tabla 3.4 <i>Costo por cada actividad de construcción</i>	77
Tabla 3.5 <i>Capacidad de generación eléctrica estimada</i>	78
Tabla 3.6 <i>Capacidad y costo estimado de generación de energía por tecnología sostenible en la Isla Isabela</i>	79
Tabla E.1 <i>Tabla de amortización del proyecto</i>	123
Tabla E.2 <i>Perfil económico de la implementación</i>	127

Capítulo 1

1. Introducción

En el 2022, se consumieron 30.000 TWh de energía eléctrica a nivel global, en donde el 22.5% fue generado por energía hidráulica, 6% eólica y solar y 1.5% a través de fuentes alternativas [1]. De estas últimas, se destaca la energía obtenida a partir del mar, en donde, se estima que la energía contenida en el océano es de 50.000 TWh anuales, provenientes del oleaje, mareas, gradientes salino y térmico [2]. Una de las fuentes más atractivas es la energía undimotriz, la cual representa un recurso concentrado que puede ser explotado a través de la absorción de energía mecánica de las olas [3]. Este tipo de energía se origina a partir de la interacción del viento sobre la superficie del mar, lo que genera una transferencia de energía hacia el agua a través de la presión del viento, involucrando factores complejos como la profundidad del agua, la batimetría y la fuerza y dirección del viento para determinar la altura, frecuencia y forma de la ola [4]. Esta energía puede predecirse de forma confiable, lo que permite desarrollar mecanismos de conversión que puedan optimizar su eficiencia en las condiciones de operación locales [5]. Además, la energía transmitida por las olas presenta pocas pérdidas aun cuando viaja largas distancias, haciendo posible su captura cerca o fuera de las costas [6]. Por lo que, esta energía, también denominada undimotriz, presenta el potencial para generar un modelo de producción energética que reduzca la dependencia convencional de hidrocarburos y contribuya a la creación de empleos directos e indirectos, lo que se traduce en una gran rentabilidad económica a largo plazo [7].

Actualmente, existen diversos prototipos Convertidores de Energía de oleaje o WEC (por sus siglas en inglés Wave Energy Converter) en etapa pre-comercial a nivel mundial, como es el caso del Wave Dragon en Dinamarca, de 300x170x17.5 m, capaz de generar 7 MW [8], o el dispositivo Pelamis A1 en Portugal, de 150x3 m, con una generación de 250 KW [9], entre otros. Estos dispositivos son diseñados considerando las condiciones de mar en las que se va a operar para optimizar la potencia mecánica y generar electricidad a través de un sistema de

toma de fuerza (PTO, por sus siglas en ingles). Los WECs pueden ser clasificados en tres categorías: absorbedores puntuales, columna de agua oscilante y atenuantes [10]. El principal desafío de esta tecnología es reducir el LCOE (Coste Normalizado de Energía, USD/MWh) que le permita competir con las otras fuentes renovables [11], tomando en cuenta que, en el 2022, el LCOE de la energía solar fotovoltaica se estableció en \$49/MWh y el de la energía eólica terrestre y marina en \$33/MWh y \$81/MWh, respectivamente [12]. Frente al LCOE de la energía undimotriz, establecido en \$710/MWh [13]. No obstante, la energía undimotriz posee una densidad energética de 2000-3000 W/m², a diferencia de las energías eólica y solar, con 100-200 W/m² y 400-600 W/m², respectivamente [2], lo que representa una ventaja para el desarrollo de esta tecnología.

Para obtener un WEC económicamente viable se debe alcanzar la mayor eficiencia en el proceso de extracción de energía, por lo que, su diseño debe contemplar las dimensiones, orientación y adaptación necesarias para alcanzar la condición de resonancia frente a la ola dominante en un estado de mar local [14]. Es decir, debe acoplarse al perfil hidrodinámico requerido para que la frecuencia natural del dispositivo iguale a la frecuencia de la ola incidente. Por ejemplo, Sigiura et al [15], demostraron que la eficacia de un WEC en un sistema de boya cilíndrica flotante puede aumentar un 56% con un ajustador de inercia (tuned inerter, TI), compuesto por un resorte ajustable, una masa inercial rotacional y un componente amortiguador viscoso. Los autores demostraron que aumentaba la capacidad de absorción de energía aprovechando el efecto de resonancia de la masa rotacional sin necesidad de aumentar la masa de la boya, concluyendo que, el rango de frecuencia efectiva del TI es ajustable simplemente cambiando el valor de la masa rotacional. Por otro lado, Cai y Zhu [16], propusieron el diseño de un oscilador de péndulo de doble masa (DMP) cuya frecuencia natural puede sintonizarse ajustando las posiciones de dos masas independientes, demostrando que, con una sintonización adecuada, la capacidad de absorción de energía del WEC aumentaba hasta un 170% en

comparación a cuando no se sintoniza. En resumen, estos trabajos permitieron ampliar la visión de los convertidores de energía actuales, que, aunque se encuentran en un nivel de formulación de concepto (TRL 2) [17], proponen una alternativa para mejorar el modelo de conversión de energía convencional y adaptarlo a diferentes condiciones de operación.

Recientemente, se ha evaluado la implementación de WECs en las islas Galápagos para el abastecimiento energético de la población, dado que posee una relación espacio/rendimiento capaz de concentrar hasta 30 veces la energía solar y 5 veces la eólica utilizando una mínima parte de la superficie marina, lo que permitiría aumentar la capacidad de generación de energía reduciendo el espacio de operación [18]. A esto se añade que, al ser el punto de encuentro entre el oleaje del hemisferio suroeste y norte, produce una potencia energética de 14 KW/m en promedio [19]. Este hecho ha permitido realizar estudios que analicen la captura de energía, por ejemplo, Zambrano [20] realizó un estudio de factibilidad para la implementación de 20 boyas de 1 m de diámetro en la isla Isabela, con una capacidad de generación individual de 89.3 MWh anual, lo que permitiría cubrir hasta el 25% de su demanda energética. Por otro lado, Segovia [21] realizó una prueba experimental de concepto de un WEC de inercia variable para acoplar su frecuencia natural a la frecuencia de oleaje de la isla Isabela, aumentando un 30% el periodo natural para el aprovechamiento de absorción de energía en la condición de resonancia.

Los estudios sugieren que las islas Galápagos son una zona viable para la energía undimotriz. Se requieren pruebas experimentales para analizar la respuesta de los dispositivos WEC al oleaje local y ajustar la frecuencia natural con un dispositivo pasivo para mejorar la eficiencia.

1.1. Descripción del Problema

El uso de energías renovables en las islas Galápagos cubrió el 25% de su consumo energético anual de 36.690 MWh en 2022, de donde, el 11% fue generado con energía solar y el 14% con energía eólica [22]. No obstante, estas tecnologías producen un fuerte impacto

ambiental en el archipiélago. Por ejemplo, solo el proyecto fotovoltaico Puerto Ayora de 1.5 MW cubre una superficie de 29000 m² en la isla, reemplazando la flora y fauna por estructuras de captación de energía [23]. Por otro lado, se han propuesto algunos modelos de extracción undimotriz en Ecuador. Por ejemplo, Calero et al propusieron la instalación de 15 Boyas Powerboy con una potencia de generación total de 12.99 MW, capaz de abastecer el 9.98% de la demanda de potencia en Santa Elena [24]. Además, Hernández y Tovar propusieron un modelo de instalación de 20 convertidores de 3 m de diámetro para producir 367.5 KW, necesario para abastecer la necesidad energética de la isla Jambelí [25]. Sin embargo, a pesar de que estos prototipos presentaban un diseño viable, la mayoría de los WECs con cuerpos flotantes presentaban áreas de flotación casi constantes, de manera que la frecuencia natural del prototipo se alejaba de la frecuencia de la ola, por lo que no se alcanzaba la condición de resonancia necesaria para aumentar la energía capturada por el sistema. A eso se añade que, al estar limitados a una frecuencia natural, solo podían operar bajo una condición de oleaje, desaprovechando la recolección de energía proveniente de los cambios de estados de mar y condiciones meteorológicas variables. Es decir, los sistemas de extracción undimotriz convencionales presentan limitaciones hidrodinámicas.

1.2. Justificación del Problema

Este proyecto permitirá evaluar experimentalmente con un modelo a escala 1:100, la efectividad del dispositivo sumergido como sintonizador pasivo de frecuencia de un WEC operando en las condiciones de oleaje de las islas Galápagos. Los resultados obtenidos permitirán estimar la capacidad de extracción de energía del dispositivo operando en resonancia con la finalidad de incrementar su eficiencia. Proponiendo un sistema multifuncional que se adapte a distintas condiciones de operación, beneficiando a instituciones como el Ministerio del Ambiente (MAE) y Parque Nacional Galápagos (DPNG).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar de forma experimental la respuesta en olas de un prototipo WEC con un dispositivo sumergido de sintonización hidrodinámica pasiva usando un modelo en escala 1:100, para su operación en condición de resonancia en el proceso de extracción de energía en las Islas Galápagos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar las características del oleaje alrededor de la zona costera de las Islas Galápagos y escalarlas para utilizarlas como rango de operación en un canal hidráulico.
- Realizar pruebas experimentales de inclinación, decaimiento logarítmico y respuesta en olas regulares de un prototipo WEC tipo barcaza de escala 1:100 utilizando un dispositivo de sintonización pasivo.
- Comparar los resultados experimentales de los modelos utilizando el dispositivo de tuneo pasivo para la demostración de la efectividad de su capacidad de ‘tuneo’.
- Analizar la viabilidad económica en la implementación del dispositivo WEC para producción de energía eléctrica a partir de la energía undimotriz.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Teoría de Olas gravitacionales

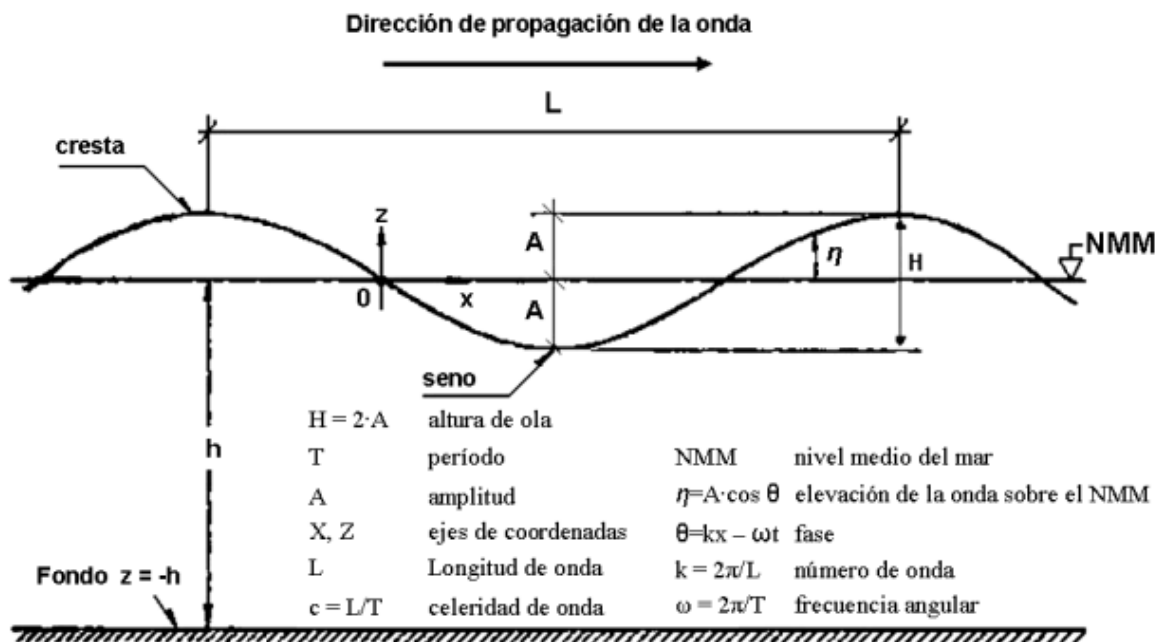
Una ola gravitacional es definida como una onda superficial originada por la interacción entre el viento y el océano, cuyos parámetros principales son la altura, longitud y profundidad, en la dirección de propagación [26]. A eso se añade la influencia del viento sobre los estados de mar, que genera una fuerza al producirse un aumento de velocidad de desplazamiento del aire sobre la superficie del océano, definiendo la cantidad de energía disponible [27].

En la Figura 1.1, se presenta un esquema de elementos que describen los diferentes componentes de una ola sinusoidal.

Figura 1.1

Perfil de una onda sinusoidal

Fuente: Muñoz, 2011 [28]



Las olas se clasifican en regulares, que se presentan de forma repetitiva, con un periodo y amplitud constante, producidas por la dirección y velocidad del viento, descritas con una función sinusoidal; e irregulares, que describen un periodo y amplitud variable, ya sea por la superposición de olas o por condiciones meteorológicas adversas [29].

1.4.2. Compensador pasivo de balance

En la Figura 1.2 se muestran los movimientos descritos por un elemento flotante, para reducir el balance, se utilizan compensadores pasivos, que utilizan estructuras sumergibles interconectadas a través de una viga de soporte y un cable [30]. De manera que, durante el balance, el compensador genera una fuerza de arrastre vertical que se transmite a la viga de

soporte a través de la tensión del cable que la conecta. Este efecto produce un momento que va a oponerse al movimiento oscilatorio, provocando que la estructura sumergida regrese a su posición inicial, ocasionando que el cable se tense nuevamente, repitiendo el proceso.

Figura 1.2

Movimientos de un buque en 6 grados de libertad

Fuente: A. Blanco [31]

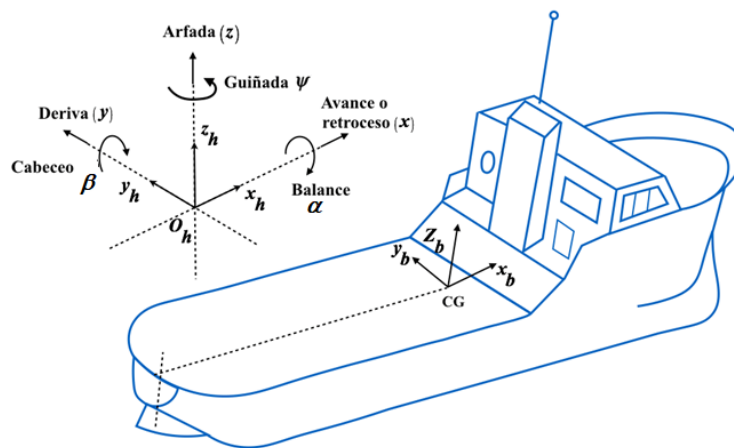
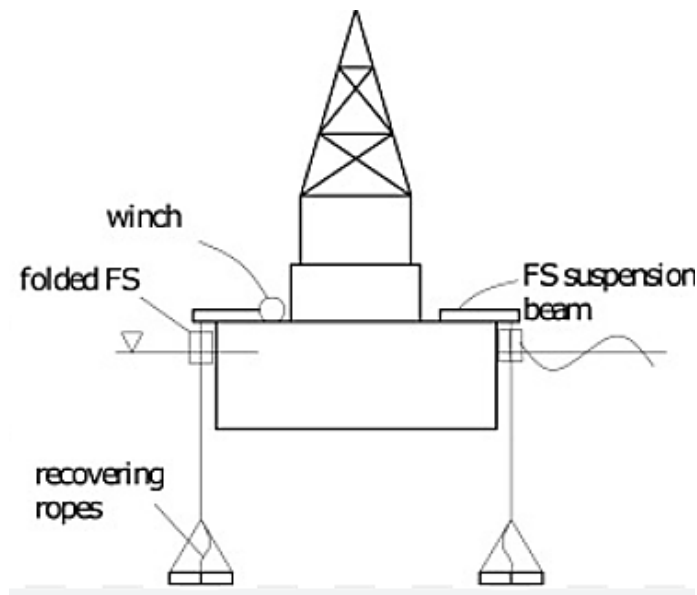


Figura 1.3

Elementos de un compensador pasivo

Fuente: Guachamin-Acero et al [30]



1.4.3. Convertidores de energía por oleaje (WEC)

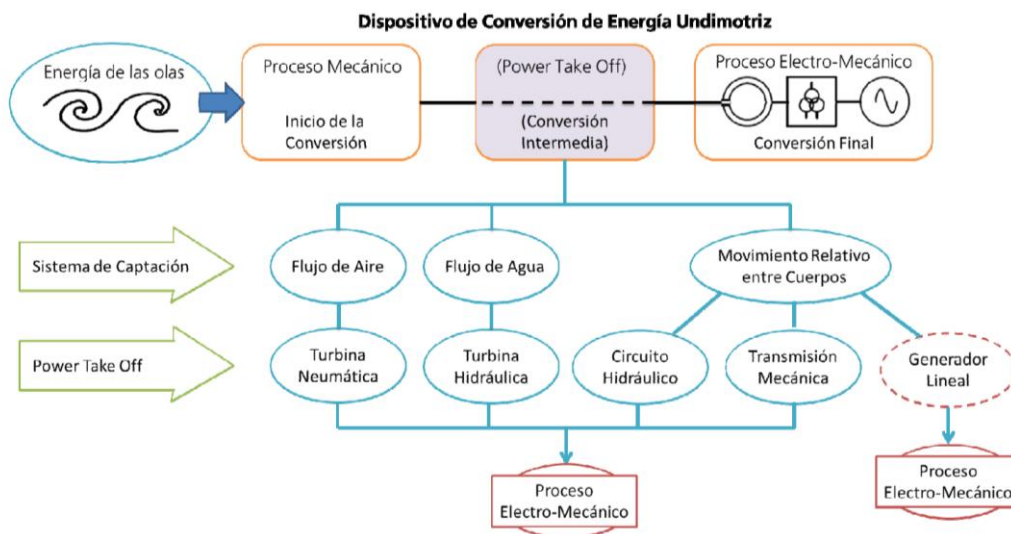
Son dispositivos usados para convertir la energía cinética y potencial de las olas en eléctrica. De manera simplificada, la

Figura 1.4 describe mediante un esquema, el proceso de conversión de energía undimotriz utilizando WECs.

Figura 1.4

Esquema de conversión de energía undimotriz

Fuente: Cubero, 2011 [32]

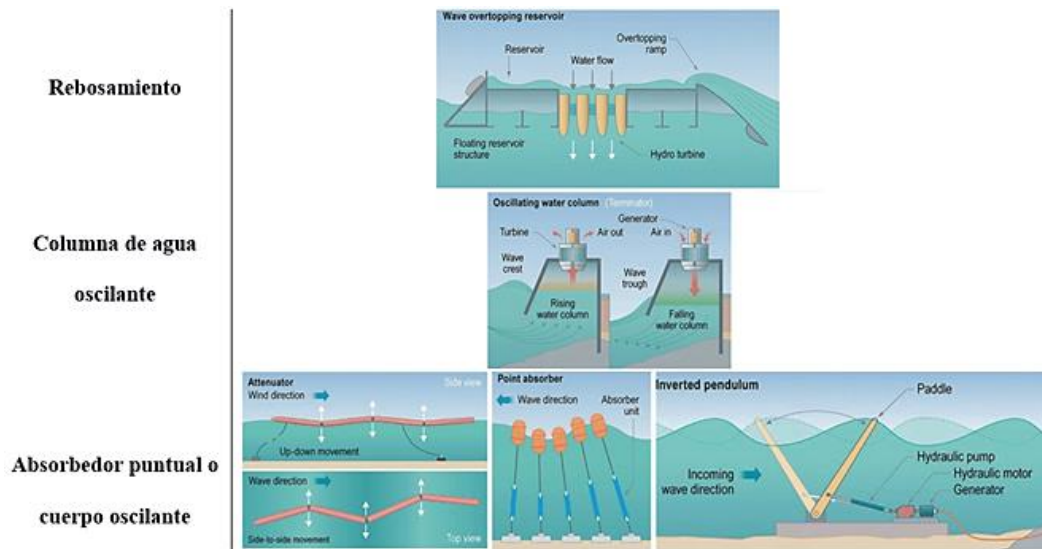


Los dispositivos WEC se pueden clasificar en base a las condiciones de operación, localización y aplicación, tal como lo ilustra la Figura 1.5

Figura 1.5

Clasificación de los WECs por operación

Fuente: Alpaslan et al [33]



Los convertidores de rebosamiento aprovechan la energía potencial de las olas al dirigir las olas hacia un reservorio a través de una rampa, generando un flujo para impulsar turbinas. Los dispositivos de columna de agua oscilante (OWC) aprovechan el aire atrapado en una columna de agua para mover una turbina bidireccional en la parte superior de una plataforma. Los cuerpos oscilantes tienen tres aplicaciones principales: levantamiento de cuerpo, donde dispositivos flotantes extraen energía de las olas; convertidor de avance de ola oscilante (OWSC), que emplea un péndulo invertido; y cuerpo articulado, que se basa en la flexión de articulaciones con el movimiento de las olas.

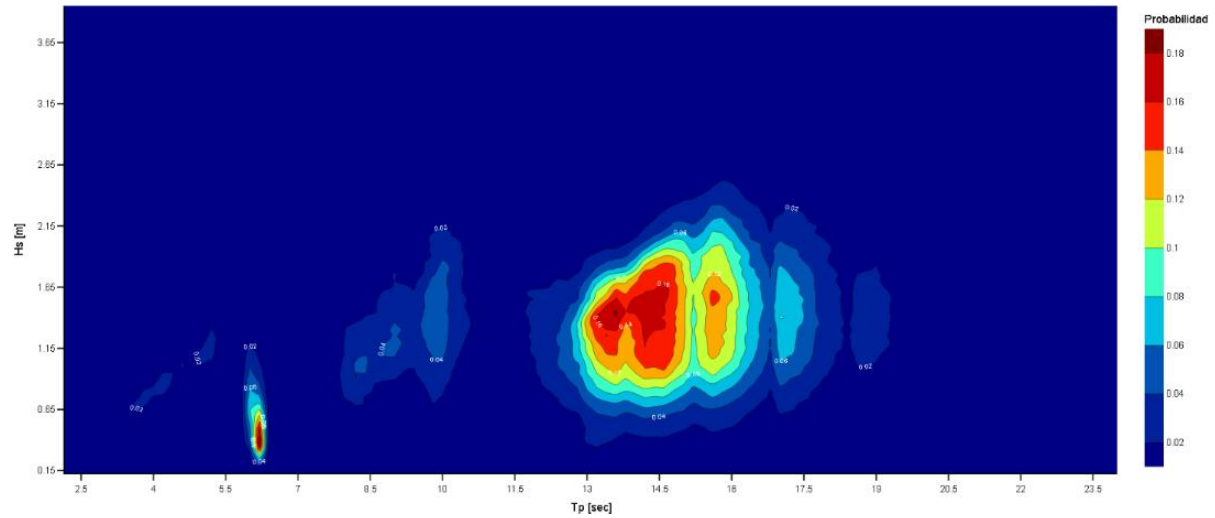
1.4.4. Características de oleaje en las islas Galápagos

Figura 1.6, refleja las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de olas a partir de la altura significativa respecto al periodo del oleaje. Se destacan 2 regiones, en la primera, para un periodo de 6 segundos, se desarrollan H_s entre 0.10 y 0.90 metros. La segunda se define en el rango de 12 a 15 segundos con H_s entre 0.80 y 2.1 metros.

Figura 1.6

Ocurrencia de oleaje en las Galápagos

Fuente: CMEMS [34]



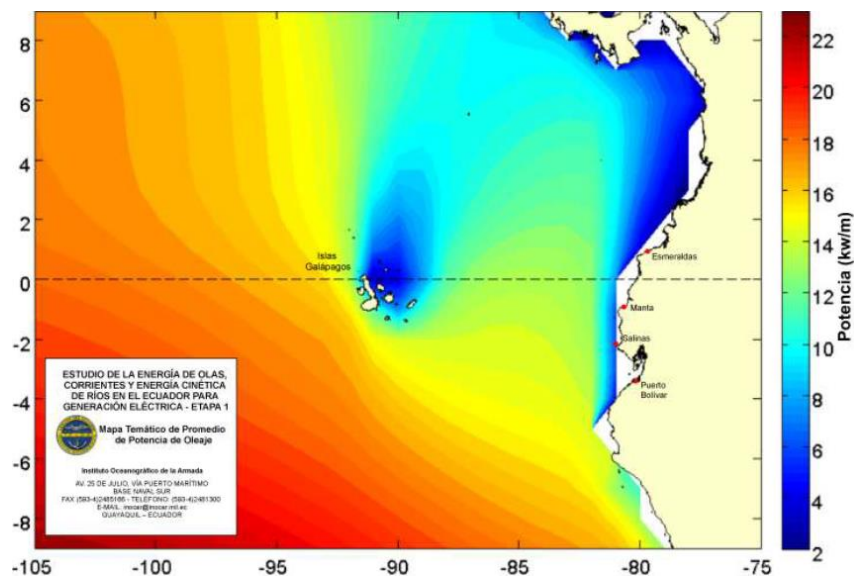
1.4.5. Potencia energética de las olas

La evaluación de la potencia energética del oleaje en el mar ecuatorial, basada en datos de la ECMWF [19] y visualizada en la Figura 1.7, indica que la potencia promedio de las olas se encuentra alrededor de los 14 kW/m.

Figura 1.7

Mapa promedio general de potencia del oleaje en la zona del Pacífico Ecuatorial

Fuente: INOCAR, 2011 [19]



En áreas como el noroeste de Esmeraldas y Puerto Bolívar, los valores son bajos, mientras que, en la zona suroeste de las Galápagos, se registra un mayor potencial energético, tal como se evidencia en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.8, reflejando el análisis de potencia promedio en puntos determinados de la costa de Esmeraldas, Guayas y Galápagos.

Tabla 1.1

Promedio de potencia de oleaje

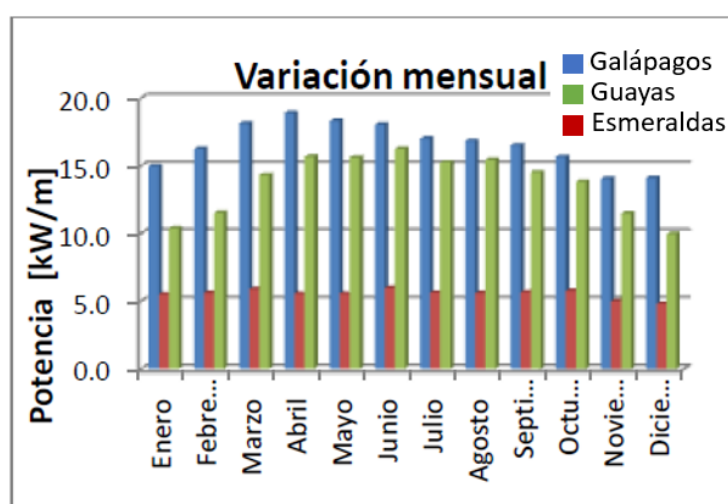
Fuente: INOCAR, 2011 [19]

Potencia de oleaje	Galápagos	Esmeraldas	Guayas
Promedio, KW/m	16.6	5.5	13.7

Figura 1.8

Variaciones mensuales de potencia de oleaje en sitios específicos

Fuente: INOCAR, 2011 [19]



1.4.6. Batimetría General

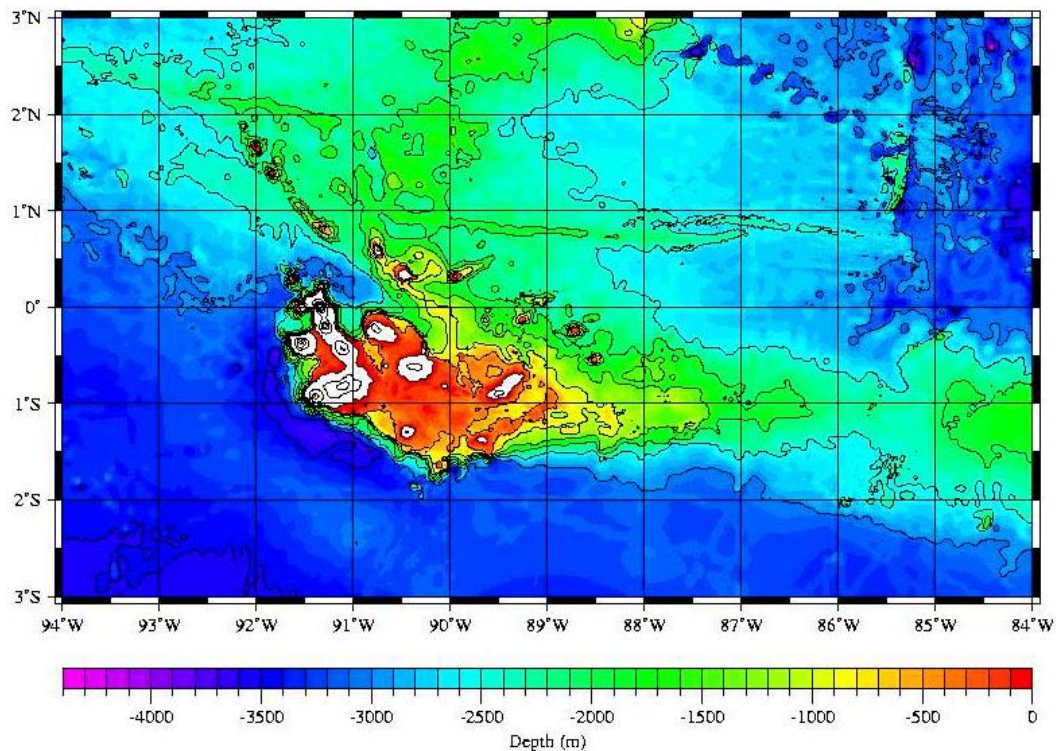
En las proximidades de las Islas Galápagos, se pueden notar diferencias en las profundidades marinas, que van desde aguas superficiales hasta abismos de 2550 m de profundidad. Esta variada topografía, como se observa en la Figura 1.9 es imprescindible para

la regulación de las corrientes oceánicas y la formación de diversos hábitats marinos que se encuentran en la región Insular.

Figura 1.9

Batimetría de las Galápagos

Fuente: PMEL [35]



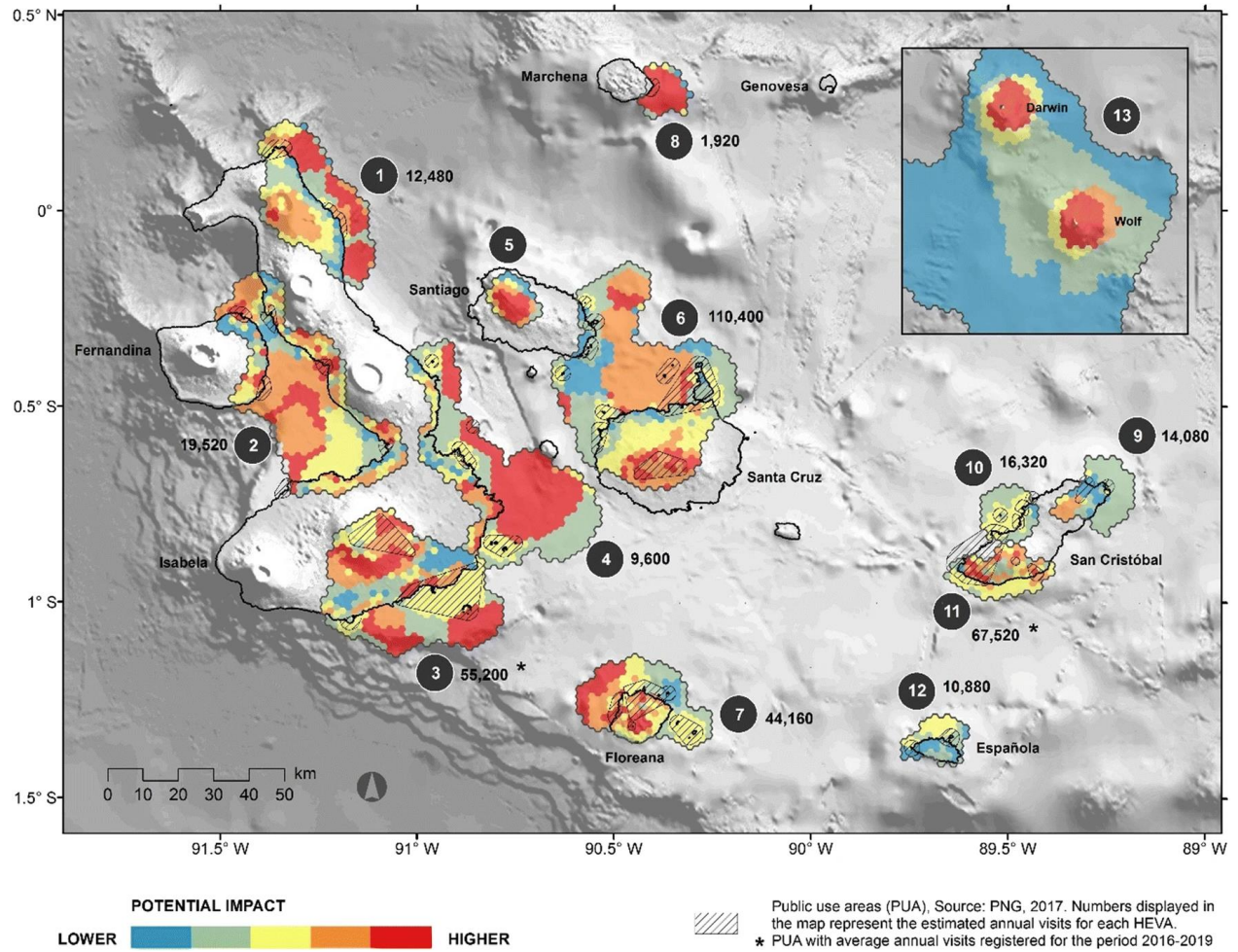
1.4.7. Zonas ideales para la implementación

La biodiversidad endémica de las Galápagos es primordial, por ende, es necesario delimitar una zona que no comprometa el desarrollo y la integridad ambiental. Entonces, en la Figura 1.10 se presenta un diagrama con las ubicaciones de alto riesgo, basado en los parámetros de zonas concentración y de recreación de las especies marinas.

Figura 1.10

Diagrama de áreas de alto valor ecológico

Fuente: Escobar-Camacho [36]

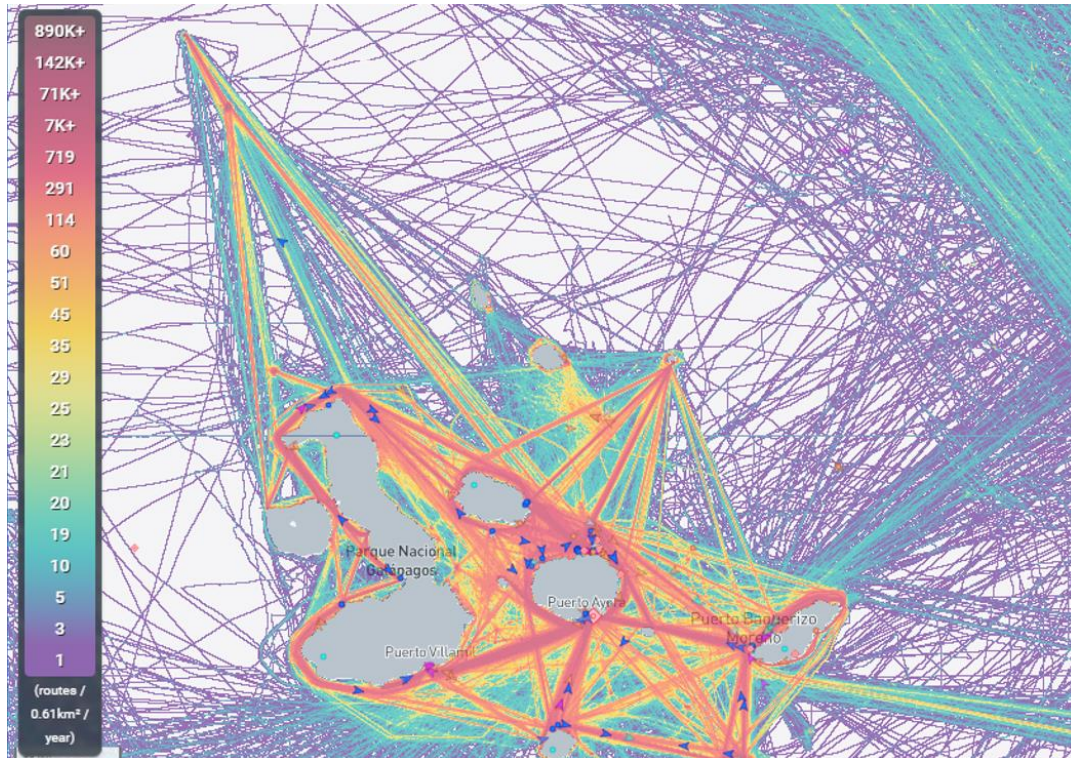


Además, se deben analizar las rutas de navegación entre las islas para no comprometer la zona de implementación, la Figura 1.11 refleja la fluencia de tráfico marítimo interno en la isla.

Figura 1.11

Diagrama de tráfico marítimo en las Galápagos

Fuente: Marine Traffic [37]



Finalmente, tomando en cuenta los aspectos técnicos, ecológicos y factibles, se presenta en la Figura 1.12, las áreas con el mayor potencial para la extracción de energía solar utilizando dispositivos flotantes [38], las mismas que pueden ser utilizadas para la extracción de energía undimotriz dadas las condiciones de oleaje previamente analizadas.

Figura 1.12

Posibles zonas para la extracción de la energía undimotriz

Fuente: SEAS, 2019 [38]



Capítulo 2

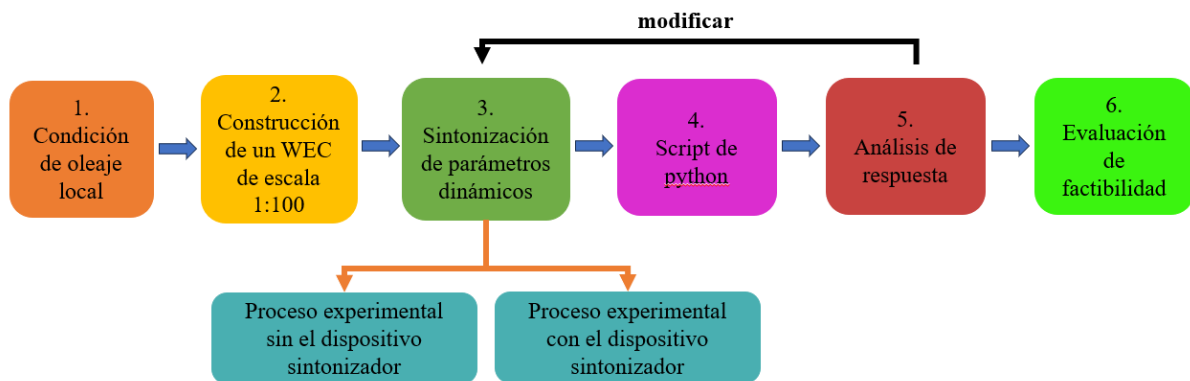
2. Metodología

El desarrollo de una prueba experimental de concepto para la evaluación de un dispositivo WEC nuevo o existente, requiere de una serie de pasos que permitan identificar los parámetros críticos que determinarán su viabilidad. En la Figura 2.1, se presenta el flujograma que describe brevemente la metodología aplicada, mediante el cual se realizó un análisis técnico y económico respecto a la aplicación del convertidor de energía de las olas.

Figura 2.1

Flujograma de la prueba experimental de concepto

Fuente: Autores



El primer paso fue identificar las condiciones de oleaje para el sitio costa afuera, este proceso permitió conocer la dirección, periodo máximo y altura significativa de la ola dominante. Posteriormente, se construyó un prototipo a escala 1:100 de un dispositivo WEC basado en un modelo conceptual de uso de compensadores pasivos [30]. Una vez listo, se realizaron dos ensayos hidrostáticos en un tanque de pruebas de 11x4x0.8 m, los cuales fueron: decaimiento logarítmico, donde se determinó la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento, y prueba de inclinación, donde se obtuvo la altura metacéntrica; luego, en un canal hidrodinámico de 10x0.32x0.35 m con un generador de olas tipo flap, se evaluó la respuesta en olas regulares en el rango de frecuencias posibles del mecanismo disponible. En

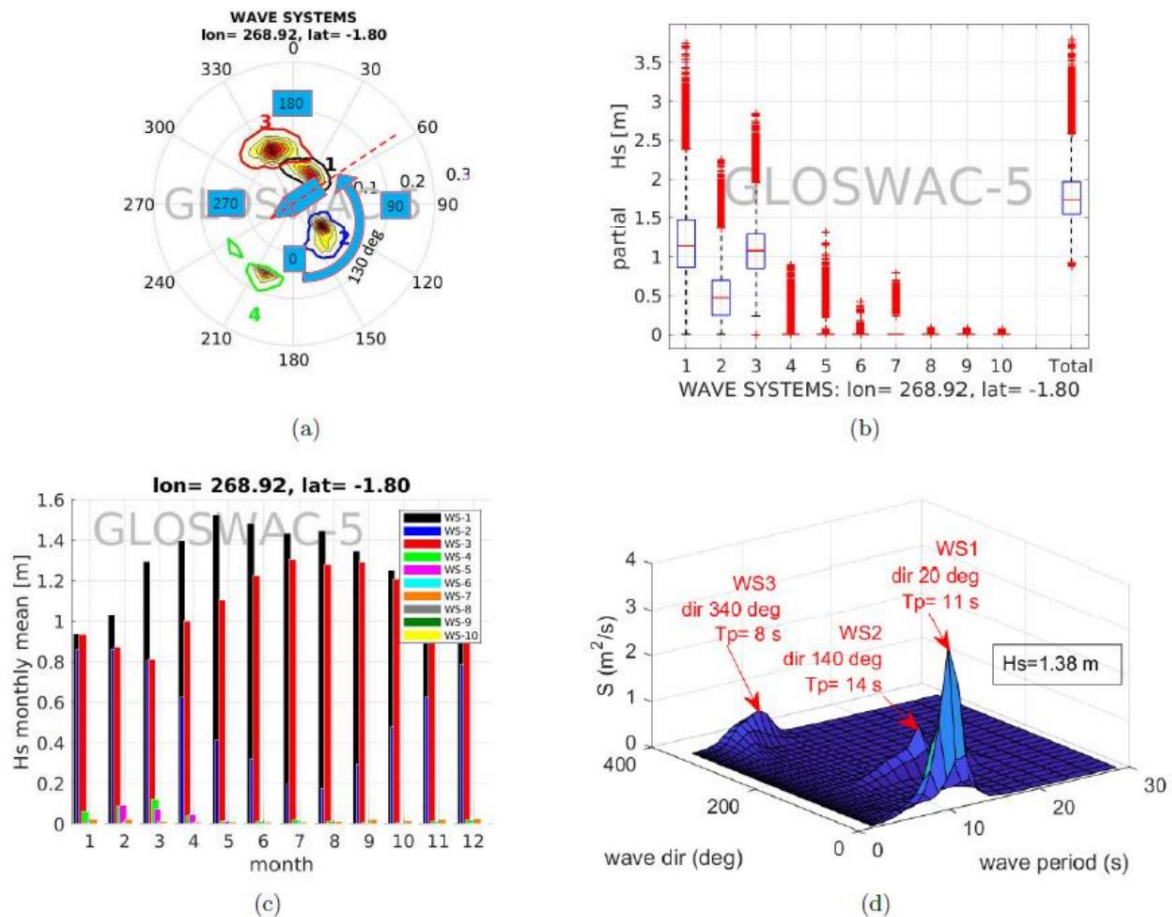
este proceso se realizaron dos prototipos, el primero constaba de un modelo tipo barcaza, y el segundo, que implementó el mismo diseño, pero utilizando 4 configuraciones distintas de operación, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 2.7. En todas las pruebas experimentales se midieron desplazamientos angulares y aceleraciones usando un sensor de aceleración marca XSENS, modelo MTi-300 [39] y procesados utilizando el programa base MT MANAGER [40], para luego ser analizado mediante un script de programación en Python, el cual se encuentra en la sección de Análisis de datos, lo que permitió procesar los datos experimentales y obtener gráficas que describan el comportamiento del prototipo. Finalmente, se presentó un análisis económico que permitió analizar la factibilidad tanto técnica como rentable del proyecto.

2.1. Condición de Oleaje local

Es necesario analizar el espectro de oleaje en las Galápagos, pues, para alcanzar la resonancia, se debe igualar la frecuencia natural del WEC con la frecuencia de la ola incidente en el pico de dicho espectro. Un estudio de factibilidad realizado por Guachamin-Acero et al. [41], presenta la Figura 2.2(a), en donde, se evidencia que el oleaje costa afuera en Galápagos (-1.8°N , 269°O), se rodea por tres sistemas de olas dominantes descritos como WS1 (línea negra), WS2 (línea azul) y WS3 (línea roja). Además, en la Figura 2.2(b), se observa que la altura significativa (H_s) para WS1, WS2 y WS3 varía entre 1 y 3.5 metros. En la Figura 2.2(c) se muestra la variación de altura significativa mensual para diferentes sistemas de olas. Finalmente, dado que estos sistemas de olas pueden ocurrir simultáneamente, la Figura 2.2(d) muestra un ejemplo de un espectro de olas de WS1, WS2 y WS3. Esta información permitió la delimitación del rango de olas dominantes para el proceso experimental.

Figura 2.2

Espectros de olas y sistema de oleaje para las Galápagos (a) sistemas de olas; (b) altura significativa, H_s ; (c) variación de H_s por mes; (d) Espectro típico para la isla Isabela [41]



A partir de una base de datos ERA-Interim del “Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Rango Medio” (ECMWF), se pudo recuperar registros de espectros de olas desde enero de 1979 hasta Diciembre del 2016, los cuales, se resumen en la Tabla 2.1, que muestra un diagrama de dispersión para el sitio costa afuera. Se observa que los estados del mar comunes presentan $H_s = 1,5$ m y $T_p = 13$ s. De nuevo, como usamos esta información en el proyecto.

Tabla 2.1

Diagrama de dispersión para las islas Galápagos (-1.8°N, 269°W),

Fuente: Guachamin-Acero et al [41]

Hs (m)	Tp (s)													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.5	0	0	0	4	21	11	20	26	17	0	7	4	0	0
1.0	92	280	346	417	719	3018	5506	5086	3491	0	1957	917	0	285
1.5	49	128	523	1485	1592	2329	11328	19391	14747	0	8401	3489	0	1079
2.0	0	0	20	216	814	655	764	4436	8091	0	4245	1561	0	406
2.5	0	0	0	0	14	131	78	127	789	0	993	388	0	69
3.0	0	0	0	0	0	6	5	11	27	0	103	85	0	19

2.2. Construcción de prototipo WEC

Para la prueba experimental de concepto, se fabricó un prototipo WEC usando madera tipo moral fino y siguiendo el diseño descrito por Guachamin-Acero et al [41], que consiste en una barcaza de fondo plano con un sistema de estructuras sumergibles tipo cono, que se conectan mediante cables de amarre a los extremos de una viga de soporte ubicada transversalmente en la sección media. El objetivo principal de las estructuras es el de aumentar el momento de inercia de la masa cuando el prototipo se mueve en balance, así, aumentaba su periodo natural hasta alcanzar la condición de resonancia, permitiendo aumentar la cantidad de energía capturada [30]. La Figura 2.3(a), (b) muestra un diseño conceptual, en el que se basó la construcción del WEC, junto con el prototipo construido, la Figura 2.4 presenta los dispositivos de sintonización pasiva tipo cono. Las medidas principales del prototipo y los conos se encuentran en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3, respectivamente.

Figura 2.3

(a) Diseño esquemático de un concepto WEC basado en la sintonización de balance [41]; (b)

Modelo 3D del prototipo

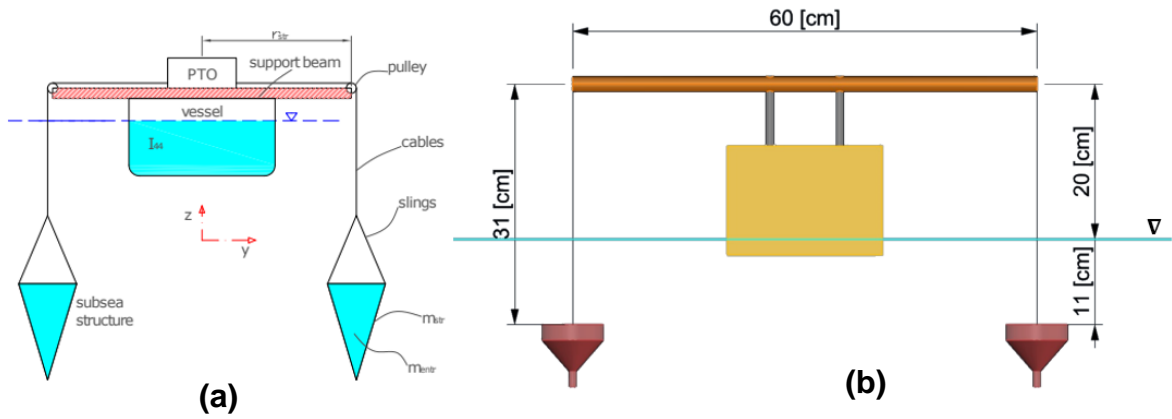


Tabla 2.2

Dimensiones principales del prototipo escalado y real

DIMENSIONES DE LA BARCAZA A ESCALA 1:100	
Largo [cm]	30
Ancho [cm]	20
Alto [cm]	15
Peso ligero [Kg]	2.69
DIMENSIONES DE LA BARCAZA REAL	
Largo [m]	30
Ancho [m]	20
Alto [m]	15
Peso [Kg]	-

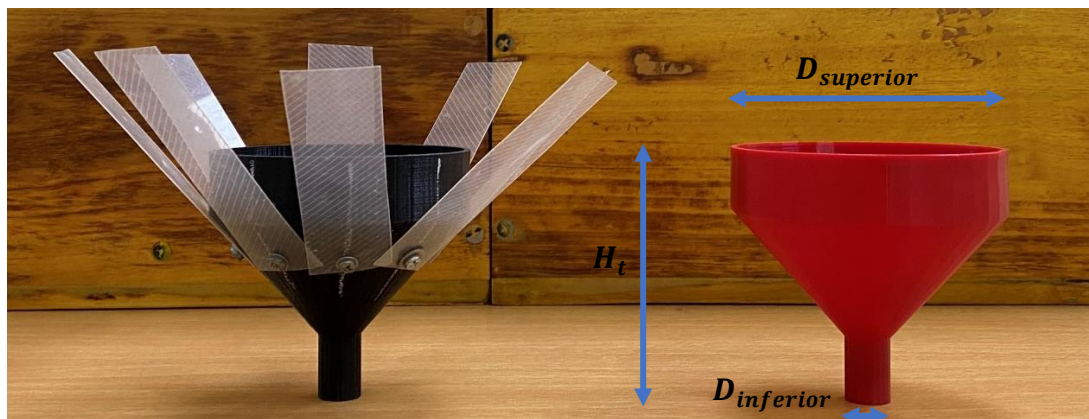
Tabla 2.3

Dimensiones principales de los dispositivos sintonizadores de inercia tipo cono

DIMENSIONES DE LOS CONOS	
$D_{superior}$ [cm]	10
$D_{inferior}$ [cm]	1
H_t [cm]	13
Peso por cono [Kg]	0.033
Peso por cono + medusa [Kg]	0.038

Figura 2.4

Dispositivos sintonizadores de inercia con y sin medusa



2.3. Sitios de pruebas

Las pruebas experimentales se realizaron en 2 etapas, la primera consistía en el análisis de las propiedades hidrostáticas y el amortiguamiento del prototipo en un tanque de pruebas estático ubicado en la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, FIMCM [42]. Para estas pruebas el tanque tuvo que ser cubierto por un envoltorio plástico, para evitar que las ráfagas de viento generen interferencia en el sensor de medición y que la maleza del bosque produzca carga orgánica, reduciendo la calidad del agua contenida en el tanque. En la Tabla 2.4

se encuentran las características principales del tanque y en la Figura 2.5 el tanque listo para las pruebas.

Tabla 2.4

Dimensiones principales del tanque de pruebas "Experimental II" [42]

DIMENSIONES DEL TANQUE DE PRUEBAS DE LA FIMCM	
Largo [m]	11
Ancho [m]	4
Profundidad [m]	0.8

Figura 2.5

Tanque de pruebas "Experimental II" [42]



Posteriormente, se realizó la segunda etapa experimental, para registrar la respuesta del prototipo en olas regulares considerando varias configuraciones en el tanque del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, FIMCP [43]. En la Tabla 2.5 se encuentran las características principales del tanque y en la Figura 2.6 el tanque listo para las pruebas.

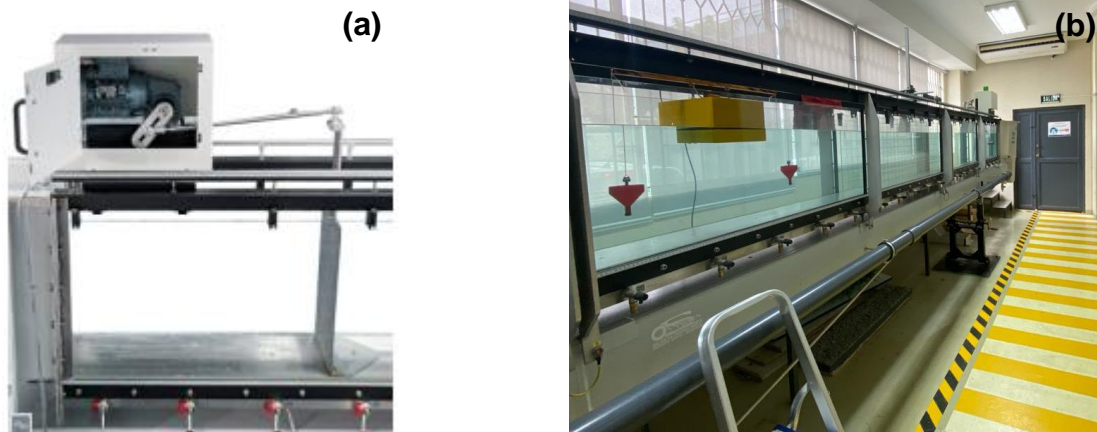
Tabla 2.5

Propiedades principales del canal hidráulico del Laboratorio de Hidráulica [44]

PROPIEDADES DEL TANQUE DE PRUEBAS DE LA FIMCP	
Largo [m]	10
Ancho [m]	0.31
Profundidad [m]	0.45
Rango de frecuencia del flap [Hz]	0.1-1.3
Rango de la carrera del flap [mm]	60-200

Figura 2.6.

Laboratorio de Hidráulica, (a) centro de control; (b) canal hidráulico [43]



2.4. Descripción de equipos

Para registrar los datos experimentales se utilizó el sensor MTi-300 AHRS, de la compañía XSENS, que funciona como un procesador de señales para proporciona resultados como aceleración lineal 3D calibrada, aceleración, velocidad de giro (datos de giroscopio),

entre otros., La Tabla 2.6 y la Figura 2.7 presentan las características y primera impresión del sensor.

Tabla 2.6

Características principales del MTi-300 [39]

ACELERÓMETRO XSENS MTi-300	
Largo [cm]	11
Ancho [cm]	4
Alto [cm]	0.8
Peso [Kg]	0.055

Figura 2.7

Acelerómetro XSENS MTi-300



2.5. Diseño de experimento

Para las pruebas, se realizaron seis configuraciones de operación diferentes en el prototipo: barcaza sola, barcaza con estructura del WEC, barcaza con WEC sin medusa en los extremos, barcaza con WEC sin medusa a 10 cm de los extremos, barcaza con WEC y medusa en los extremos, y barcaza con WEC y medusa a 10 cm de los extremos.

Para la gestión de los datos experimentales, se le asignó un código a cada configuración del prototipo en sus 2 condiciones de carga evaluadas. La Tabla 2.7 presenta la codificación para el proceso experimental con lastre y sin lastre. Las pruebas con el WEC se realizaron posicionando el dispositivo en los extremos de la viga y a 10 cm de cada extremo, tal como se observa en la Figura 2.8.

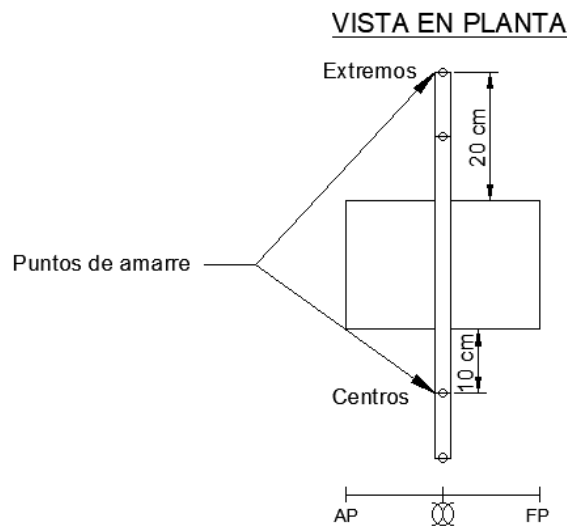
Tabla 2.7

Tabla de codificación de pruebas del prototipo con y sin lastre

CODIFICACIÓN DE PRUEBAS, BARCAZA SIN LASTRE					
Experimento	Código	Barcaza Sola	Barcaza + Estructura	Barcaza + WEC	Barcaza + WEC + Medusa
Inclinación	TE01	TE01-A	TE01-B	TE01-C	TE01-D
Decaimiento libre	TE02	TE02-A	TE02-B	TE02-C	TE02-D
RAO	TE03	TE03-A	TE03-B	TE03-C	TE03-D
CODIFICACIÓN DE PRUEBAS, BARCAZA CON LASTRE					
Experimento	Código	Barcaza Sola	Barcaza + Estructura	Barcaza + WEC	Barcaza + WEC + Medusa
Inclinación	TE01-L	TE01-A-L	TE01-B-L	TE01-C-L	TE01-D-L
Decaimiento libre	TE02-L	TE02-A-L	TE02-B-L	TE02-C-L	TE02-D-L
RAO	TE03-L	TE03-A-L	TE03-B-L	TE03-C-L	TE03-D-L

Figura 2.8

Posiciones en donde se evaluó el WEC

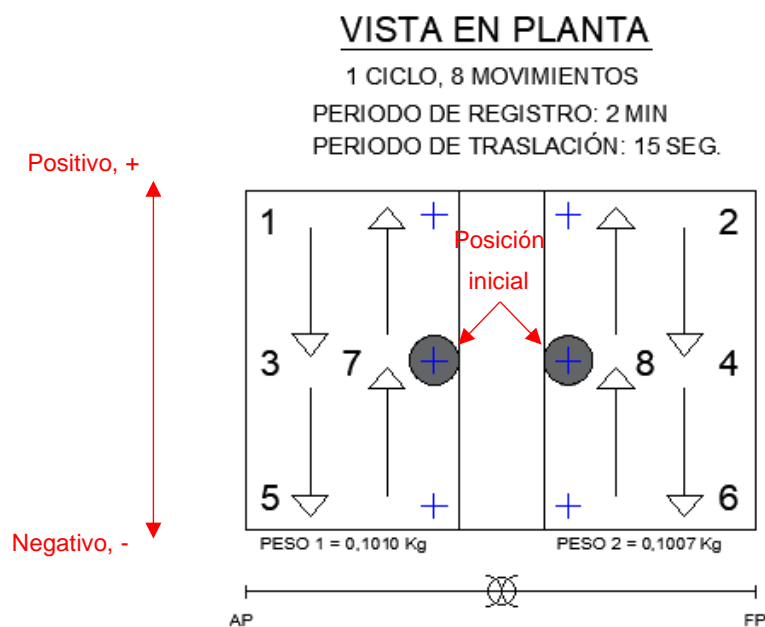


2.6. Experimento de inclinación

En la primera parte experimental, se determinó la altura metacéntrica y la posición del centro de gravedad del prototipo realizando un experimento de inclinación, la Figura 2.9 presenta el diagrama de la secuencia de los movimientos de pesos realizados en el prototipo.

Figura 2.9

Diagrama de movimientos del experimento de inclinación



2.6.1. Diseño de pesos para el experimento de inclinación

Los pesos utilizados fueron confeccionados en el laboratorio metalúrgica de la FIMCP, la Figura A.4 presentan los pesos calibrados que se utilizaron en el experimento. Se observa una diferencia decimal entre los pesos, sin embargo, la escora inicial no fue significativa.

2.6.2. Método de estimación Lineal

Con los datos de inclinación registrados con el acelerómetro, se realizó una estimación lineal de la forma:

$$y = mx + b \quad (2.1)$$

Donde:

$y = \text{ángulo de escora } [^\circ]$

$m = \text{pendiente de la recta } \left[\frac{1}{kg - cm} \right]$

$x = \text{momento escorante desde el centro del buque } [N - cm]$

$b = \text{intercepto de la recta con el eje } y$

Se determinó el intercepto (b) utilizando el método de mínimos cuadrados.

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum y}{\Delta} \quad (2.2)$$

$$\Delta = N \sum x^2 - \left(\sum x \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta = \text{cuadrado de la suma de las distancias } x \text{ menos}$

$\text{la suma de las distancias al cuadrado}$

$N = \text{número de datos}$

La pendiente (m) se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$m = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\Delta} \quad (2.4)$$

La altura metacéntrica (GM_T) es estimada a partir de la pendiente m [45], usando la siguiente ecuación:

$$GM_T = \frac{m}{W_T} \quad (2.5)$$

Donde:

$W_T =$ peso total del prototipo

Posteriormente, se calculó la distancia vertical entre el centro de gravedad y el metacentro (KM_T):

$$KM_T = KB + BM_T \quad (2.6)$$

$$BM_T = \frac{I_T}{V} = \frac{LB^3}{12V} \quad (2.7)$$

Donde:

$KB =$ distancia vertical desde la quilla al centro de carena [m],

en el caso de la barcaza es estimada como la mitad del calado

$BM_T =$ radio metacéntrico transversal [m]

$I_T =$ Inercia transversal [m^4]

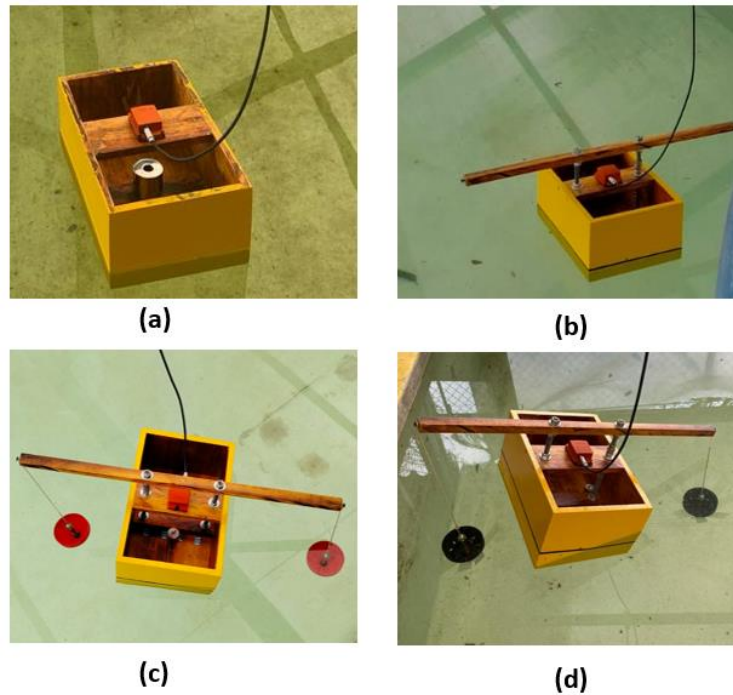
$V =$ volumen desplazado del barco [m^3]

Finalmente, se calculó el centro de gravedad (KG) usando los valores previamente estimados, mediante la ecuación:

$$KG = KM_T - GM_T \quad (2.8)$$

Figura 2.10

Experimento de inclinación, (a) TE01A-L; (b) TE01B-L; (c) TE01C; (d) TE01D



2.7. Prueba de decaimiento libre

Se obtuvo la frecuencia natural y amortiguamiento para cada una de las configuraciones del prototipo a través de la prueba de amortiguamiento o decaimiento libre, en donde, se aplicó una fuerza externa inicial en la sección media de una de las bandas del prototipo, registrando los datos de la amplitud y oscilación mediante el uso del sensor MTi-300 [39]. Para los cálculos, se utilizaron las siguientes ecuaciones [46]:

2.7.1. Frecuencia natural del prototipo

Por cada prueba realizada, para obtener el decremento logarítmico a partir de los valores experimentales, se empleó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\ln(w(t_1))}{\ln(w(t_2))} \quad (2.9)$$

Donde:

$\sigma =$ decremento logarítmico

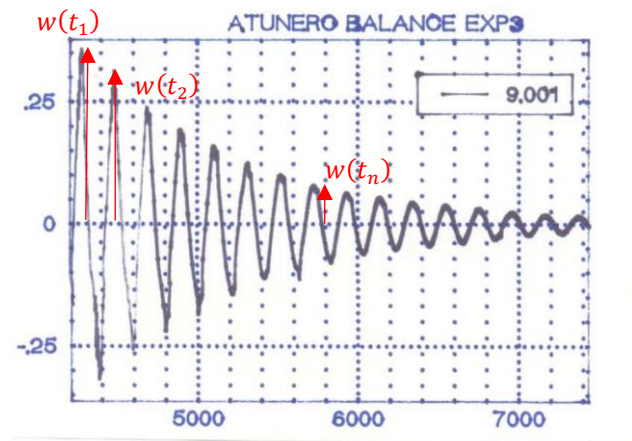
$$w(t) = \text{amplitud } [^\circ]$$

Para entender mejor este concepto, la Figura 2.11 presenta el comportamiento de una prueba típica de decaimiento logarítmico.

Figura 2.11

Modelo buque atunero (sin quilla)

Fuente: Marin [46]



A partir de este dato, se calculó el coeficiente de amortiguamiento adimensional:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\sigma}\right)^2 + 1}} \quad (2.10)$$

Para obtener el periodo amortiguado, se estimó la diferencia entre los tiempos de las máximas amplitudes registrados:

$$\tau_d = t_2 - t_1 \quad (2.11)$$

Se calculó la frecuencia amortiguada mediante la siguiente ecuación

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.12)$$

Finalmente, se calcula la frecuencia natural despejando la ecuación 2.12:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{\tau_d \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.13)$$

Figura 2.12

Prueba de decaimiento libre, (a) TE02-A; (b) TE02-D



2.8. Análisis dimensional de modelo y olas

Debido a que se realizó el análisis dimensional de un modelo real, se utilizó el siguiente factor de escala en base a un prototipo escalado [47].

$$\lambda = \frac{\text{Longitud del prototipo}}{\text{Longitud del modelo}} = \frac{L_1}{L_2} \quad (2.14)$$

Respecto a los periodos, para oscilaciones pequeñas, los periodos entre el prototipo y el modelo a escala se relacionaron utilizando el siguiente factor [47].

$$T_1 = \lambda^{1/2} T_2 \quad (2.15)$$

En donde:

$T_1 =$ Periodo del prototipo, en segundos

$T_2 =$ Periodo del modelo, en segundos

2.9. Respuesta en olas regulares

Utilizando el canal hidráulico de la FIMCP [43], se registró la respuesta en los 6 grados de libertad del prototipo en olas al posicionarlo de forma transversal y someterlo a pruebas dinámicas generando un sistema de olas regulares usando varias frecuencias carreras del flap donde se registraba el comportamiento.

2.9.1. Teoría simplificada para generadores de olas planas en aguas poco profundas

Dado que se trabajó en un tanque de poca profundidad, se utilizó la teoría de Galvin (1964) [48], para la generación de olas utilizando generadores planos, basado en que el agua desplazada por el generador debería ser igual al volumen de la cresta de la ola propagada.

El volumen de agua en la cresta de una ola es:

$$\int_0^{L/2} (H/2) \text{sen}(kx) dx = \frac{H}{k} \quad (2.16)$$

Igualando los 2 volúmenes:

$$Sh = \frac{H}{k} = \frac{H}{2} \left(\frac{L}{2}\right) \frac{2}{\pi} \quad (2.17)$$

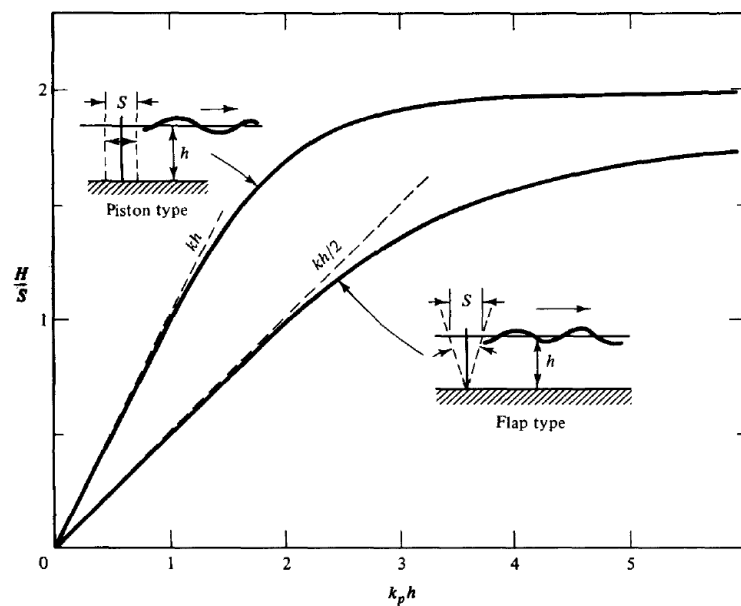
Donde $2/\pi$ representa un factor de área, por lo que, la ecuación puede ser

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{flap} = \frac{kh}{2} \quad (2.18)$$

Figura 2.13

Teoría del generador de olas planas

Fuente: Dean y Dalrymple [48]



2.9.2. Número de ola

Para estimar la longitud de la ola, se utilizó la siguiente relación [49]:

$$k\lambda = 2\pi \rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.19)$$

2.9.3. Frecuencia de la ola

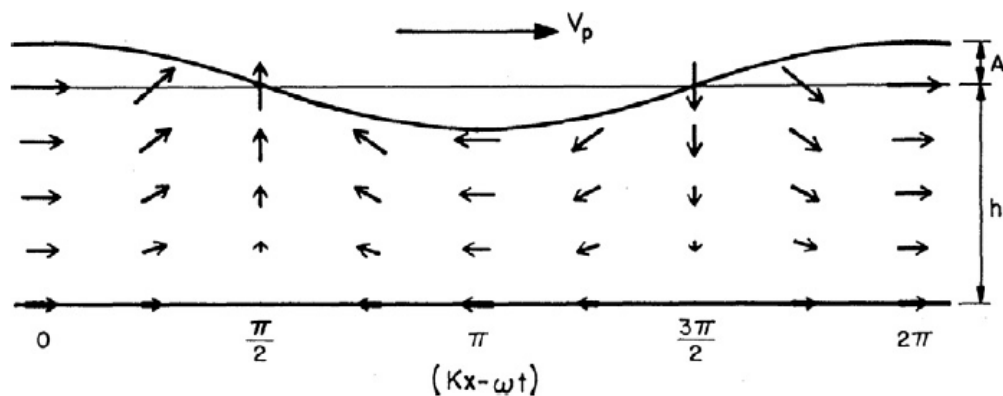
Se utilizó la ecuación de dispersión presentada por Newman [50] para calcular la frecuencia de la ola respecto al flap.

$$V_p = \frac{\lambda}{\tau} \rightarrow f = \left(\frac{1}{\lambda}\right) V_p \quad (2.20)$$

Para el cálculo de la frecuencia en base a la longitud de la ola, se utilizó la ecuación de Newman, 1997 [50], siguiendo el esquema del campo de velocidades de una ola progresiva plana en profundidad finita, tal como se observa en la Figura 2.14.

Figura 2.14

Campo de velocidades de una ola progresiva plana en profundidad finita [50]



$$V_p = \frac{\omega}{k} = [(g/k)\tanh]^{1/2} \quad (2.21)$$

2.9.4. Proceso experimental

Se estableció un esquema acorde al diseño de experimento presentado en la Tabla 2.8, el cual se describe a continuación.

Tabla 2.8

Esquema de pruebas dinámicas para el prototipo, parámetros

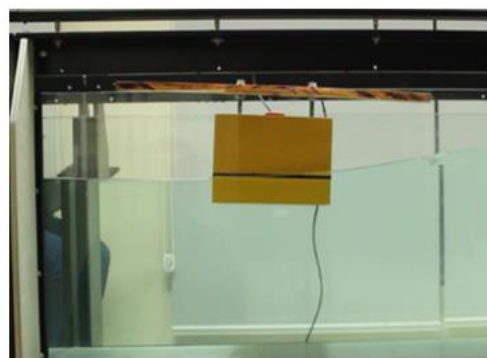
Parámetros de Pruebas en el canal hidráulico					
F. INICIAL,	F. FINAL,	PASO,	CARRERA,	TIEMPO,	MUESTRA
Hz	Hz	Hz	mm	min	
0.1	0.3		200		
0.4	0.5		150		1 prueba/ Frecuencia
0.6	0.7	0.1	100	2	
	0.8		80		6 pruebas/ Frecuencia
0.9	1.3		60		

Figura 2.15

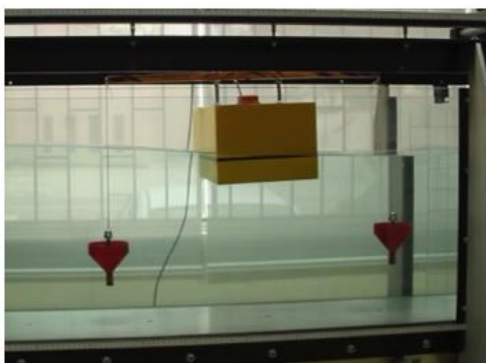
Respuesta en olas, (a) TE01A-L; (b) TE01B-L; (c) TE01C-L; (d) TE01D-L



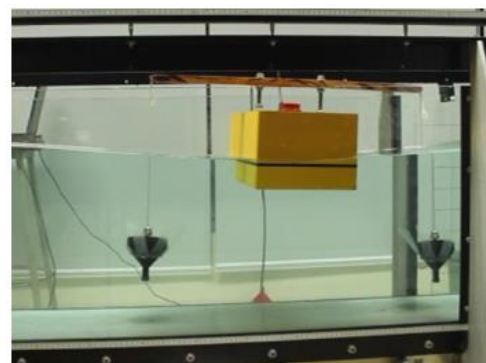
(a)



(b)



(c)



(d)

2.9.5. Propiedades de las olas

Siguiendo el esquema de la Tabla 2.8, se registraron las amplitudes, longitudes y periodos de las olas conforme se variaba la frecuencia y carrera del generador tipo flap, estableciendo 2 marcas a lo largo del volumen donde se desarrollaban las pruebas dinámicas del prototipo. Se utilizó un método manual de medición basado en la posición de 2 ganchos en la cresta y valle de la ola para medir la amplitud, y ambos a la distancia de separación entre 2 crestas o valles para medir la longitud, tal como se observa en la Figura 2.16

Figura 2.16

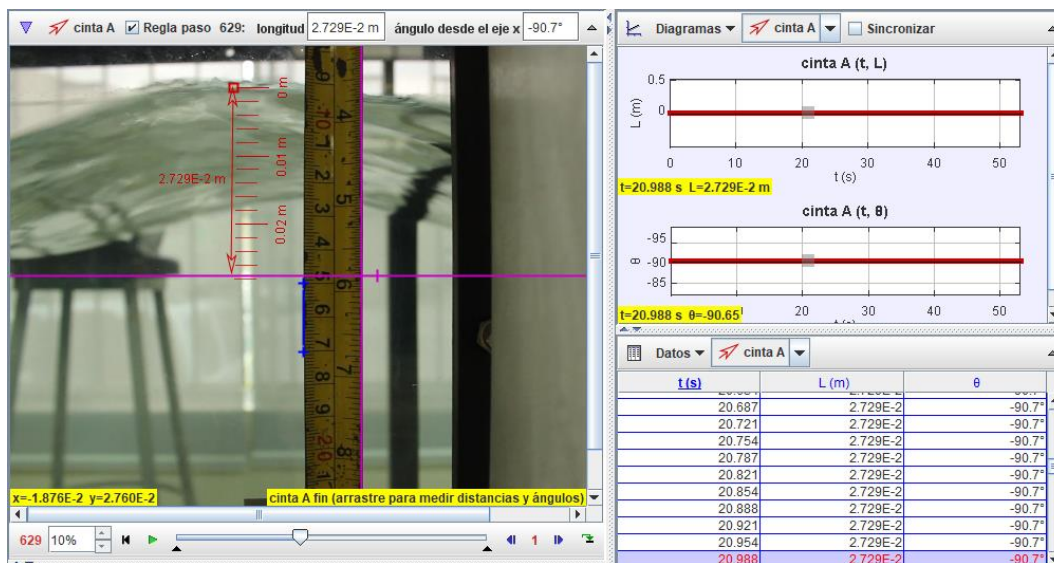
Método manual para medición física de la ola, 1.1 Hz



Este método de medición fue validado, utilizando el software Tracker [51], tal como se observa en la Figura 2.17.

Figura 2.17

Método para medición física de la ola utilizando software, 1.1 Hz [51]

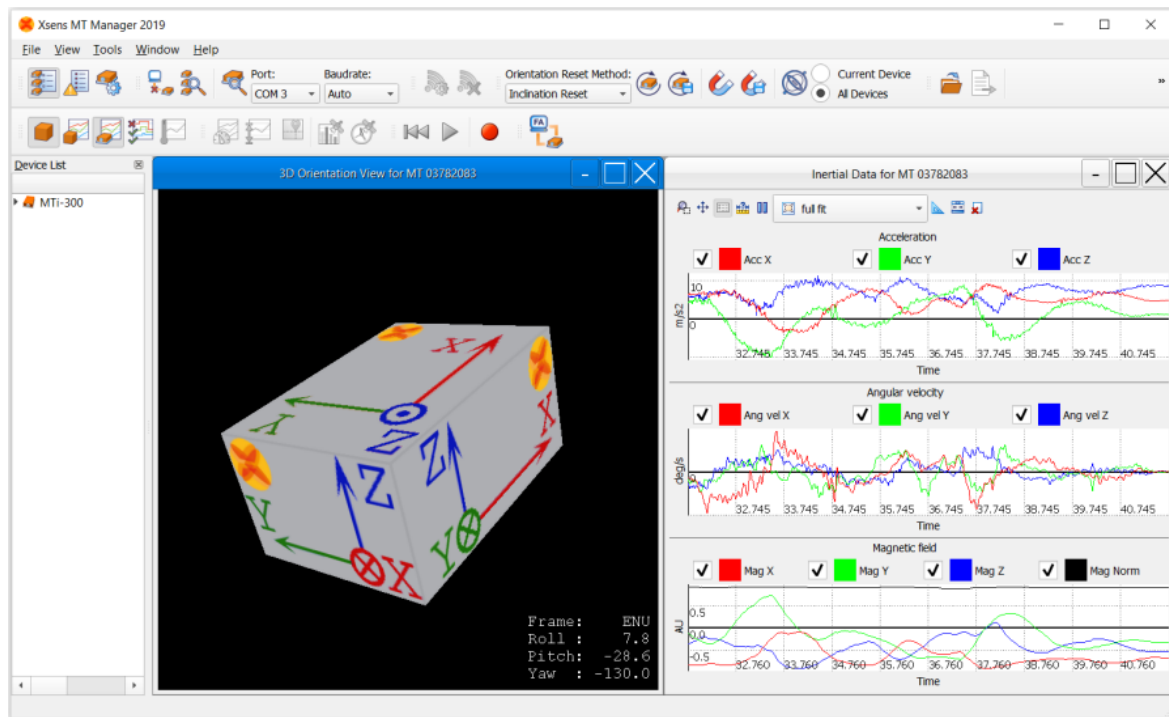


2.10. Análisis de datos

Para procesar los datos registrados con el sensor, se utilizó el programa MT Manager Software, que se incluye en el paquete de productos de XSENS [40]. Posteriormente, se los exportó en formato .txt, recolectando información referente al roll, pitch and yaw.

Figura 2.18

Interfaz del software MT Manager

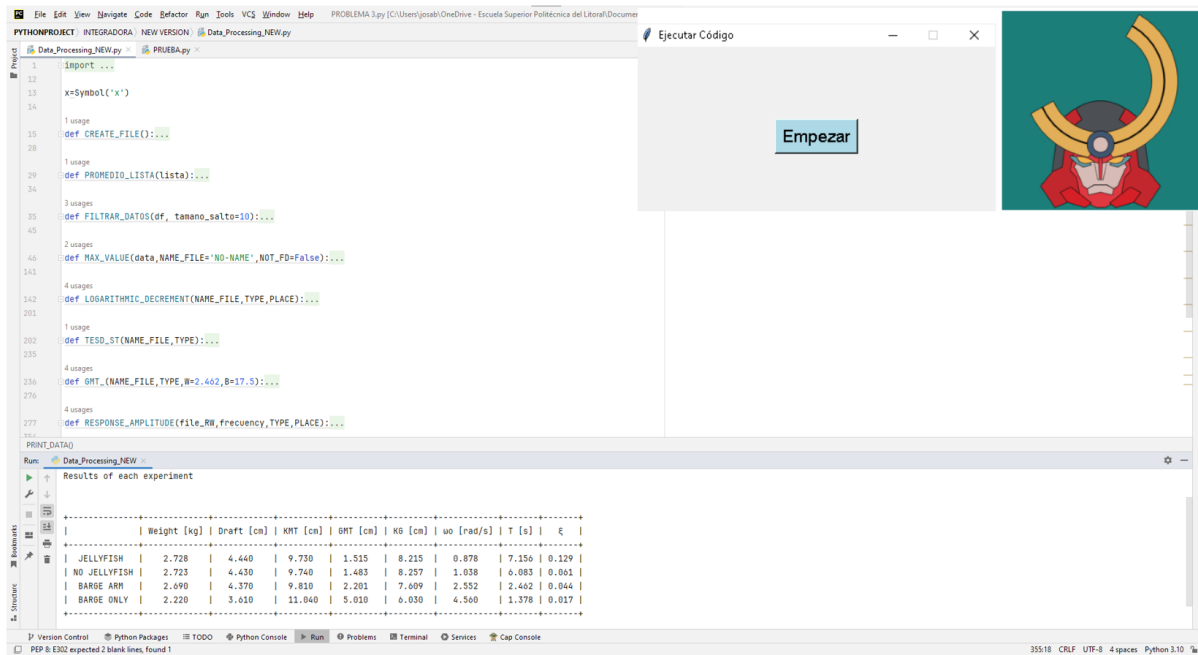


2.10.1. Script de python

Para el análisis de las tomas de datos se desarrolló un código en python, que se encuentra en el Apéndice E: Código fuente del script, en torno a una variedad de operaciones, desde la lectura y filtrado de datos hasta la generación de gráficos, enfocado en los experimentos de decaimiento libre, prueba de inclinación y respuesta a olas regulares a través de funciones basadas en las ecuaciones planteadas anteriormente. La modularidad de este código permitió analizar datos provenientes de múltiples experimentos, facilitando la comparación de resultados y ofreciendo una visión completa de los fenómenos estudiados, como se observa en la Figura 2.19.

Figura 2.19

Muestra del script de python



2.11. Análisis económico

2.11.1. Fase preliminar

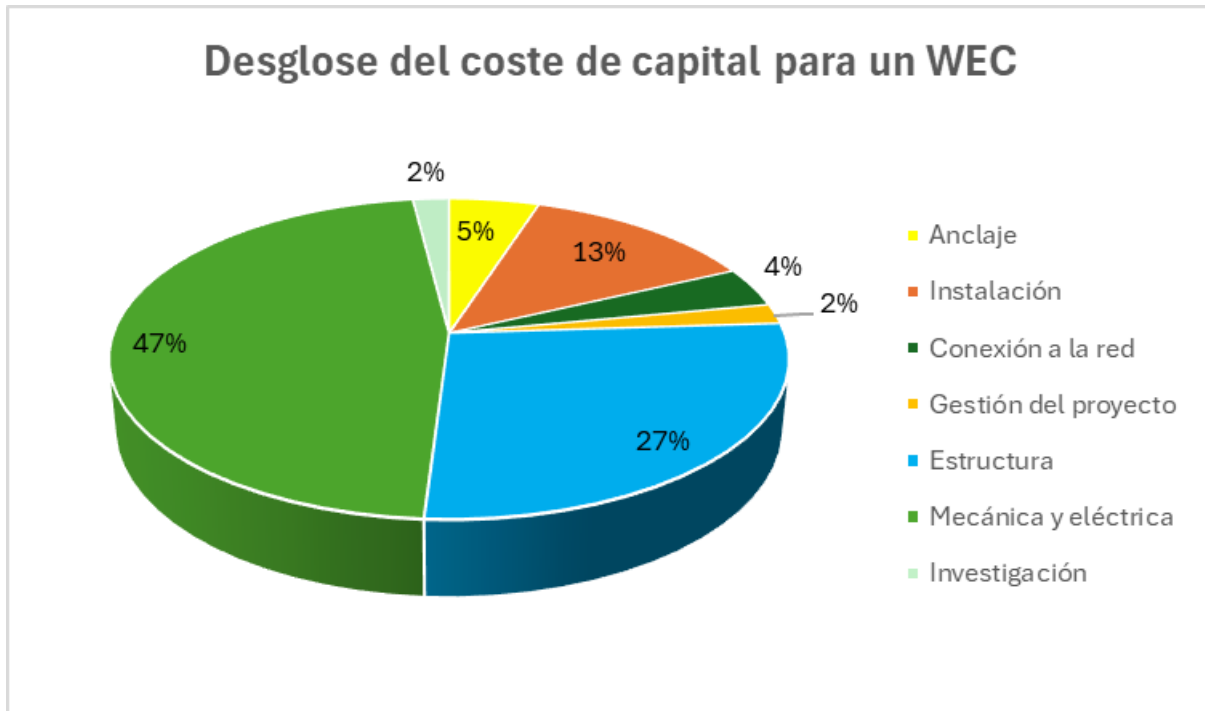
En esta sección se presentan los parámetros para estimar el costo-beneficio de la construcción preliminar e implementación del dispositivo real, tomando en cuenta los grupos de trabajo y materiales requeridos a partir del modelado y escantillonado del prototipo utilizando el plug-in Orca del software Rhinoceros.

2.11.2. Costo del proyecto

La Figura 2.20, presenta el costo general del proyecto, con el precio por cada actividad definida, los porcentajes correspondientes a las actividades se obtuvieron del análisis de costos para la energía undimotriz en el Pacífico [52]. El punto de equilibrio se presenta en la Figura 3.20 y la tabla de amortización en la Tabla E.1

Figura 2.20

Desglose del coste de capital de un WEC [52]



2.11.3. Matriz Potencia

Para estimar la generación de energía, se relacionó la ola incidente con la capacidad de generación del proyecto y utilizando la formulación de aproximación de potencia [53]. Los resultados generales permitieron realizar el perfil económico del proyecto, presentado en el Anexo E, Tabla E.2.

$$F = \frac{1}{8} \rho g H^2 T = 1.26 H^2 T \text{ [kW/m]} \quad (2.22)$$

$$P_{anual} = \sum 8766 * 1.26 * H_i^2 * T_j * \eta * L * \left(\frac{D_j}{100} \right) \text{ [kWh]} \quad (2.23)$$

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proceso experimental. Iniciando con la prueba de estabilidad, que permitió obtener el valor del GMT (altura metacéntrica). Posteriormente, se realizó la prueba de decaimiento logarítmico para obtener el amortiguamiento y frecuencia natural. Finalmente, se analizó la respuesta en olas regulares para evaluar la condición de resonancia.

3.1 Resultados de la prueba de inclinación

Se siguió el plano de movimientos descrito en la Figura 2.9, tomando un tiempo de registro de 2 minutos al posicionar el peso y 15 segundos cuando se lo trasladaba. Se obtuvieron las gráficas de roll en cada movimiento y se realizó una interpolación lineal, lo que permitió obtener el GMT y el KG de cada configuración. Se presentan las gráficas correspondientes a las configuraciones con lastre. Las gráficas sin lastre se encuentran en el Apéndice B, sección 4.4.1. En la Tabla 3.2, se muestran los resultados, registrando un total de 29 minutos y 15 segundos por prueba.

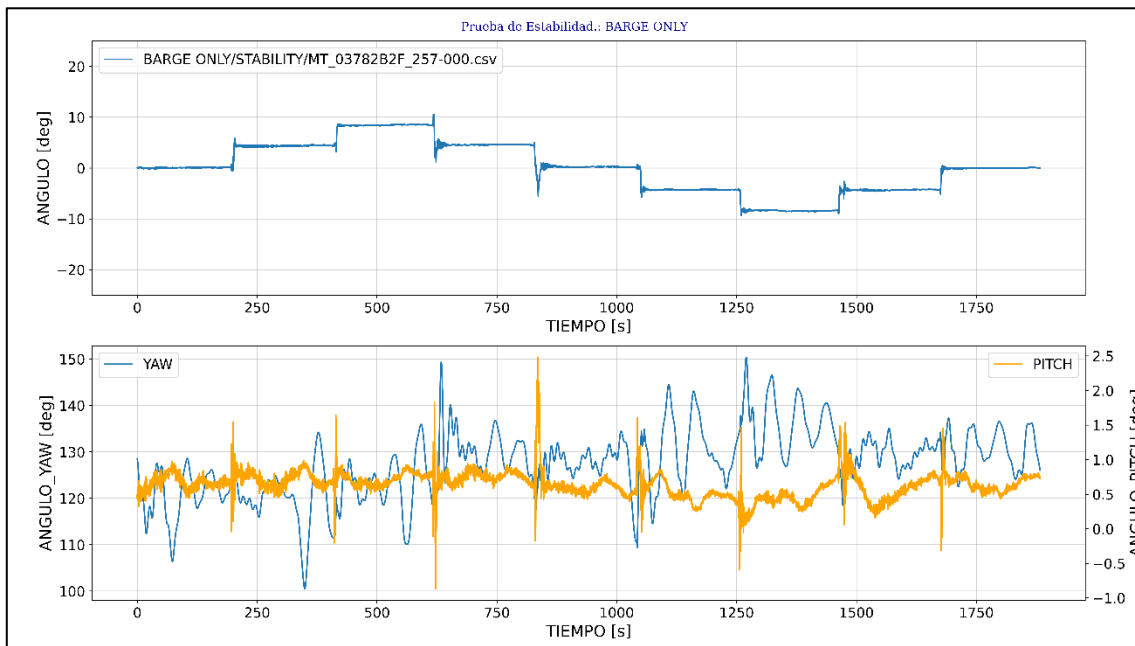
3.1.1 Prueba de inclinación para configuraciones con lastre

3.1.1.1 Barcaza sola

En la Figura 3.1 y Figura 3.3, se observó simetría en las gráficas del movimiento transversal de los pesos, esto debido a que el peso vuelve a su posición original luego de realizar los 8 movimientos. Además, para cada salto en la gráfica, se evidenció una perturbación inicial, esto causado por una pequeña oscilación en la barcaza causada al colocar el peso en la posición de registro.

Figura 3.1

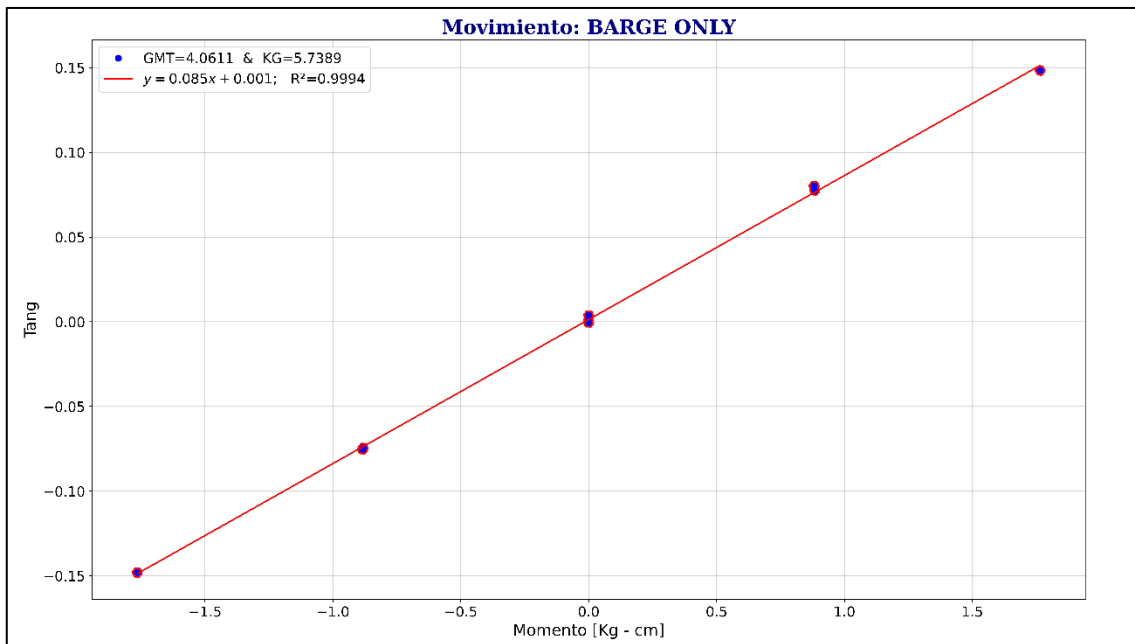
Movimiento de pesos del sistema TE01-A-L



La Figura 3.2 reflejó valores de GMT y KG mayores que la Figura 3.4. Esto debido a la forma en que se distribuye el peso añadido en el prototipo al utilizar los cuerpos sumergibles, lo que genera a su vez, una disminución de la altura metacéntrica y un aumento del centro de gravedad. Cabe recalcar que el coeficiente de correlación fue de 0.9846, lo cual, aumenta la confiabilidad de los resultados. El efecto inercial causado por los WECs sumergidos puede ser cuantificado usando las expresiones mostradas en Guachamin-Acero et al [54].

Figura 3.2

Regresión lineal del sistema TE01-A-L



3.1.1.2 Barcaza+WEC+Medusa, posicionado en los extremos

En las gráficas de yaw y pitch vs. tiempo, no se evidenció acoplamiento que pueda generar inclinación en las direcciones de los otros ejes. Además, se observó en la Figura 3.1 y Figura 3.3, ciertos picos que sugerirían un acoplamiento de movimientos, pero realmente trató de una perturbación externa debido al desplazamiento presumiblemente brusco de los pesos hacia las posiciones de registro.

Figura 3.3

Movimiento de pesos del sistema TE01-D-L, extremos

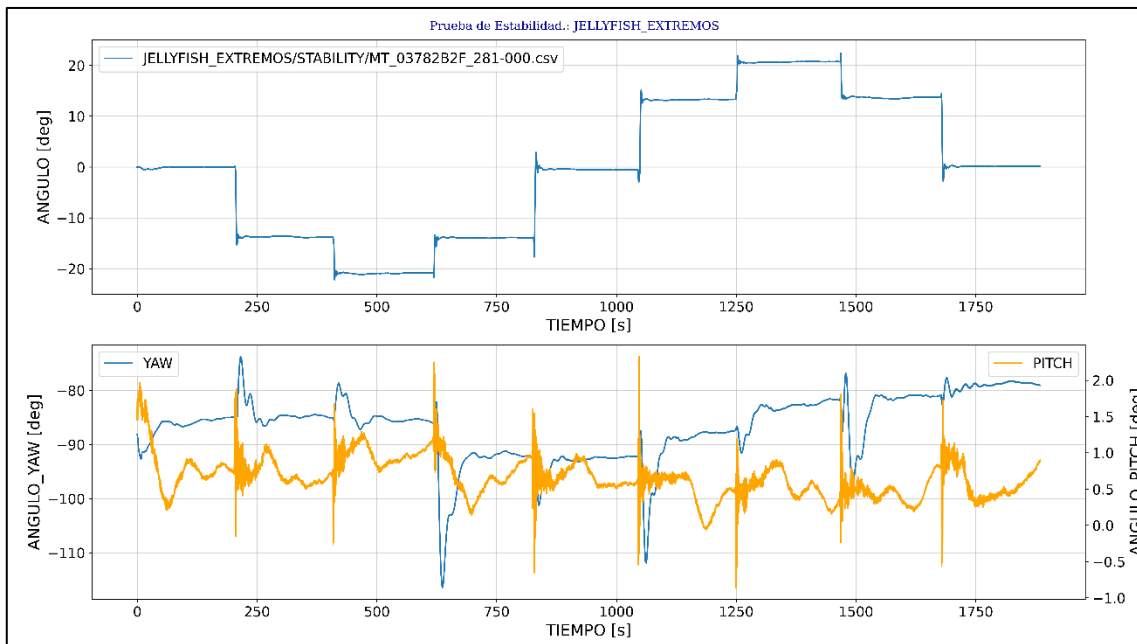
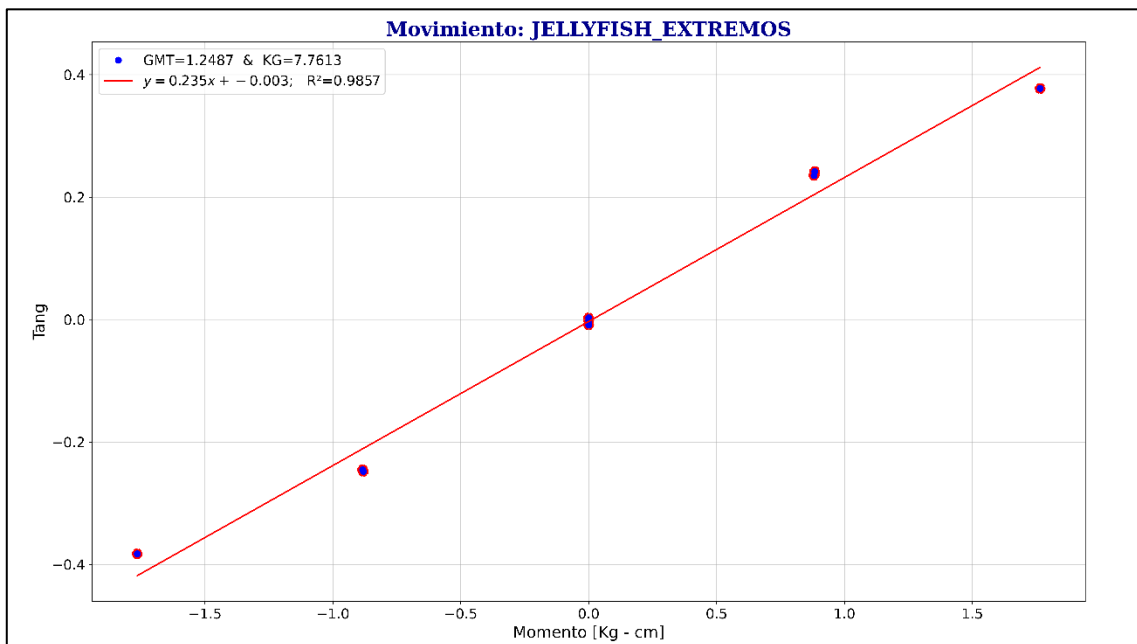


Figura 3.4

Regresión lineal del sistema TE01-D-L, WEC en los extremos



3.2. Resultados de la prueba de decaimiento logarítmico

En esta prueba, se registró la cantidad de oscilaciones que describía cada configuración de la barcaza colocada paralela al tanque, empleando un desplazamiento inicial aplicando una fuerza externa en los extremos de la viga de soporte, es decir, en la sección media. Se presentan las gráficas correspondientes a las configuraciones con lastre. Las gráficas sin lastre se encuentran en el Apéndice C, sección 4.5.1. En la Tabla 3.2, se muestran los resultados, tomando un registro de 2 minutos por prueba.

3.2.1. Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones con lastre

3.2.1.1. Barcaza sola

Revisando las gráficas de decaimiento, se observó que las oscilaciones reducen su amplitud conforme pasa el tiempo, esto debido al efecto de amortiguamiento, ya que, al oscilar libremente el prototipo, este buscará la estabilidad. Para calcular la frecuencia natural, se estableció en el script que solo se tomen los puntos máximos que estén por debajo del coeficiente de correlación de 0.90, así se descartaban los datos aberrantes, como los datos donde la gráfica comenzaba a ser constante.

Figura 3.5

Oscilación libre del sistema TE02-A-L

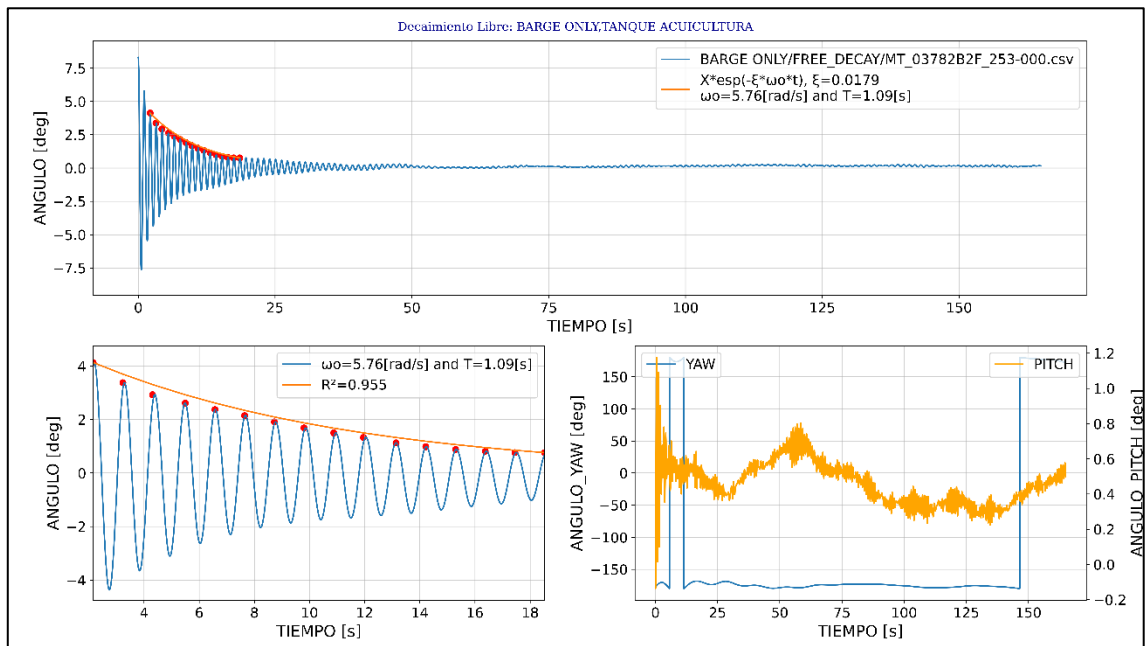
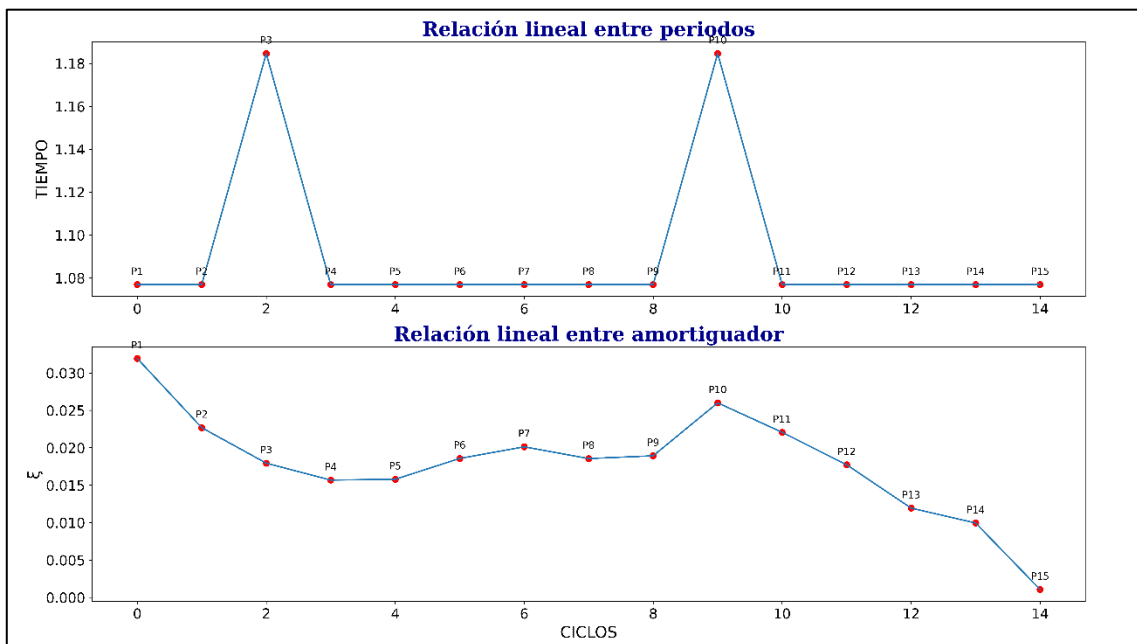


Figura 3.6

Variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-A-L

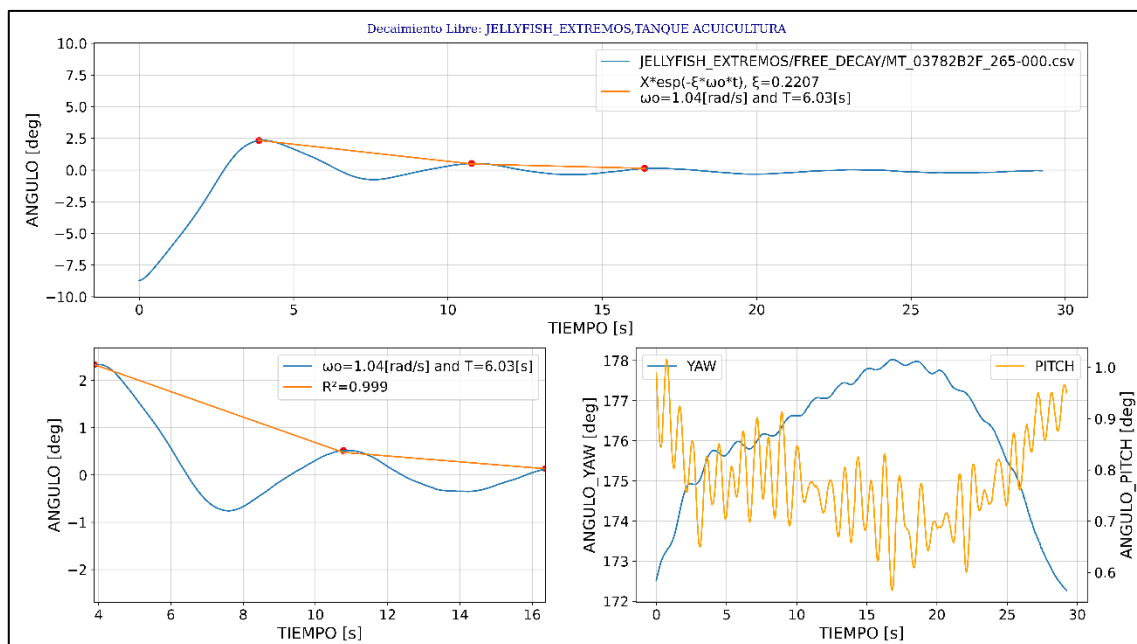


3.2.1.2. Barcaza + WEC + Medusa, posicionado en los extremos

En la Figura 3.5 el número de oscilaciones son mayores y más concurrentes que en la Figura 3.7, esto debido al aumento del amortiguamiento en el sistema cuando se añadieron los cuerpos sumergibles. Entonces, se redujo el balanceo del prototipo y, por ende, las oscilaciones fueron más lentas y separadas. Esto también explica por qué en la Figura 3.7 el periodo natural es mayor.

Figura 3.7

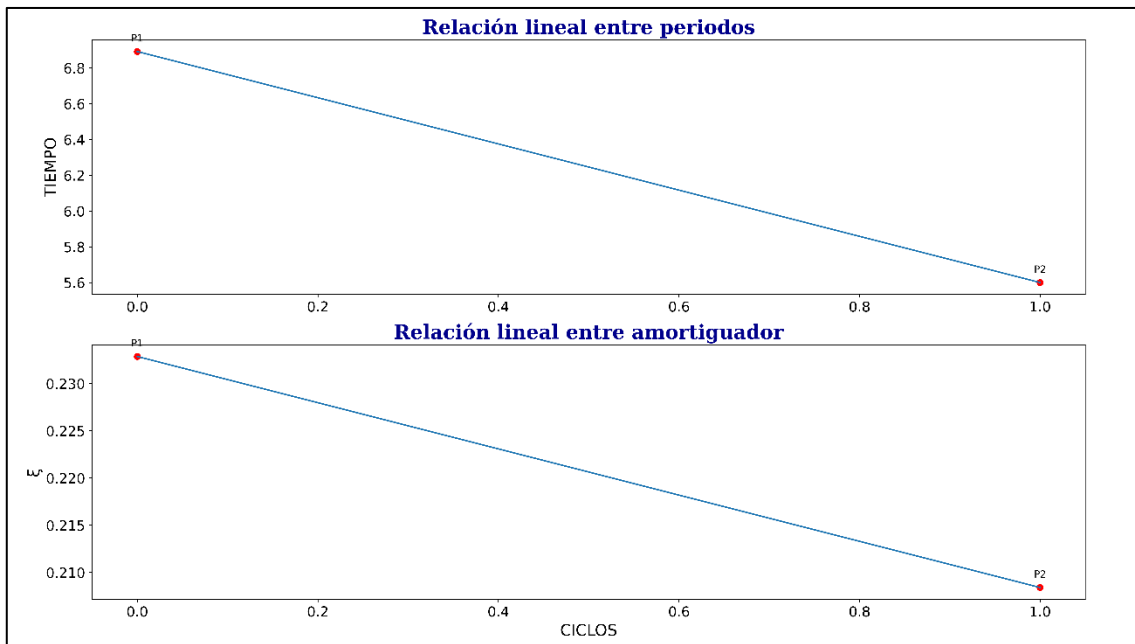
Oscilación libre del sistema TE02-D-L, extremos



En la Figura 3.6 y Figura 3.8 se observó que la relación lineal entre los periodos describió una tendencia constante. Sin embargo, se observan saltos de 0.1[s], lo que probablemente sea una limitación del sensor. En las gráficas del amortiguamiento, se aprecia un comportamiento decreciente, esto debido a que, para el cálculo del amortiguamiento, se elegían los picos de cada oscilación, y dado el comportamiento amortiguado, tiende a reducirse.

Figura 3.8

Variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L, extremos



3.3. Resultados de la prueba de respuesta en olas regulares

3.3.1. Calibración de olas regulares con generador tipo flap de FIMCM

En la Figura 3.9 se observan las comparaciones entre frecuencias experimentales vs teóricas, esta aproximación fue necesaria dado que, por efectos de pérdidas, la frecuencia de la ola no es la misma del flap, lo que es importante analizar dado que la frecuencia de la ola es la que rige el cálculo hidrodinámico.

Figura 3.9

Relación de frecuencias Flap vs Ola

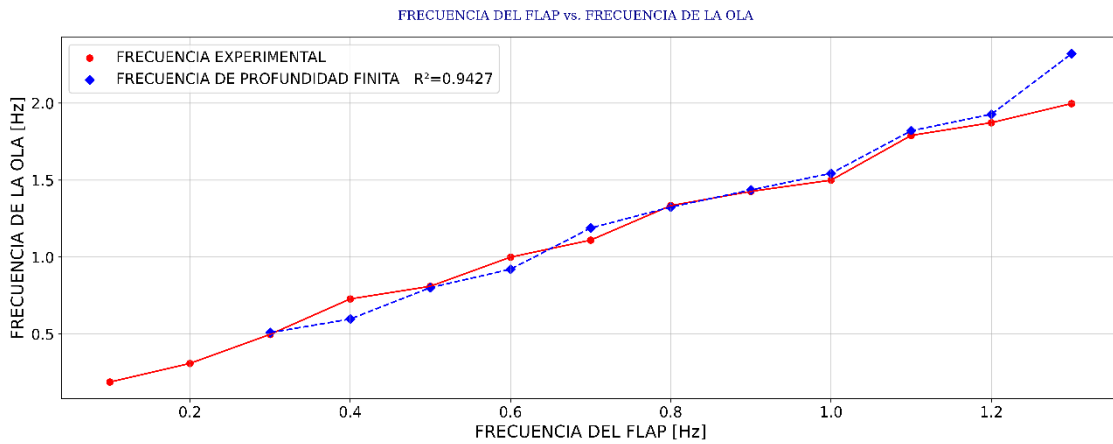


Tabla 3.1

Frecuencia de la ola teórica vs. experimental

Frec. Flap [Hz]	S [m]	A [m]	h [m]	k [1/m]	k Exp [1/m]	Long [m]	Long. Exp [m]	Frec. Teórica [Hz]	Frec. Frec.	Frec. FD [Hz]
0.1	0.099	0.0061	0.35	0.3489		18.00		0.2945	0.1879	0.3881
0.2	0.099	0.0079	0.35	0.4541		13.84		0.3359	0.3089	0.4419
0.3	0.0745	0.0217	0.35	1.6661	1.988	3.771	3.16	0.6434	0.4974	0.5093
0.4	0.0745	0.0245	0.35	1.8831	2.484	3.337	2.53	0.6841	0.7278	0.5971
0.5	0.0496	0.0286	0.35	3.2931	3.157	1.908	1.99	0.9045	0.8100	0.8014
0.6	0.0496	0.0368	0.35	4.2314	3.785	1.485	1.66	1.0254	0.9993	0.9209
0.7	0.0397	0.0383	0.35	5.5073	5.928	1.141	1.06	1.1698	1.1099	1.1882
0.8	0.0298	0.0390	0.35	7.4880	7.139	0.839	0.88	1.3640	1.3340	1.3249
0.9	0.0298	0.0395	0.35	7.5756	8.378	0.829	0.75	1.3720	1.4265	1.4356
1	0.0298	0.0411	0.35	7.8807	9.666	0.797	0.65	1.3994	1.499	1.5436
1.1	0.0298	0.0499	0.35	9.5682	13.37	0.657	0.47	1.5419	1.7901	1.8203
1.2	0.0298	0.0611	0.35	11.729	14.96	0.536	0.42	1.7072	1.8727	1.9275
1.3	0.0298	0.0728	0.35	13.959	21.66	0.450	0.29	1.8625	1.9970	2.3201

Así mismo, en la, se compararon los resultados experimentales con la tendencia que se debe esperar de la relación H/S al utilizar generadores tipo flap, con lo expuesto en la literatura. Se observa una cercanía de los puntos a la línea de tendencia, corroborada con el coeficiente de correlación de 0.93.

3.3.2. Respuesta en olas

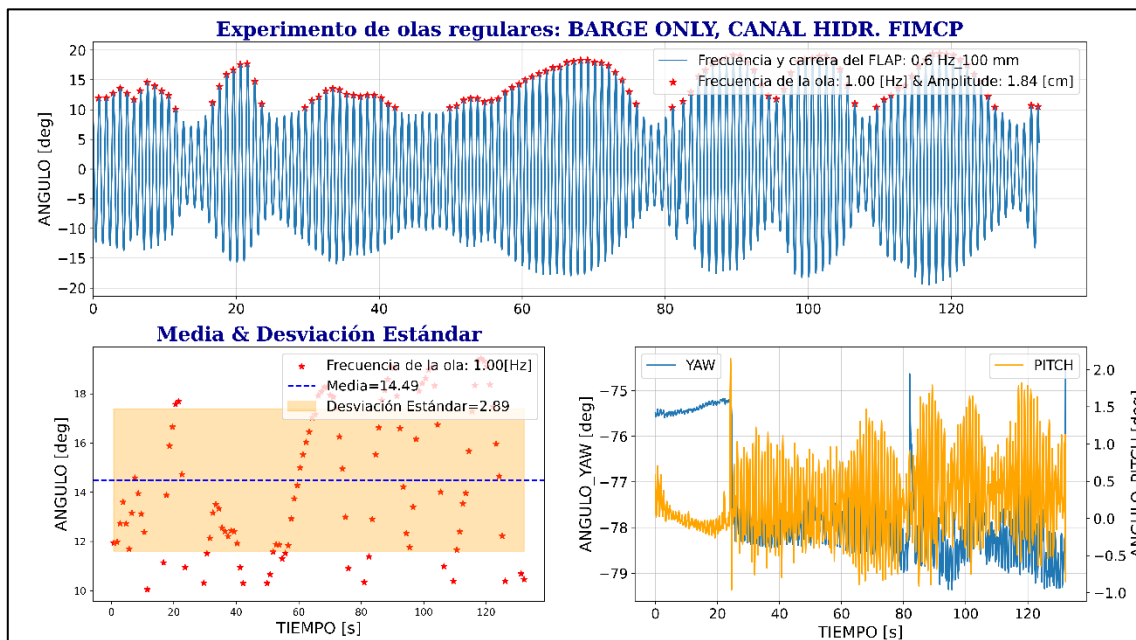
3.3.2.1. Barcaza sola

En la

Figura 3.10, se observa una respuesta más pronunciada a la frecuencia de la ola. Esto se debe a que el sistema de la barcaza sola tiene una masa menor y un mayor GMT. Esto provoca que el movimiento de balanceo sea más extenso, lo que resulta en una escora mayor. Además, el gráfico tiende a mostrar una amplitud significativa mayor a conforme se acerca a la frecuencia natural. También, en la figura se escogen los picos máximos y realizando un análisis estadístico, se logra estimar la respuesta promedio, junto a su desviación estándar, permitiendo entender la variabilidad de la respuesta del sistema ante las diferentes condiciones de las olas.

Figura 3.10

Respuesta en olas para el sistema TE03-A-L, frecuencia del flap: 0.60[Hz]



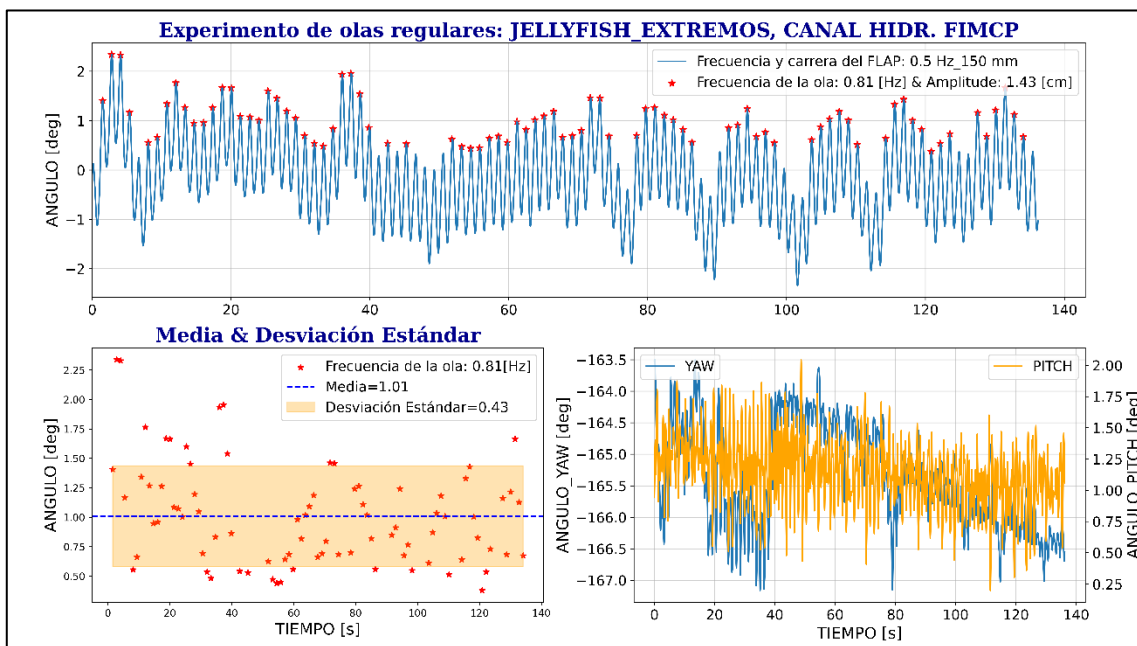
3.3.2.2. Barcaza+WEC+Medusa

Por otro lado, en la Figura 3.11, sugiere que, debido al efecto de masa añadida, el dispositivo tiende a desplazarse menos. Además, en este caso, como la frecuencia natural es menor en comparación con la

Figura 3.10, su balance irá aumentando a medida que la ola incidente vaya disminuyendo.

Figura 3.11

Respuesta en olas para el sistema TE03-D-L, frecuencia del flap: 0.50[Hz]



3.3.3. Comparación de resultados

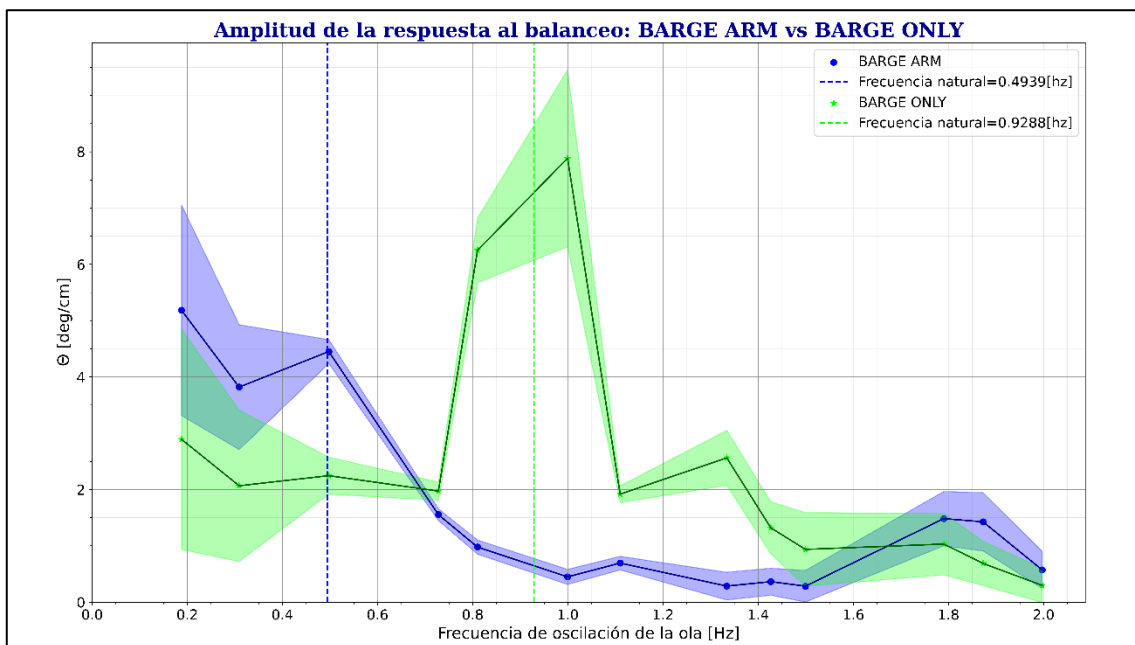
Dentro de las pruebas hidrodinámicas, se realizó una comparación para el Operador de Amplitud de la Respuesta al balance (RAO), luego de evaluar cada una de las configuraciones descritas en la Tabla 2.7, siguiendo el esquema de la Tabla 2.8. Entonces, Se presentan las gráficas correspondientes a las configuraciones con lastre. Las gráficas sin lastre se encuentran en el Apéndice D, sección 4.7.1.

3.3.3.1. RAO para las configuraciones con lastre

En la Figura 3.12 se evidencia un ligero desplazamiento en la frecuencia natural, pero es debido al aumento de masa estructural al añadirse la base de los cuerpos sumergibles, lo que describe más un efecto inercial por aumento de masa que un efecto de sintonización, e incluso respalda lo expuesto en la problemática, pues, siguiendo esta gráfica, se necesitaría jugar con la masa estructural del prototipo para variar la frecuencia natural.

Figura 3.12

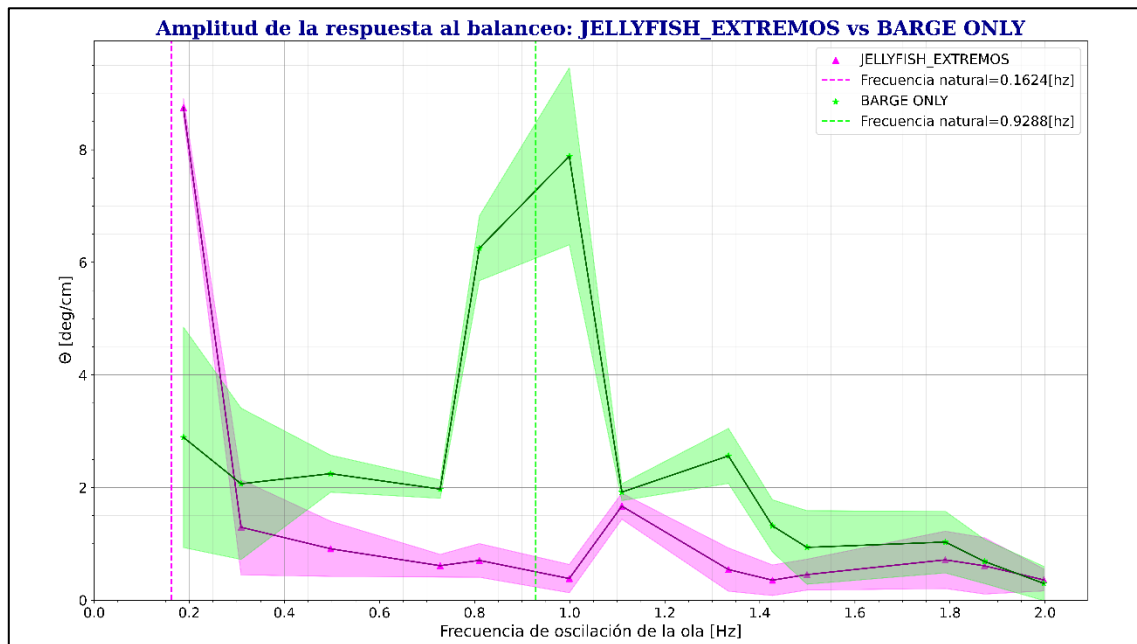
RAO para la barcaza: sola vs. Estructura



En la Figura 3.13, se observa como las frecuencias naturales y el RAO se desplazan a lo largo del eje x cuando se añaden los cuerpos sumergibles. Esto se debe al efecto de oposición al movimiento oscilatorio desarrollado por el WEC, generando un cambio de inercia producido el efecto de masa añadida de los cuerpos sumergibles, tal como se explicó en la sección 1.4.2.

Figura 3.13

RAO para la barcaza: Sola vs. WEC+medusa en los extremos



Revisando la Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16 se observa como varía la frecuencia natural al desplazar transversalmente los puntos de anclaje de los cuerpos sumergibles. Se puede evidenciar que existe un mínimo cambio de frecuencia natural, esto debido a que, aunque, al reducirse la longitud del brazo de acción, se reduce el momento, lo que se traduce como una ligera variación en el cambio de inercia.

Figura 3.14

RAO para la barcaza con WEC: extremos vs. centros

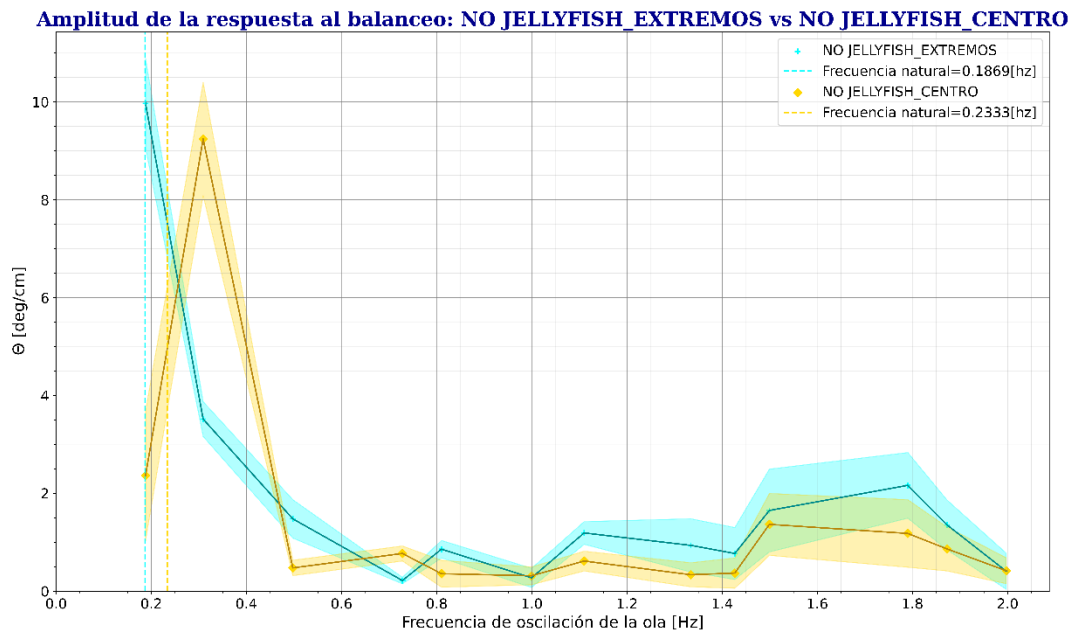


Figura 3.15

RAO para la barcaza con WEC+medusa: extremos vs. centros

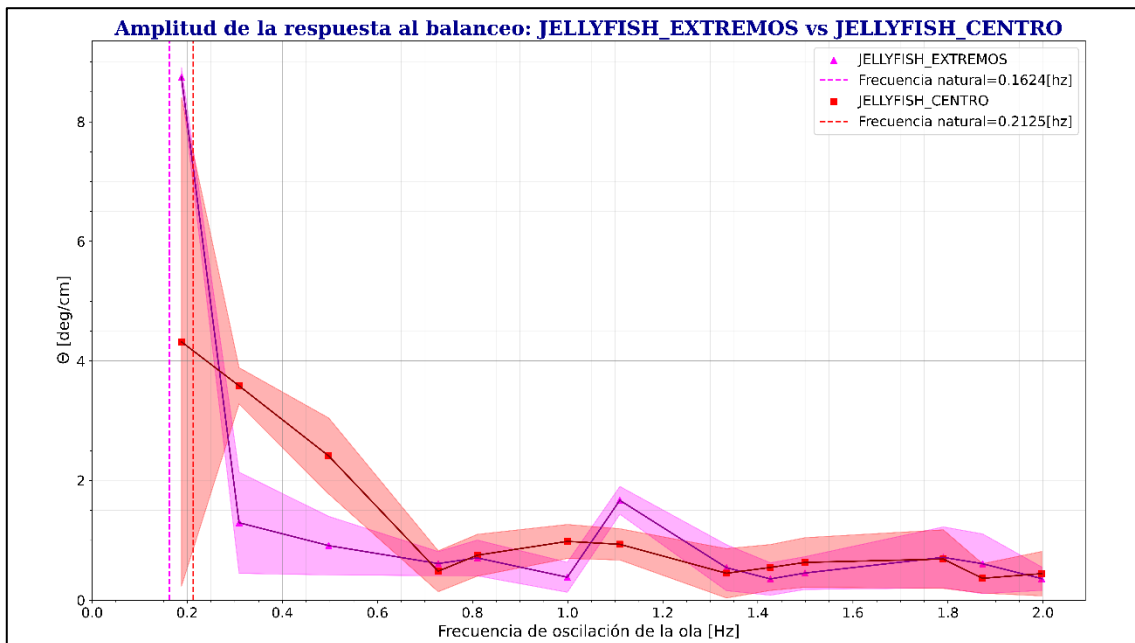
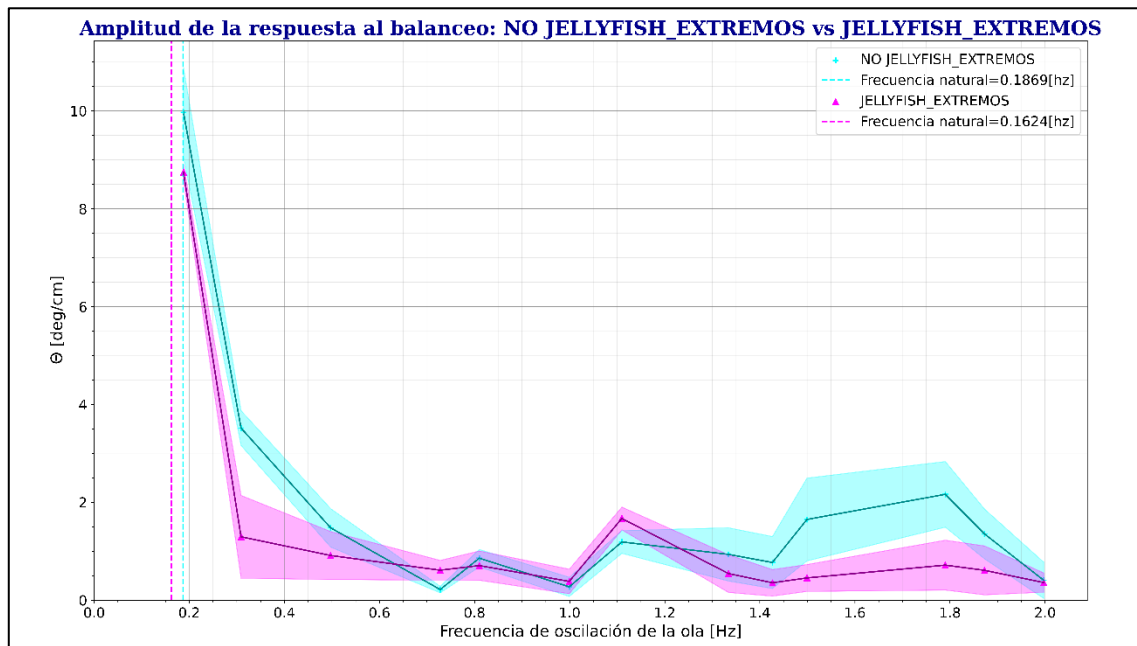


Figura 3.16

RAO para la barcaza: WEC vs. WEC+medusa, ambos en los extremos

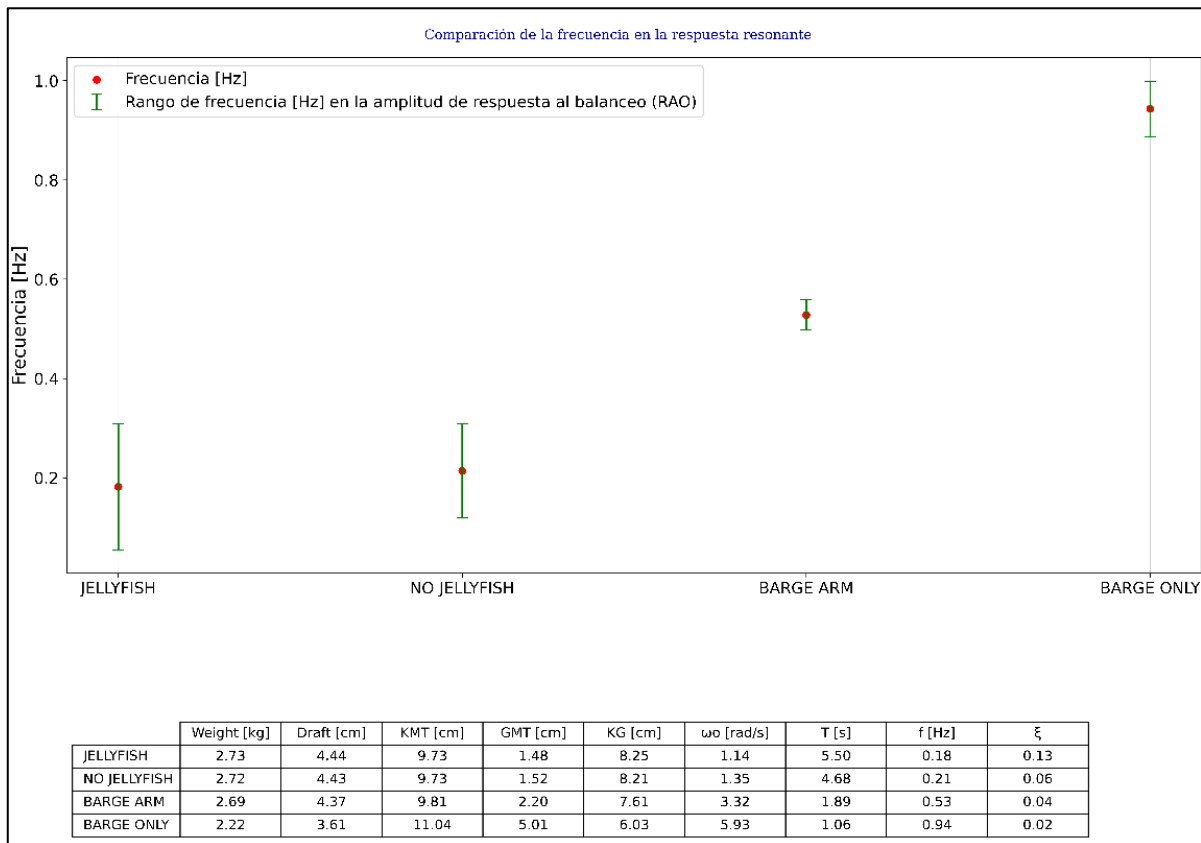


3.3.4. Rangos de frecuencia para el RAO

En la Figura 3.17, se observa que el dispositivo barcaza + WEC + medusa es más sensible a ciertos rangos de frecuencia de las olas. Por lo tanto, es crucial tener una cobertura de datos más densa alrededor de la frecuencia natural del dispositivo para comprender completamente su comportamiento y su capacidad de respuesta a diferentes condiciones de las olas.

Figura 3.17

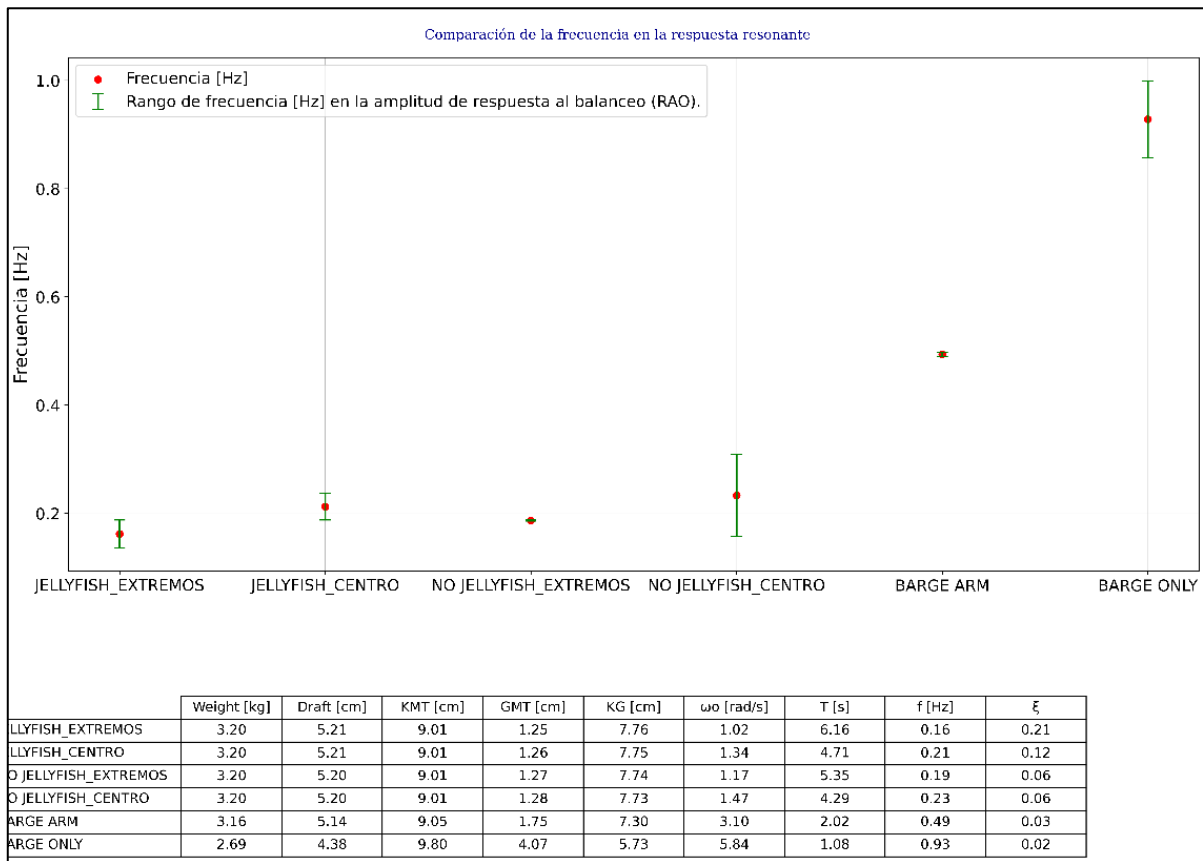
Rango de frecuencias para configuraciones sin lastre



Por otro lado, en la Figura 3.18, es notable que los rangos están más cerca a la frecuencia natural obtenida de la prueba de decaimiento libre. Esto se debe a que, al aumentar el lastre, el centro de gravedad baja, haciéndola menos sensible al movimiento.

Figura 3.18

Rango de frecuencias para configuraciones con lastre



3.4. Resumen de Resultados

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados del proceso experimental, donde, a medida que el GMT de los dispositivos aumenta, la frecuencia también lo hace, pero el período disminuye, tanto en los modelos con lastre como sin lastre. Esto se debe al efecto producido por la masa añadida de los dispositivos WEC, la cual, como se trató en la sección 1.4.2, cumple con el principio de compensación pasiva al movimiento de balance.

Tabla 3.2

Resultados del proceso experimental a 20° de temperatura del agua

PRUEBAS SIN LASTRE									
	Peso	Calado	KMT	GMT	KG	ω	T	f	ξ
	[kg]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[rad/s]	[s]	[Hz]	
WEC	2.728	4.44	9.73	1.481	8.249	1.142	5.50	0.182	0.129
WEC + Medusa	2.723	4.43	9.73	1.518	8.212	1.35	4.68	0.214	0.061
Barcaza + Estructura	2.69	4.37	9.81	2.201	7.609	3.317	1.89	0.528	0.044
Barcaza sola	2.22	3.61	11.04	5.01	6.03	5.927	1.06	0.943	0.017
PRUEBAS CON LASTRE									
	Peso	Calado	KMT	GMT	KG	ω	T	f	ξ
	[kg]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[rad/s]	[s]	[Hz]	
WEC + Medusa, extremos	3.202	5.21	9.01	1.249	7.761	1.02	6.16	0.162	0.214
WEC + Medusa, centros	3.202	5.21	9.01	1.263	7.747	1.335	4.705	0.213	0.118
WEC, extremos	3.197	5.2	9.01	1.267	7.743	1.174	5.351	0.187	0.059

PRUEBAS CON LASTRE									
	Peso	Calado	KMT	GMT	KG	ω	T	f	ξ
	[kg]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[rad/s]	[s]	[Hz]	
WEC, centros	3.197	5.2	9.01	1.279	7.731	1.466	4.287	0.233	0.056
Barcaza + Estructura	3.164	5.14	9.05	1.75	7.3	3.104	2.025	0.494	0.033
Barcaza sola	2.694	4.38	9.8	4.068	5.732	5.836	1.077	0.928	0.016

3.5. Análisis económico

3.5.1. Fase preliminar

Se presenta el costo estimado de la construcción del proyecto.

Tabla 3.3

Costo de construcción preliminar del proyecto

COSTO GENERAL DEL PROYECTO					
ITEM	CTD.	\$/TON	VALOR	SUBTOTAL	%
ESTRUCTURA				\$ 421,331.45	
MATERIAL [ton]	327	\$ 1,143.00	\$ 373,852.22		27%
MISCELANEOS [ton]	33	\$ 1,451.61	\$ 47,479.23		
TOTAL, PRESUPUESTO				\$ <u>1,560,486.84</u>	

Se presenta en la Tabla 3.4 la estimación de la construcción del proyecto, para realizarlo, se siguió el formato de porcentajes establecidos en la Figura 2.20.

Tabla 3.4

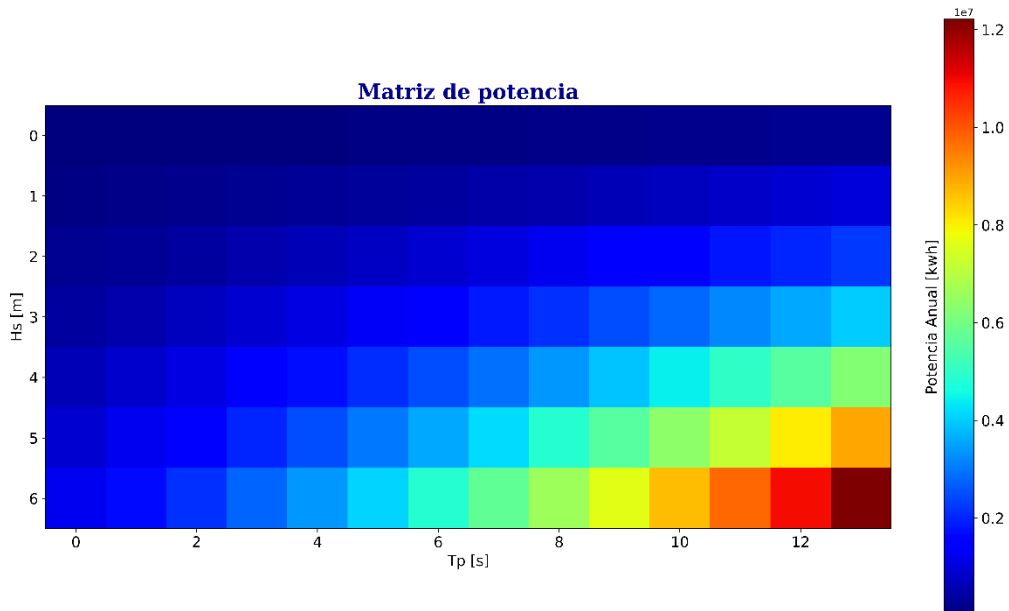
Costo por cada actividad de construcción

COSTO POR ACTIVIDADES Y GRUPOS DE TRABAJO		
Anclaje	\$	78,024.34 5%
Instalación	\$	202,863.29 13%
Investigación	\$	31,209.74 2%
Conexión a la red	\$	62,419.47 4%
Gestión del proyecto	\$	31,209.74 2%
Estructura	\$	421,331.45 27%
Mecánica y eléctrica	\$	733,428.82 47%

3.5.2. Matriz Potencia

Figura 3.19

Matriz potencia del proyecto.



3.2.1. Capacidad de Generación de energía

En base a los datos de amplitud y periodo de la ola incidente ($H_s = 1,5$ m y $T_p = 13$ s), se realiza el cálculo de generación eléctrica anual con el cual, se puede estimó la capacidad de generación de energía del proyecto, presentados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5

Capacidad de generación eléctrica estimada

Descripción	Medida
Amplitud de ola	1.5 m
Periodo de ola	13 s
Generación anual del proyecto	1.12 GWh

3.2.2. Capacidad de Generación de energía

En base al costo de generación eléctrica establecido en $\$0.45 / \text{KW}$ [21], se obtiene que.

Figura 3.20

Gráfica de punto de equilibrio

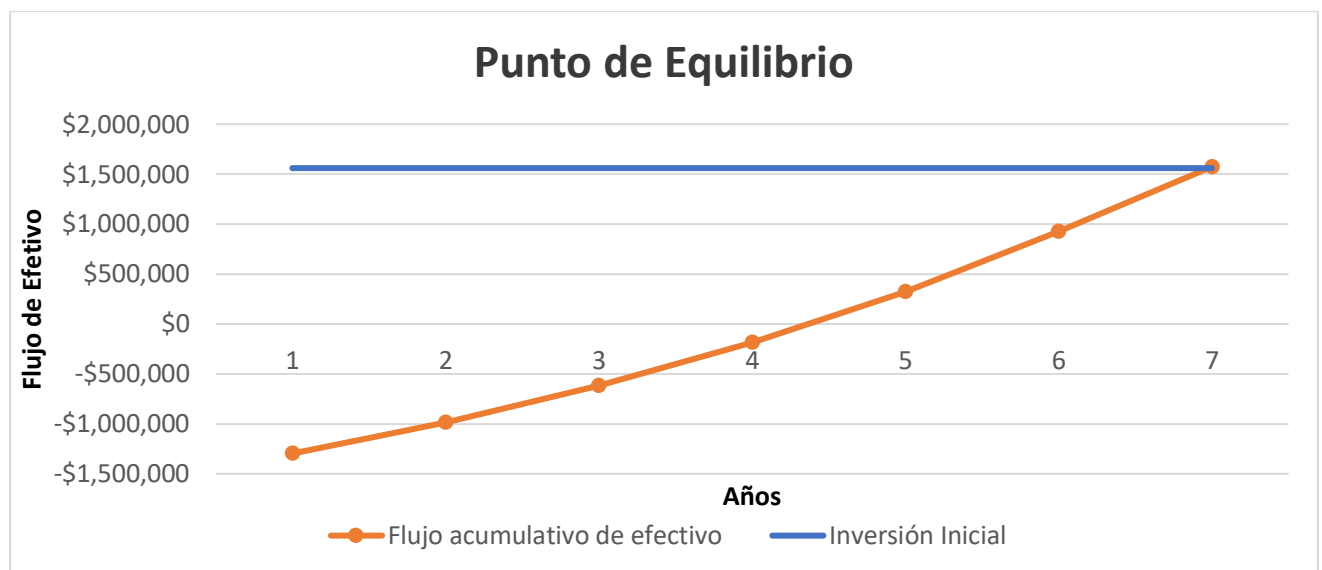
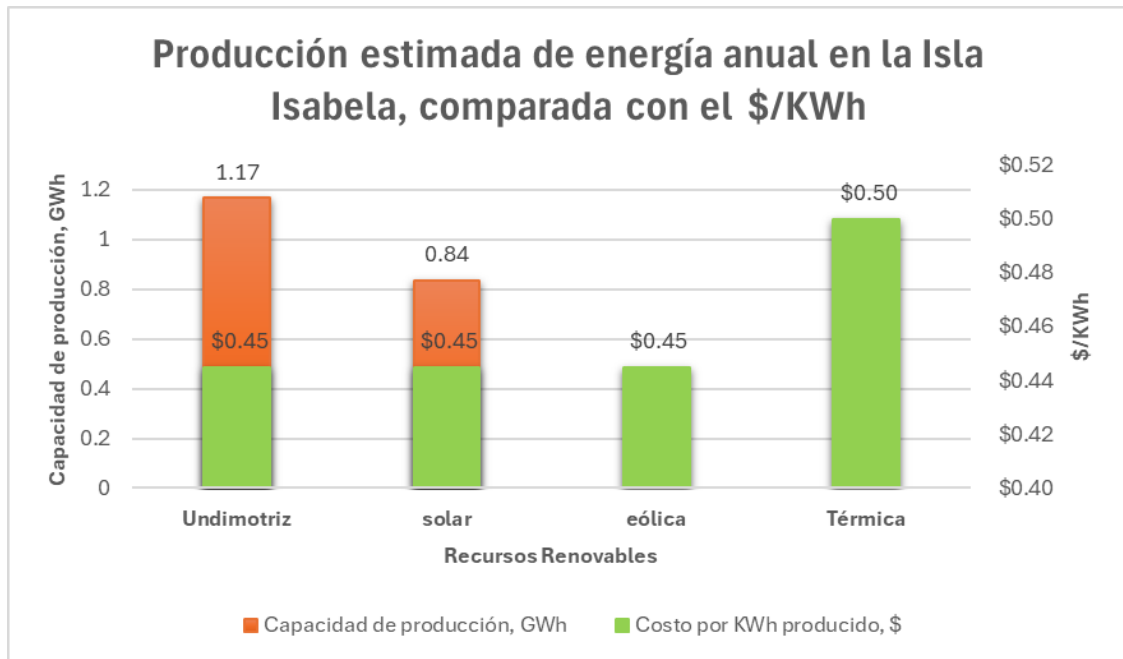


Tabla 3.6

Capacidad y costo estimado de generación de energía por tecnología sostenible en la Isla Isabela



Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La respuesta de olas regulares evaluada en el tanque de hidráulica correspondía el rango escalado (1:100) donde se encuentra la ola dominante en las Galápagos, por lo que, se concluye, que el prototipo pudo alcanzar la resonancia para el oleaje característico escalado del archipiélago, lo que lo hace apto para la implementación y adaptable a distintos cambios de oleaje, sin disminuir su rendimiento.
- A partir de las pruebas experimentales realizadas con el prototipo WEC tipo barcaza a escala 1:100 y el dispositivo de sintonización pasiva, se concluye que el dispositivo sumergido es capaz de tunear la inercia del prototipo WEC, y, por ende, aprovechar la capacidad de resonancia para una mayor extracción de energía. La frecuencia natural del prototipo presenta un comportamiento directamente proporcional al aumento del GMT, lo que puede ser aprovechado por el dispositivo sintonizador para adaptarse a cambios de oleaje o condiciones adversas.
- Se ha constatado que, al utilizar el sintonizador, se varia la frecuencia natural del dispositivo, sin necesidad de aumentar la masa estructural, al aumentar el desplazamiento del WEC y variar la masa añadida hidrodinámica.
- El uso de este dispositivo WEC es una alternativa para la producción sostenible de energía, pues, la producción energética anual de 1 solo dispositivo sería de 1.12 GWh, lo que cubriría un 12% de la capacidad de producción de energía en 2022 en la Isla Isabela, de 7.60 GWh, y, con el precio actual de generación de electricidad proveniente de fuentes renovables de \$0.45, se podría competir con los sistemas eólicos y solar basándose en la gran densidad energética versus la reducción de espacio de aplicación.
- La prueba experimental de concepto realizada permitió evaluar la capacidad de absorción de energía de un dispositivo WEC utilizando un sintonizador de inercia

pasivo, esto permite mejorar el modelo de extracción de energía undimotriz convencional para proponer un modelo sofisticado que pueda adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del mar, lo que podría aumentar significativamente su eficiencia y rendimiento en la captura de energía de las olas, procurando alcanzar la etapa comercial.

4.2 Recomendaciones

- Realizar pruebas hidrostáticas en circuitos cerrados y controlados para así, evitar que las lecturas se distorsionen por factores externos referentes a corrientes de aire o carga orgánica.
- Utilizar un mecanismo de excitación que permita aplicar una fuerza en dirección perpendicular al momento de realizar las pruebas de decaimiento logarítmico, así se evitara vectores de fuerza no procedentes y se mejorará la toma de datos.
- Se recomienda realizar pruebas en tanques de mayor dimensión que permitan la propagación de olas en todas las direcciones, para evitar efectos de superficie libre y efectos 3D.
- Se recomienda utilizar sensores inalámbricos para descartar efectos de fuerzas externas en las pruebas producidas por interacción del cable de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EI. (2023) Energy Institute. [Online]. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] Mario Pelissero, Pablo A. Haim, Guillermo Oliveto, Francisco Galia, Roberto Tula. (2011) Aprovechamiento de la Energía Undimotriz. [Online]. <http://humadoc.mdp.edu.ar:8080/bitstream/handle/123456789/642/aprovech%20de%20la%20energia%20und%20%281%29.pdf?sequence=1>
- [3] IEA. (2007) International Energy Agency. [Online]. <https://www.calameo.com/read/0006724196fd7994f6e52>
- [4] Daniel Montoya. (2010) Universidad de Sevilla. [Online]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70175>
- [5] Markel Penalba, John V. Ringwood, "A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute, MDPI*, vol. 9, no. 7, June 2016.
- [6] David Morillo, Belvinel Epeni, Wilson Quijije, Valentin Montes, Stalin Velez, María Rodríguez, "Reflections on the Implementation of Tidal Energy in Ecuador," *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 31-40, December 2017.
- [7] Lucas de Oliveira, Ivan Silva, Nágila Lucietti, Geraldo Tiago, Ramiro Ramirez, Regina Barros, "Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil," *Renewable Energy*, vol. 178, pp. 1279-1290, Noviembre 2021.
- [8] TETHYS. Wave Dragon Pre-Commercial Demonstration Project. [Online]. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/wave-dragon-pre-commercial-demonstration-project>

- [9] EMEC. (2013) Pelamis Wave Power. [Online]. <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
- [10] Tundre Aderinto, Hua Li, "Ocean Wave Energy Converters: Status and Challenges," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute, MDPI*, vol. 11, no. 5, Abril 2018.
- [11] IRENA. (2020) International Renewable Energy Agency. [Online]. <https://www.irena.org/Publications/2020/Dec/Fostering-a-blue-economy-Offshore-renewable-energy#:~:text=Offshore%20renewables%20could%20provide%20clean,character%20solar%20PV%20and%20wind.>
- [12] AleaSoft Energy Forecasting. (2023) La caída del LCOE de las energías renovables en la última década impulsa la transición energética. [Online]. <https://aleasoft.com/es/caida-lcoe-energias-renovables-ultima-decada-impulsa-transicion-energetica/>
- [13] Camilo Figueredo, Fidel Quevedo. (2022) Evaluación de la energía undimotriz como una alternativa sustentable para alimentación de un sistema de levantamiento artificial en una plataforma sumergible. [Online]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8859/1/5162541-2022-1-IP.pdf>
- [14] Arthur Pecher, Jens Peter Kofed, *Handbook of Ocean Wave Energy*, 7th ed., Manhar I. Xiros, Ed. Switzerland: Springer Open, 2017.
- [15] K. Sigiura, R. Sawada, Y. Nemoto, R. Haraguchi, T. Asai, "Wave flume testing of an oscillating-body wave energy converter with a tuned inerter," *Applied Ocean Research*, 2020.
- [16] Q. Cai, S. Zhu, "Applying double-mass pendulum oscillator with tunable ultra-low," *Applied Energy Volume 298*, 15 September 2021, 117228, 2021.

- [17] NASA. (2023) National Aeronautics and Space Administration. [Online]. [https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/#:~:text=Technology%20Readiness%20Levels%20\(TRL\)%20are,based%20on%20the%20projects%20progress.](https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/#:~:text=Technology%20Readiness%20Levels%20(TRL)%20are,based%20on%20the%20projects%20progress.)
- [18] REPSOL. (2024) REPSOL. [Online]. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-undimotriz/index.cshtml#:~:text=No%20genera%20emisiones%20de%20Gases,necesita%20ning%C3%BAAn%20tipo%20de%20combusti%C3%B3n.>
- [19] INOCAR, "Estudio de la energía de las olas, corrientes, y energía cinética de los ríos en el Ecuador para la generación eléctrica," Instituto Ocenográfico de la Armada, Guayaquil, 2011.
- [20] Paul Zambrano. (2022) Escuela Superior Politécnica del Litoral. [Online]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56963>
- [21] Jordany Segovia. (2023) Escuela Politécnica Nacional. [Online]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25070/1/CD%2013570.pdf>
- [22] BID. (2023) Ministerio de Energía y Minas. [Online]. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/BID-GALAPAGOS-PUBLICACION-v7-fotos-comprimido.pdf>
- [23] CIER. (2019) Centro de Información de Energía Renovable. [Online]. <https://ciergalapagos.wordpress.com/renovables/energia-fotovoltaica/>
- [24] Rolando Calero, David Viteri. (2013) Universidad Estatal Península de Santa Elena, UPSE. [Online]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7213/1/UPSE-RCT-2013-Vol.1-No.2-010.pdf>

- [25] Jairo Hernández, Luis Tovar. (2015) Plan de negocios: Estudio de factibilidad de generación de energía undimotriz para abastecer de energía eléctrica a la parroquia Jambelí, cantón Santa Rosa, provincia del Oro. [Online]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/30924/1/D-P12560.pdf>
- [26] IADO. (2011) Instituto Argentino de Oceanografía. [Online]. <https://iado.conicet.gov.ar/images/stories/archivos/geologiamarina/TransSedCapitulo4.pdf>
- [27] Pablo Fraile, Mónica Aguilar. (2006) La influencia de la presión atmosférica y el viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza (Cádiz). [Online]. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/30482/La%20influencia%20de%20la%20presi%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20y%20el%20viento%20en%20la%20variabilidad%20del%20nivel%20del%20mar%20en%20el%20mare%C3%B3grafo%20de%20Bonanza.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=>
- [28] Juan José Muñoz Perez. (2011) Introducción a la ingeniería de costas. [Online]. <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/20998/ondas%20texto%20final%20revisado.pdf>
- [29] Yong Li, Mian Lin, "Regular and irregular wave impacts on floating body," *Ocean Engineering*, vol. 42, pp. 93-101, March 2012.
- [30] Benito Ribadeneira, Sebastian Benalcázar, Wilson Guachamin-Acero, "Feasibility study of flopper stoppers as a passive roll compensation system for offshore construction vessels," *Ocean Energy*, vol. 264, November 2022.
- [31] A. Blanco, Edgar Antúnez, J. Colin, Wilberth Alcocer, "Diseño de un robot paralelo para el anaveaje," *ResearchGate*, September 2018.

- [32] Javier Gonzales Cubero. (2011) Universidad de Sevilla. [Online].
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4991>
- [33] Alpaslan Aydingakko, Mohamed Al Mukhaini, Salim Al-Jassasi. (2016) ResearchGate. [Online].
https://www.researchgate.net/publication/309041849_Renewable_Energy_Potential_in_Middle_East_and_Particularly_Oman_case
- [34] CMEMS. (2021) Copernicus Marine Service Information. [Online].
https://data.marine.copernicus.eu/viewer/expert?view=layers&dataset=GLOBAL_MU_LTIYEAR_WAV_001_032
- [35] PMEL. (2007) NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL). [Online].
<https://www.pmel.noaa.gov/eoi/staff/chadwick/galapagos.html>
- [36] Daniel Escobar-Camacho, Paulina Rosero, Mauricio Castrejón, Carlos F. Mena, Francisco Cuesta. (2021) Regional Environmental Change. [Online].
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-021-01768-0>
- [37] Marine Traffic. (2024) Marine Traffic. [Online].
<https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-90.3/centery:0.2/zoom:8>
- [38] Steve van Adrichem, Bart Guinee, Yannick Steenman, Joost Verbart, Jelle Zijlstra, "Floating photovoltaics for the Galápagos Islands," Multidisciplinary Project SEAS, 2019.
- [39] Movella. (2023) MTi-300 Data Sheet. [Online].
<https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Leaflets/MTi-300.pdf>
- [40] XSENS. (2020) MT Manager User Manual. [Online].
https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/usermanual/MT_Manager_user_manual.pdf

- [41] Wilson Guachamin-Acero, Ricardo Alvarez, Jordany Segovia, Marcelo Salguero, Jorge Bravo, Rubén Paredes, Mijail Arias-Hidalgo, Rafael Soria, Jesús Portilla-Yandún. (2023) A numerical feasibility study of a novel resonant wave energy converter concept based on the roll response. [Online].
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4508774
- [42] FIMCM. Laboratorio Experimental II. [Online].
<https://www.fimcm.espol.edu.ec/acuicultura/laboratorios>
- [43] FIMCP. Laboratorio de Hidráulica. [Online].
<https://www.fimcm.espol.edu.ec/es/oceanografia/laboratorios>
- [44] gunt HAMBURG. (2023) HM 162, Canal de ensayo 309x405mm. [Online].
<https://www.gunt.de/es/productos/canal-de-ensayo-309x450mm/070.16200/hm162/glct-1:pa-150:pr-675>
- [45] Antonio Mandelli, *Elementos de Arquitectura Naval*. Buenos Aires, Argentina: ALSINA, 1986.
- [46] José R. Marín L., *Mechanical Vibrations*. Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [47] Rameswar Bhattacharya, *Dynamics of Marine Vehicles.*, 1978.
- [48] Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics For Engineers and Scientists*. USA, 1991.
- [49] José R. Marín Lopez, *Ship Dynamics*. Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [50] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics, 40th Anniversary Edition*. Cambridge, 1997.
- [51] Physlets. (2023) Tracker Video Analysis and Modeling Tool. [Online].
<https://physlets.org/tracker/>
- [52] Cyprien Bosserelle, Sandeep Kaushal Reddy. (2015) Cost Analysis of Wave Energy in the Pacific. [Online].

https://www.researchgate.net/publication/305126646_Cost_Analysis_of_Wave_Energy_in_the_Pacific

- [53] Itxaso Odériz, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva. (2012) Dispositivo WEC: OWC. Síntesis y posible implementación en el clima marino. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/324546838_Dispositivo_WEC_OWC_Sintesis_y_posible_implementacion_en_el_clima_marino_mexicano
- [54] W. Guachamin-Acero, R. Alvarez, J. Segovia, M. Salguero, J. Bravo, R. Paredes, M. Arias-Hidalgo, R. Soria, J. Portilla, "Feasibility study of a method for tuning wave energy converters," 2023.
- [55] OMI. (2008) International Code on Intact Stability. [Online]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/ShipDesignAndStability-default.aspx#IS2008>
- [56] Global Sustainable Electricity Partnership. (2013) Proyecto Eólico Isla San Cristobal-Galápagos 2007-2013. [Online]. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00158.pdf>
- [57] La Hora. (2022) Las energías renovables son un buen negocio económico y ambiental para Galápagos. [Online]. <https://www.lahora.com.ec/pais/energias-renovables-islas-galapagos-apuesta/>

APÉNDICES

APÉNDICE A

4.3 Construcción de prototipos, dispositivos sintonizadores y pesos móviles

Figura A.1

Primeras impresiones de los prototipos



Figura A.2

Impresión 3D de los dispositivos sintonizadores

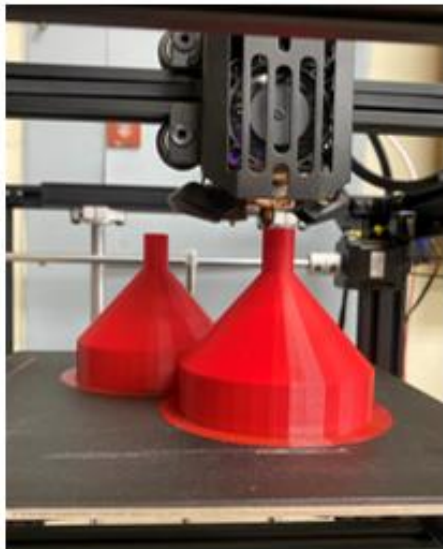


Figura A.3

Confección de los pesos movibles



Figura A.4

Pesos calibrados



APÉNDICE B

4.4 Resultados de la prueba de inclinación

4.4.1 Prueba de inclinación para configuraciones sin lastre

4.4.1.1 Barcaza sola

Figura B.1

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-A

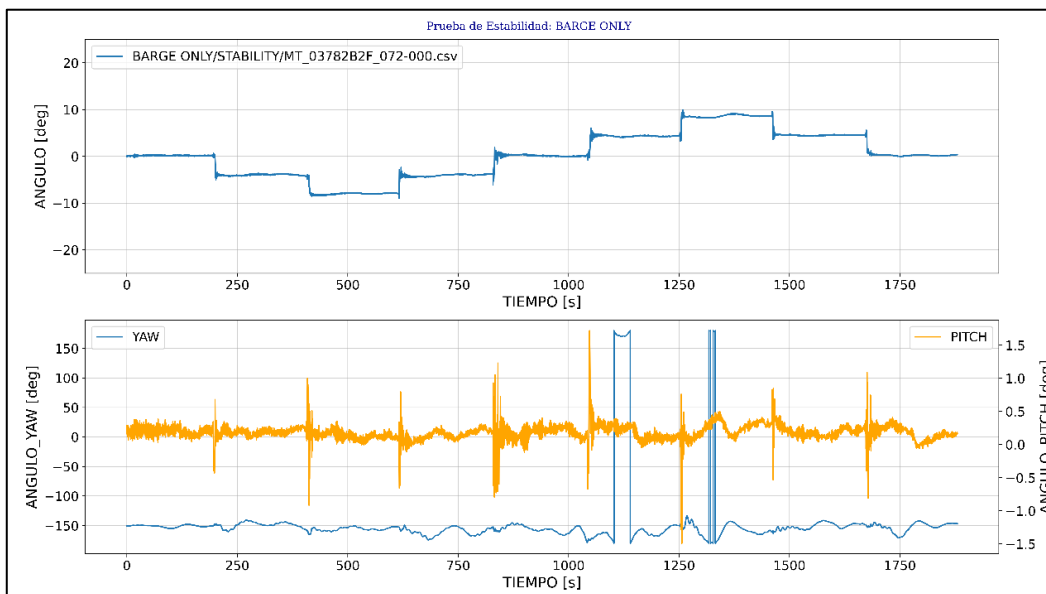
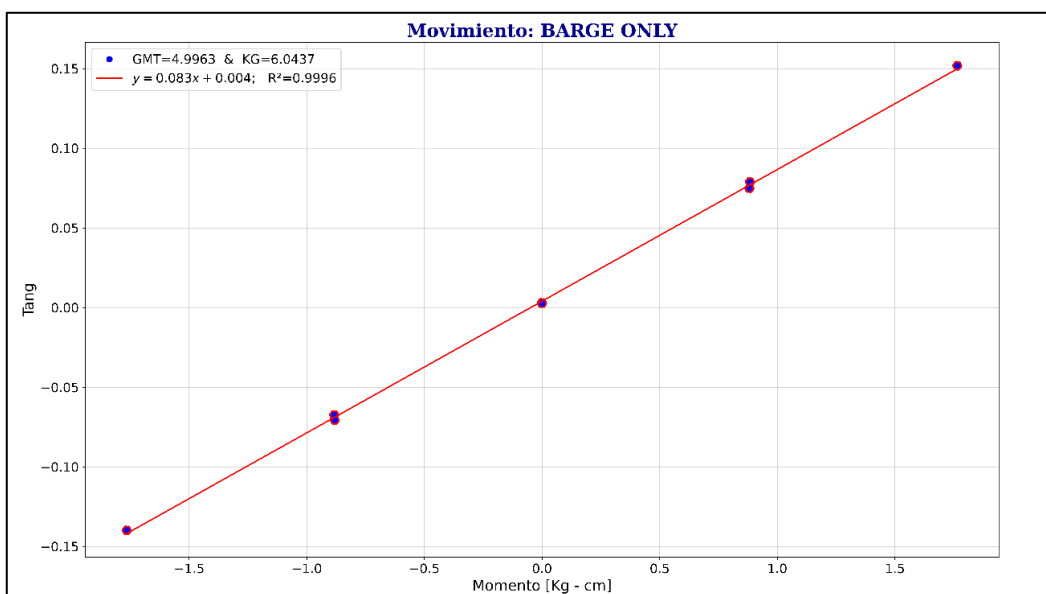


Figura B.2

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-A



4.4.1.2 Barcaza + Estructura

Figura B.3

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-B

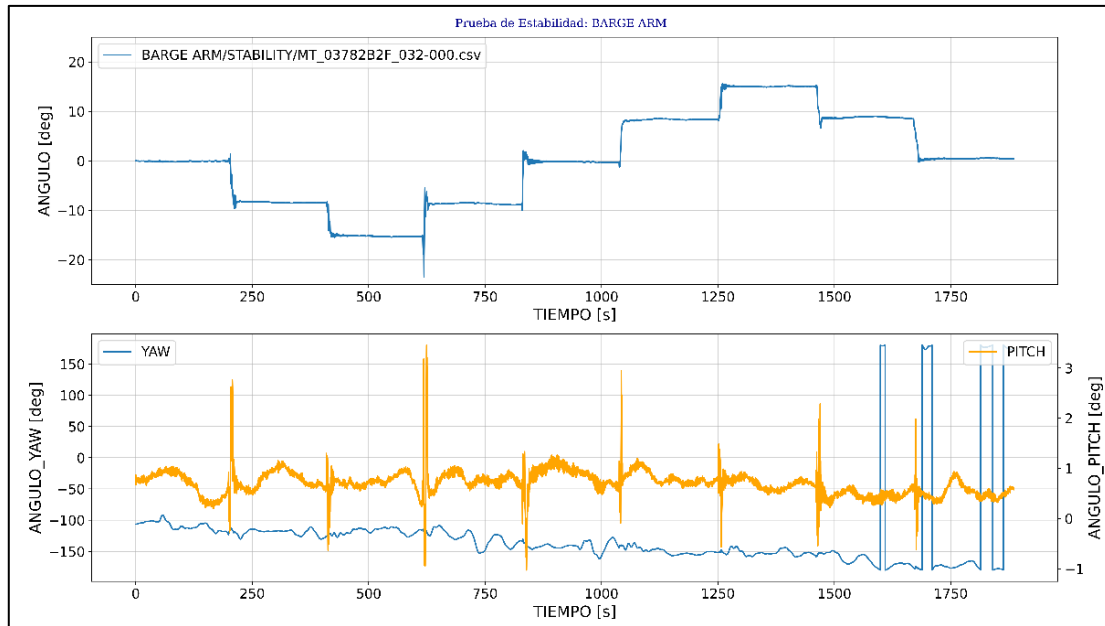
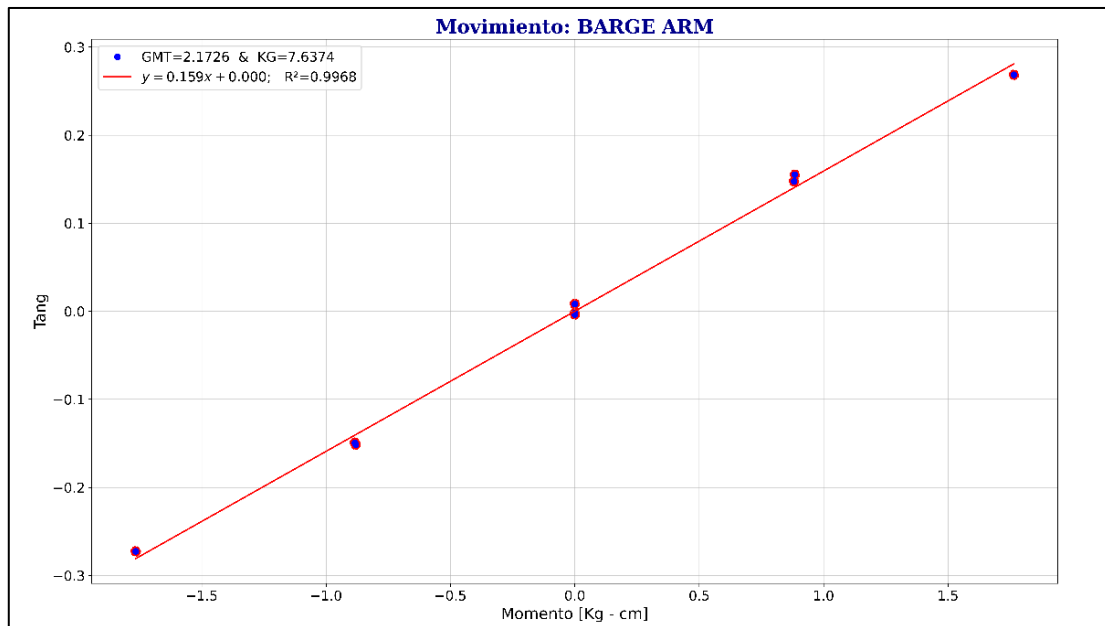


Figura B.4

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-B



4.4.1.3 Barcaza + WEC

Figura B.5

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C

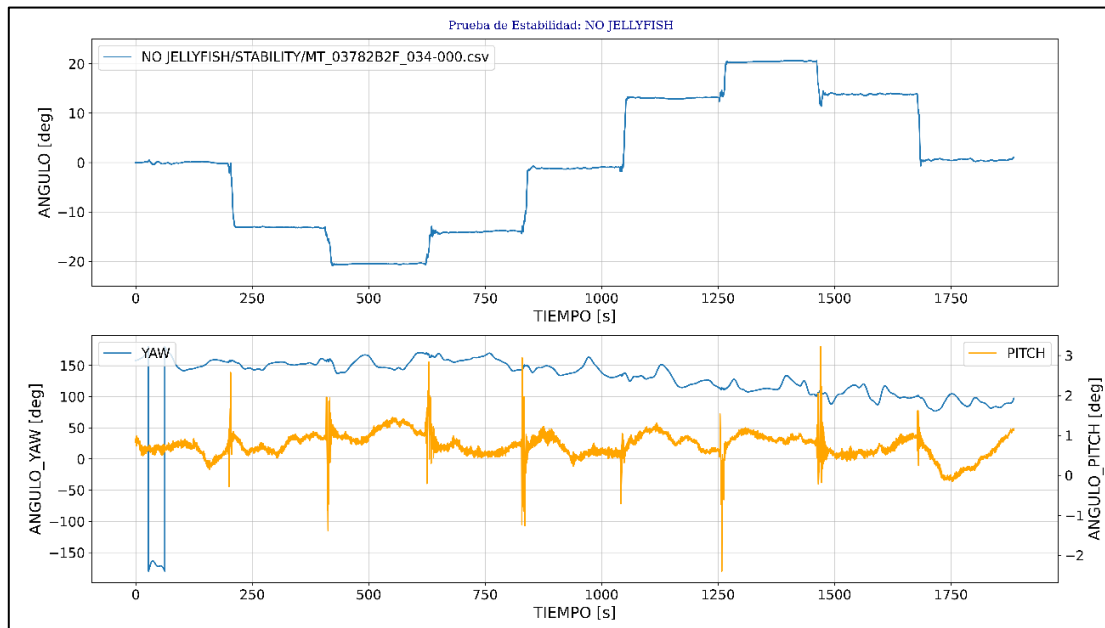
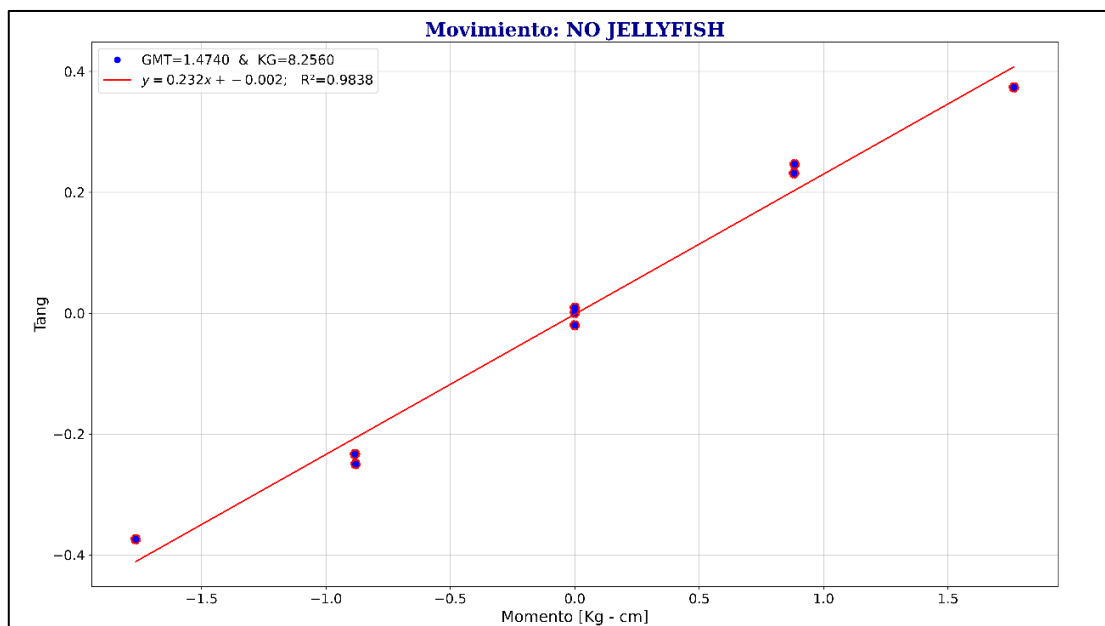


Figura B.6

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C



4.4.1.4 Barcaza + WEC + Medusa

Figura B.7

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-D

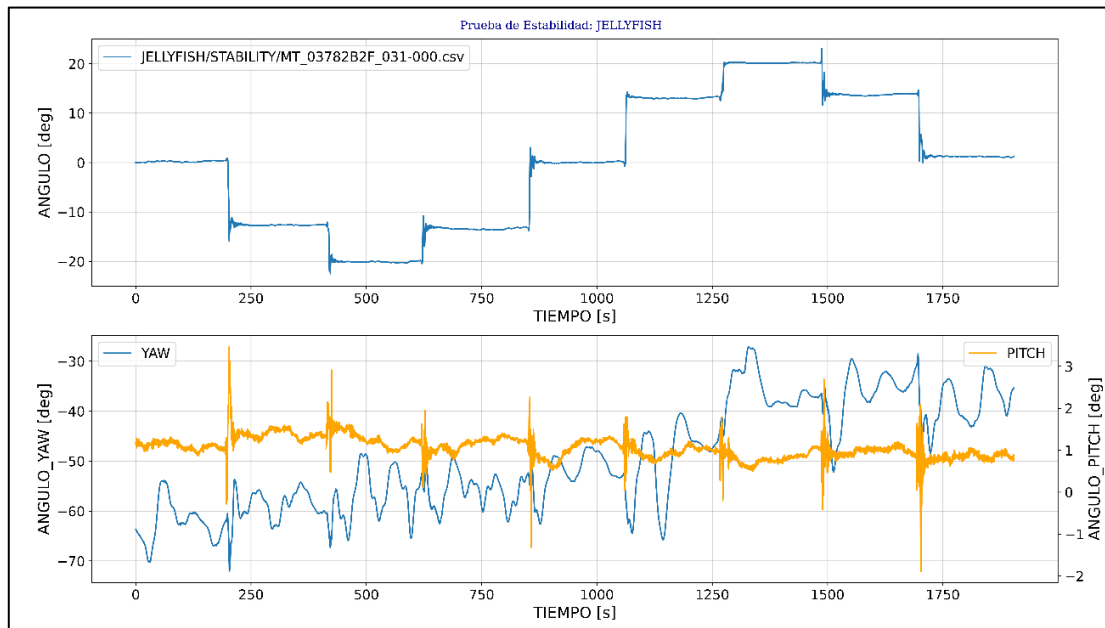
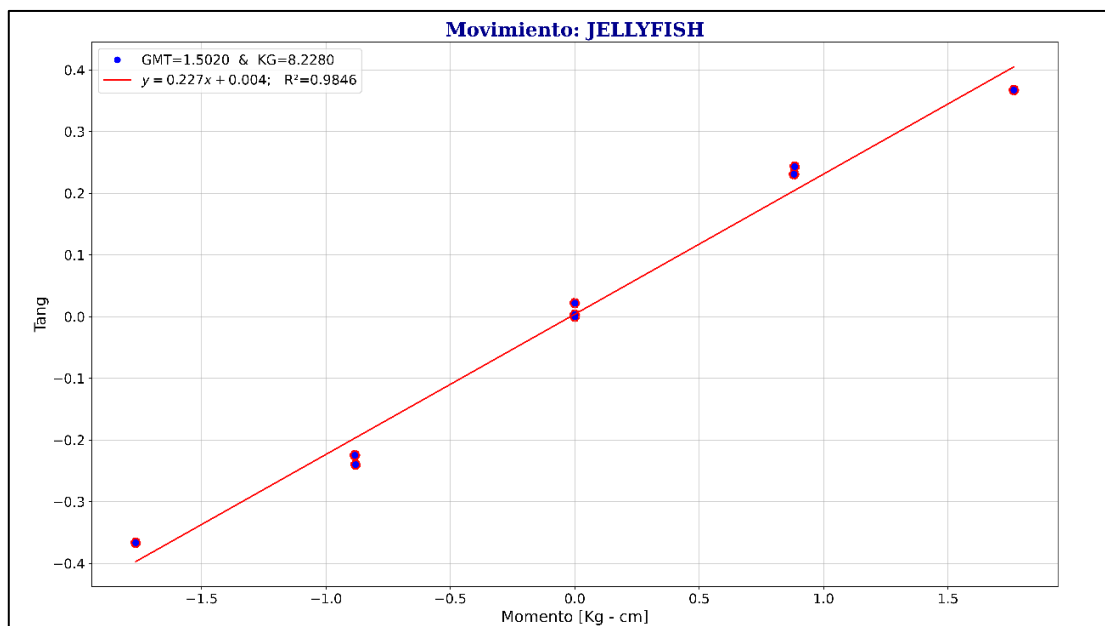


Figura B.8

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-D-L



4.4.2 Prueba de inclinación para configuraciones con lastre

4.4.2.1 Barcaza + Estructura

Figura B.9

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-B-L

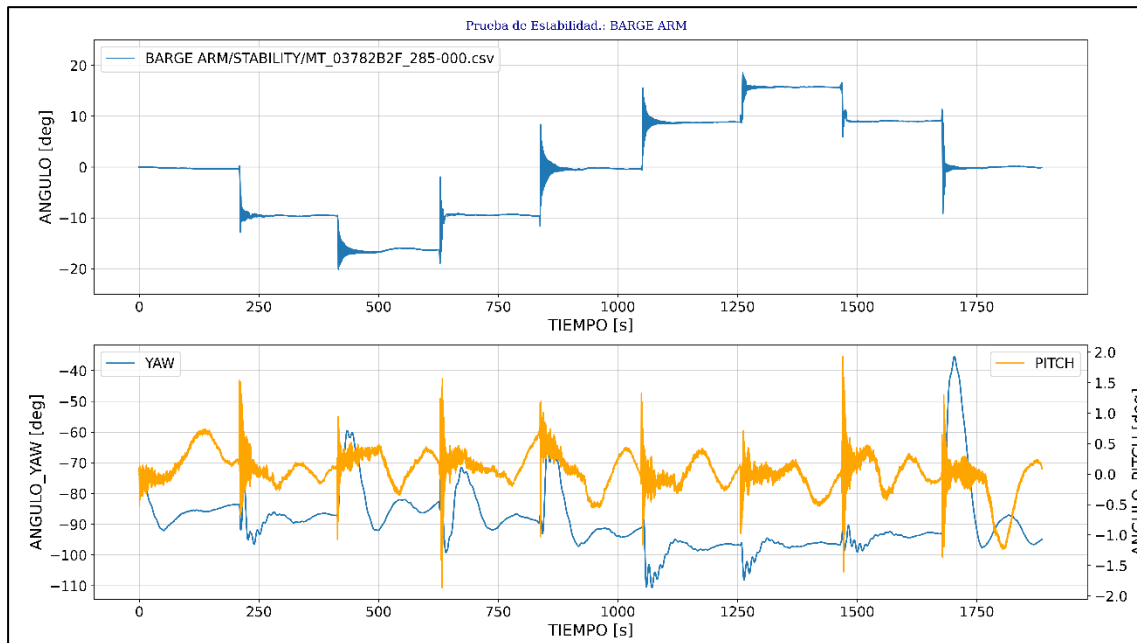
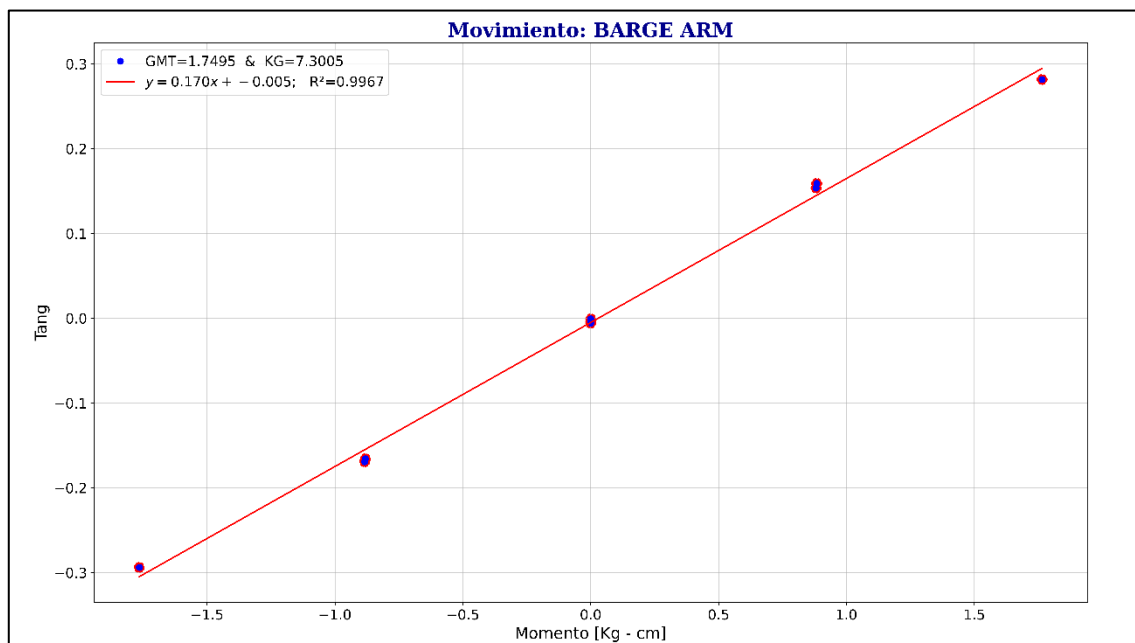


Figura B.10

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-B-L



4.4.2.2 Barcaza + WEC, posicionado a los centros

Figura B.11

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C-L, WEC en los centros

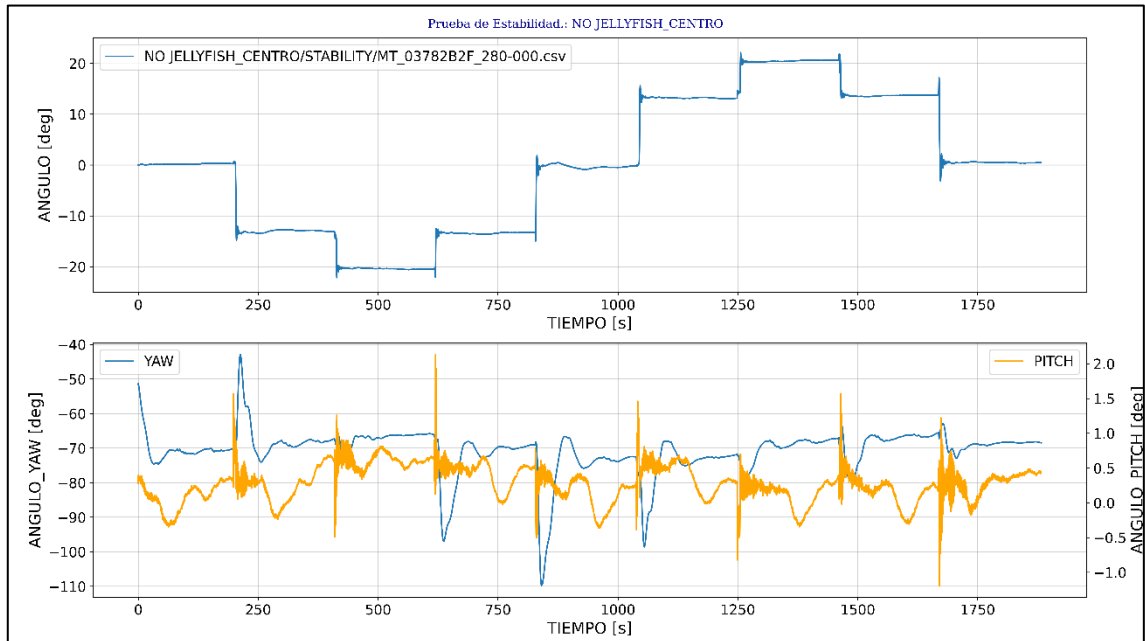
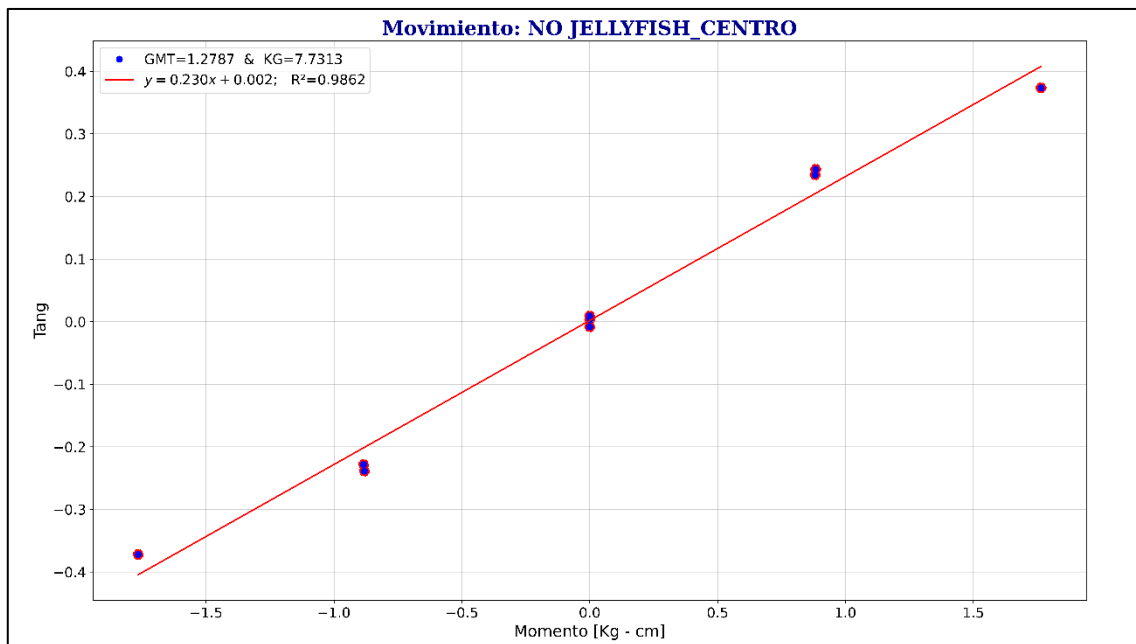


Figura B.12

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C-L



4.4.2.3 Barcaza + WEC, posicionado a los extremos

Figura B.13

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-C-L, WEC en los extremos

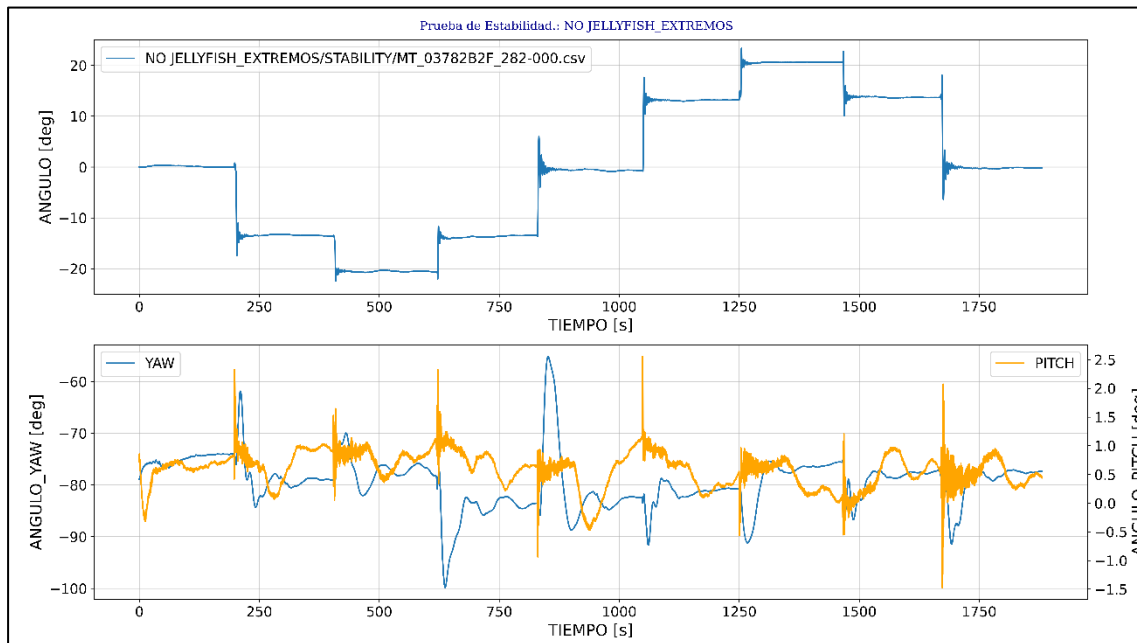
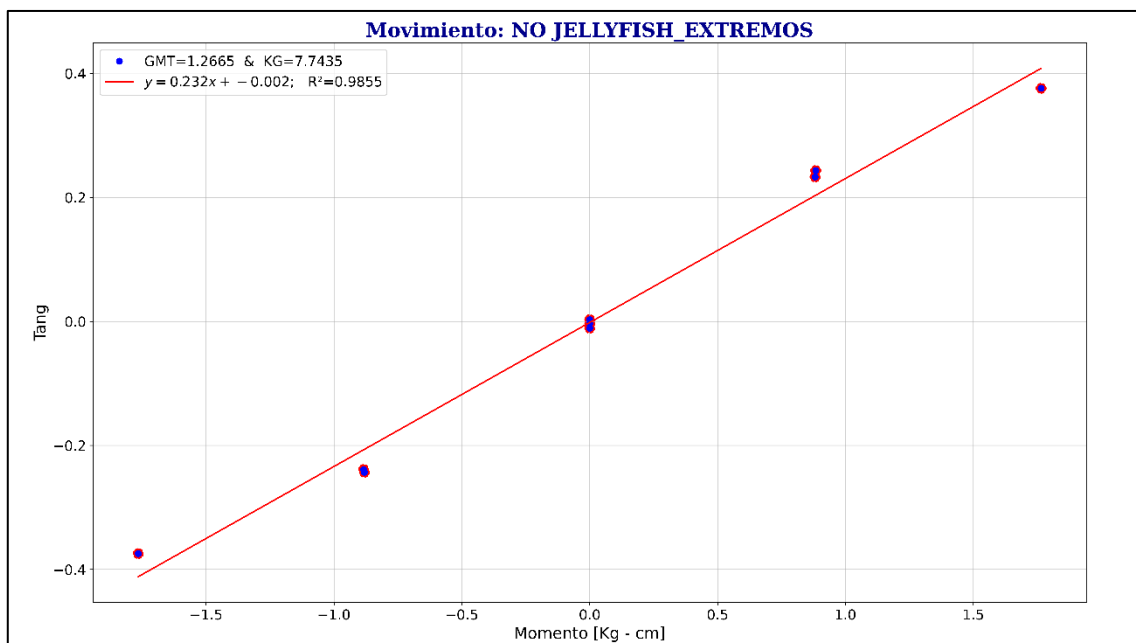


Figura B.14

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-C-L



4.4.2.4 Barcaza + WEC + Medusa, posicionado en los centros

Figura B.15

Gráfica de movimiento de pesos del sistema TE01-D-L, WEC en los centros

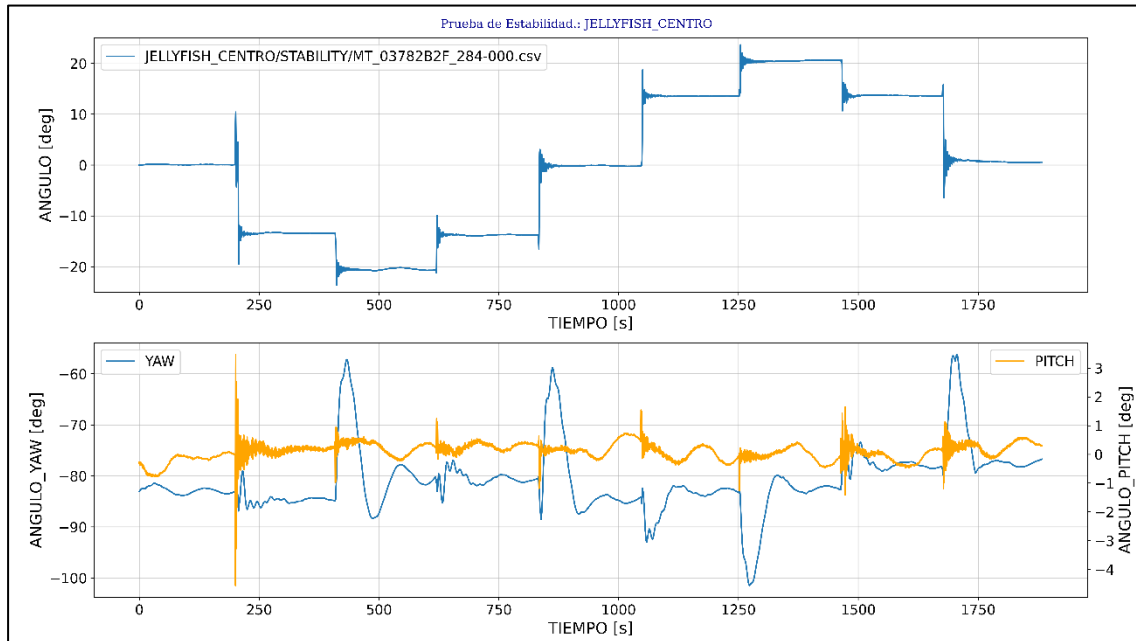
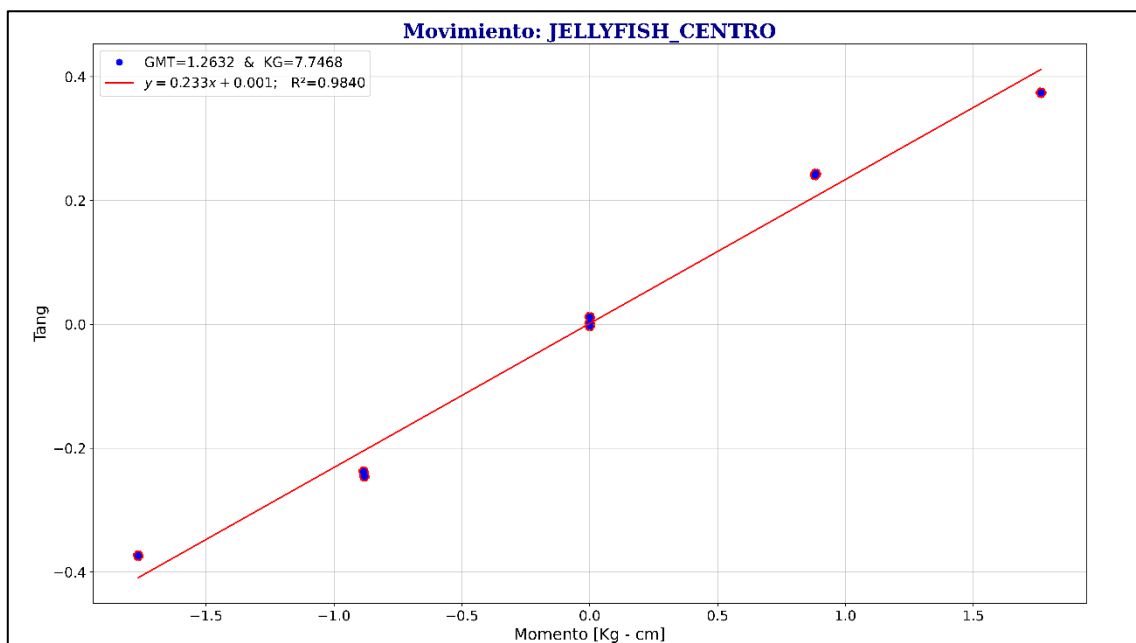


Figura B.16

Gráfica de regresión lineal del sistema TE01-D-L



APÉNDICE C

4.5 Resultados de la prueba de decaimiento logarítmico

4.5.1 Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones sin lastre

4.5.1.1 Barcaza sola

Figura C.1

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-A-L

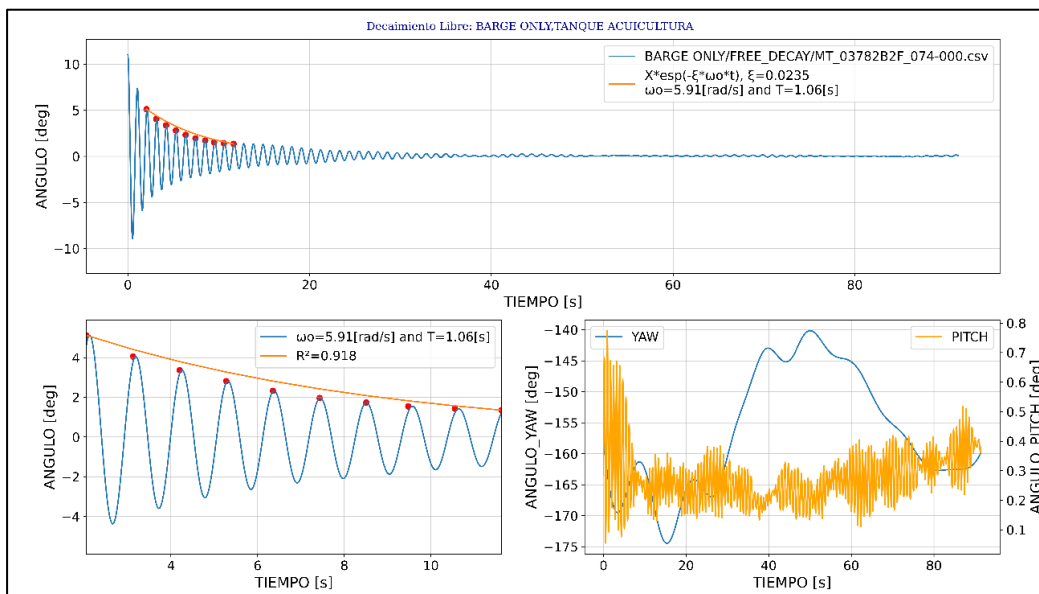
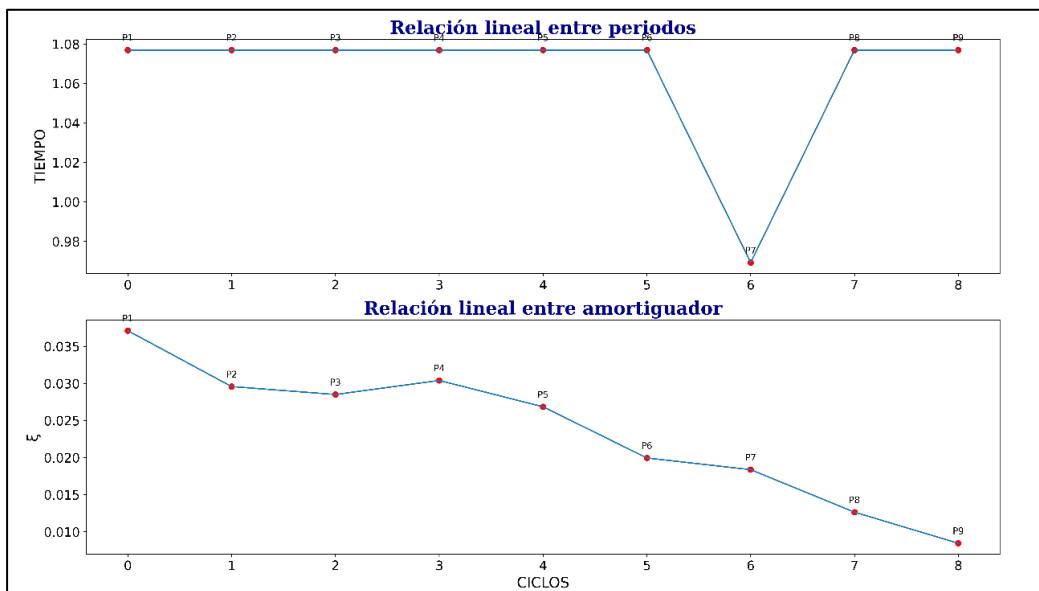


Figura C.2

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-A-L



4.5.1.2 Barcaza + WEC + Medusa

Figura C.3

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-D-L, WEC en los extremos

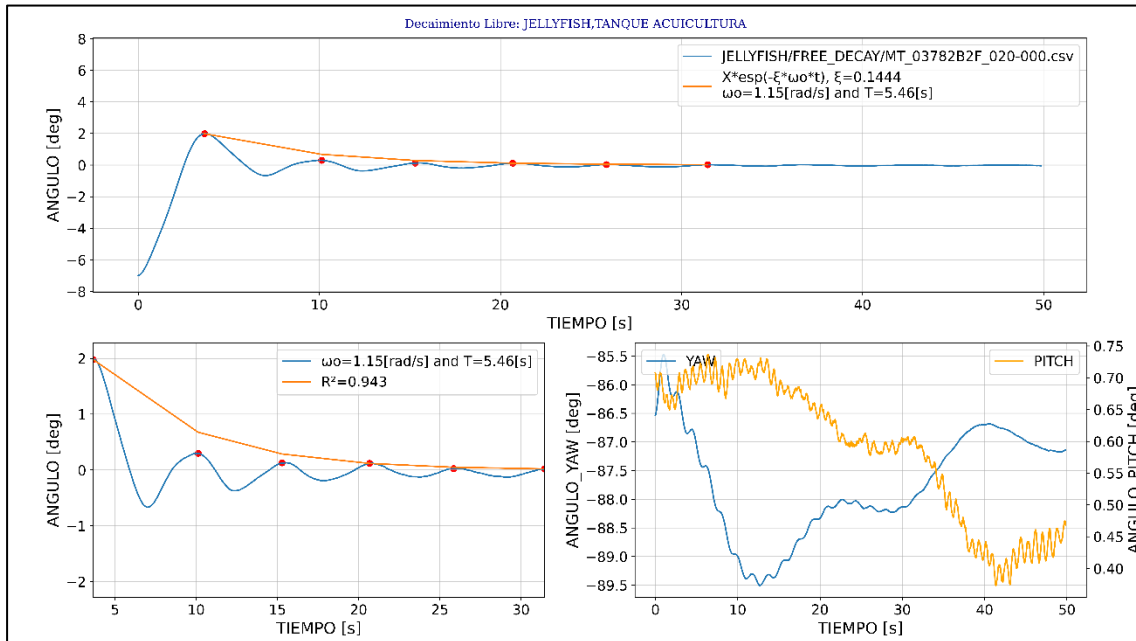
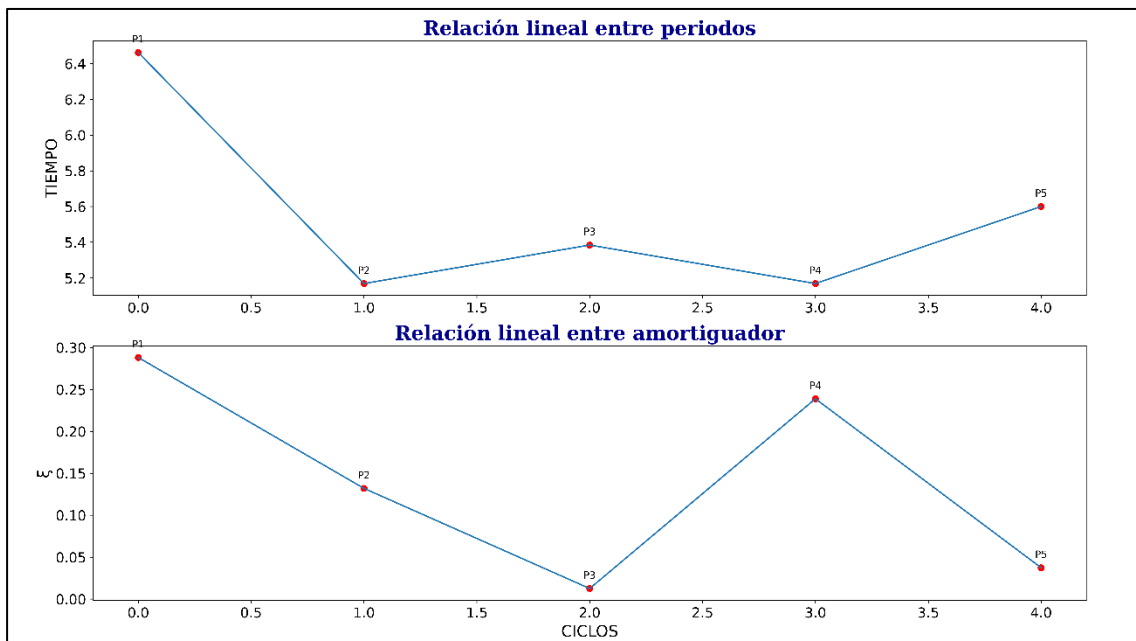


Figura C.4

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L



4.5.1.3 Barcaza + Estructura

Figura C.5

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-B

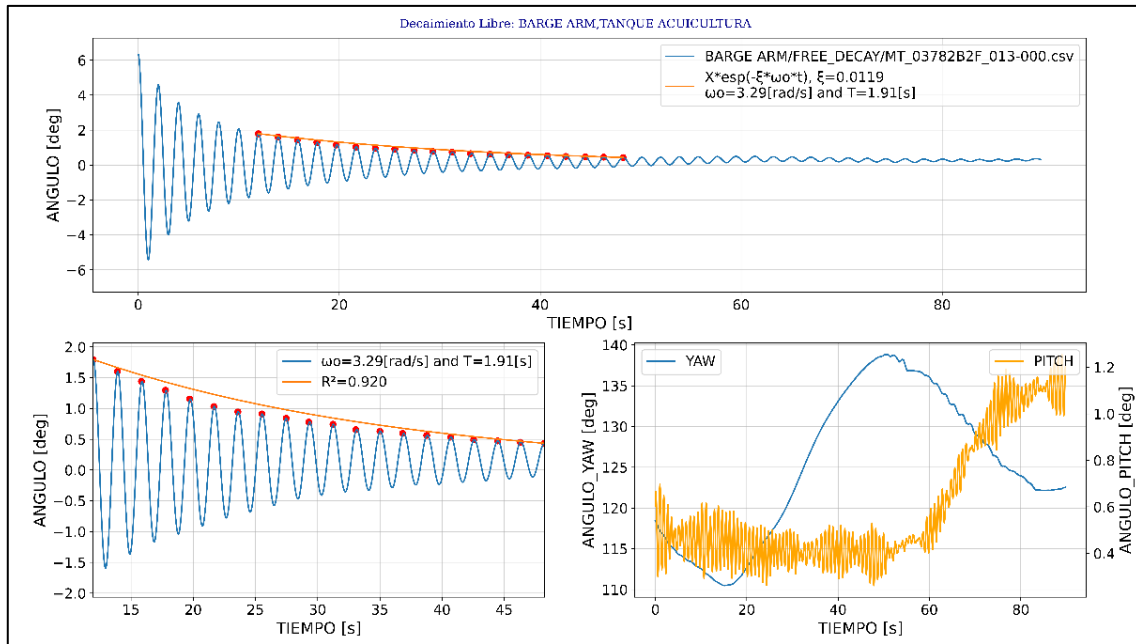
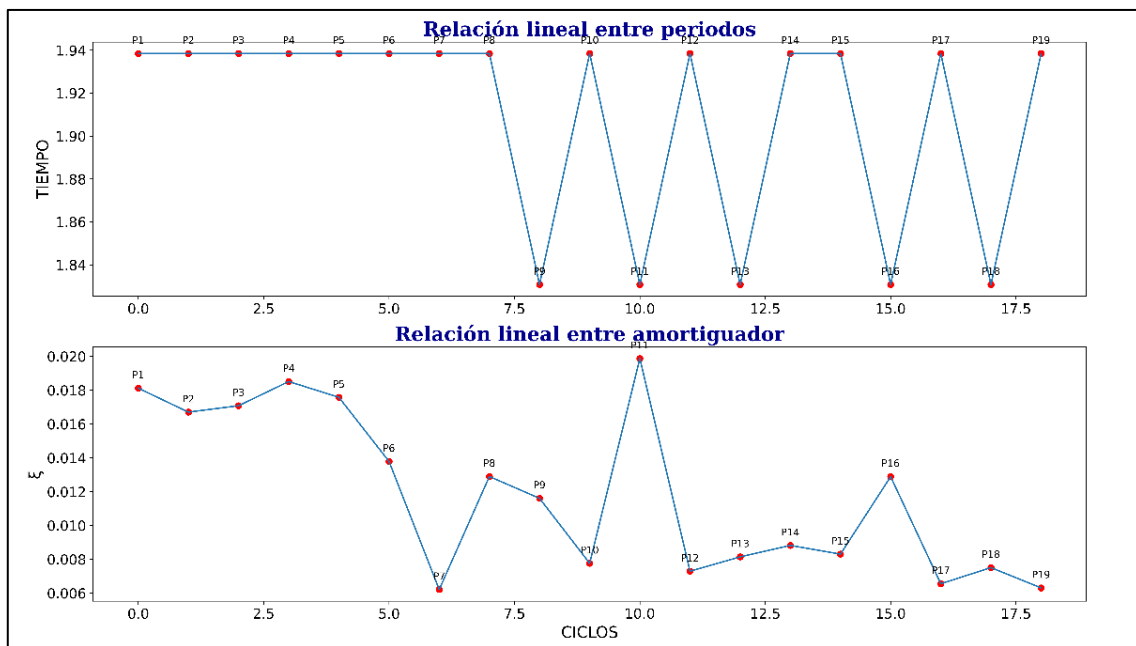


Figura C.6

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-B



4.5.1.4 Barcaza + WEC

Figura C.7

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C

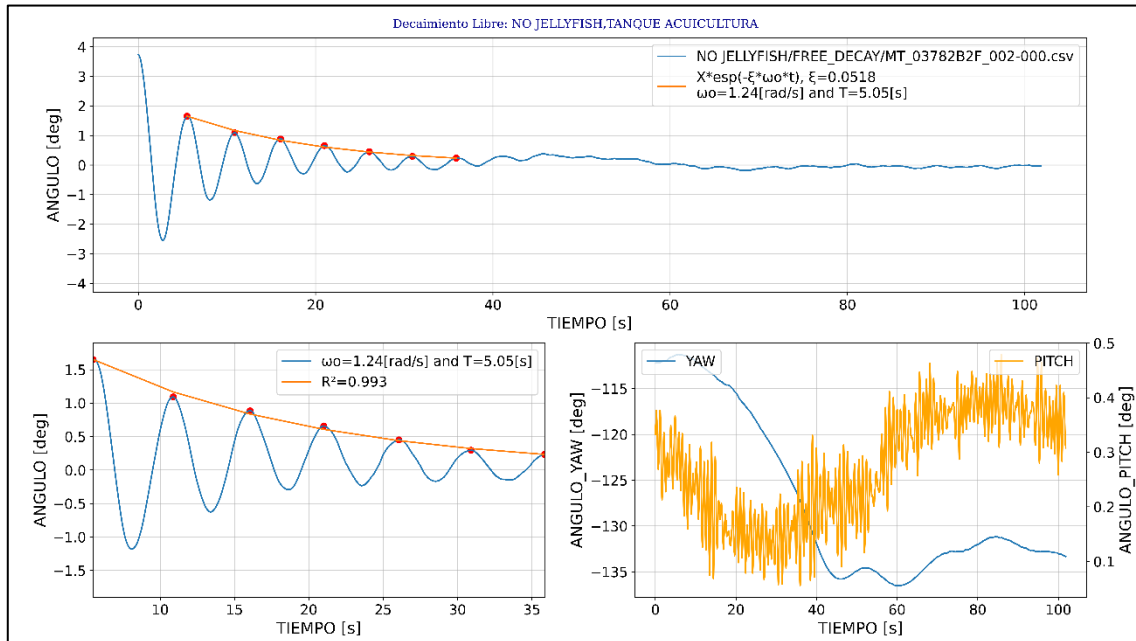
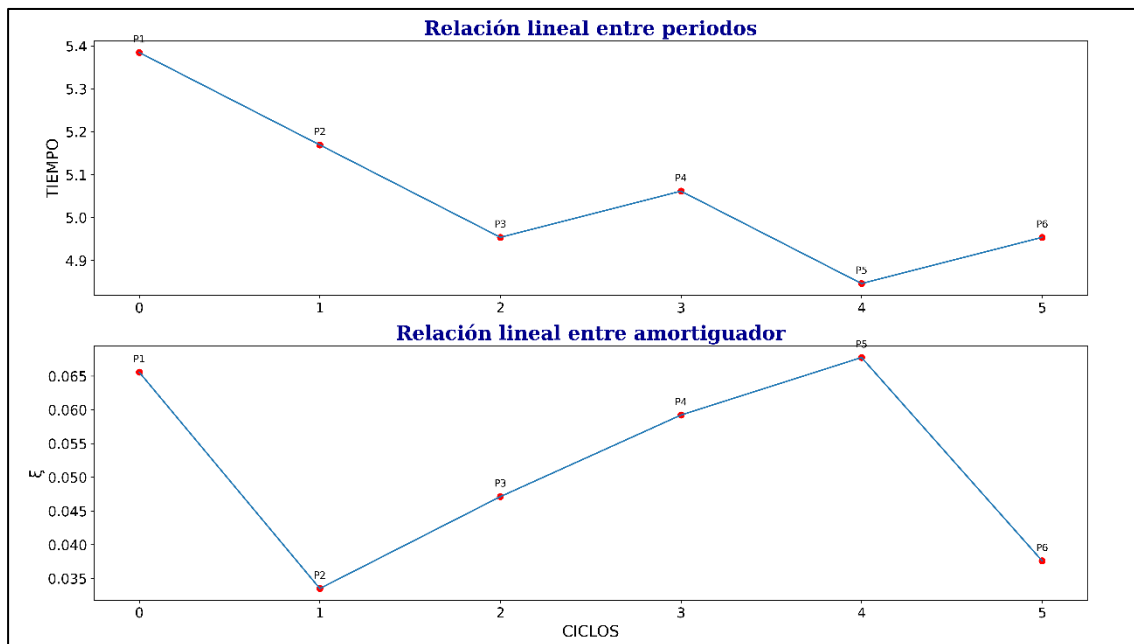


Figura C.8

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C



4.5.2 Prueba de decaimiento logarítmico para configuraciones con lastre

4.5.2.1 Barcaza + Estructura

Figura C.9

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-B-L

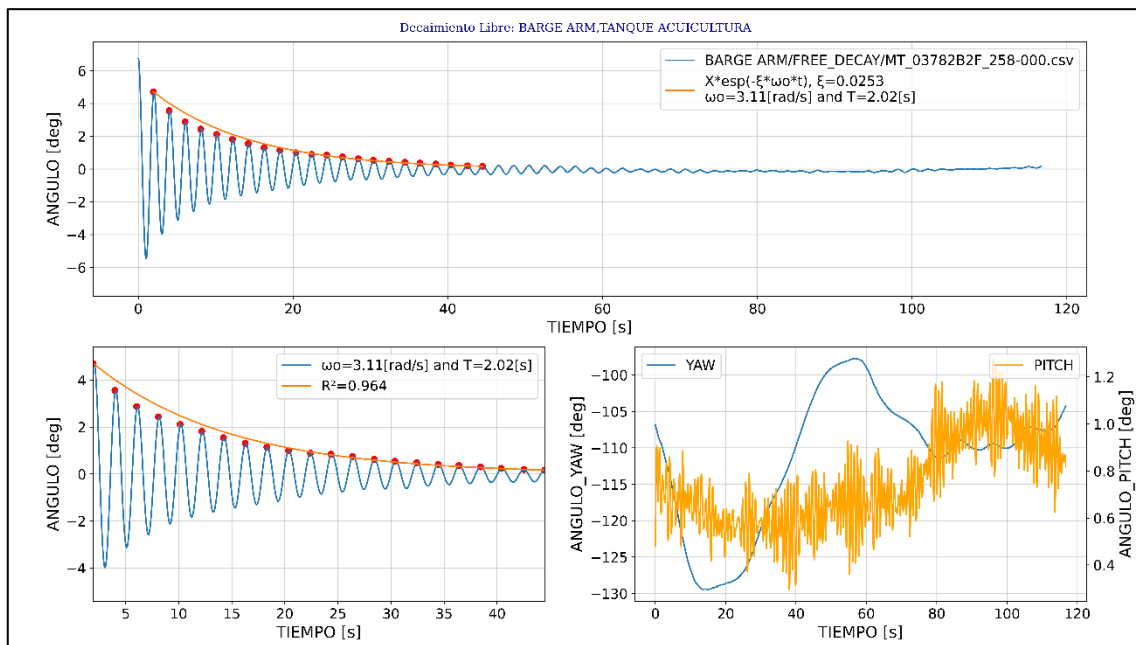
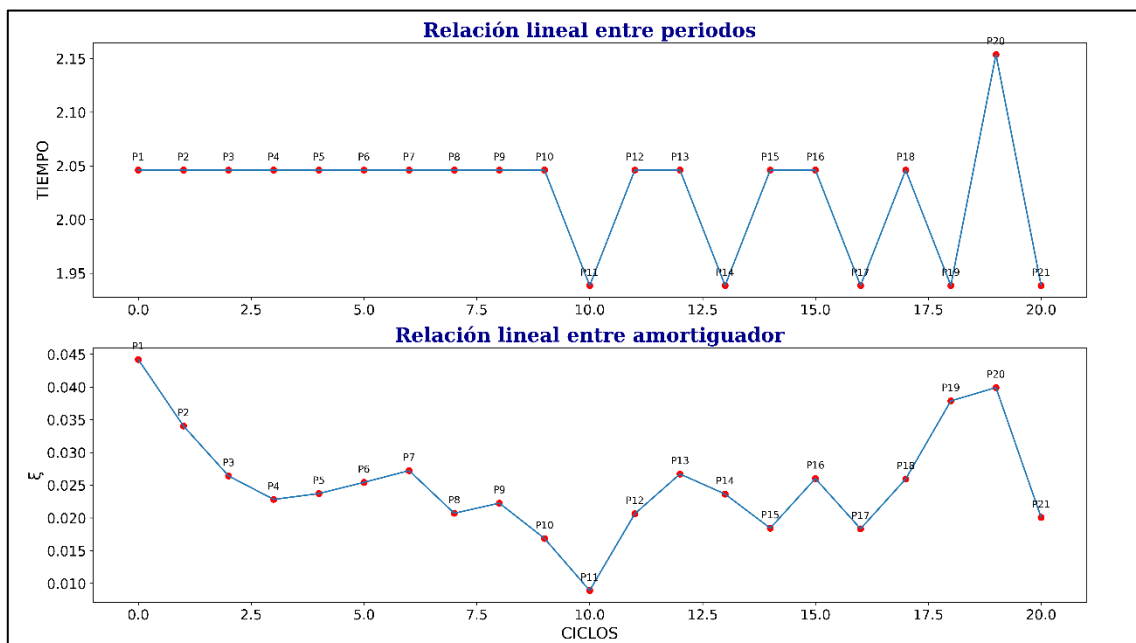


Figura C.10

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-B-L



4.5.2.2 Barcaza + WEC, posicionado en los centros

Figura C.11

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C-L, WEC en los centros

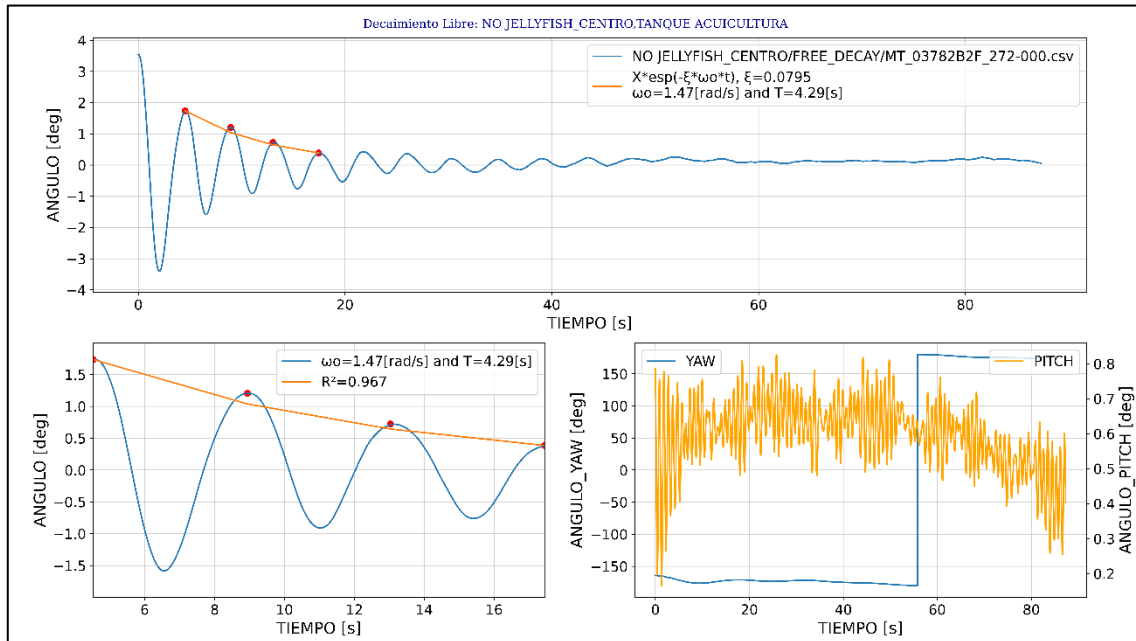
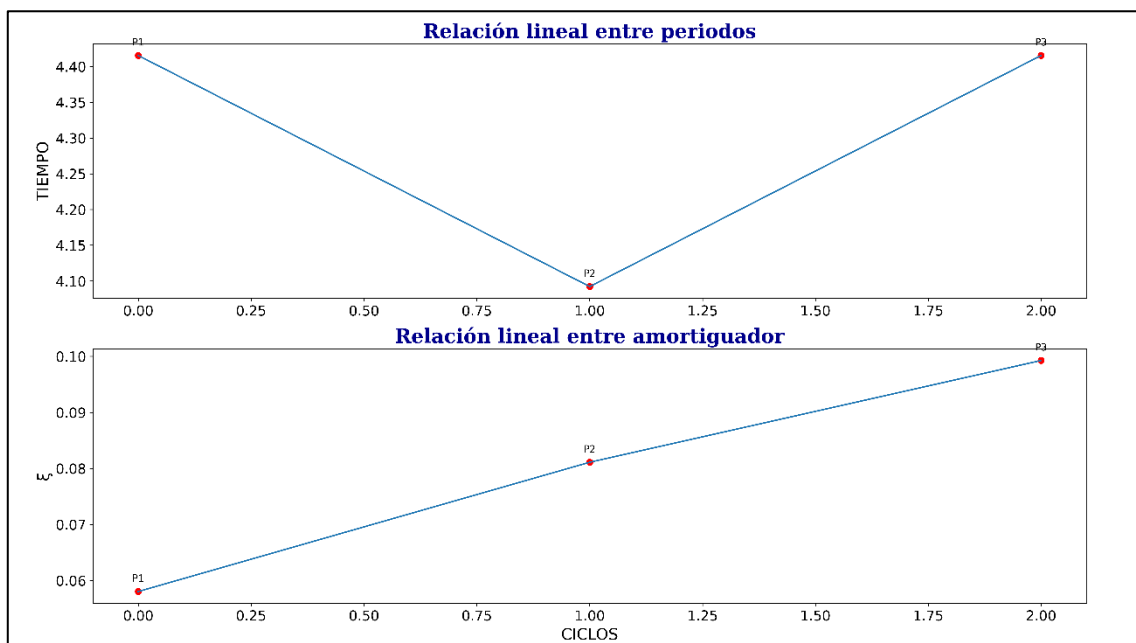


Figura C.12

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C-L



4.5.2.3 Barcaza + WEC, posicionado en los extremos

Figura C.13

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-C-L, WEC en los extremos

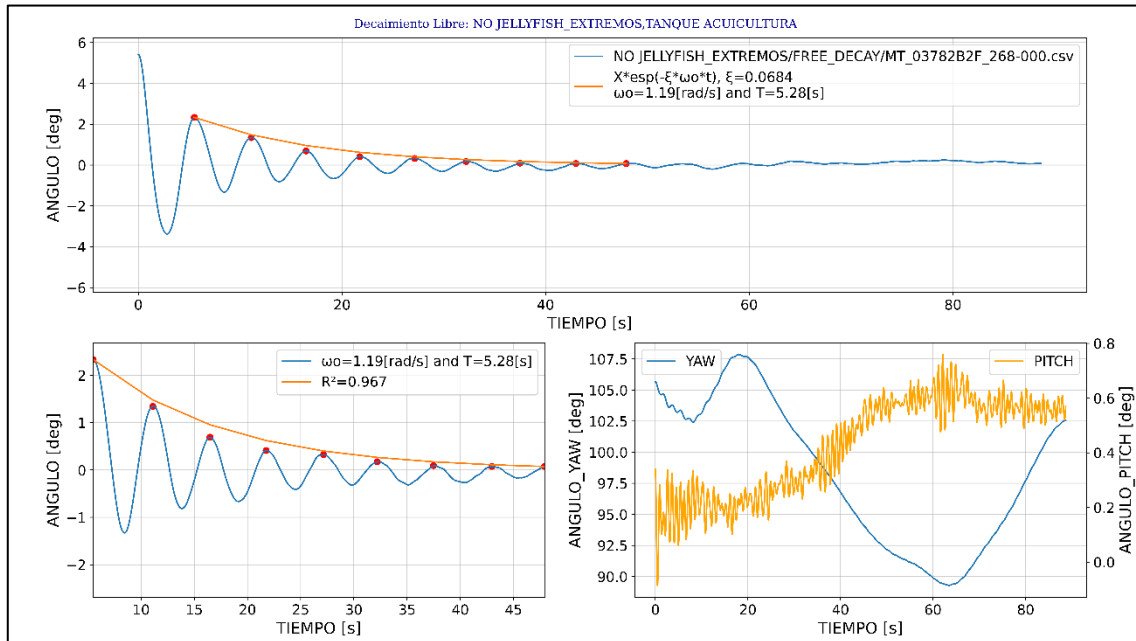
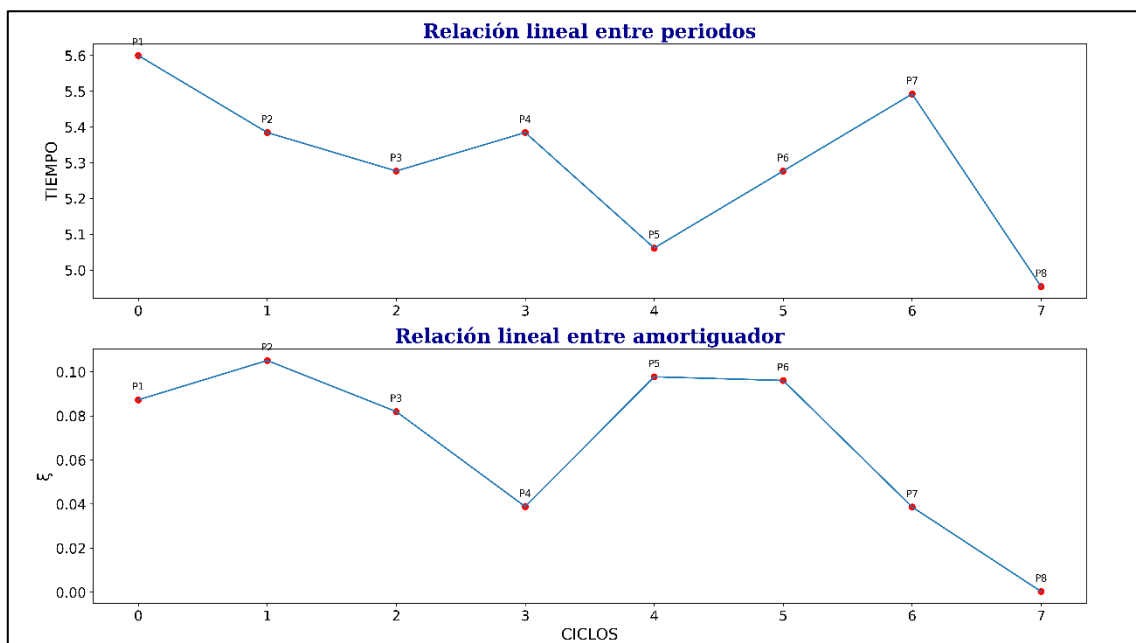


Figura C.14

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-C-L



4.5.2.4 Barcaza + WEC + Medusa, posicionado en los centros

Figura C.15

Gráfica oscilación libre del sistema TE02-D-L, WEC en los centros

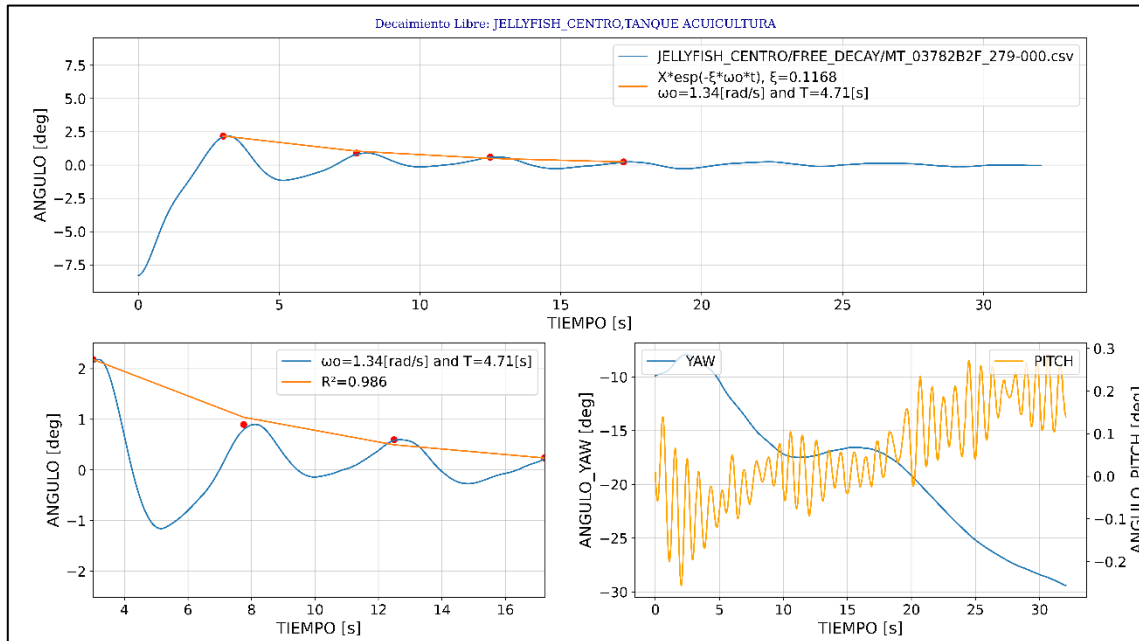
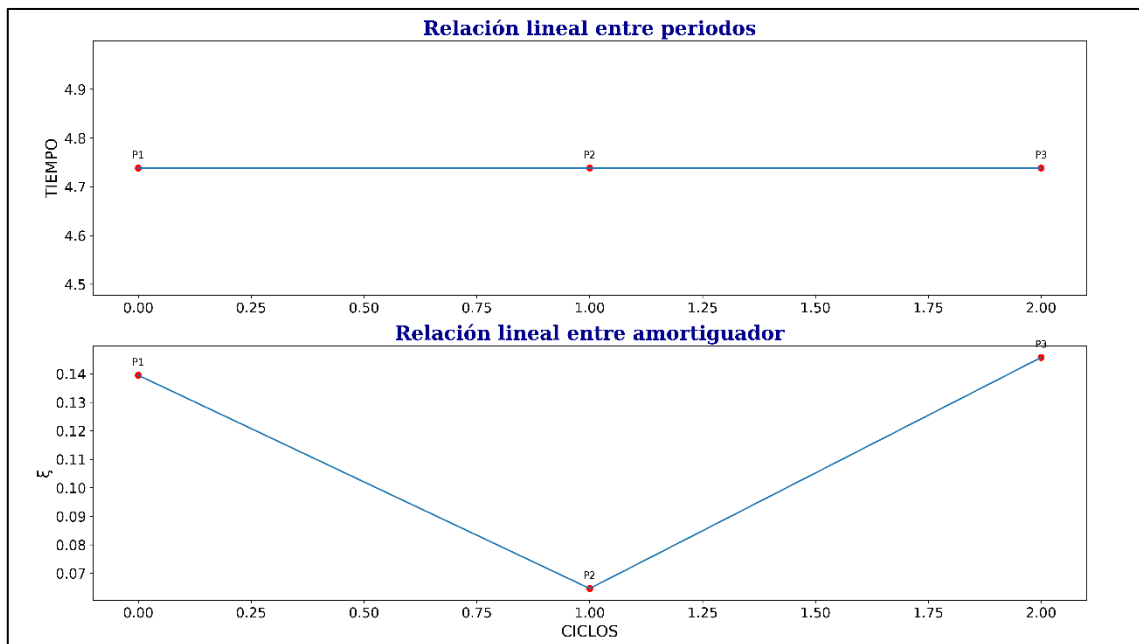


Figura C.16

Gráficas de variación del periodo y coeficiente de amortiguamiento, TE02-D-L



APÉNDICE D

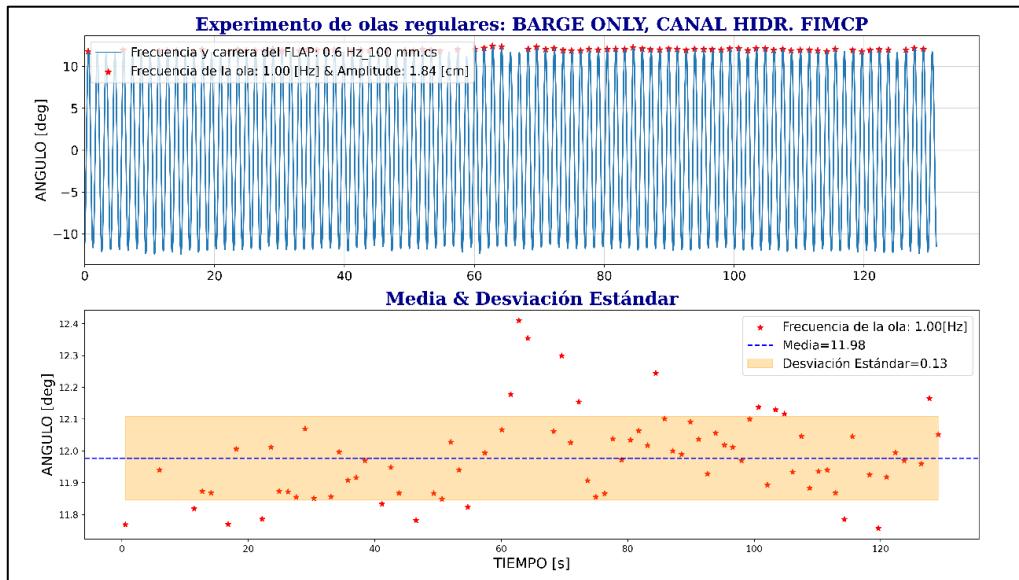
4.6 Resultados para la prueba de olas regulares

4.6.1 Respuesta en olas

4.6.1.1 Barcaza Sola

Figura D.1

Respuesta en olas para el sistema TE03-A, frecuencia del flap: 0.60 Hz



4.6.1.2 Barcaza + Estructura

Figura D.2

Respuesta en olas para el sistema TE03-B, frecuencia del flap: 0.50 Hz

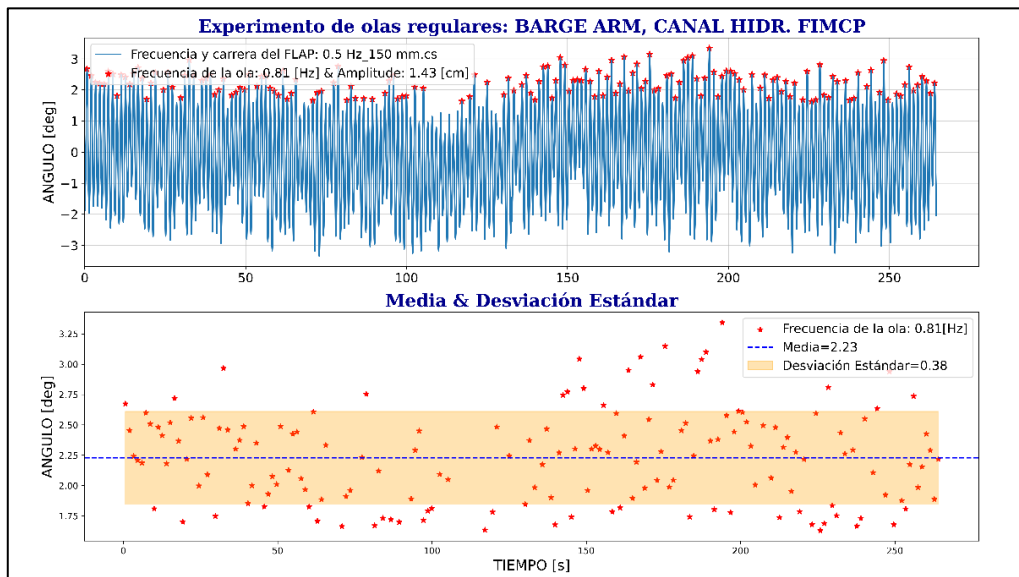
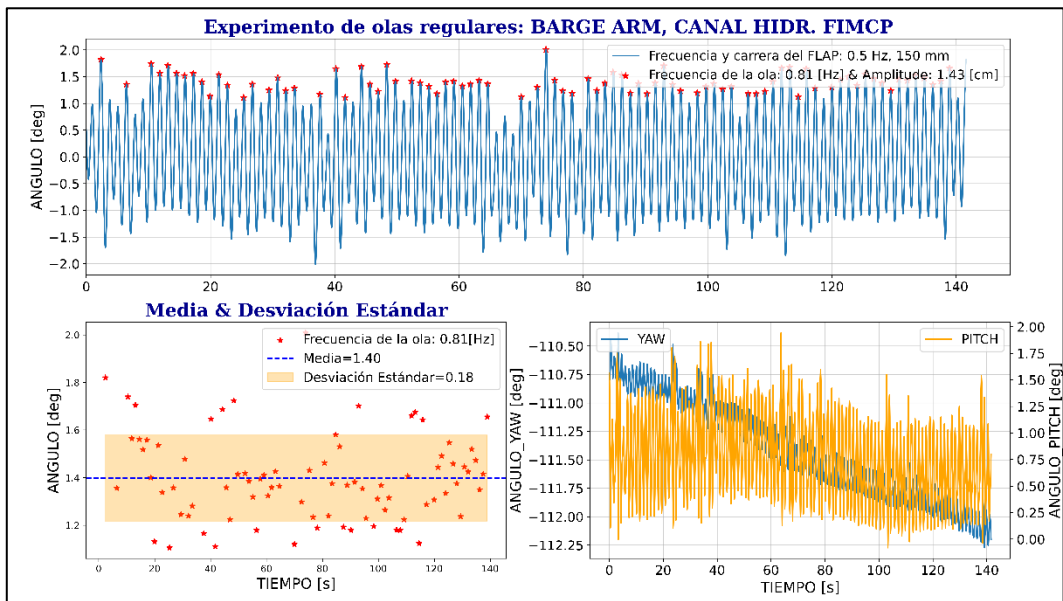


Figura D.3

Respuesta en olas para el sistema TE03-B-L, frecuencia del flap: 0.50 Hz



4.6.1.3 Barcaza + WEC

Figura D.4

Respuesta en olas para el sistema TE03-C, frecuencia del flap: 0.50 Hz

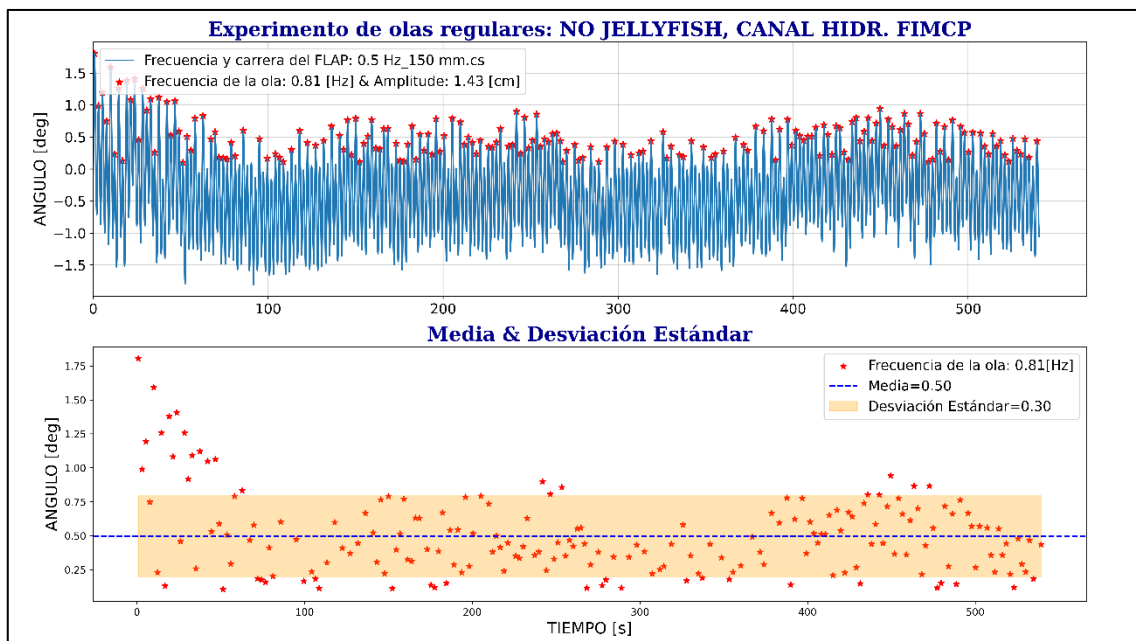
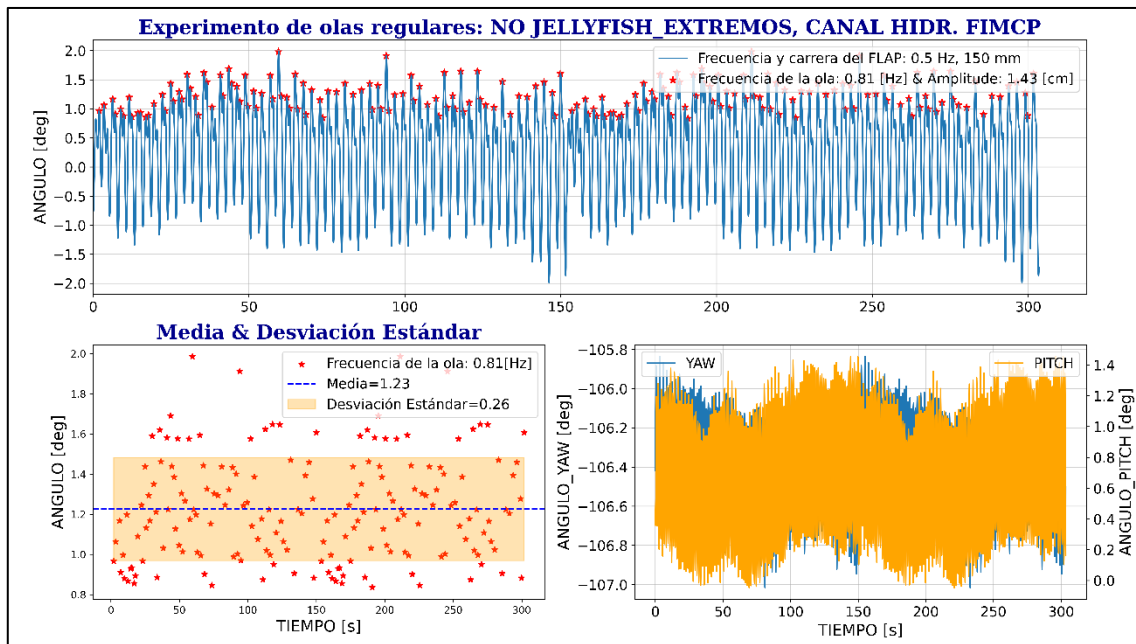


Figura D.5

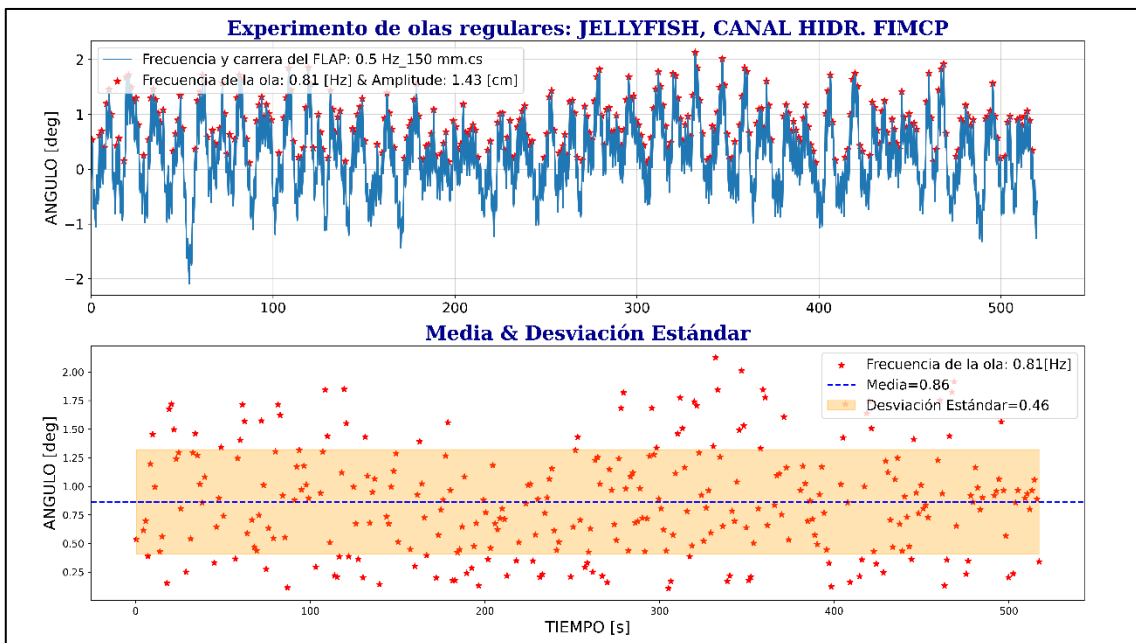
Respuesta en olas para el sistema TE03-C-L, frecuencia del flap: 0.50 Hz



4.6.1.4 Barcaza + WEC + Medusa

Figura D.6

Respuesta en olas para el sistema TE03-D, frecuencia del flap: 0.50 Hz



4.7 Resultados del RAO

4.7.1 RAO para configuraciones sin lastre

4.7.1.1 Barcaza sola

Figura D.7

RAO para el sistema TE03-A

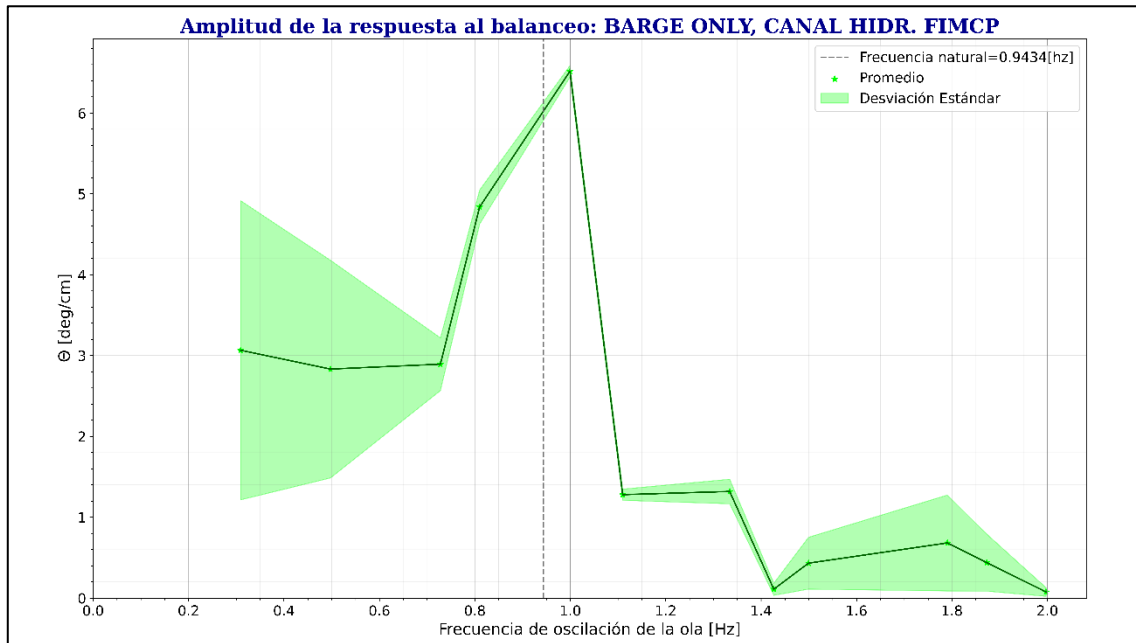
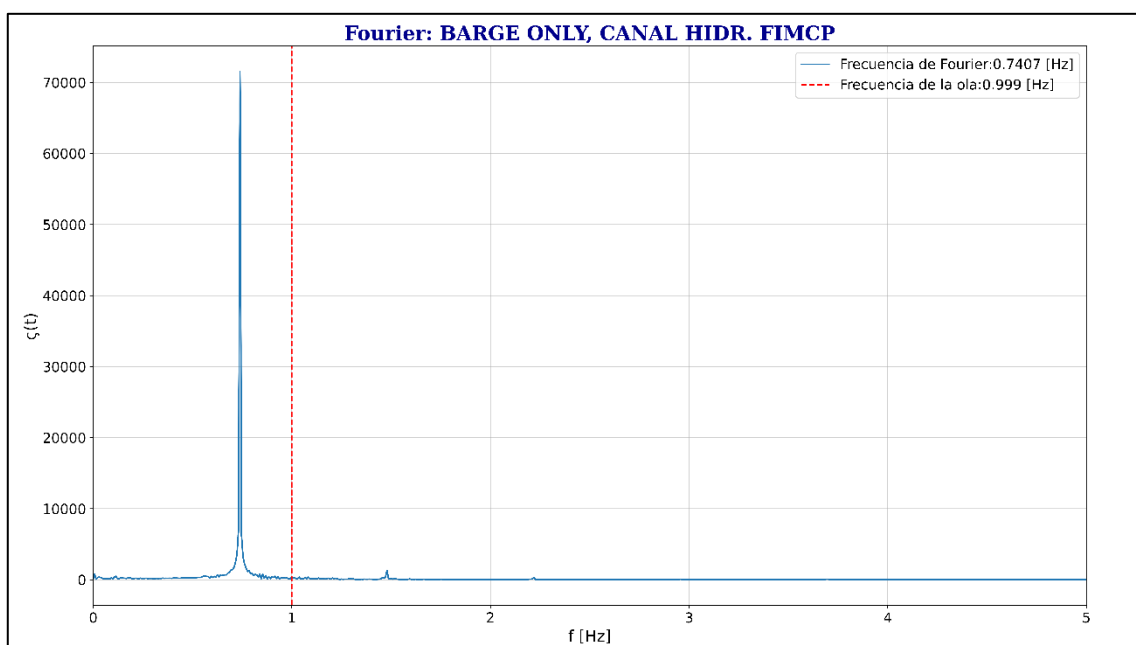


Figura D.8

Análisis de Fourier para el sistema TE03-A



4.7.1.2 Barcaza + Estructura

Figura D.9

RAO para el sistema TE03-B

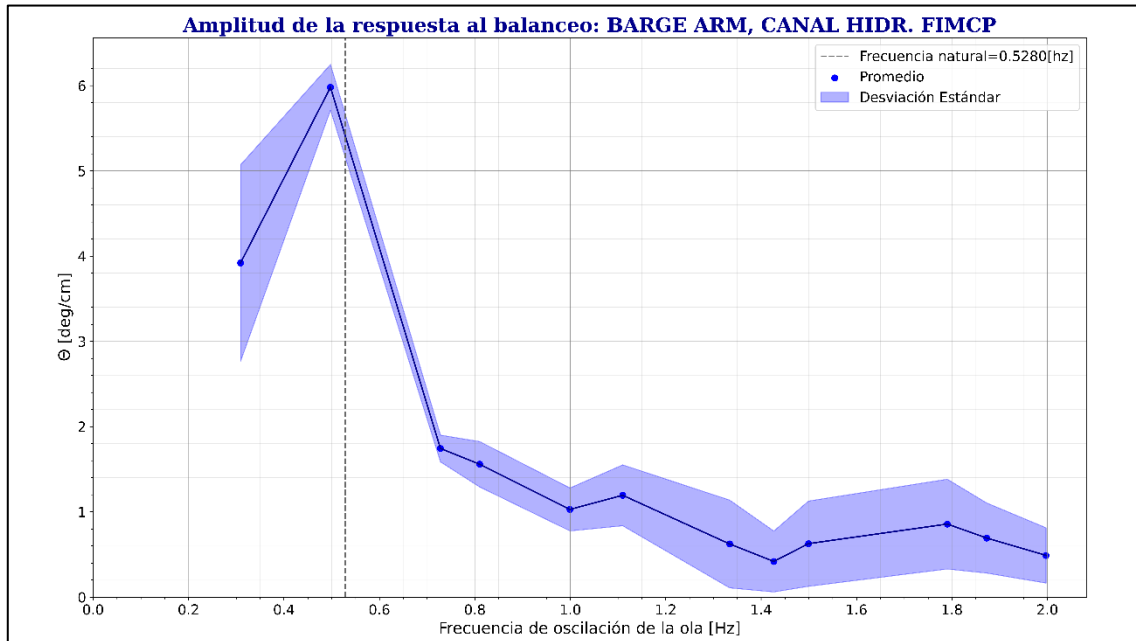
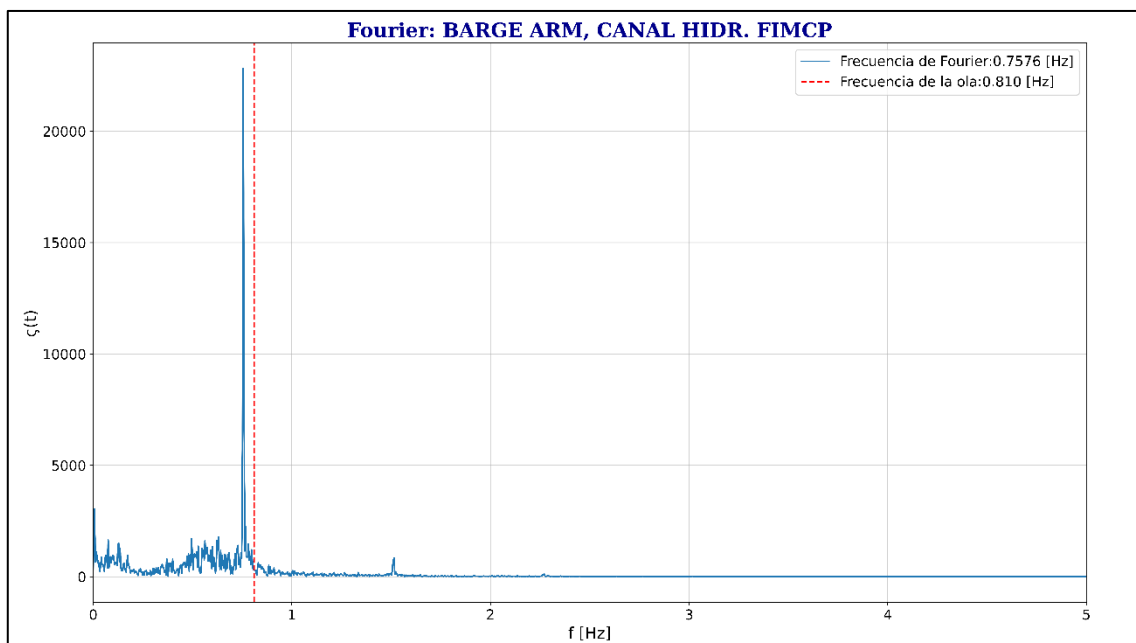


Figura D.10

Análisis de Fourier para el sistema TE03-B



4.7.1.3 Barcaza + WEC

Figura D.11

RAO para el sistema TE03-C

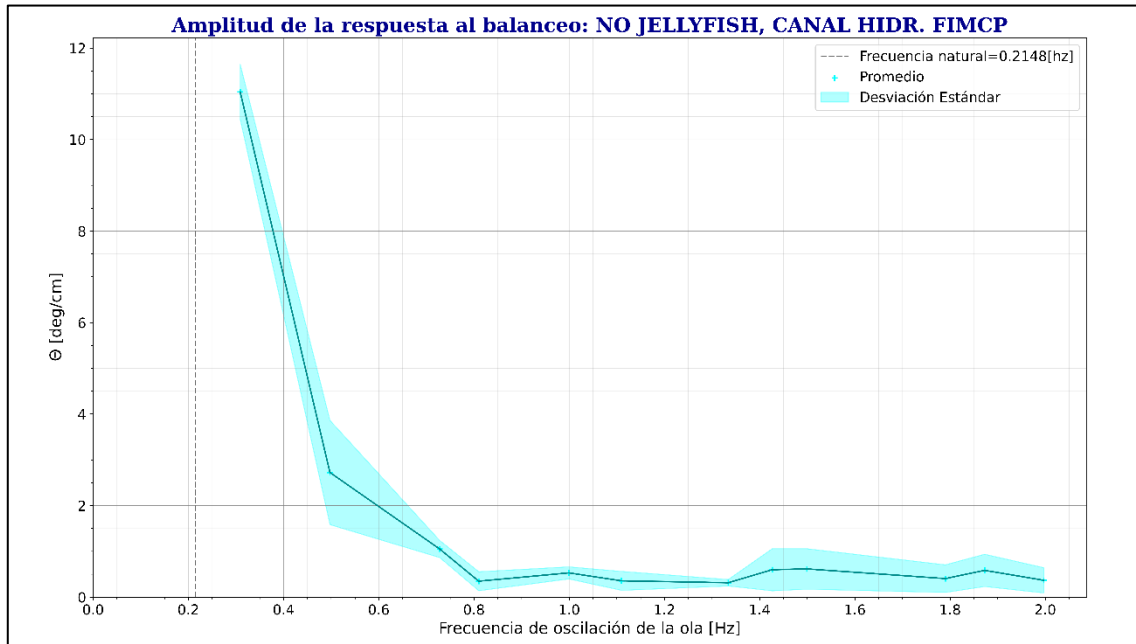
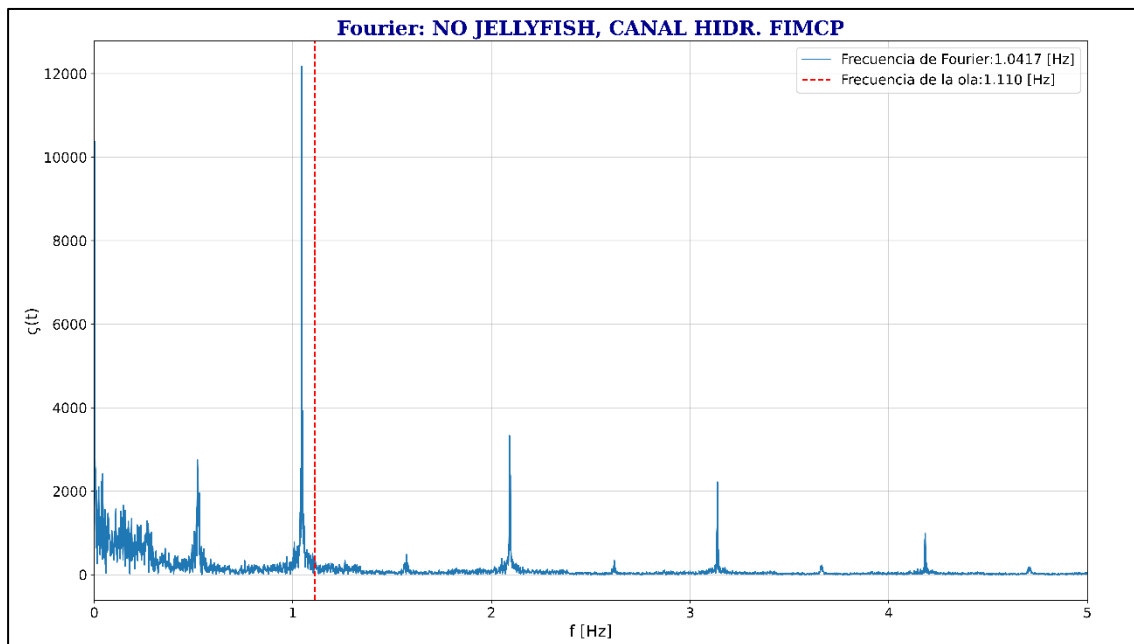


Figura D.12

Análisis de Fourier para la configuración TE03-C



4.7.1.4 Barcaza + WEC + Medusa

Figura D.13

RAO para el sistema TE03-D

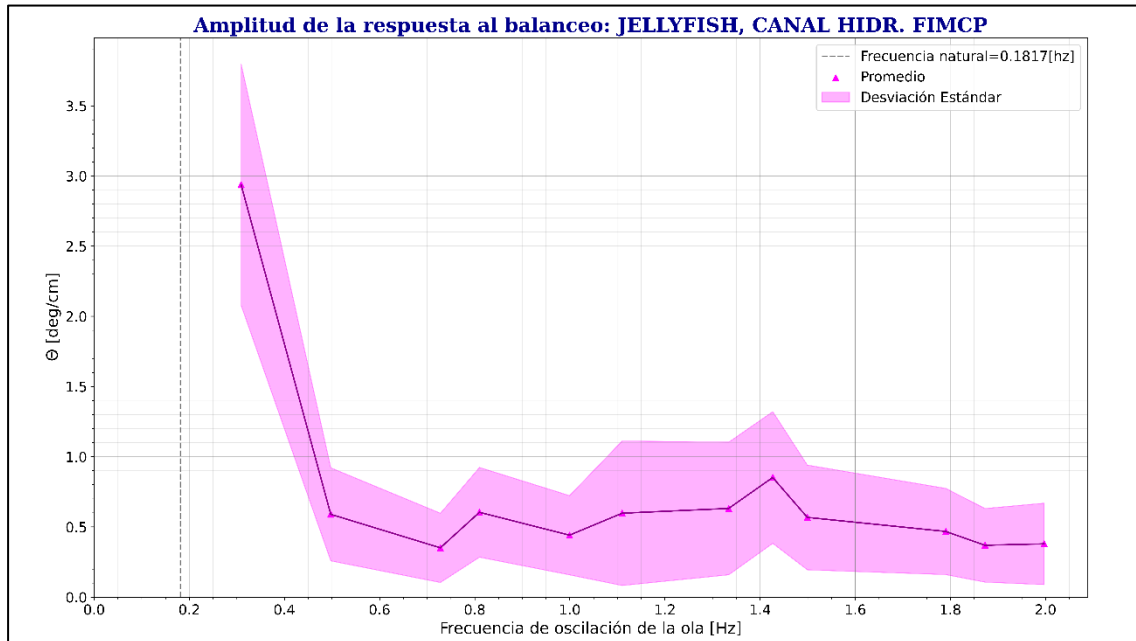
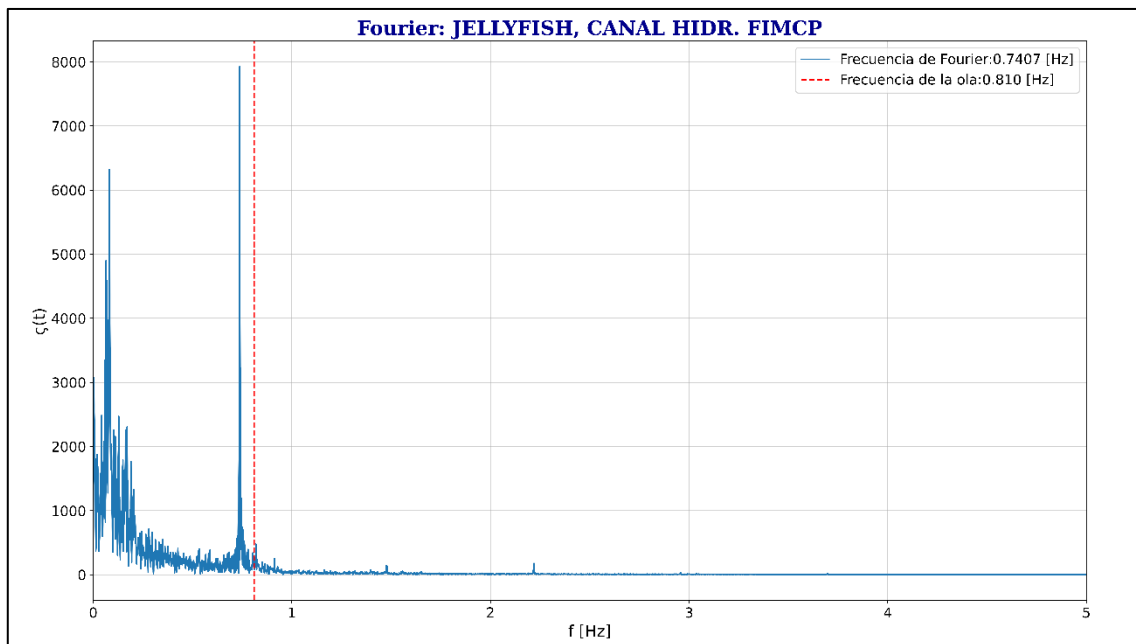


Figura D.14

Análisis de Fourier para la configuración TE03-D



3.5.2.1. Comparación del RAO para las configuraciones sin lastre

Figura D.15

RAO para la barcaza: sola vs. estructura

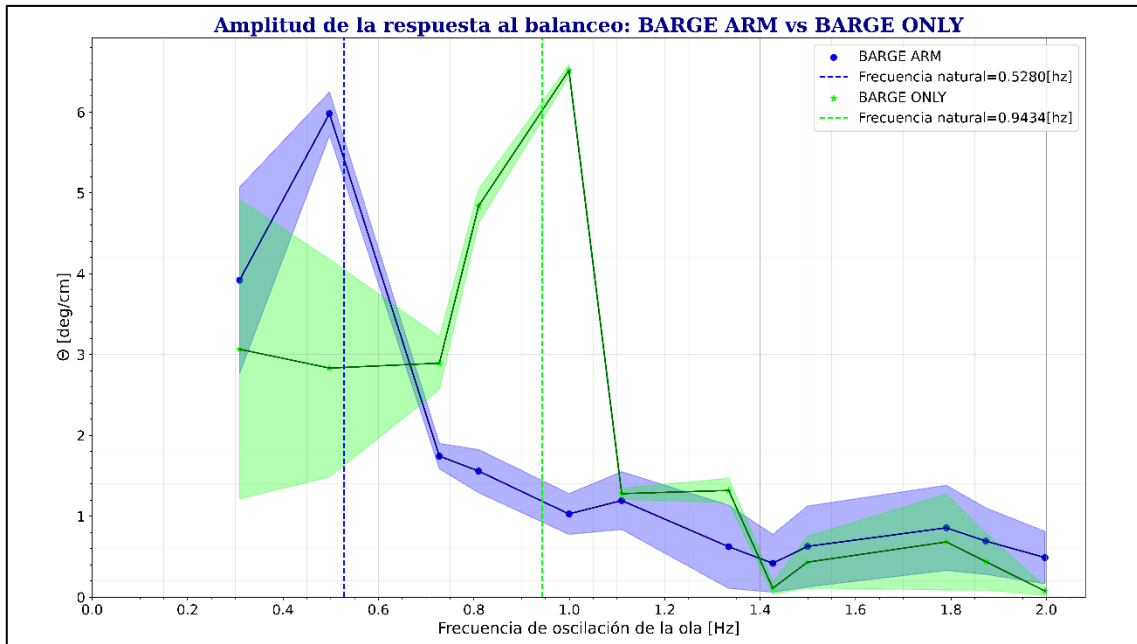


Figura D.16

RAO para la barcaza: sola vs. WEC

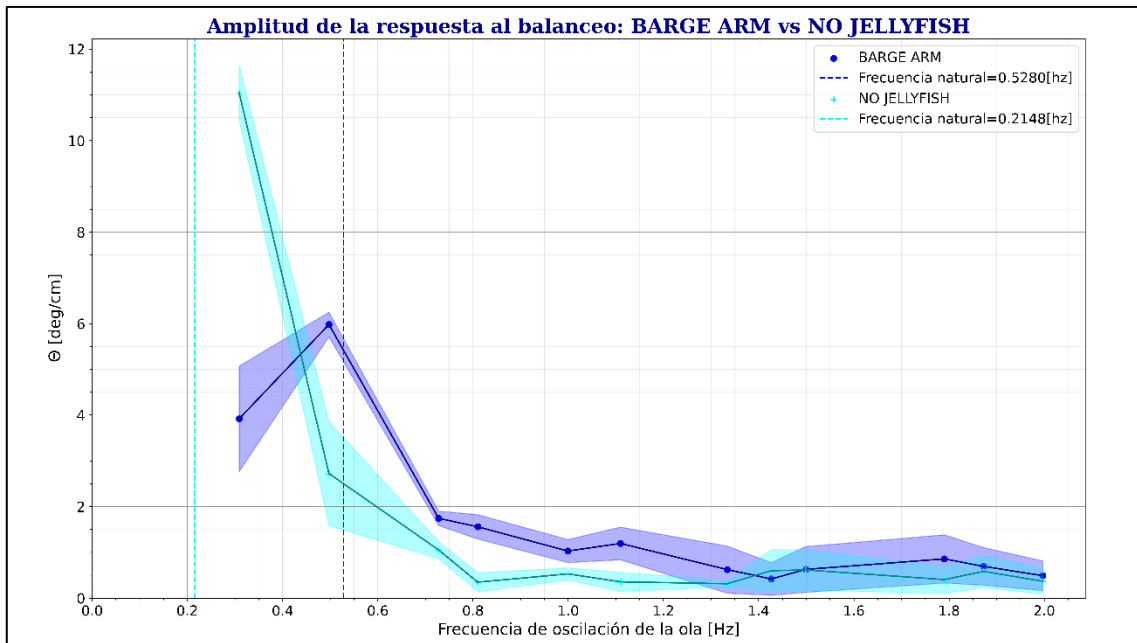
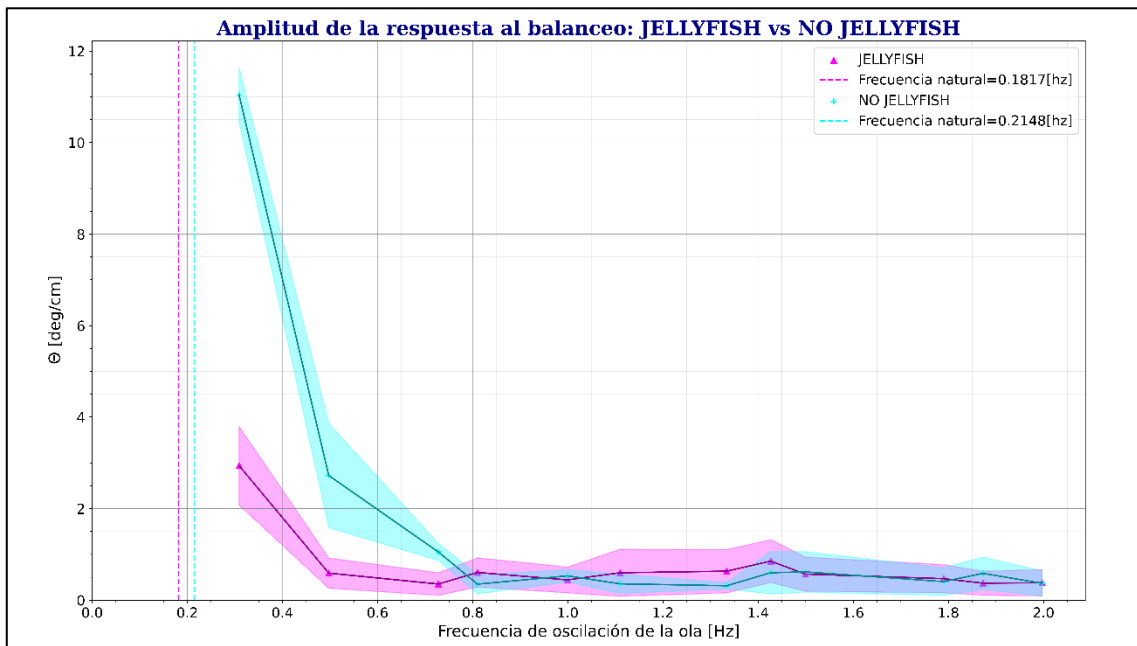


Figura D.17

RAO para la barcaza: WEC vs. WEC + Medusa



4.7.2 RAO para configuraciones con lastre

4.7.2.1 Barcaza sola

Figura D.18

RAO para el sistema TE03-A-L

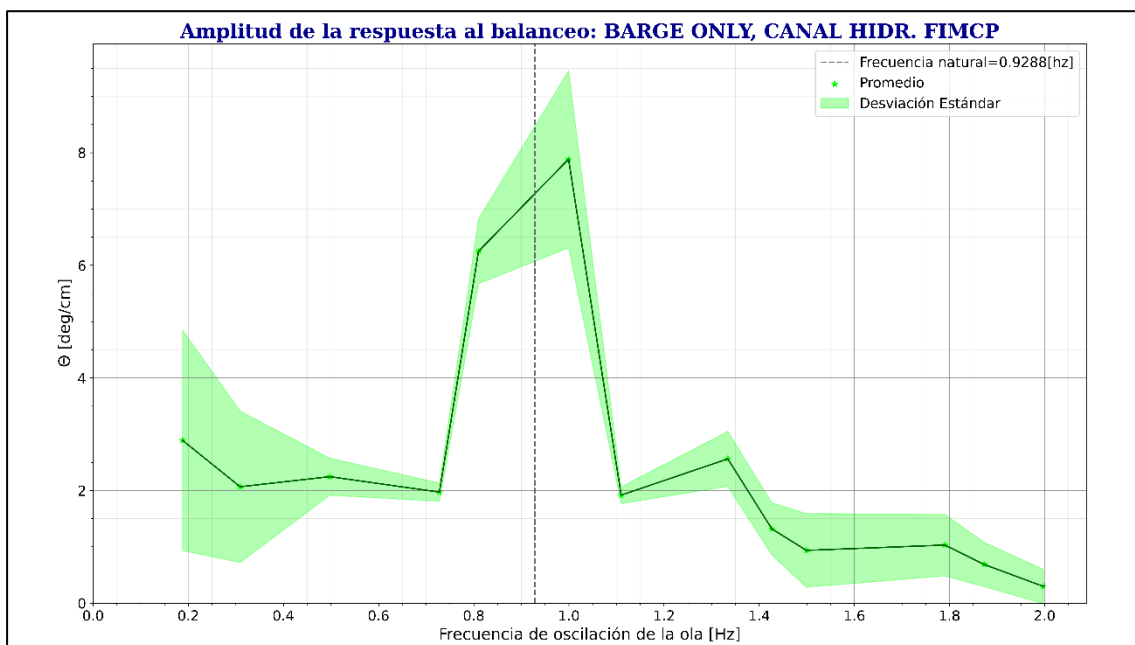
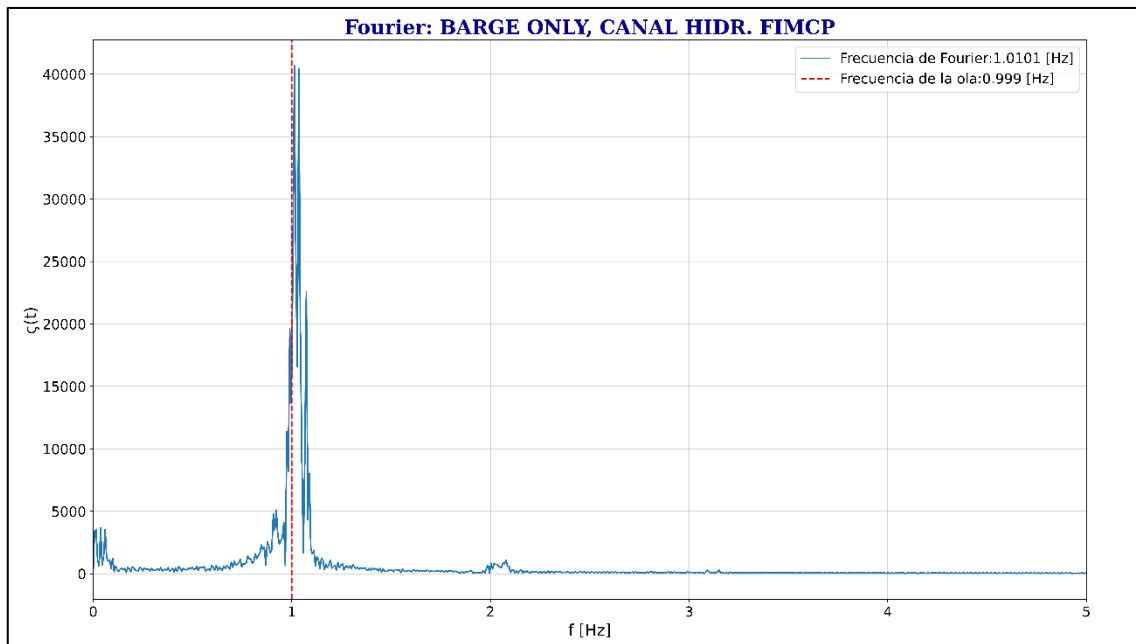


Figura D.19

Análisis de Fourier para la configuración TE03-A-L



4.7.2.2 Barcaza + Estructura

Figura D.20

RAO para el sistema TE03-B-L

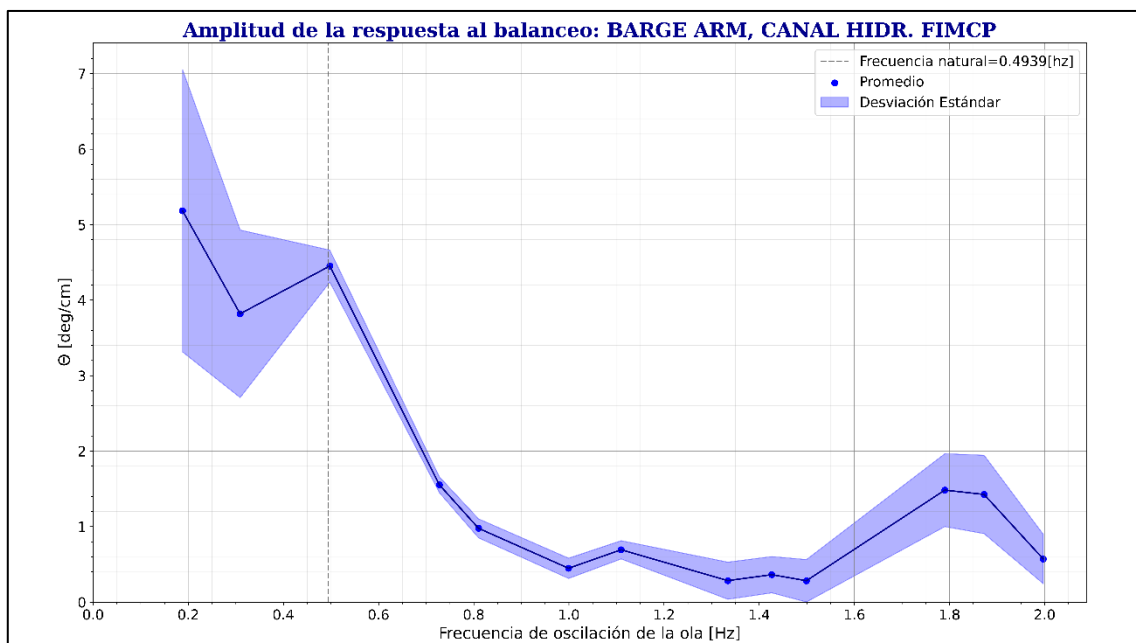
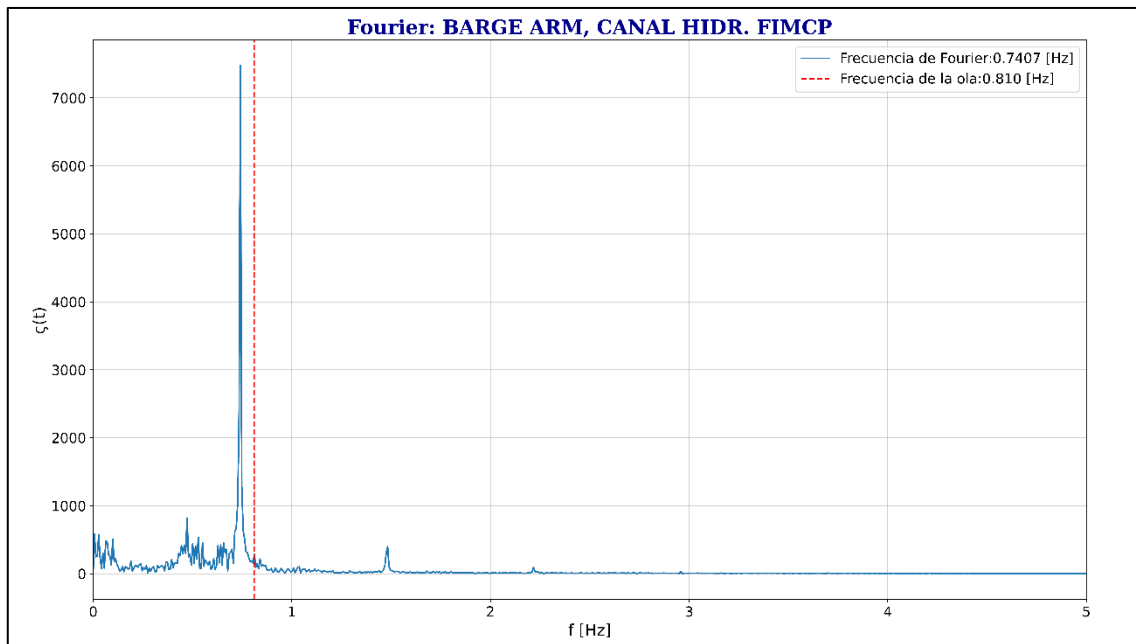


Figura D.21

Análisis de Fourier para la configuración TE03-B-L



4.7.2.3 Barcaza + WEC, posicionado en los centros

Figura D.22

RAO para el sistema TE03-C-L

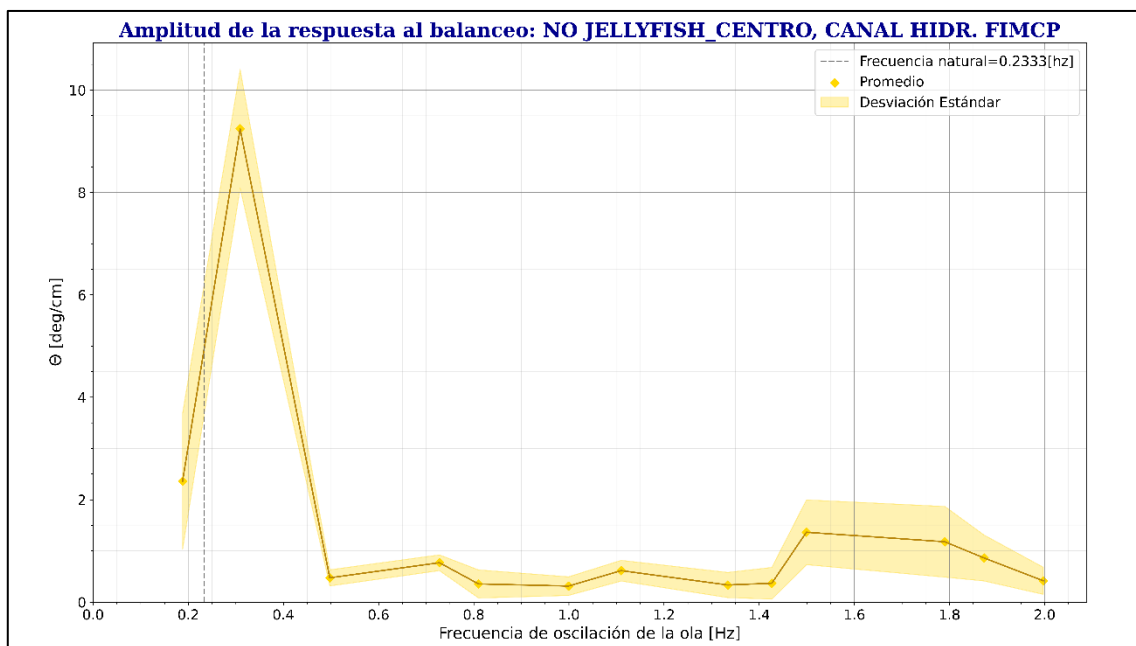
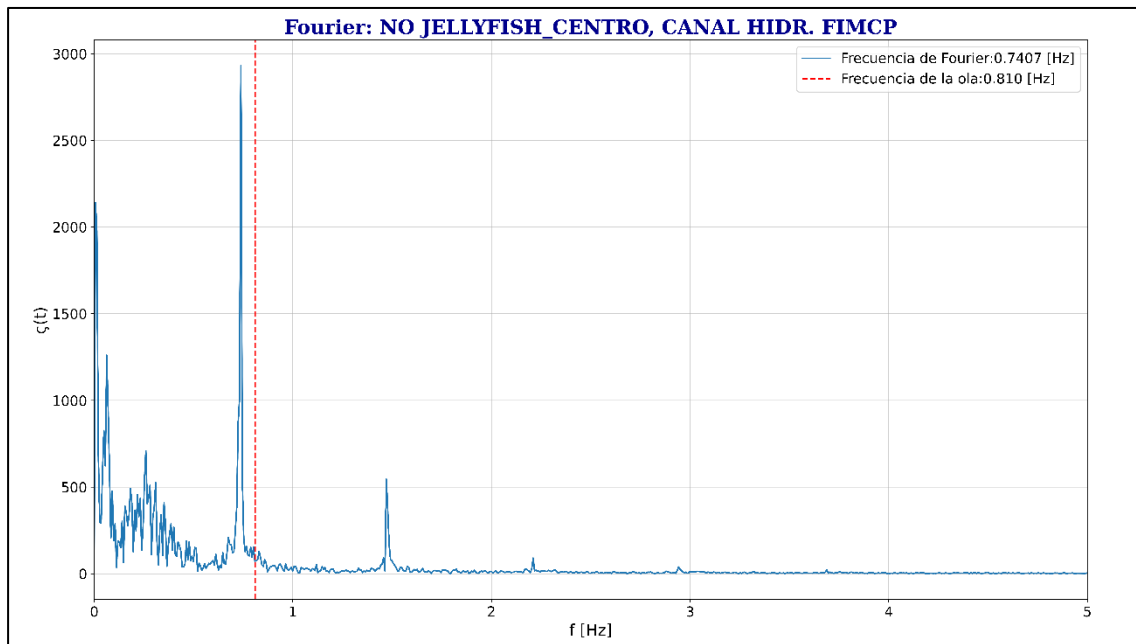


Figura D.23

Análisis de Fourier para la configuración TE03-C-L



4.7.2.4 Barcaza + WEC, posicionado en los extremos

Figura D.24

RAO para el sistema TE03-C-L

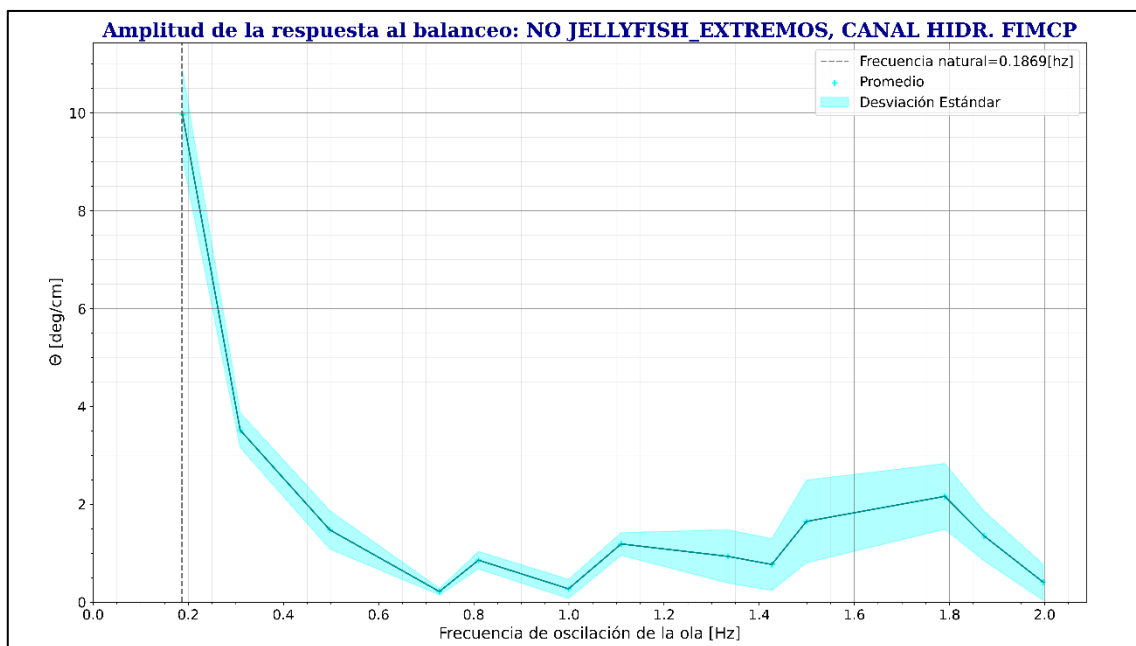
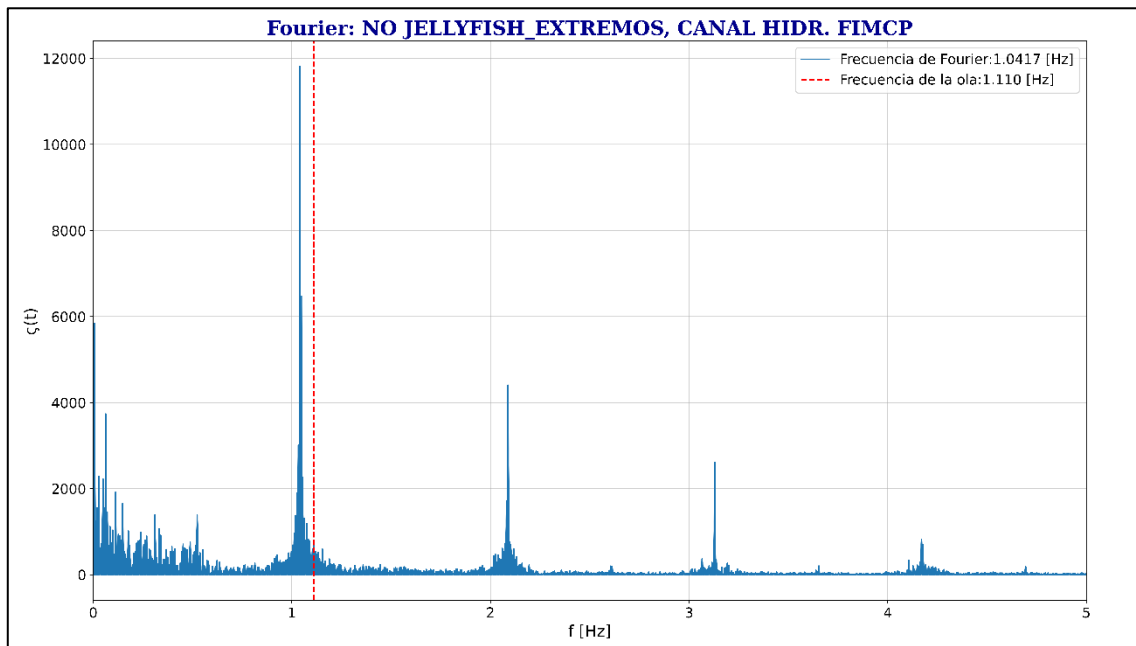


Figura D.25

Análisis de Fourier para la configuración TE03-C-L



4.7.2.5 Barcaza + WEC + Medusa, posicionado en los centros

Figura D.26

Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L

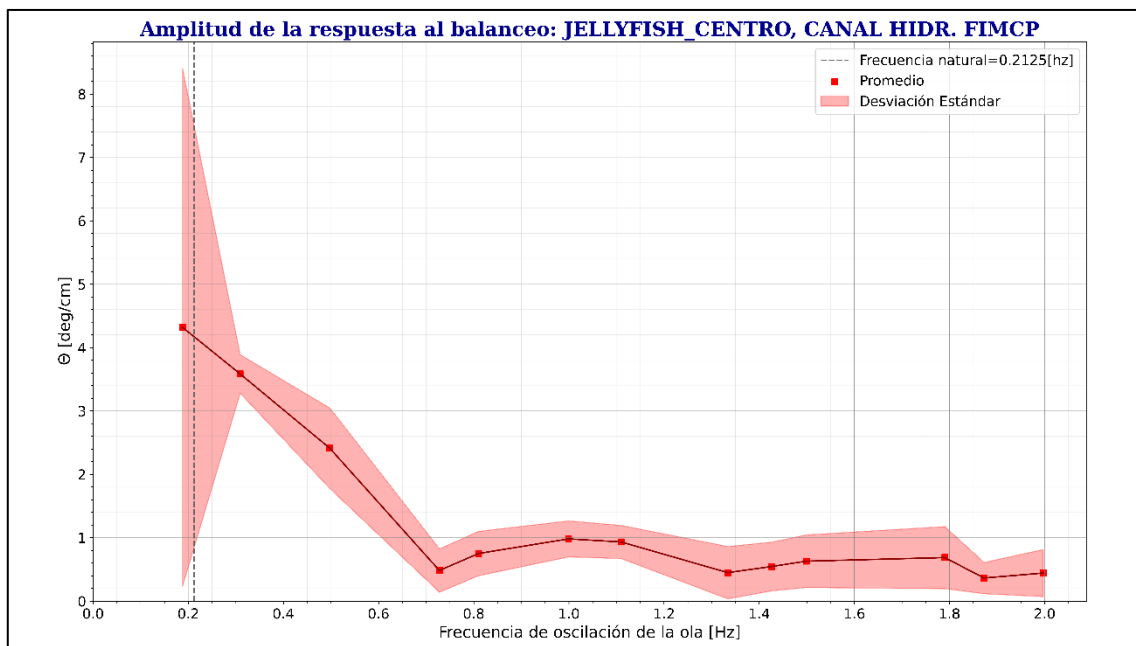
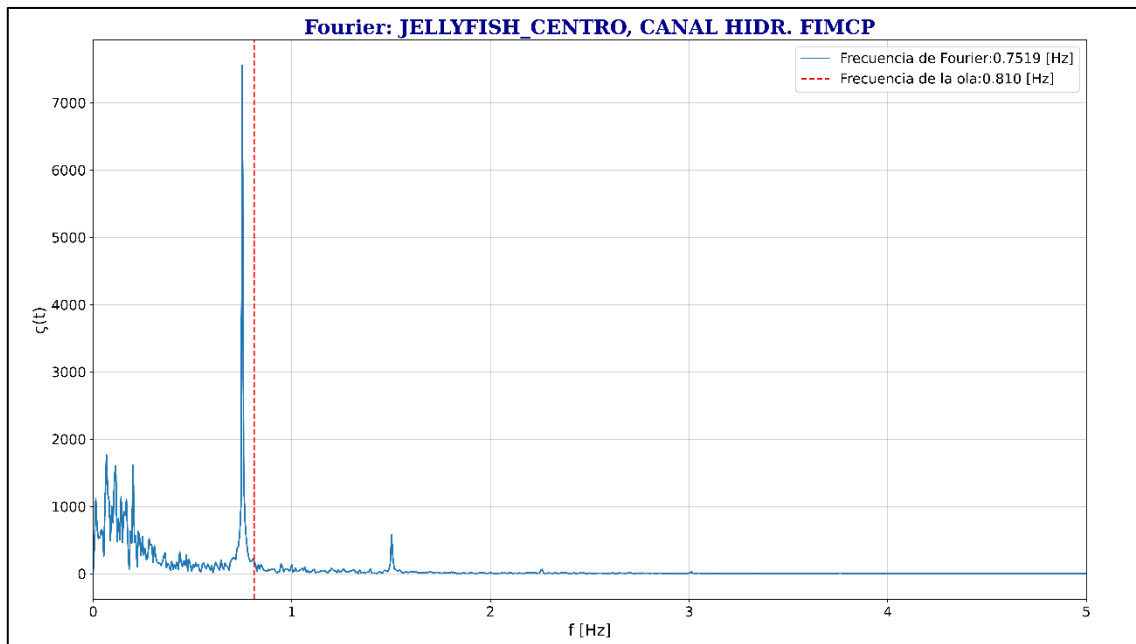


Figura D.27

Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L



4.7.2.6 Barcaza + WEC + Medusa, posicionado en los extremos

Figura D.28

RAO para el sistema TE03-D-L

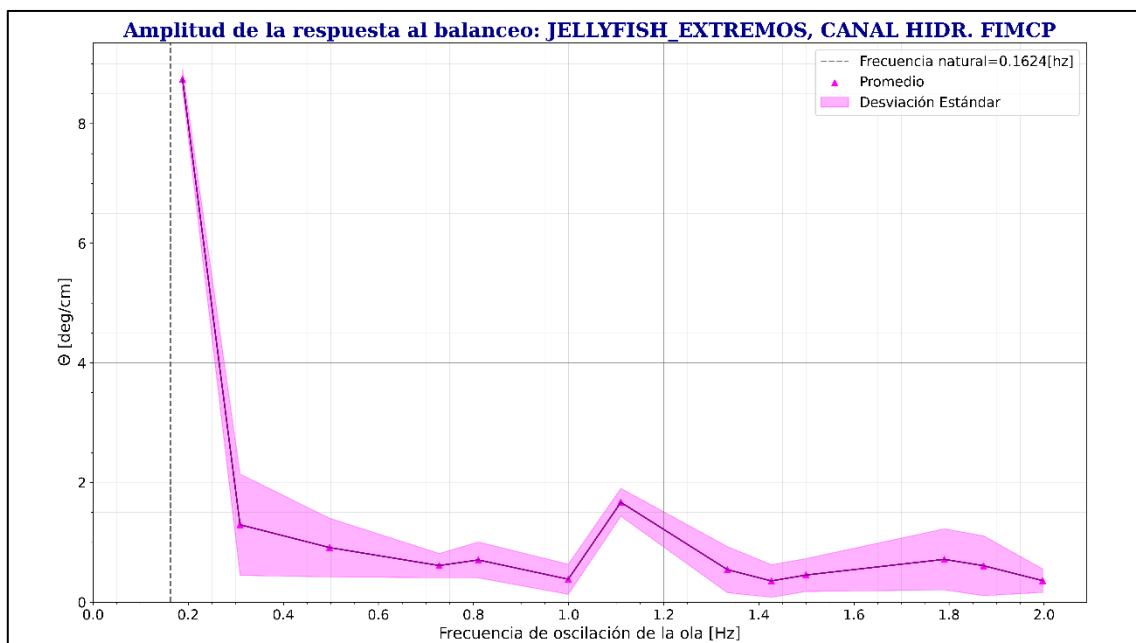
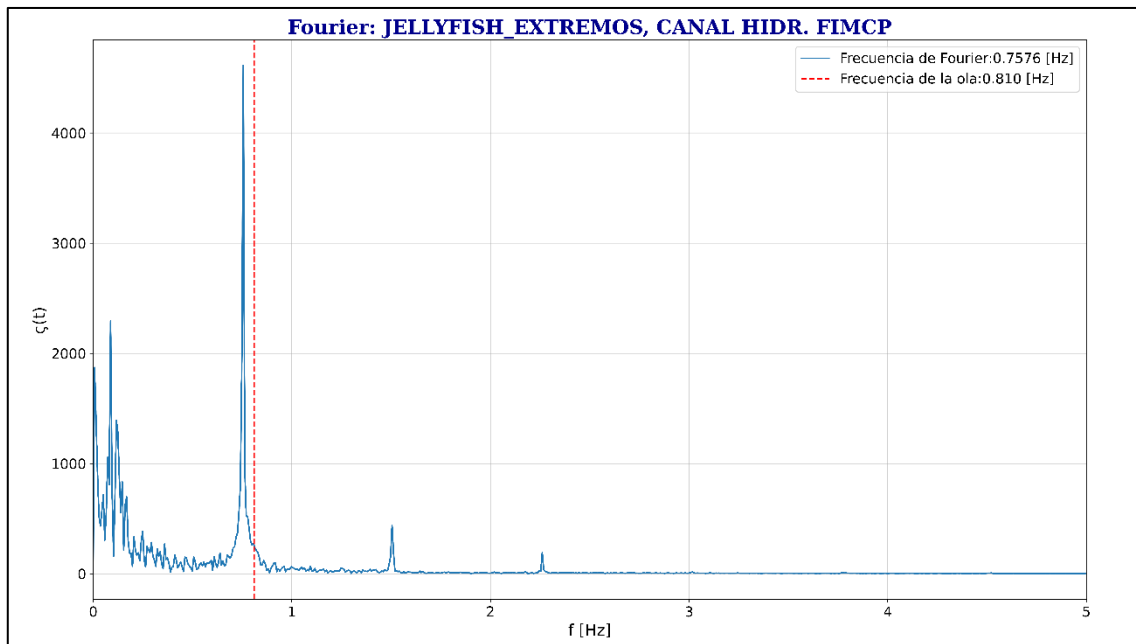


Figura D.29

Análisis de Fourier para la configuración TE03-D-L



APÉNDICE E

4.8 Tabla de Amortización

Tabla E.1

Tabla de amortización del proyecto

	Inversión	Abono	Interés	Principal	Saldo
1	\$(1,560,486.84)	\$41,999.22	\$(21,672.71)	\$20,326.51	\$(1,540,160.33)
2	\$(1,540,160.33)	\$41,999.22	\$(21,390.41)	\$20,608.81	\$(1,519,551.52)
3	\$(1,519,551.52)	\$41,999.22	\$(21,104.19)	\$20,895.04	\$(1,498,656.49)
4	\$(1,498,656.49)	\$41,999.22	\$(20,813.99)	\$21,185.23	\$(1,477,471.25)
5	\$(1,477,471.25)	\$41,999.22	\$(20,519.76)	\$21,479.46	\$(1,455,991.79)
6	\$(1,455,991.79)	\$41,999.22	\$(20,221.44)	\$21,777.78	\$(1,434,214.01)
7	\$(1,434,214.01)	\$41,999.22	\$(19,918.98)	\$22,080.24	\$(1,412,133.77)
8	\$(1,412,133.77)	\$41,999.22	\$(19,612.32)	\$22,386.90	\$(1,389,746.87)
9	\$(1,389,746.87)	\$41,999.22	\$(19,301.40)	\$22,697.82	\$(1,367,049.05)
10	\$(1,367,049.05)	\$41,999.22	\$(18,986.17)	\$23,013.06	\$(1,344,035.99)
11	\$(1,344,035.99)	\$41,999.22	\$(18,666.55)	\$23,332.67	\$(1,320,703.32)
12	\$(1,320,703.32)	\$41,999.22	\$(18,342.50)	\$23,656.72	\$(1,297,046.60)
13	\$(1,297,046.60)	\$41,999.22	\$(18,013.94)	\$23,985.28	\$(1,273,061.32)
14	\$(1,273,061.32)	\$41,999.22	\$(17,680.82)	\$24,318.40	\$(1,248,742.92)
15	\$(1,248,742.92)	\$41,999.22	\$(17,343.08)	\$24,656.14	\$(1,224,086.78)
16	\$(1,224,086.78)	\$41,999.22	\$(17,000.64)	\$24,998.58	\$(1,199,088.20)
17	\$(1,199,088.20)	\$41,999.22	\$(16,653.45)	\$25,345.77	\$(1,173,742.44)
18	\$(1,173,742.44)	\$41,999.22	\$(16,301.44)	\$25,697.78	\$(1,148,044.66)
19	\$(1,148,044.66)	\$41,999.22	\$(15,944.54)	\$26,054.68	\$(1,121,989.97)
20	\$(1,121,989.97)	\$41,999.22	\$(15,582.68)	\$26,416.54	\$(1,095,573.43)
21	\$(1,095,573.43)	\$41,999.22	\$(15,215.80)	\$26,783.43	\$(1,068,790.01)

	Inversión	Abono	Interés	Principal	Saldo
22	\$(1,068,790.01)	\$41,999.22	\$(14,843.82)	\$27,155.41	\$(1,041,634.60)
23	\$(1,041,634.60)	\$41,999.22	\$(14,466.67)	\$27,532.55	\$(1,014,102.05)
24	\$(1,014,102.05)	\$41,999.22	\$(14,084.29)	\$27,914.94	\$(986,187.11)
25	\$(986,187.11)	\$41,999.22	\$(13,696.59)	\$28,302.63	\$(957,884.48)
26	\$(957,884.48)	\$41,999.22	\$(13,303.51)	\$28,695.71	\$(929,188.77)
27	\$(929,188.77)	\$41,999.22	\$(12,904.97)	\$29,094.25	\$(900,094.53)
28	\$(900,094.53)	\$41,999.22	\$(12,500.90)	\$29,498.32	\$(870,596.21)
29	\$(870,596.21)	\$41,999.22	\$(12,091.21)	\$29,908.01	\$(840,688.20)
30	\$(840,688.20)	\$41,999.22	\$(11,675.84)	\$30,323.38	\$(810,364.82)
31	\$(810,364.82)	\$41,999.22	\$(11,254.70)	\$30,744.53	\$(779,620.29)
32	\$(779,620.29)	\$41,999.22	\$(10,827.70)	\$31,171.52	\$(748,448.77)
33	\$(748,448.77)	\$41,999.22	\$(10,394.78)	\$31,604.44	\$(716,844.33)
34	\$(716,844.33)	\$41,999.22	\$(9,955.84)	\$32,043.38	\$(684,800.95)
35	\$(684,800.95)	\$41,999.22	\$(9,510.81)	\$32,488.41	\$(652,312.54)
36	\$(652,312.54)	\$41,999.22	\$(9,059.60)	\$32,939.62	\$(619,372.92)
37	\$(619,372.92)	\$41,999.22	\$(8,602.12)	\$33,397.10	\$(585,975.82)
38	\$(585,975.82)	\$41,999.22	\$(8,138.28)	\$33,860.94	\$(552,114.88)
39	\$(552,114.88)	\$41,999.22	\$(7,668.01)	\$34,331.21	\$(517,783.67)
40	\$(517,783.67)	\$41,999.22	\$(7,191.20)	\$34,808.02	\$(482,975.65)
41	\$(482,975.65)	\$41,999.22	\$(6,707.77)	\$35,291.45	\$(447,684.20)
42	\$(447,684.20)	\$41,999.22	\$(6,217.63)	\$35,781.59	\$(411,902.61)
43	\$(411,902.61)	\$41,999.22	\$(5,720.68)	\$36,278.54	\$(375,624.07)
44	\$(375,624.07)	\$41,999.22	\$(5,216.83)	\$36,782.39	\$(338,841.68)
45	\$(338,841.68)	\$41,999.22	\$(4,705.98)	\$37,293.24	\$(301,548.44)

	Inversión	Abono	Interés	Principal	Saldo
46	\$(301,548.44)	\$41,999.22	\$(4,188.03)	\$37,811.19	\$(263,737.25)
47	\$(263,737.25)	\$41,999.22	\$(3,662.90)	\$38,336.32	\$(225,400.93)
48	\$(225,400.93)	\$41,999.22	\$(3,130.47)	\$38,868.76	\$(186,532.17)
49	\$(186,532.17)	\$41,999.22	\$(2,590.64)	\$39,408.58	\$(147,123.59)
50	\$(147,123.59)	\$41,999.22	\$(2,043.32)	\$39,955.91	\$(107,167.69)
51	\$(107,167.69)	\$41,999.22	\$(1,488.39)	\$40,510.83	\$(66,656.86)
52	\$(66,656.86)	\$41,999.22	\$(925.76)	\$41,073.46	\$(25,583.39)
53	\$(25,583.39)	\$41,999.22	\$(355.31)	\$41,643.91	\$16,060.51
54	\$16,060.51	\$41,999.22	\$223.06	\$42,222.28	\$58,282.79
55	\$58,282.79	\$41,999.22	\$809.46	\$42,808.68	\$101,091.47
56	\$101,091.47	\$41,999.22	\$1,404.00	\$43,403.22	\$144,494.69
57	\$144,494.69	\$41,999.22	\$2,006.80	\$44,006.03	\$188,500.72
58	\$188,500.72	\$41,999.22	\$2,617.98	\$44,617.20	\$233,117.92
59	\$233,117.92	\$41,999.22	\$3,237.64	\$45,236.86	\$278,354.78
60	\$278,354.78	\$41,999.22	\$3,865.91	\$45,865.13	\$324,219.91
61	\$324,219.91	\$41,999.22	\$4,502.91	\$46,502.13	\$370,722.04
62	\$370,722.04	\$41,999.22	\$5,148.75	\$47,147.97	\$417,870.01
63	\$417,870.01	\$41,999.22	\$5,803.56	\$47,802.78	\$465,672.78
64	\$465,672.78	\$41,999.22	\$6,467.46	\$48,466.68	\$514,139.47
65	\$514,139.47	\$41,999.22	\$7,140.59	\$49,139.81	\$563,279.28
66	\$563,279.28	\$41,999.22	\$7,823.07	\$49,822.29	\$613,101.57
67	\$613,101.57	\$41,999.22	\$8,515.02	\$50,514.24	\$663,615.81
68	\$663,615.81	\$41,999.22	\$9,216.58	\$51,215.80	\$714,831.61
69	\$714,831.61	\$41,999.22	\$9,927.89	\$51,927.11	\$766,758.72

	Inversión	Abono	Interés	Principal	Saldo
70	\$766,758.72	\$41,999.22	\$10,649.08	\$52,648.30	\$819,407.01
71	\$819,407.01	\$41,999.22	\$11,380.28	\$53,379.50	\$872,786.51
72	\$872,786.51	\$41,999.22	\$12,121.63	\$54,120.86	\$926,907.37
73	\$926,907.37	\$41,999.22	\$12,873.29	\$54,872.51	\$981,779.88
74	\$981,779.88	\$41,999.22	\$13,635.38	\$55,634.60	\$1,037,414.48
75	\$1,037,414.48	\$41,999.22	\$14,408.06	\$56,407.28	\$1,093,821.76
76	\$1,093,821.76	\$41,999.22	\$15,191.47	\$57,190.69	\$1,151,012.45
77	\$1,151,012.45	\$41,999.22	\$15,985.76	\$57,984.98	\$1,208,997.42
78	\$1,208,997.42	\$41,999.22	\$16,791.08	\$58,790.30	\$1,267,787.72
79	\$1,267,787.72	\$41,999.22	\$17,607.58	\$59,606.80	\$1,327,394.52
80	\$1,327,394.52	\$41,999.22	\$18,435.43	\$60,434.65	\$1,387,829.17
81	\$1,387,829.17	\$41,999.22	\$19,274.77	\$61,273.99	\$1,449,103.16
82	\$1,449,103.16	\$41,999.22	\$20,125.77	\$62,124.99	\$1,511,228.15
83	\$1,511,228.15	\$41,999.22	\$20,988.59	\$62,987.81	\$1,574,215.96

4.9 Perfil Económico

Tabla E.2

Perfil económico de la implementación

PERFIL ECONÓMICO DEL PROYECTO	
INVERSIÓN INICIAL	\$ 1,560,486.48
CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR AÑO	1.12 GWh
CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR AÑO EN LA ISLA ISABELA	7.60 GWh
PORCENTAJE CUBIERTO UTILIZANDO EL WEC	15%
\$/kW	0.45
TIEMPO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN	7 Years
PERIODO DE MANTENIMIENTO, 5 AÑOS	INCLUDED

APÉNDICE F

4.10 Código fuente del script

Figura F.1

Código fuente de Python

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import os
import scipy.fft
import statistics
from tabulate import tabulate
from sympy import *
from sklearn.metrics import r2_score
from scipy.signal import find_peaks

x=Symbol('x')

def CREATE_FILE():
    carpetas = ['BARGE ARM', 'BARGE ONLY', 'JELLYFISH', 'NO JELLYFISH']
    carpeta_result=['FREE_DECAY', 'REGULAR WAVE RESPONSE', 'STABILITY']
    if not os.path.exists('PLOT'):
        os.makedirs('PLOT')
    if not os.path.exists('PLOT/RAO'):
        os.makedirs('PLOT/RAO')
    for file in carpetas:
        if not os.path.exists('PLOT/'+file):
            os.makedirs('PLOT/'+file)
        for file_r in carpeta_result:
            if not os.path.exists('PLOT/' + file+'/'+file_r):
                os.makedirs('PLOT/' + file+'/'+file_r)

def PROMEDIO_LISTA(lista):
    if isinstance(lista, list):
        return np.mean(lista)
    else:
        return lista

def FILTRAR_DATOS(df, tamaño_salto=10):
    # Crea un nuevo DataFrame con las filas que contienen los valores máximos
    # en cada grupo
    nuevo_df = df.loc[df.groupby(df.index // tamaño_salto)['ROLL'].idxmax()]

    # Restablece los índices del nuevo DataFrame
    nuevo_df = nuevo_df.reset_index(drop=True)
    n_iteracion=df['TIME'][1] * tamaño_salto
    nuevo_df['TIME'] = nuevo_df.index * n_iteracion
    return nuevo_df

def MAX_VALUE(data, NAME_FILE='NO-NAME', NOT_FD=False):
    if NOT_FD == False:
        data = FILTRAR_DATOS(data)
        peaks, _ = find_peaks(data['ROLL'])

        while True:
            dic = {'ROLL_MAX': list(data['ROLL'][peaks]), 'TIME':
list(data['TIME'][peaks]), 'INDEX': list(peaks)}
            index_up = -1
            for i in range(len(dic['INDEX'])):
                try:
                    if dic['ROLL_MAX'][i] < dic['ROLL_MAX'][i + 1] or
dic['ROLL_MAX'][i + 1] < 0:
                        index_up = i + 1
                        break
                except:
                    continue

            dic = pd.DataFrame(dic)
            dic = dic.iloc[:index_up].reset_index(drop=True)
            sig = [];Damped_Frequency = [];time_P = []
```

```

        for i in range(len(dic['ROLL_MAX'])):
            try:
                time_P.append(dic['TIME'][i + 1] - dic['TIME'][i])
                sigma = math.log(dic['ROLL_MAX'][i] / dic['ROLL_MAX'][i +
1], math.exp(1))
                if sigma > 0:
                    wd = 2 * math.pi / (dic['TIME'][i + 1] -
dic['TIME'][i])
                    sig.append(sigma);Damped_Frequency.append(wd)
            except:
                continue

            sigma = float(np.average(sig));sigma_np=np.array(sig)
            wd = np.average(Damped_Frequency)
            xi = float(1 / math.sqrt(math.pow(2 * math.pi / sigma, 2) + 1))
            xi_np= 1 / np.sqrt(np.power(2 * np.pi / sigma_np, 2) + 1)
            w_o = float(wd / math.sqrt(1 - math.pow(xi, 2)));Period = (2 *
math.pi) / w_o
            dic['ECUATION'] = max(dic['ROLL_MAX']) * np.exp(-xi * w_o *
(dic['TIME'] - dic['TIME'][0]))

            r_squared=0
            try:
                r_squared = r2_score(dic['ROLL_MAX'], dic['ECUATION'])
            except:
                break
            if 0 < r_squared <= 0.9 and len(peaks) >= 5:
                peaks = peaks[1:]
            else:
                break

dic_result={'sigma':sigma,'xi':xi,'w_o':w_o,'periot':Period,'r2':r_squared}

        range_lent_P = range(len(time_P))
        range_lent_xi = range(len(xi_np))
        plt.close()
        # plt.figure(figsize=(16, 9))
        # plt.title('Linear Relationship between Periods',fontdict={'family':
'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
        # plt.plot(range_lent, time_P)
        # plt.scatter(range_lent, time_P, color='red')
        # for i, (xi, yi) in enumerate(zip(range_lent, time_P)):
        #     plt.annotate(f'P{i + 1}', (xi, yi), xytext=(0, 10),
textcoords='offset points', ha='center')
        # plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
        # plt.ylim(round(min(time_P), 0) - 2, round(max(time_P), 0) + 2)
        # plt.ylabel("TIME", fontsize=16)
        # plt.xlabel("CICLOS", fontsize=16)
        # plt.xticks(fontsize=14)
        # plt.yticks(fontsize=14)
        fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16, 9))
        ax1.set_title('Linear Relationship between
Periods',fontdict={'family': 'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold',
'size': 20})
        ax1.plot(range_lent_P, time_P)
        ax1.scatter(range_lent_P, time_P, color='red')
        for i, (xi, yi) in enumerate(zip(range_lent_P, time_P)):
            ax1.annotate(f'P{i + 1}', (xi, yi), xytext=(0, 10),
textcoords='offset points', ha='center')
        # ax1.set_ylim(round(min(time_P), 0) - 1, round(max(time_P), 0) + 1)
        ax1.set_ylabel("TIME", fontsize=16)
        # ax1.set_xlabel("CICLOS", fontsize=16)
        ax1.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
        ax1.tick_params(axis='both', which='minor', labelsize=14)

        ax2.set_title('Linear Relationship Between Damper',fontdict={'family':
'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
        ax2.plot(range_lent_xi, xi_np)

        ax2.scatter(range_lent_xi, xi_np, color='red')
        for i, (xi, yi) in enumerate(zip(range_lent_xi, xi_np)):
            ax2.annotate(f'P{i + 1}', (xi, yi), xytext=(0, 10),
textcoords='offset points', ha='center')
        # ax2.set_ylim(round(min(xi_np), 0) - 0.01, round(max(xi_np), 0) +
0.01)

        ax2.set_ylabel("ξ", fontsize=16)
        ax2.set_xlabel("CICLOS", fontsize=16)
        ax2.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
        ax2.tick_params(axis='both', which='minor', labelsize=14)

        plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
        plt.savefig('PLOT/' + NAME_FILE[:-4] + '-LINE' + '.png', dpi=600)
        return dic,dic_result

```

```

else:
    data = FILTRAR_DATOS(data)
    peaks, _ = find_peaks(data['ROLL'])
    dic = {'ROLL_MAX': list(data['ROLL'][peaks]), 'TIME':
list(data['TIME'][peaks])}
    return dic

def LOGARITHMIC_DECREMENT(NAME_FILE,TYPE,PLACE):
    """This function reads the data from the experiment and returns the data
    converted to ROLL, it also shows the graph of mV'
    data = pd.read_csv(NAME_FILE)
    data['ROLL']=data['ROLL']-list(data['ROLL'])[0]
    data['ROLL-m'] = np.where(data['ROLL'] > 0, data['ROLL'], 0)
    if TYPE == 'JELLYFISH':
        data = data.iloc[data['ROLL'].idxmin():].reset_index(drop=True)
        data['TIME'] = 0.014 * data.index
        data = FILTRAR_DATOS(data, tamano_salto=2)
    else:
        data = data.iloc[data['ROLL'].idxmax():].reset_index(drop=True)
        data['TIME']=0.014*data.index
    dic,dic_result=MAX_VALUE(data,NAME_FILE=NAME_FILE)

    plt.close()
    # plt.figure(figsize=(16, 9))
    # plt.title('Free Decay: ' + TYPE + ', ' + PLACE,fontdict={'family':
'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
    # plt.scatter(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'], color='red')
    # plt.plot(data['TIME'], data['ROLL'], label=NAME_FILE)
    # plt.plot(dic['TIME'], dic['ECUATION'],label='X*esp(-ξ*ω*t),
ξ=%0.4f\ω=%0.2f[rad/s] and T=%0.2f[s]' % (dic_result['xi'],
dic_result['w_o'], dic_result['periot']))
    # plt.ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
    # plt.xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
    # plt.xticks(fontsize=14)
    # plt.yticks(fontsize=14)
    # plt.legend(fontsize=14)
    # plt.grid(which="major", alpha=0.6)
    # plt.grid(which="minor", alpha=0.3)
    # plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
    # plt.savefig('PLOT/' + NAME_FILE[:-4] + '.png', dpi=600)

    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16, 9))
    fig.suptitle('Free Decay: ' + TYPE + ', ' + PLACE,fontdict={'family':
'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
    ax1.scatter(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'], color='red')
    ax1.plot(data['TIME'], data['ROLL'], label=NAME_FILE)
    ax1.plot(dic['TIME'], dic['ECUATION'],label='X*esp(-ξ*ω*t),
ξ=%0.4f\ω=%0.2f[rad/s] and T=%0.2f[s]' % (dic_result['xi'],
dic_result['w_o'], dic_result['periot']))
    ax1.set_ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
    ax1.set_xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
    ax1.tick_params(axis='both', which='major', labels=14)
    ax1.tick_params(axis='both', which='minor', labels=14)

    ax1.legend(fontsize=14)
    ax1.grid(which="major", alpha=0.6)
    ax1.grid(which="minor", alpha=0.3)

    ax2.scatter(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'], color='red')
    ax2.plot(data['TIME'], data['ROLL'], label=NAME_FILE)
    ax2.plot(dic['TIME'], dic['ECUATION'],label='ω=%0.2f[rad/s] and
T=%0.2f[s]\nR=%0.3f' % (dic_result['w_o'], dic_result['periot'],
dic_result['r2']))
    ax2.set_ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
    ax2.set_xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
    ax2.tick_params(axis='both', which='major', labels=14)
    ax2.tick_params(axis='both', which='minor', labels=14)
    ax2.legend(fontsize=14)
    ax2.set_xlim(dic['TIME'][0],list(dic['TIME'])[-1])
    ax2.grid(which="major", alpha=0.6)
    ax2.grid(which="minor", alpha=0.3)

    plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
    plt.savefig('PLOT/' + NAME_FILE[:-4] + '.png', dpi=600)

    return dic_result

```

```

def TESD_ST(NAME_FILE,TYPE):
    data=pd.read_csv(NAME_FILE)
    data['ROLL'] = data['ROLL'] - list(data['ROLL'])[0]

    MV_0 = float(np.average(data['ROLL'][0:15000]))
    MV_1 = float(np.average(data['ROLL'][29000:36000]))
    MV_2 = float(np.average(data['ROLL'][42000:54000]))
    MV_3 = float(np.average(data['ROLL'][62000:74000]))
    MV_4 = float(np.average(data['ROLL'][82000:94000]))
    MV_5 = float(np.average(data['ROLL'][102000:114000]))
    MV_6 = float(np.average(data['ROLL'][120000:134000]))
    MV_7 = float(np.average(data['ROLL'][142000:154000]))
    MV_8 = float(np.average(data['ROLL'][160000:172000]))

    degrees=[MV_0,MV_1,MV_2,MV_3,MV_4,MV_5,MV_6,MV_7,MV_8]

    plt.close()
    plt.figure(figsize=(16, 9))
    plt.title('Stability Test: '+TYPE, fontdict={'family': 'serif', 'color':
'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
    plt.plot(data['TIME'], data['ROLL'], label=NAME_FILE)
    # plt.plot(data.index, data['ROLL'], label=NAME_FILE)
    plt.ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
    plt.xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
    plt.xticks(fontsize=14)
    plt.yticks(fontsize=14)
    plt.legend(fontsize=14)
    plt.grid(which="major", alpha=0.6)
    plt.grid(which="minor", alpha=0.3)
    plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
    plt.savefig('PLOT/'+NAME_FILE[:-4]+'.png', dpi=600)

    return degrees

def GMT_(NAME_FILE,TYPE,W=2.462,B=17.5):
    '''This function calculates the GMT, in addition to returning a graph
    relating Tang vs Moment, and also shows the movements it makes, the data is
    also written in the .txt document'''

    degrees = TESD_ST(NAME_FILE,TYPE)
    distance = B * np.array([0,-0.5,-0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,-0.5,-0.5])

    w=np.array([0.1007,0.1010,0.1007,0.1010,0.1007,0.1007,0.1010,0.1007,0.1010])
    Wi_D=w*distance

    sum_Wi_D=[];suma_acumulada=0
    for Mo in Wi_D:
        suma_acumulada+=Mo
        sum_Wi_D.append(suma_acumulada)
    sum_Wi_D=np.array(sum_Wi_D)

    tang=np.tan(np.radians(degrees))

    f_d = np.polyfit(sum_Wi_D, tang, 1)
    predicted = np.polyval(f_d, sum_Wi_D)
    r_squared = r2_score(tang,predicted)

    GMT=1/(W+0.1007+0.1010)*f_d[0]

    plt.close()
    plt.figure(figsize=(16, 9))
    plt.title('Movement: '+TYPE, fontdict={'family': 'serif', 'color':
'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
    plt.plot(sum_Wi_D, tang, 'ob',label='GMT=%0.4f'% float(GMT))
    plt.plot(sum_Wi_D, f_d[0] * sum_Wi_D + f_d[1], color='red',
label="Sy=%0.3fx+%0.3f%; R'=%0.4f" % (float(f_d[0]),
float(f_d[1]),r_squared))
    plt.scatter(sum_Wi_D, tang, s=100, color="red", linestyle='dashed')
    plt.ylabel("Tang", fontsize=16)
    plt.xlabel('Moment [Kg - cm]', fontsize=16)
    plt.xticks(fontsize=14)
    plt.yticks(fontsize=14)
    plt.legend(fontsize=14)
    plt.grid(which="major", alpha=0.6)
    plt.grid(which="minor", alpha=0.3)
    plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
    plt.savefig('PLOT/' + NAME_FILE[:-4] + '_Movement'+ '.png', dpi=600)
    # plt.show()

    return GMT

```

```

def RESPONSE_AMPLITUDE(file_RW,frecuency,TYPE,PLACE):
    """This frequency reads the Roll Amplitude Response Test files and obtains
    the experiment amplitudes in [deg/cm]"""
    data_A=pd.read_csv('AMPLITUD_FIMCP.csv');j=0
    lista_Amplitud=[];frecuency=frecuency/(2*math.pi)

    for name in os.listdir(file_RW):
        data=pd.read_csv(file_RW+'/'+name)

        dic = MAX_VALUE(data,NOT_FD=True)
        Maximo_Am=np.array(dic['ROLL_MAX'])
        lista_Amplitud.append(Maximo_Am / (data_A['Amplitud'][j] * 100))

        media = np.mean(dic['ROLL_MAX'])
        desviacion_estandar = np.std(dic['ROLL_MAX'])

        plt.close()
        # plt.figure(figsize=(16, 9))
        # plt.title('Regular Wave Experiment: '+TYPE+', '+PLACE,
fontdict={'family': 'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size':
20})
        # plt.plot(data['TIME'], data['ROLL-NEW'], label=name)
        # plt.plot(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'],'*-',
color='red',label='Frecuencia:%0.2f[hz]'%float(data_A['Freq'][j]))
        # plt.ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
        # plt.xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
        # plt.xticks(fontsize=14)
        # plt.yticks(fontsize=14)
        # plt.legend(fontsize=14)
        # plt.grid(which="major", alpha=0.6)
        # plt.grid(which="minor", alpha=0.3)

        # plt.subplots adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)

        fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(16, 9))
        ax1.set_title('Regular Wave Experiment: '+TYPE+',
'+PLACE,fontdict={'family': 'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold',
'size': 20})
        ax1.plot(data['TIME'], data['ROLL'], label=name)
        ax1.plot(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'],'*-',
color='red',label='Frecuencia:%0.2f[hz]'%float(data_A['Freq'][j]))
        ax1.set_ylabel("ANGLE [deg]", fontsize=16)
        # ax1.set_xlabel("TIME [s]", fontsize=16)
        ax1.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
        ax1.tick_params(axis='both', which='minor', labelsize=14)
        ax1.legend(fontsize=14) # Suponiendo que ya tienes una leyenda
definida para este gráfico\
        ax1.set_xlim(0)
        ax1.grid(which="major", alpha=0.6)
        ax1.grid(which="minor", alpha=0.3)

        ax2.scatter(dic['TIME'], dic['ROLL_MAX'], marker='*', color='red',
label='Frecuencia: %0.2f[Hz]' % float(data_A['Freq'][j]))
        ax2.axhline(y=media, color='blue', linestyle='--
',label='Mean=%0.2f'%float(media))
        ax2.fill_between(dic['TIME'], media - desviacion_estandar, media +
desviacion_estandar, color='orange',alpha=0.3,label='Standard
Deviation=%0.2f'%float(desviacion_estandar))
        ax2.set_xlabel('TIME [s]', fontsize=16)
        ax2.set_ylabel('ANGLE [deg]', fontsize=16)
        ax2.set_title('Mean & Standard Deviation',fontdict={'family': 'serif',
'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
        ax2.legend(fontsize=14)
        plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
        plt.savefig('PLOT/'+file_RW+'/'+ name[:-4] + '.png', dpi=600);j+=1

    means = [np.mean(data) for data in lista_Amplitud]
    std_devs = [np.std(data) for data in lista_Amplitud]
    meas_min = [a - b for a, b in zip(means, std_devs)]
    meas_max = [a + b for a, b in zip(means, std_devs)]

```

```

plt.close()
plt.figure(figsize=(16, 9))
plt.title('Amplitude of roll Response: '+TYPE+',
'+PLACE,fontdict={'family': 'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold',
'size': 20})
plt.plot(data_A['Freq'], means)
plt.axvline(x=frecuency, color='red', linestyle='--
',label='f=%0.4f[Hz]'+frecuency)
plt.scatter(data_A['Freq'], means, c='red', marker='o', label='Promedio')
plt.fill_between(list(data_A['Freq']), meas_min, meas_max, color='orange',
alpha=0.3,label='Standard Deviation')
# plt.errorbar(data_A['Freq'], means, yerr=std devs, linestyle='None',
capsize=5, color='g',label='Desviación Estándar')
plt.xlabel('Hz', fontsize=16)
plt.ylabel(r'$\Theta$ [deg/cm]', fontsize=16)
plt.xticks(fontsize=14)
plt.yticks(fontsize=14)
plt.legend(fontsize=14)
plt.grid(which="major", alpha=0.6)
plt.grid(which="minor", alpha=0.3)
plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
plt.savefig('PLOT/' + file_RW + '/' + 'Roll Response.png', dpi=600)

list_RAO=[means,std_devs,float(frecuency)]
return list_RAO

def PRINT_DATA():
DIC_JELLYFISH = {'Weight [kg]':2.7281,'Draft [cm]': 4.44,'KMT [cm]':
9.73,'GMT [cm]': [],'KG [cm]': 0, 'wo [rad/s]': [], 'T [s]': [],'\xi':[]}

DIC_NO_JELLYFISH = {'Weight [kg]':2.72341,'Draft [cm]':4.43,'KMT [cm]':
9.74,'GMT [cm]': [],'KG [cm]': 0, 'wo [rad/s]': [], 'T [s]': [],'\xi':[]}
DIC_BARGE_ONLY = {'Weight [kg]':2.22,'Draft [cm]':3.61,'KMT [cm]':
11.04,'GMT [cm]': [],'KG [cm]': 0, 'wo [rad/s]': [], 'T [s]': [],'\xi':[]}
DIC_BARGE_ARM = {'Weight [kg]':2.69,'Draft [cm]':4.37,'KMT [cm]':
9.81,'GMT [cm]': [],'KG [cm]': 0, 'wo [rad/s]': [], 'T [s]': [],'\xi':[]}

DIC_RAO={}

FILES = [nombre for nombre in os.listdir('.') if
os.path.isdir(os.path.join('.', nombre))]
for file in FILES:

if file == 'JELLYFISH':
for file_1 in os.listdir(file):
if file_1 == 'STABILITY':
URL=file+'/' +file_1
for csv in os.listdir(URL):
GMT= GMT_(URL + '/' + csv, file,
W=DIC_JELLYFISH['Weight [kg]'])
DIC_JELLYFISH['GMT [cm]'].append(GMT)
elif file_1 == 'FREE_DECAY':
URL=file+'/' +file_1
for csv in os.listdir(URL):
dic_result = LOGARITHMIC_DECREMENT(URL+'/' +csv, file,
'TANQUE ACUICULTURA')
DIC_JELLYFISH['wo [rad/s]'].append(dic_result['w_o'])
DIC_JELLYFISH['\xi'].append(dic_result['xi'])
DIC_JELLYFISH['T [s]'].append(dic_result['period'])
elif file_1 == 'REGULAR WAVE RESPONSE':
URL=file+'/' +file_1
DIC_RAO['JELLYFISH']=
RESPONSE_AMPLITUDE(URL,np.mean(DIC_JELLYFISH['wo [rad/s]']) ,file, 'CANAL
HIDR. FIMCP')

elif file == 'NO JELLYFISH':
for file_1 in os.listdir(file):
if file_1 == 'STABILITY':
URL=file+'/' +file_1
for csv in os.listdir(URL):
GMT= GMT_(URL + '/' + csv, file,
W=DIC_NO_JELLYFISH['Weight [kg]'])
DIC_NO_JELLYFISH['GMT [cm]'].append(GMT)
elif file_1 == 'FREE_DECAY':
URL=file+'/' +file_1
for csv in os.listdir(URL):
dic_result = LOGARITHMIC_DECREMENT(URL+'/' +csv, file,
'TANQUE ACUICULTURA')
DIC_NO_JELLYFISH['wo
[rad/s]'].append(dic_result['w_o'])
DIC_NO_JELLYFISH['\xi'].append(dic_result['xi'])
DIC_NO_JELLYFISH['T [s]'].append(dic_result['period'])
elif file_1 == 'REGULAR WAVE RESPONSE':
URL=file+'/' +file_1
DIC_RAO['NO JELLYFISH']=
RESPONSE_AMPLITUDE(URL,np.mean(DIC_NO_JELLYFISH['wo [rad/s]']) ,file, 'CANAL
HIDR. FIMCP')

```



```

elif file == 'BARGE ONLY':
    for file_1 in os.listdir(file):
        if file_1 == 'STABILITY':
            URL=file+'/' +file_1
            for csv in os.listdir(URL):
                GMT= GMT_(URL + '/' + csv, file,
W=DIC_BARGE_ONLY['Weight [kg]'])
                DIC_BARGE_ONLY['GMT [cm]'].append(GMT)
            elif file_1 == 'FREE_DECAY':

                URL=file+'/' +file_1
                for csv in os.listdir(URL):
                    dic_result = LOGARITHMIC_DECREMENT(URL+'/' +csv, file,
'TANQUE ACUICULTURA')
                    DIC_BARGE_ONLY['ω [rad/s]'].append(dic_result['w_0'])
                    DIC_BARGE_ONLY['ξ'].append(dic_result['xi'])
                    DIC_BARGE_ONLY['T [s]'].append(dic_result['period'])
                elif file_1 == 'REGULAR WAVE RESPONSE':
                    URL=file+'/' +file_1
                    DIC_RAO['BARGE ONLY'] =
RESPONSE_AMPLITUDE(URL,np.mean(DIC_BARGE_ONLY['ω [rad/s]']),file, 'CANAL
HIDR. FIMCP')

elif file == 'BARGE ARM':
    for file_1 in os.listdir(file):
        if file_1 == 'STABILITY':
            URL=file+'/' +file_1
            for csv in os.listdir(URL):
                GMT= GMT_(URL + '/' + csv, file,
W=DIC_BARGE_ARM['Weight [kg]'])
                DIC_BARGE_ARM['GMT [cm]'].append(GMT)
            elif file_1 == 'FREE_DECAY':
                URL=file+'/' +file_1
                for csv in os.listdir(URL):
                    dic_result = LOGARITHMIC_DECREMENT(URL+'/' +csv, file,
'TANQUE ACUICULTURA')
                    DIC_BARGE_ARM['ω [rad/s]'].append(dic_result['w_0'])
                    DIC_BARGE_ARM['ξ'].append(dic_result['xi'])
                    DIC_BARGE_ARM['T [s]'].append(dic_result['period'])
                elif file_1 == 'REGULAR WAVE RESPONSE':
                    URL=file+'/' +file_1
                    DIC_RAO['BARGE ARM'] =
RESPONSE_AMPLITUDE(URL,np.mean(DIC_BARGE_ARM['ω [rad/s]']),file, 'CANAL
HIDR. FIMCP')

PLOT_RAO_CONCAT([DIC_RAO['BARGE ARM'],DIC_RAO['BARGE ONLY']],['BARGE
ARM','BARGE ONLY'],'TANQUE ACUICULTURA')
PLOT_RAO_CONCAT([DIC_RAO['JELLYFISH'], DIC_RAO['NO JELLYFISH']],
['JELLYFISH', 'NO JELLYFISH'], 'TANQUE ACUICULTURA')
PLOT_RAO_CONCAT([DIC_RAO['BARGE ARM'], DIC_RAO['NO JELLYFISH']], ['BARGE
ARM', 'NO JELLYFISH'], 'TANQUE ACUICULTURA')

result = pd.DataFrame([DIC_JELLYFISH, DIC_NO_JELLYFISH,DIC_BARGE_ARM
,DIC_BARGE_ONLY],index=['JELLYFISH', 'NO JELLYFISH','BARGE ARM', 'BARGE
ONLY'])

# Reemplazar listas por promedio de sus elementos
for col in result.columns:
    result[col] = result[col].apply(PROMEDIO_LISTA)
result['KG [cm]']=result['KMT [cm]']-result['GMT [cm]']

formatear_float = lambda x: f'{x:.3f}' if isinstance(x, float) else x
result_3f = result.applymap(formatear_float)
print('\nResults of each experiment\n\n')
print(tabulate(result_3f, headers='keys', tablefmt='pretty',
showindex='always'))

# Escribir la tabla en un archivo de texto (siempre como un archivo nuevo)
with open('PLOT/RESULT.txt', 'w', encoding='utf-8') as archivo:
    archivo.write('Results of each experiment\n\n')
    archivo.write(tabulate(result_3f, headers='keys', tablefmt='pretty',
showindex='always'))
    archivo.write('\n\n')
    archivo.write(200 * '*')
    archivo.write('\n\n')

def PLOT_RAO_CONCAT(LIST,TYPE,PLACE):
    data_A = pd.read_csv('AMPLITUD_FIMCP.csv')

```

```

plt.close()
plt.figure(figsize=(16, 9))
plt.title('Amplitude of roll Response: '+PLACE,fontdict={'family':
'serif', 'color': 'darkblue', 'weight': 'bold', 'size': 20})
colores=['red','blue'];markers=['o','*']
for i in range(len(LIST)):
    means = LIST[i][0];std_devs = LIST[i][1];frequency=LIST[i][2]
    meas_min = [a - b for a, b in zip(means, std_devs)]
    meas_max = [a + b for a, b in zip(means, std_devs)]
    plt.scatter(data_A['Freq'], means, marker=markers[i],
label=TYPE[i],color=colores[i])
    plt.plot(data_A['Freq'], means)
    plt.axvline(x=frequency, linestyle='--
',color=colores[i],label='f=%0.4f[hz]'%frequency)
    plt.fill_between(list(data_A['Freq']), meas_min, meas_max,
alpha=0.3)#,label='Standard Deviation')
    # plt.errorbar(data_A['Freq'], means, yerr=std_devs, linestyle='None',
capsize=5, color='g')
    plt.xlabel('Hz', fontsize=16)
    plt.ylabel(r'$\Theta$ [deg/cm]', fontsize=16)
    plt.xticks(fontsize=14)
    plt.yticks(fontsize=14)
    plt.legend(fontsize=14)
    plt.grid(which="major", alpha=0.6)
    plt.grid(which="minor", alpha=0.3)
    plt.subplots_adjust(left=0.075, right=0.95, top=0.95, bottom=0.075)
plt.savefig("PLOT/' + 'RAO/' + 'Roll
Response_%%s_%%s.png'% (str(TYPE[0]),str(TYPE[1])), dpi=600)

CREATE_FILE()
PRINT_DATA()

```