

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE**



**“Estudio experimental de la oscilación e
interacción energética de boyas undimotrices con
forzamiento externo en oleaje marino irregular
en aguas someras”**

JOSÉ TOMÁS CONCHA SUÁREZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA:

ALEX FLORES MADARIAGA

PROFESOR CORREFERENTE:

PATRICIO WINCKLER GREZ

Agosto – 2023

AGRADECIMIENTOS

Comenzando los agradecimientos, primero que todo agradecer a los profesores que me acompañaron durante la realización de esta tesis junto a la Universidad de Valparaíso quienes me facilitaron el laboratorio para poder realizar los diversos ensayos experimentales. Agradeciendo además las herramientas entregadas por la universidad Técnica Federico Santa María para poder enfrentar este desafío de la mejor forma posible.

Continuando quiero agradecer el apoyo entregado por mi familia, tanto mi madre, padre, mis hermanos y mis amigos más cercanos quienes fueron parte importante durante mi proceso universitario, el cual estuvo lleno de altos y bajos, donde el apoyo y fuerza entregada por mis seres queridos resulto de lo más relevante para afrontar cada tropiezo o dificultad. Agradeciendo además a mi compañero de tesis quien fue un más que un colega un gran amigo. A los mencionados anteriormente debo agradecer a quienes hoy en día ya no forman parte de mi vida pero que aportaron su granito de arena para formar mi ser actual.

Agradecer además a mi gato Copito Ragnar y mis cuatro perritos quienes fueron mucho más que un pilar de fortaleza, fueron mi paz y mi motivación para lograr lo que estoy logrando y tener la fortaleza mental de avanzar pese a los distintos percances.

RESUMEN

En el presente trabajo se busca modelar de forma física en un canal hidráulico de olas la relación entre el forzamiento externo y la dinámica oscilatoria de un dispositivo captador del tipo absorbedor puntual, específicamente para estados de mar que representen las características de Punta Curaumilla y las costas de Valparaíso, siendo estos los de mayor ocurrencia y potencial energético, variando los periodos y alturas significativos.

Para esto, primeramente, se debió entender y basar la metodología en los principios de semejanza, específicamente bajo el número de Froude debido a las características del fenómeno, cumpliendo con el escalamiento correspondiente tanto geométrico como cinemático y dinámico. Una vez se entiende el problema se comienza con la metodología práctica, calibrando el canal hidráulico para poder tener el control del proceso y los parámetros de entrada, siguiendo a esto se especifica en qué consisten las diversas pruebas a realizar junto a sus objetivos, insumos especificaciones técnicas y variables de medición. Posteriormente se realizan los experimentos según los requerimientos y materiales necesarios para un correcto uso de los datos, siguiendo una estructura fija.

Una vez que se realicen las experiencias se procede a la toma de datos y su post-procesamiento, donde se limpian los comportamientos anómalos y separan los distintos resultados que entreguen la información relevante para cada modelo, estado y prueba.

Por último, se analiza y concluye sobre los diferentes resultados obtenidos, observando la relación entre cada uno, obteniendo patrones de interés, proporcionalidades e influencia entre uno u otro parámetro que permitan obtener una correcta conjetura final.

Ya analizando, los resultados se obtuvo el estado de mar más energético el cual fue de un periodo de 1,13 segundos y altura de ola de 7 centímetros aproximadamente, además se demostró una relación entre el periodo del estado de mar y su inversa proporción frente al aprovechamiento y captación energética, es decir, a mayor periodo menor aprovechamiento, mientras que para la altura de mar se tiene una relación directa entre el aumento de la altura de mar y el aumento de la eficiencia de captación.

Se concluyo que el sistema SALM es más eficiente empleando una configuración donde el amarre entre el dispositivo WEC y la boya auxiliar sea catenaria de gran peso y el anclaje de la boya auxiliar al fondo marino sea más flexible. Y que para el modelo empleado se requiere de mayor diámetro que altura y un calado aproximado del 75%.

Para finalizar, este trabajo da pie a un trabajo a futuro en donde se encuentre mejores geometrías que permitan una mayor captación y sincronización con el movimiento del oleaje como también el estudio más profundo entre las propiedades del sistema de anclaje. Como también vendría siendo el esfuerzo de probar y analizar añadiendo al sistema de anclaje un sistema que permita la extracción energética o power take off.

ABSTRACT

The present work seeks to model physically in a hydraulic wave channel the relationship between the external forcing and the oscillatory dynamics of a point absorber type absorber device, specifically for sea states that represent the characteristics of Punta Curaumilla and the coasts of Valparaíso, these being those of greater occurrence and energy potential, varying periods and significant heights.

For this, firstly, it was necessary to understand and base the methodology on the principles of similarity, specifically under the Froude number due to the characteristics of the phenomenon, complying with the corresponding geometric, kinematic and dynamic scaling. Once the problem is understood, we start with the practical methodology, calibrating the hydraulic channel to be able to have control of the process and the input parameters, following this we specify what the different tests to be performed consist of together with their objectives, inputs, technical specifications and measurement variables. Subsequently, the experiments are carried out according to the requirements and materials necessary for a correct use of the data, following a fixed structure.

Once the experiments are carried out, data collection and post-processing are performed, where anomalous behaviors are cleaned and the different results are separated to provide the relevant information for each model, state and test.

Finally, the different results obtained are analyzed and concluded, observing the relationship between each one, obtaining patterns of interest, proportionalities and influence between one or another parameter that allow to obtain a correct final conjecture.

Analyzing the results, the most energetic sea state was obtained, which was a period of 1.13 seconds and a wave height of approximately 7 centimeters, also showed a relationship between the period of the sea state and its inverse proportion against the use and energy capture, i.e., the longer the period, the lower the use, while for the sea height there is a direct relationship between the increase of the sea height and the increase of the capture efficiency.

It was concluded that the SALM system is more efficient using a configuration where the mooring between the WEC device and the auxiliary buoy is a heavy catenary and the anchoring of the auxiliary buoy to the seabed is more flexible. And that for the model used, a greater diameter than height and an approximate draught of 75% is required.

Finally, this work gives rise to a future work where better geometries are found that allow a greater capture and synchronization with the movement of the waves as well as a deeper study of the properties of the anchoring system. As it would also be the effort to test and analyze adding to the anchoring system a system that allows energy extraction or power take off.

Índice

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT.....	5
1. Introducción.....	19
2. Problemática	21
2.1. Contextualización.....	21
2.2. Antecedentes	23
2.3. Planteamiento de la problemática.....	26
3. Marco teórico.....	28
3.1. Oleaje	28
3.1.1. Oleaje irregular	31
3.2. Teoría oleaje irregular.....	31
3.2.1. Teoría de Stokes de primer orden	31
3.2.2. Teoría de Stokes de segundo orden.....	38
3.3. Movimiento de un cuerpo en el mar	39
3.3.1 Fuerzas involucradas.....	40
3.3.2 Relaciones de movimiento de un absorbedor puntual.....	43
3.4 Análisis de forzamiento externo debido al anclaje	45
3.4.1 Resonancia y control de fase	45
3.4.2 Conexiones.....	45
3.4.3 Análisis analítico de la catenaria.	48
3.4.4 Amarres.....	49
3.5 RAO'S.....	53
3.5.1. RAO'S HEAVE.....	54
3.6 Modelación física	54
3.6.1 Modelo de semejanza de Froude.....	55
3.6.2 Análisis adimensional comportamiento elástico	56
4 Estado del arte	58
4.1. Panorama energético mundial boyas undimotrices	58

4.1.1.	Proyectos y patentes actuales	58
4.1.2.	Innovación de las patentes.	59
4.2.	Panorama energético nacional boyas undimotrices.....	61
4.3.	Avances científicos.....	62
4.4.	Normativa vigente	64
4.4.1.	Normativa internacional	64
4.4.2.	Normativa nacional.....	65
5.	Propuesta a plantear.....	66
6.	Objetivos	67
6.1.	Objetivo general.....	67
6.2.	Objetivos específicos	67
7.	Metodología.....	68
7.1.	General.....	68
7.2.	Parámetros y propósito de pruebas	70
7.2.1.	Fase y escala empleada.....	71
7.3.	Pruebas y objetivos de medición.	72
7.3.1.	Prueba 00-Calibración canal de olas.....	72
7.3.2.	Prueba 01-Prueba fondeo estándar.....	74
7.3.3.	Prueba 02-Prueba fondeo SALM-1.	76
7.3.4.	Prueba P03-Prueba fondeo SALM-2	78
7.4.	Plan y programación de trabajo.....	80
8.	Especificaciones técnicas-físicas del modelo	83
8.1.	Especificaciones técnicas físicas del modelo	83
8.1.1.	Modelo de boya.	83
8.1.2.	Modelo del sistema de amarre.	86
8.2.	Características generales de operación	92
8.2.1.	Estados de mar.....	92
8.2.2.	Capacidad de generación de olas y registro digital	94
9.	Resultados.....	97
9.1.	Calibración canal de olas.....	97
9.2.1.	Calibración archivo de oleaje irregular	99
9.2.	Resultados pruebas P01, P02 y P03	101

10.	Análisis de resultados	106
10.1.	Calibración oleaje irregular.....	106
10.2.	Prueba P01 Fondeo tradicional.....	111
10.2.1.	Modelo A1.....	111
10.2.2.	Modelo A2.....	187
10.2.3.	Modelo B1.....	207
10.3.	Prueba P02 – Fondeo SALM-1.....	227
10.3.1.	Modelo A2.....	227
10.3.2.	Modelo B1.....	248
10.4.	Prueba P03 – Fondeo SALM-2.....	270
10.4.1.	Modelo A2.....	270
11.	Conclusiones	285
12.	Continuación de trabajo	287
13.	Bibliografía	288

INDICE DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1: CAMBIOS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN 2020 Y 2021	21
ILUSTRACIÓN 2: A) GRÁFICO DE AMPLITUD SEGÚN CADA GEOMETRÍA PARA DIÁMETRO IGUAL A 3 METROS. B) GRÁFICO DE AMPLITUD SEGÚN CADA GEOMETRÍA PARA DIÁMETRO IGUAL A 7 METROS.....	24
ILUSTRACIÓN 3: FACTOR DE AMORTIZACIÓN PARA CADA GEOMETRÍA Y DIMENSIÓN	24
ILUSTRACIÓN 4: MODELOS A EMPLEAR PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	25
ILUSTRACIÓN 5: CONEXIONES DISPONIBLES DENTRO DEL SOFTWARE ANSYS AQWA	26
ILUSTRACIÓN 6: RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS GRUPOS DE ONDAS Y SU NIVEL ENERGÉTICO.....	29
ILUSTRACIÓN 7: DESCRIPCIÓN COMPONENTES DE UNA OLA.	30
ILUSTRACIÓN 8: FORMACIÓN DE OLEAJE IRREGULAR.....	31
ILUSTRACIÓN 9: COMPARACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE LAS PARTÍCULAS PARA EL CASO DE AGUAS PROFUNDAS(IZQUIERDA) Y EL CASO DE AGUAS SOMERAS(DERECHA)	38
ILUSTRACIÓN 10: GRADOS DE LIBERTAD DE UN CUERPO SUSPENDIDO EN EL MAR.	40
ILUSTRACIÓN 11: REPRESENTACIÓN DE LA INTERACCIÓN OLA-CUERPO.....	44
ILUSTRACIÓN 12: COMPONENTES QUE FORMAN UNA CADENA NÁUTICA.	47
ILUSTRACIÓN 13: DCL DE LA CATENARIA.....	48
ILUSTRACIÓN 14: LARGO DEL SISTEMA DE AMARRE CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD. .	50
ILUSTRACIÓN 15: CONFIGURACIÓN REPRESENTATIVA DEL SISTEMA SALM	51
ILUSTRACIÓN 16: IMAGEN REFERENCIAL DEL PROYECTO DE LUNDING ENERGY.	58
ILUSTRACIÓN 17: DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PATENTE WO/2021/078899	60
ILUSTRACIÓN 18: DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PATENTE WO / 2019/018226	60
ILUSTRACIÓN 19: PROYECTO BAM II.....	62
ILUSTRACIÓN 20: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	69
ILUSTRACIÓN 21: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS MODELO A	84
ILUSTRACIÓN 22: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS MODELO B.	85
ILUSTRACIÓN 23: CABLE SINTÉTICO TRENZADO CON NÚCLEO DE 12 CORDONES.....	88
ILUSTRACIÓN 24: EXTRACTO DEL CATÁLOGO PRODINSA DEL CABLE SALMONPLAST 6X17 AA.	90

ILUSTRACIÓN 25: CURVA DE POTENCIA DEL OLEAJE EN FUNCIÓN DE LA ALTURA Y PERIODO SIGNIFICATIVO.	93
ILUSTRACIÓN 26: MOTOR LINEAL LINMOT P10-70X320.	95
ILUSTRACIÓN 27: SERVO DRIVE E-1400-GP-QN-1S.....	95
ILUSTRACIÓN 28: RESISTOR DE MEDICIÓN.....	96
ILUSTRACIÓN 29: CÁMARA GOPRO HERO 5 BLACK.....	96
ILUSTRACIÓN 30: COMPARACIÓN ENTRE CURVAS OBTENIDAS, (I) EN NEGRO LA GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LA PALETA TIPO PISTÓN, (II) EN ROJO EL COMPORTAMIENTO TEÓRICO, (III) EN AZUL EL COMPORTAMIENTO OBTENIDO MEDIANTE RESISTORES.	97
ILUSTRACIÓN 31: EXPERIMENTOS CON 12.000 DATOS POR ARCHIVO.	98
ILUSTRACIÓN 32: EXPERIMENTOS CON 6.000 DATOS POR ARCHIVO.	98
ILUSTRACIÓN 33: COMPARACIÓN ENTRE EL PERIODO LEÍDO POR LOS RESISTORES Y EL PERIODO ESPERADO. ELABORACIÓN PROPIA.....	99
ILUSTRACIÓN 34: ESPECTRO DISTRIBUCIÓN JONSWAP.....	100
ILUSTRACIÓN 35: ARCHIVO GENERADO DE OLEAJE IRREGULAR MEDIANTE MATLAB.....	100
ILUSTRACIÓN 36: ARCHIVO LEÍDO DE LOS RESISTORES.....	101
ILUSTRACIÓN 37: LECTURA DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLA IRREGULAR GENERADA. ...	101
ILUSTRACIÓN 38: TRAYECTORIA DEL DISPOSITIVO WEC, MODELO A1 ESTADO E22.	102
ILUSTRACIÓN 39: DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	102
ILUSTRACIÓN 40: DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	103
ILUSTRACIÓN 41: VELOCIDAD HORIZONTAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	103
ILUSTRACIÓN 42: VELOCIDAD VERTICAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	103
ILUSTRACIÓN 43: VELOCIDAD TOTAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	104
ILUSTRACIÓN 44: ACELERACIÓN HORIZONTAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	104
ILUSTRACIÓN 45: ACELERACIÓN VERTICAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	104
ILUSTRACIÓN 46: ACELERACIÓN TOTAL DEL MODELO A1 ESTADO E22.....	105
ILUSTRACIÓN 47: FUERZA TOTAL SOBRE EL MODELO A1 ESTADO E22.....	105
ILUSTRACIÓN 48: POTENCIA OBTENIDA POR EL MOVIMIENTO DEL DISPOSITIVO MODELO A1 ESTADO E22.	105
ILUSTRACIÓN 49: COMPARACIÓN ENTRE OLA GENERADA A ESCALA PROTOTIPO Y ESCALA MODELO.....	106
ILUSTRACIÓN 50: RESPUESTA RAO PARA MODELO A1 PRUEBA P01 ALTURA 3,36 [CM] Y PERIODO 1,13 [SEG].	113

ILUSTRACIÓN 51: RESPUESTA RAO MODELO A1 PRUEBA P01 SINTÉTICO ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	115
ILUSTRACIÓN 52: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 CADENA ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	117
ILUSTRACIÓN 53: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	119
ILUSTRACIÓN 54: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	121
ILUSTRACIÓN 55: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	123
ILUSTRACIÓN 56: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	125
ILUSTRACIÓN 57: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	127
ILUSTRACIÓN 58: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	129
ILUSTRACIÓN 59: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	131
ILUSTRACIÓN 60: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	133
ILUSTRACIÓN 61: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	135
ILUSTRACIÓN 62: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	137
ILUSTRACIÓN 63: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	139
ILUSTRACIÓN 64: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	141
ILUSTRACIÓN 65: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	143
ILUSTRACIÓN 66: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	145
ILUSTRACIÓN 67: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	147
ILUSTRACIÓN 68: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	149

ILUSTRACIÓN 69: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	151
ILUSTRACIÓN 70: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	153
ILUSTRACIÓN 71: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	155
ILUSTRACIÓN 72: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	157
ILUSTRACIÓN 73: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	159
ILUSTRACIÓN 74: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	161
ILUSTRACIÓN 75: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	163
ILUSTRACIÓN 76: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	165
ILUSTRACIÓN 77: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	168
ILUSTRACIÓN 78: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	170
ILUSTRACIÓN 79: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 3,36 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	172
ILUSTRACIÓN 80: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	174
ILUSTRACIÓN 81: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	176
ILUSTRACIÓN 82: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	178
ILUSTRACIÓN 83: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	180
ILUSTRACIÓN 84: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	182
ILUSTRACIÓN 85: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A1 ALTURA 7 [CM] PERÍODO 1,909 [SEG].	184
ILUSTRACIÓN 86: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	189

ILUSTRACIÓN 87: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	191
ILUSTRACIÓN 88: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	193
ILUSTRACIÓN 89: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,4 [SEG].	195
ILUSTRACIÓN 90: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	197
ILUSTRACIÓN 91: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	199
ILUSTRACIÓN 92: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	201
ILUSTRACIÓN 93: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	203
ILUSTRACIÓN 94: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	205
ILUSTRACIÓN 95: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	209
ILUSTRACIÓN 96: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	211
ILUSTRACIÓN 97: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	213
ILUSTRACIÓN 98: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	215
ILUSTRACIÓN 99: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	217
ILUSTRACIÓN 100: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	219
ILUSTRACIÓN 101: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 ACERO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	221
ILUSTRACIÓN 102: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	223
ILUSTRACIÓN 103: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	225
ILUSTRACIÓN 104: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER DE ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	229

ILUSTRACIÓN 105: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	231
ILUSTRACIÓN 106: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	233
ILUSTRACIÓN 107: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHE ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	236
ILUSTRACIÓN 108: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	238
ILUSTRACIÓN 109: RESPUESTA RAO PRUEBA P01 CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	240
ILUSTRACIÓN 110: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	242
ILUSTRACIÓN 111: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	244
ILUSTRACIÓN 112: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER CADENA MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	246
ILUSTRACIÓN 113: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER DE ACERO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	250
ILUSTRACIÓN 114: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	252
ILUSTRACIÓN 115: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	254
ILUSTRACIÓN 116: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER ACERO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	257
ILUSTRACIÓN 117: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	259
ILUSTRACIÓN 118: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	261
ILUSTRACIÓN 119: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER ACERO MODELO B12 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	263
ILUSTRACIÓN 120: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER SINTÉTICO MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	265
ILUSTRACIÓN 121: RESPUESTA RAO PRUEBA P02 TETHER CADENA MODELO B1 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	267
ILUSTRACIÓN 122: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER DE ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	272

ILUSTRACIÓN 123: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,13 [SEG].	274
ILUSTRACIÓN 124: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	276
ILUSTRACIÓN 125: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,48 [SEG].	278
ILUSTRACIÓN 126: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER ACERO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	280
ILUSTRACIÓN 127: RESPUESTA RAO PRUEBA P03 HAWSER SINTÉTICO MODELO A2 ALTURA 5 [CM] PERÍODO 1,697 [SEG].	282

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LOS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO.	22
TABLA 2: NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA.	29
TABLA 3: RESUMEN DE VARIABLES ENCONTRADAS POR LA TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE	36
TABLA 4: RESUMEN DE LAS LÍNEAS DE AMARRE	47
TABLA 5: COMPONENTES DE AMARRE V/S COSTOS	48
TABLA 6: ESCALAMIENTO DIMENSIONAL DE SIMILITUD.	72
TABLA 7: PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN PRUEBA FONDEO ESTÁNDAR.	75
TABLA 8: PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN PRUEBA FONDEO SALM-1.	77
TABLA 9: PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN PRUEBA FONDEO SALM-2.	79
TABLA 10: TABLA RESUMEN DE ACTIVIDADES Y ENSAYOS.....	82
TABLA 11: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS ESTABLECIDOS PARA EL MODELO A MODELADO. 83	
TABLA 12: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS ESTABLECIDOS PARA EL MODELO B MODELADO. 83	
TABLA 13: PARÁMETROS DE CUERPO OBTENIDOS PARA EL MODELO A.	85
TABLA 14: PARÁMETROS DE CUERPO OBTENIDOS PARA EL MODELO B.....	86
TABLA 15: PARÁMETROS CABLE SINTÉTICO A PROTOTIPAR.	88
TABLA 16: VALORES MODELO DEL CABLE EMPLEADO.	89
TABLA 17: VALORES MODELO DEL CABLE REAL OBTENIDO EMPLEANDO NYLON.	89
TABLA 18: PARÁMETROS MODELO DEL CABLE DE ACERO EMPLEADO EN EL TRABAJO DE ESTEBAN PARRA.	89
TABLA 19: VALORES MODELO DEL CABLE DE ACERO EMPLEADO EN EL TRABAJO DE ESTEBAN PARRA.	90
TABLA 20: VALORES MODELO DEL CABLE REAL OBTENIDO EMPLEANDO ALAMBRE ACERADO.	90
TABLA 21: ESPECIFICACIONES CADENA ESCALA PROTOTIPO.	91
TABLA 22: VALORES MODELO DE LA CADENA SIN CONTRETE EMPLEADA EN EL TRABAJO DE ESTEBAN PARRA.	91
TABLA 23: VALORES MODELO DE LA CADENA REAL OBTENIDOS EMPLEANDO CADENA METÁLICA.....	92
TABLA 24: CARACTERÍSTICAS BOYA AUXILIAR SALM.	92
TABLA 25: CARACTERÍSTICAS DE OLEAJE PARA ALTURA Y PERIODO.....	93

TABLA 26: ESTADOS DE MAR A EMPLEAR EN EL ESTUDIO.	94
TABLA 27: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO.	186
TABLA 28: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO.....	187
TABLA 29: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO A2.....	206
TABLA 30: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO A2.	207
TABLA 31: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO B1.....	226
TABLA 32: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO B1.....	227
TABLA 33: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO A2 SALM-1.	247
TABLA 34: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO A2.	248
TABLA 35: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO B1 SALM-1.	268
TABLA 36: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO B1 SALM-1.	269
TABLA 37: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA MODELO A2 SALM-2.	282
TABLA 38: TABLA CON LOS VALORES MEDIOS PARA VELOCIDAD, ACELERACIÓN, POTENCIA, ANCHO DE CAPTURA Y DESEMPEÑO DE CAPTURA PARA ESCALA PROTOTIPO A2 SALM-2.	283

1. Introducción

A lo largo de la historia, el crecimiento de la humanidad ha venido acompañado con un aumento y continuo avance con respecto al uso de las diversas fuentes y tipos de energía. Sin embargo, durante mucho tiempo existían vagos conocimientos y nulas preocupaciones asociadas al uso indiscriminado de la mayor fuente energética empleada en el siglo XX, los combustibles fósiles, donde principalmente podemos encontrar al carbón y el petróleo como máximos exponentes de estos recursos. Actualmente nos encontramos en un camino de transición para la utilización de energías mas limpias como lo son las energías renovables no convencionales, siendo algunas de estas la energía solar, eólica, hidráulica entre otras, sin embargo, existe una alternativa cuya utilización sigue siendo escasa. Hablamos de la energía undimotriz o aprovechamiento de la energía almacenada y transportada por el oleaje marino, la cual presenta un alto potencial, especialmente en Chile debido a su amplia costa. De esto nace la oportunidad y necesidad de ampliar los conocimientos y mejorar las tecnologías para su aprovechamiento.

En esta tesis se profundizará el estudio de la relación e interacción energética entre un modelo de absorbedor puntual con respecto al oleaje y a una interacción dinámica con forzamiento externo producto a un sistema de anclaje o sujeción, basado en 3 trabajos realizados previamente para la determinación de parámetros iniciales y poder obtener un camino inicial para recorrer.

El primer trabajo realizado por David Olivos titulado “Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación” nos permite obtener un primer análisis de la interacción dispositivo-oleaje, en donde se empleo oleaje característico de Punta Curaumilla, ubicado en la quinta región, junto a un análisis geométrico de optimización de dicho dispositivo.

En segundo lugar, encontramos el trabajo de Yerko Tomelic titulado "Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso". El cual toma el análisis propuesto por David Olivos y procede a realizar un ajuste y comparación de forma experimental empleando un canal hidráulico de olas, empleando modelamiento lineal de oleaje regular, obteniendo un primer análisis experimental de la relación e interacción de un modelo a escala con el oleaje regular.

El tercer trabajo analizado corresponde a "Influencia del forzamiento externo en la interacción dinámica de boyas con olas en aguas someras" realizado por Esteban Parra, el cual se encarga de analizar los trabajos previos, entregando una primera

aproximación numérica de la interacción del forzamiento externo sobre la relación dispositivo-oleaje y además realiza la primera simulación empleando teoría de oleaje irregular.

En base a estos trabajos mencionados es que se nos permite contar con una base de conocimiento previo, permitiendo así el focalizar el motivo de estudio y los objetivos fundamentales, en donde se procede a realizar un estudio de la teoría de oleaje lineal irregular, siendo esta la suposición de superposición de varias olas regulares dando una forma sinusoidal irregular, es decir que no se cuente con una sola altura o frecuencia de oleaje empleando en su defecto valores estadísticos de estos parámetros permitiendo con esto contar con mayor precisión para el modelamiento del fenómeno de oleaje real.

Como desafíos para este trabajo experimental, se debe tener conocimiento y control de la generación de este tipo de oleaje irregular, en donde se buscará la obtención de este en un canal hidráulico de olas del tipo pistón.

Se debe estudiar, además la materialidad y el forzamiento realizado por diversos tipos de sistemas de anclajes para obtener control de su relación con la interacción dispositivo-oleaje.

Finalmente mediante lo descrito en estas líneas nos permite tener una idea de lo que se realizara a groso modo en este trabajo permitiendo entregar un poco mas de control y conocimiento con respecto a una ambiciosa fuente energética limpia y que permita principalmente la independencia con respecto al uso de combustibles fósiles.

2. Problemática

2.1. Contextualización

Actualmente, nos enfrentamos a grandes problemas, dentro de los cuales nos encontramos con el cambio climático, esta problemática que nos aqueja va íntimamente relacionada con la producción energética mundial, la cual en su mayoría proviene de fuentes de combustibles fósiles. Principalmente, estos combustibles se emplean en el sector de generación energética, la cual si bien durante el año 2020 sufrió una disminución producto de la pandemia [1] actualmente, los valores de producción energética en base a combustibles fósiles nuevamente esta al alza.

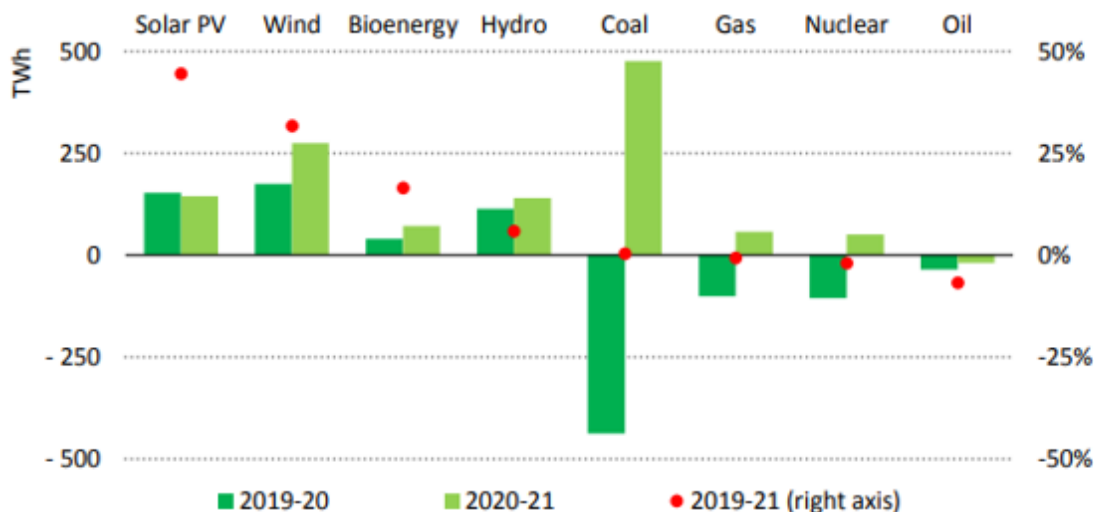


Ilustración 1: Cambios en la producción de energía en 2020 y 2021

Se prevé además un aumento en la demanda energética a nivel mundial, estimando un aumento en un 4,6% , lo que es realmente preocupante al observar la potencialidad que esto conlleva, donde los gases de efecto invernadero en la actualidad son provocados en su mayoría por el uso y quema de combustibles fósiles, siendo principalmente el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) entre otros, en donde podemos distinguir el potencial de calentamiento global o GWP de cada gas de efecto invernadero, unidad que cuantifica la contribución de dicho gas al calentamiento global, el cual se expresa en términos de un gas común para fines de comparación, es decir expresa el potencial de calentamiento expresado en términos que posee la misma masa de dióxido de carbono, siendo la unidad del GWP el [CO_2 equivalente]. En la tabla Y a continuación se señalan los principales gases de efecto invernadero donde encontramos el dióxido de carbono. Cabe señalar que el horizonte temporal es de 100 años, lo que significa que en este periodo de tiempo si se

añade CO_2 con la misma masa que algún otro elemento como por ejemplo el N_2O , este absorberá 298 veces mas el calor que la masa de CO_2 .

Tabla 1: Potencial de calentamiento global de los principales gases de efecto invernadero.

Tipo de GEI	GWP [CO_2eq]
Dióxido de Carbono (CO_2)	1
Metano (CH_4)	25
Óxido Nitroso (N_2O)	298
Hidrofluorocarbonos (HFC)	124 – 14.800
Perfluorocarbonos (PFC)	7.390 – 17.200
Hexafluoruro de azufre (SF_6)	22.800

Es por esto que se debe buscar formas de mitigar la emanación de estos gases, donde surgen como alternativa viable las energías renovables no convencionales (ERNC), permitiendo aportar energía limpia a la matriz tanto mundial como nacional sin generar huella de carbono, en donde queda en contraste la relación beneficios/costos que estas generan.

Alrededor del mundo existe una tendencia al alza en torno a las energías renovables de aproximadamente 6%, en donde podemos encontrar a Chile dentro de los primeros puestos de crecimiento, especialmente gracias al gran potencial con el que se cuenta para el aprovechamiento de este tipo de energías, sumándole a esto el plan de descarbonización con el que cuenta la nación, cuya finalidad es lograr para el año 2050 la independencia total con respecto al uso de carbón como matriz energética.

En Chile la matriz sigue estando altamente ligada a las centrales de generación eléctrica en base a carbón, gas natural, Diesel entre otras, sin embargo, la participación dentro de la generación energética viene siendo de un 21,7% en base a ERNC, principalmente solar fotovoltaica y eólica contando con una capacidad instalada de 8.604 [MW] equivalentes al 33,6% del total instalado, con fuente en la asociación chilena de energías renovables y almacenamiento (ACERA A.G)

Como se ya se mencionó, Chile posee un gran potencial en cuanto a las energías renovables no convencionales, alcanzando los 1.865 [GW] entre energía eólica, solar e hidroeléctrica [6]. Sin embargo, estas fuentes de energía poseen una alta dependencia en cuanto a las condiciones climáticas, por lo que según un estudio realizado por Baird & Associates S.A. el recurso más importante para su aprovechamiento es la energía undimotriz proveniente de la energía transportada y almacenada en las olas, en donde el potencial bruto alcanza los 240 GW, los cuales se distribuyen en los más de 4.200 [km] de costa, siendo Chile el país que posee el mayor potencial en cuanto a este recurso. Este recurso se aprecia en cada sector del país, alcanzando una densidad promedio de 20 [kW/m] en la zona norte y 50 [kW/m] en la región de los Lagos. Lo

que resulta interesante al observar el potencial de la energía undimotriz, la cual se espera teóricamente alcance los 32.000 [TWh/año].

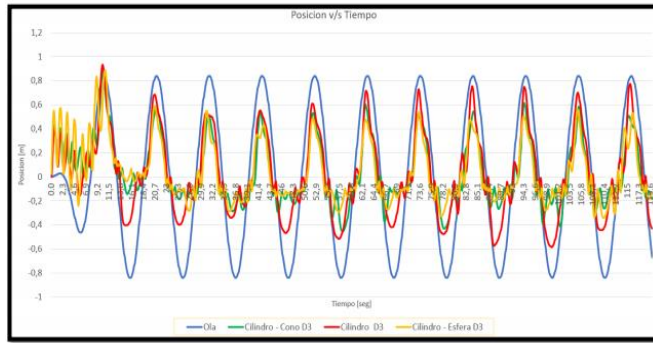
Sin embargo, el potencial bruto estimado a nivel mundial alcanza los 500 [GW], lo cual, en contraste con el potencial teórico del país, posiciona a Chile como el poseedor de la mitad de dicho potencial global. Sin embargo, las tecnologías y conocimientos sobre esta materia siguen siendo incipientes permitiendo tan solo alcanzar una penetración del 0.002% dentro de la matriz nacional, dando la oportunidad a nuevos desafíos que permitan aprovechar de mejor manera este recurso, logrando la relación costo/beneficio más propicia para su utilización.

2.2. Antecedentes

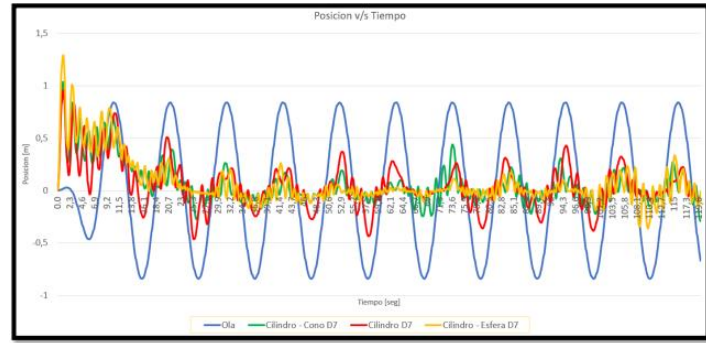
Para centrar el estudio mostrado a continuación es necesario tener una base cimentada en trabajos e investigaciones anteriores, por lo que se procederá a estudiar el desarrollo del estudio de boyas undimotrices.

Comenzando primeramente por el trabajo de David Olivos, basándonos en el “estudio numérico experimental y optimización de geometría para la extracción de energía undimotriz”, en donde primeramente se establece la ubicación de estudio junto al estudio de la teoría correspondiente, hallando la relación entre las tecnologías y métodos actuales con respecto a , permitiendo así obtener un modelado general del problema, logrando adquirir de una manera clara las condiciones de trabajo y los supuestos teóricos para el estudio de caso, los cuales primeramente simplifican el análisis de fuerzas externas con respecto a la interacción boya-oleaje, centrándose completamente en la geometría del elemento oscilante. Posteriormente, surgen los primeros diseños experimentales de este tipo de mecanismos enfocándose en comparar tres tipos de geometrías distintas, específicamente la combinación cilindro-cono, cilindro completo y cilindro-esfera, de las cuales cada una se diferencia en distintas dimensiones, modificando parámetros fundamentales para cada una como lo son el diámetro del cilindro, la masa y el volumen de los objetos. Con esta base de trabajo realizado se procedió a estudiar mediante la simulación numérica empleando el módulo ANSYS Aqwa, otorgando las condiciones de borde acordes a aguas someras. De esta modelación se desprenden las primeras interpretaciones y conclusiones.

X



a)



b)

Ilustración 2: a) Gráfico de amplitud según cada geometría para diámetro igual a 3 metros. b) Gráfico de amplitud según cada geometría para diámetro igual a 7 metros.

Gracias a este estudio se desprende que a menor diámetro se alcanzan mayores amplitudes del elemento, alcanzando a la amplitud original de la ola, junto a que se estima que la geometría optima viene siendo el cilindro puro.

Además de esto, se tiene la relación entre la teoría de absorbedor puntual, la cual permite relacionar el factor de amortización con la amplitud generada, a mayor factor, menor amplitud del absorbedor.

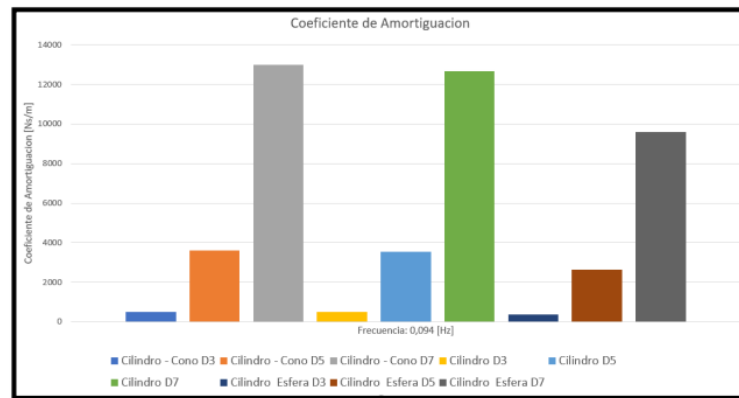


Ilustración 3: Factor de amortización para cada geometría y dimensión

Por lo que se concluye de forma general que la geometría se optimiza de tal forma que entregue un mayor volumen sumergido. Sin embargo, existe una relación entre la masa agregada y el volumen sumergido, por lo que se debe comprobar experimentalmente la validación de esta investigación.

Para esto, se estudia la tesis de Yerko Tomelic, "Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso". En donde esta investigación se centra en la comprobación experimental de un modelo basado en la geometría optima hallada por David Olivos, en donde se emplea técnicas de análisis dimensional y leyes de semejanza para poder prototipar de una forma económica y practica los elementos oscilantes. Para lo cual se utilizarán 2 modelos, el primero se centrará en la boya ya encontrada con una escala 1:50 mientras que el segundo invertirá la relación diámetro/altura para evaluar el desempeño al variar estos parámetros. Además de evaluar la relación de volumen sumergido respecto al volumen total, añadiendo masa a uno de los prototipos.

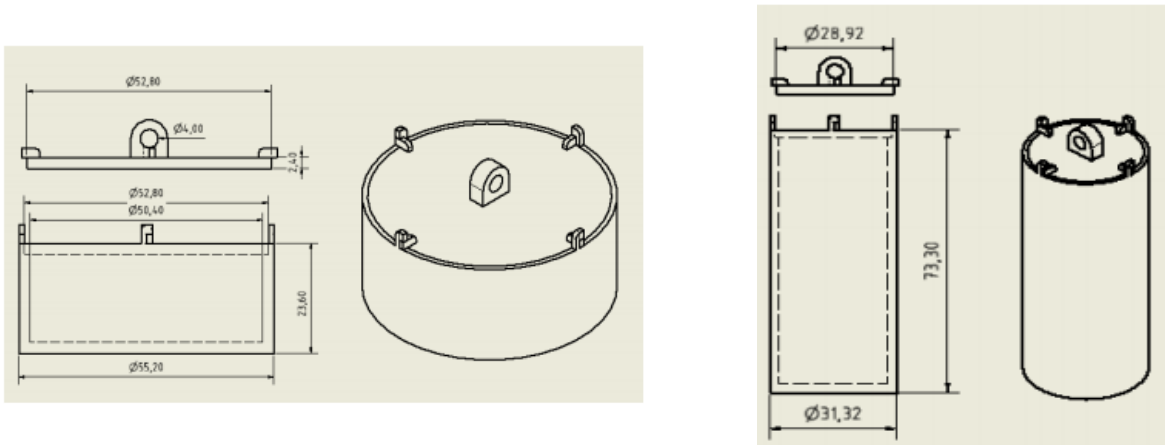


Ilustración 4: Modelos a emplear para el estudio experimental.

Para obtener una experiencia satisfactoria se debe planificar los objetivos específicos de pruebas puntuales de estudio de diversos parámetros, determinando con esto los parámetros a observar y medir.

Por último, se empleará el trabajo de tesis de Esteban Parra, "Influencia del forzamiento externo en la interacción dinámica de boyas con olas en aguas someras". De este estudio se añade a la investigación la simulación numérica de fuerzas externas a la interacción principal boya-ola, para esto se analizará la nueva teoría con respecto al movimiento quitando las simplificaciones previas. Como primera interacción, se estudia los efectos de la catenaria o anclaje de la boya, analizando distintas características de dichos elementos como la linealidad o no del elemento, la articulación o rigidez de la catenaria, el tipo de conexiones entre otros, todo esto basándose en las libertades que otorga el módulo ANSYS AQWA.

Se investigaron dos casos, uno donde la boya está directamente anclada al fondo marino y la segunda se está anclada a una segunda estructura de sujeción.

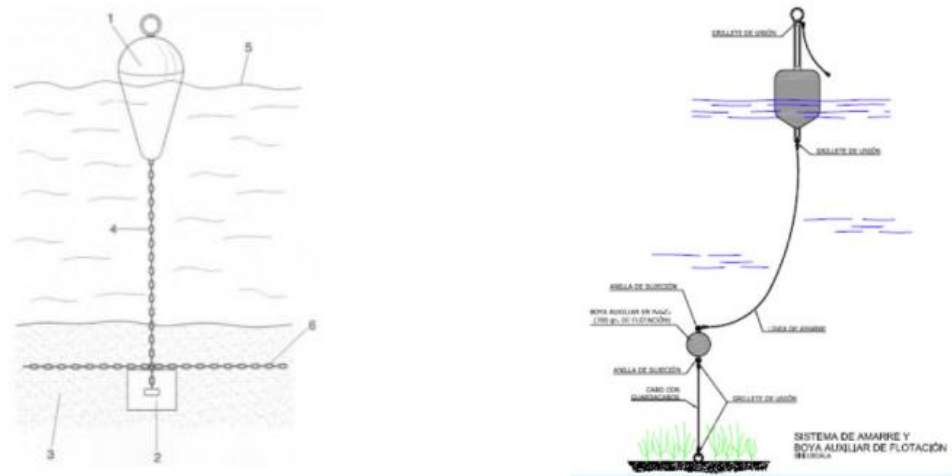


Ilustración 5: Conexiones disponibles dentro del software ANSYS AQWA

Con esta información previamente elegida, se determinará metodológicamente las variables a elegir tanto de geometría como de material y de marco teórico a incluir, analizando con esto las variables a medir en cuestión. Observando las siguientes variables adjuntas.

- Cinemática
 - Desplazamiento
 - Velocidad
 - Aceleración
- Dinámica
 - Masa total de la boya
 - Fuerzas inerciales
 - Froud-Krylov
 - Difracción
 - Operador de amplitud
 - Amortiguación de la radiación y masa agregada

2.3. Planteamiento de la problemática

Como bien sabemos, en la actualidad la energía mareomotriz y undimotriz se encuentran en una etapa incipiente en cuanto a su desarrollo e investigación. Específicamente la tecnología para convertir la energía derivada de las olas se encuentra aún lejos de alcanzar niveles comerciales. Considerando el potencial que posee tanto en Chile como en el mundo este tipo con respecto a la energía undimotriz

como sus ventajas con respecto a otras fuentes energéticas, es que surge la necesidad de seguir investigando las formas de aprovechamiento energético con relación al mar, especialmente con la energía proveniente de las olas. Con la finalidad de lograr ventajas competitivas tanto en aumento de eficiencia como disminución de costos de producción e instalación, como también otorgar un mayor tiempo de vida útil efectiva.

Junto a esto se tiene la necesidad de continuar con los avances entregados por los colegas mencionados en la sección anterior, donde se necesita continuar planteando el cómo se ve afectado la interacción directa boya-ola por forzamiento externo debido al sistema de anclaje. Pudiendo ser este un anclaje directo de la boya con el fondo marino, o bien un anclaje a una boya o estructura auxiliar.

Continuando con la investigación previa, nace la necesidad de concluir mediante el análisis experimental el estudio del forzamiento externo para boyas en aguas someras, estudiar de manera práctica, en base a ensayos en un canal de olas el comportamiento oscilatorio cuando se emplean sistemas de anclajes y lograr comprender de primera forma el como una o más catenarias, una segunda boya, entre otros elementos influyen en el aprovechamiento energético, donde urge la necesidad de analizar la generación de fuerzas de anclaje producto a la formación de la capa límite, comparando dichos resultados con los hallados numéricamente, permitiendo otorgar una mayor exactitud a los avances necesarios.

Para finalizar el presente estudio tiene la finalidad de hallar la relación e interacción de los diversos tipos de amarres, aportando en el desafío ingenieril que representa el poder controlar los parámetros en un sistema irregular.

3. Marco teórico

3.1. Oleaje

Para comenzar con el estudio es necesario comprender el fenómeno del oleaje, en donde las olas son formadas por la acción del viento por sobre la superficie del fluido, el viento a su vez es generado por la radiación solar, además de que el sol genera una radiación incidente por lo que las olas vienen siendo a su vez una forma de almacenamiento y transporte de energía proveniente del sol. El viento genera rozamiento entre el aire y la superficie del agua, el cual produce arrastre de las partículas de agua, perdiendo esta su lisura. De esto proviene el oleaje, ya que al perderse la lisura comienza a intensificarse el efecto del rozamiento aumentando el tamaño de las olas.

En consecuencia, de esto es que el oleaje contiene tanto energía cinética como energía potencial, en donde se presentan dos tipos grandes de movimiento, el primero circular o elíptico debido al choque de partículas arrastradas y un movimiento ondulatorio ya que existe una traslación de avance, como también existen zonas donde se eleva o disminuye la altura con respecto a un eje fijo.

Existen distintos tipos de olas, donde para su clasificación se pueden analizar diversas formas de ordenar, pese a esto, las olas se clasifican principalmente en dos dependiendo de su movimiento, estas son:

- Ondas estacionarias:

Estas ondas son todas aquellas que poseen una clara tendencia a seguir un movimiento que permita identificar puntos nodales o de movimiento cero de los puntos donde existe movimiento máximo o puntos ventrales.

- Ondas transitorias:

Estas ondas son todas aquellas en donde no existe una tendencia fija, y los puntos de los nodos varían con el tiempo.

Esta clasificación agrupa a los diversos grupos o criterios de clasificación de ondas, como lo son:

- De acuerdo a la fuerza que las perturba:
 - Generadas por el viento.
 - Generadas por terremotos y tormentas.
 - Generadas por atracción del sol y la luna.
- De acuerdo al tiempo de aplicación de las fuerzas perturbadoras:

- Ondas libres.
- Ondas forzadas.
- De acuerdo al período de duración:
 - Olas de periodo largo.
 - Olas de gravedad.
 - Olas capilares.
- De acuerdo a la longitud de onda:
 - Ondas largas.
 - Ondas cortas.

Todos estos tipos de olas se pueden agrupar en la siguiente figura N°6, donde se relaciona el tipo de onda, su periodo, su nivel energético y su periodo de duración.

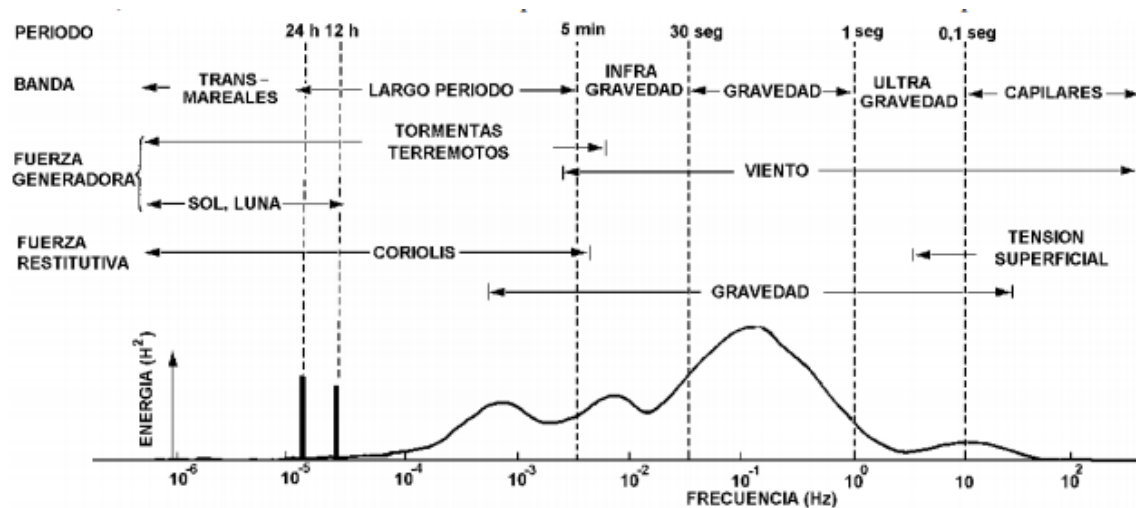


Ilustración 6: Relación entre los distintos grupos de ondas y su nivel energético.

Finalmente se debe comprender que es una ola y sus diversos componentes, estos componentes vendrían siendo.

Tabla 2: Nomenclatura y simbología.

Componente	Simbología	Descripción
Cresta		Punto más alto de la ola
Valle		Punto más bajo de la ola
Nodo de agua quieta “Still Water Level”	swl	Superficie del agua en donde no hay olas

Altura	H	Distancia entre la cresta y el valle
Amplitud	A	Distancia entre el swl y la cresta o valle
Largo	L	Distancia entre dos crestas sucesivas o dos valles
Periodo	T	Tiempo entre crestas sucesivas
Peralte	s	H/L, relación entre la altura con la longitud de onda, pendiente de la onda.
Frecuencia	f	1/T
Frecuencia angular	σ	$2*\pi/T$
Celeridad	c	Velocidad de una única ola
Numero de onda	k	$2*\pi/L$
Elevación del nivel de agua “Water Surface Elevation”	η	Elevación del agua en función del tiempo y la distancia horizontal
Profundidad	d	Distancia desde el swl hasta el fondo marino
Distancia bajo el swl	Z	Es la altura del fondo marino al swl
Profundidad Local	H	$h(x) = \eta(x) + d(x)$

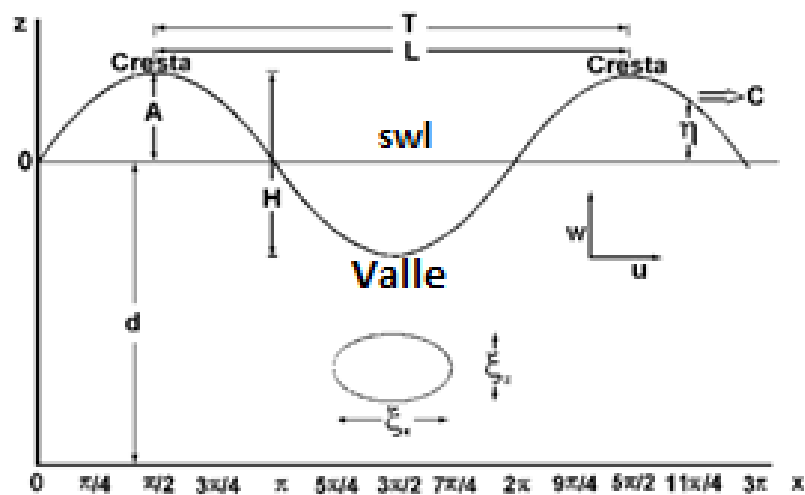
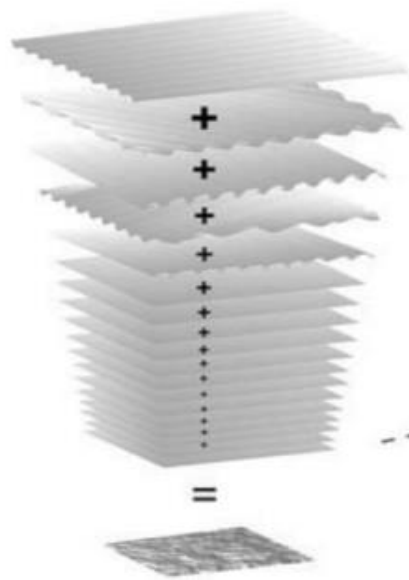


Ilustración 7: Descripción componentes de una ola.

3.1.1. Oleaje irregular

Para el estudio más certero del comportamiento de las olas, específicamente en zonas cercanas o medianas a la costa, se debe considerar un comportamiento de onda no regular, es decir con amplitud, periodo, largo variable. Esto se puede producir diversos a distintos factores como la consideración de los efectos de la profundidad o la reflexión o refracción, entre otros factores.

Esta teoría de oleaje irregular plantea considerar el oleaje como la superposición de un océano totalmente desarrollado, es decir, el oleaje generado por un viento constante durante un tiempo suficiente, y la generación de oleaje debido al viento en cada momento, donde se obtiene olas con forma de onda armónica.



$$\begin{cases} \eta_1(t) = A_1 \cdot \text{sen}(w_1 \cdot t + \varphi_1) \\ \eta_2(t) = A_2 \cdot \text{sen}(w_2 \cdot t + \varphi_2) \\ \vdots \\ \eta_n(t) = A_n \cdot \text{sen}(w_n \cdot t + \varphi_n) \end{cases}$$

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^n \eta_k$$

Ilustración 8: Formación de oleaje irregular

3.2. Teoría oleaje irregular

Ahora que comprendemos ciertos parámetros sobre las olas y en qué consisten, debemos plantear la base teórica de este fenómeno, para lo cual nos centraremos en la teoría de Stokes de segundo orden, siendo esta una teoría no lineal, para lo cual primeramente se debe comprender los cimientos teóricos y las condiciones de contorno pertinentes.

3.2.1. Teoría de Stokes de primer orden

Primeramente, se debe comenzar estableciendo ciertas suposiciones que nos permitan simplificar y plantear las ecuaciones. Comenzando el análisis, hay que considerar que el estudio de las olas como fenómeno dependiente de gran número de variables resulta

sumamente complejo, por lo que resalta la necesidad de establecer los supuestos o hipótesis necesarias [7]:

- Primeramente, se debe considerar una ola regular, es decir, que no existan perturbaciones, obstáculos y que la ola se propague constante en el tiempo.
- La ola es bidimensional, es decir que tenga un eje de propagación y un eje de movimiento vertical.
- Fluido es incompresible, es decir que la densidad permanezca constante.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

- Fluido es no viscoso, es decir, se desprecian los efectos de la viscosidad.
- Flujo es irrotacional, lo que permite interpretar como flujo ideal, por lo que existe una función potencial de velocidad.

$$\nabla \times V \quad (2)$$

Estas simplificaciones nos permitirán abordar de manera más sencilla las ecuaciones que gobiernan el sistema.

Las ecuaciones básicas a emplear corresponden a las ecuaciones de Navier-Stokes

- Continuidad o conservación de masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3)$$

- Conservación de momento general.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla \cdot (V) \right) = \frac{1}{\rho} \nabla p + g \quad (4)$$

Esta ecuación se puede expandir en sus términos que corresponden a las dos direcciones que se evalúan.

- Conservación de momento en x

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5)$$

- Conservación de momento en z.

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -g - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Para la obtención de expresiones analíticas simplificadas se procede a emplear la teoría de flujo potencial, cuyo resultado final viene siendo la ecuación de Laplace, obteniendo así relaciones que nos permitan estudiar el fenómeno irregular del oleaje.

Primeramente, planteamos la relación del campo de velocidades ($V = (u, w)$) con la función escalar de potencial de velocidades, función que se expresa como $\phi(x, z, t)$

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad w(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (7)$$

Analizando ahora la ecuación de Laplace obtenemos la siguiente expresión.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Donde ∇^2 es el operador Laplaciano en coordenadas cartesianas. La funcionalidad de trabajar bajo estas condiciones radica en que se debe resolver las ecuaciones en torno a la escalar $\phi(x, z, t)$ y luego despejar según corresponda el campo de velocidades.

Luego tenemos las relaciones para el campo de aceleraciones ($a = (a_x, a_z)$) y para el campo de desplazamiento ($\zeta = (\zeta_x, \zeta_z)$) representados por las expresiones (9) y (10) respectivamente

$$a_x(x, z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad a_z(x, z, t) = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (9)$$

$$\zeta_x(x, z, t) = \int u dt = \int \frac{\partial \phi}{\partial x} dt \quad ; \quad \zeta_z(x, z, t) = \int w dt = \int \frac{\partial \phi}{\partial z} dt \quad (10)$$

Al trabajar bajo la teoría de flujo potencial y empleando la ecuación de Laplace, trabajamos sobre una ecuación diferencial parcial elíptica en torno a dos variables y de segundo orden, por lo que se requieren de 4 condiciones de borde para poder hallar soluciones.

Condiciones de borde

- La primera condición de borde que se debe aplicar corresponde a la condición de borde cinemática del fondo, la cual para la teoría de Stokes viene siendo que las líneas de flujo son horizontales y constantes.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} |_{(z = -h)} = 0 \quad (11)$$

Esta condición no incluye fenómenos sísmicos o perturbaciones generadas por tsunamis.

- La segunda condición de borde corresponde a la condición cinemática en la superficie, la cual relaciona la desnivelación instantánea con la altura de la superficie, la cual se expresa como $z = \eta(x, t)$, de lo que se deduce la siguiente expresión.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (12)$$

El componente no lineal donde está la multiplicación de variables se puede despreciar bajo el supuesto de que el oleaje es infinitesimal, lo cual bajo este mismo supuesto se puede evaluar un nivel estático, evaluando la función en torno a un nivel, de lo que se puede simplificar como se aprecia en la siguiente expresión

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{en } z = 0; \quad \eta = 0 \quad (13)$$

- La tercera condición de borde corresponde a una condición dinámica de la superficie, para lo cual se emplea la ecuación de Bernoulli en la interfaz o en la superficie de la ola empleada como nivel estático. La ecuación viene dada por:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{1}{2g} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = B \quad (14)$$

Lo cual como estamos evaluando en el nivel estático asumimos $z = 0$, como también se puede asumir el trabajar con presión atmosférica constante y con el valor de presión manométrica, es decir, $p = 0$ para la superficie es decir $p = 0$ para $z = \eta(x, t)$.

Además, al trabajar con la ecuación (8), podemos despreciar los términos no lineales, además para su estudio e inclusión se requieren de metodologías y técnicas complejas que se escapan del alcance de este estudio. Donde finalmente, la expresión (14) se puede ver reducida como:

$$\eta - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = B \quad \text{en } z = 0 \quad (15)$$

- La cuarta condición necesaria viene siendo la condición de periodicidad, la cual asume que la ola es periódica tanto en el tiempo como en el espacio, específicamente en la coordenada horizontal o de desplazamiento, por lo que el potencial de velocidades asume dicha condición.

$$\phi(x, z, t) = \phi(x + \lambda, z, t) \quad \text{o} \quad \phi(x, z, t) = \phi(x, z, t + T) \quad (16)$$

Solución de las condiciones de borde

Para poder emplear las condiciones de borde previamente descritas dentro de las ecuaciones de Laplace y de Stokes, se recurre al método de separación de variables, donde la función potencial viene siendo escrita analíticamente como:

$$\phi(x, z, t) = F(z) \cdot G(x, t) \quad (17)$$

Donde las funciones que componen la ecuación 17 vienen siendo:

- F(z) representa a la función hiperbólica que modela los campos cinemáticos y dinámicos de la profundidad

$$F(z) = C \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \quad (18)$$

Donde C corresponde a una constante a obtener según las condiciones de borde.

- G (x, t) representa el movimiento de una onda que se desplaza en el sentido x positivo.

$$A \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (19)$$

Donde A corresponde a una constante a obtener según las condiciones de borde.

Con la teoría aplicada hasta el momento integrando las condiciones de borde y la función potencial obtenemos la ecuación de dispersión de frecuencias, permitiéndonos relacionar diversos parámetros relevantes.

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kh) \quad (20)$$

La ecuación 20 puede expresarse también en términos de la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (21)$$

Además, para la función de la elevación del nivel de agua para la teoría lineal viene dada por

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (22)$$

Donde finalmente la función potencial viene dada por:

$$\phi(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (23)$$

Ahora para analizar de mejor forma las relaciones encontradas procederemos a evaluar el comportamiento de las soluciones encontradas según la profundidad relativa, la cual viene dada por.

$$\mu = \frac{h}{\lambda} \quad (24)$$

- Aguas someras: Para este caso corresponde a una relación de $\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{25}$
- Aguas intermedias: Es una zona de transición entre las aguas someras o Shallow Waters y las aguas profundas o Deep Waters. $\frac{1}{25} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$
- Aguas profundas: Para este caso se tiene una relación de $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$

De estas relaciones se deduce las asíntotas de la función $\tanh(x)$, en donde se tiene que:

- $\lim_{x \rightarrow 0} \tanh x = x$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \tanh x = 1$

Energía del oleaje

Como se mencionó anteriormente, el oleaje es producto de transferencia energética entre el viento y el mar, y de la energía proveniente del sol sobre el mar. De esto podemos observar que las olas cuentan tanto con energía potencial E_p , ya que es una fuente de almacenamiento energético y energía cinética E_c .

$$E_t = E_p + E_c = \frac{1}{2} \rho g a^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda \quad (25)$$

Siendo

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (26)$$

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (27)$$

Donde finalmente podemos observar la potencia media (P) en $\left[\frac{kW}{m}\right]$ viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi} \quad (28)$$

Por lo que finalmente podemos observar los resultados obtenidos de las diversas variables según la profundidad relativa como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 3: Resumen de variables encontradas por la teoría lineal del oleaje

Profundidad relativa	$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{25}$ Aguas someras	$\frac{1}{2} > \frac{h}{\lambda} > \frac{1}{25}$ Aguas intermedias	$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$ Aguas profundas
Longitud de onda (λ)	$\sqrt{gh}T$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidad de fase o celeridad (c)	$\sqrt{gh}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\frac{gT}{2\pi}$

Componente horizontal de velocidad (u)	$\frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - wt)$	$\frac{\pi H \cosh(k(z+h))}{T \sinh(kh)} \cos(kx - wt)$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - wt)$
Componente vertical de velocidad (w)	$\frac{\pi H (z+h)}{T h} \sin(kx - wt)$	$\frac{\pi H \sinh(k(z+h))}{T \sinh(kh)} \sin(kx - wt)$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - wt)$
Posición de las partículas en x	$-\frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - wt)$	$-\frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - wt)$	$-\frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - wt)$
Posición de las partículas en z	$\frac{H \sinh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - wt)$	$\frac{H \sinh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - wt)$	$\frac{H \sinh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - wt)$
Presión dinámica.	$\rho g \frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - wt)$	$\rho g \frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - wt)$	$\rho g \frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - wt)$

De la tabla señalada podemos obtener la trayectoria de las partículas, donde podemos señalar que para aguas profundas la trayectoria posee una órbita circular, en donde mientras se cumpla con la relación que indica que todo efecto externo es despreciable mientras el objeto se encuentre a una distancia mayor a la mitad de la longitud de onda, mientras que para el caso de aguas someras, la superficie o fondo marino tiene efectos sobre el comportamiento de las orbitas siendo estas cada vez más elípticas. Estas relaciones se pueden ver reflejadas en la siguiente imagen.

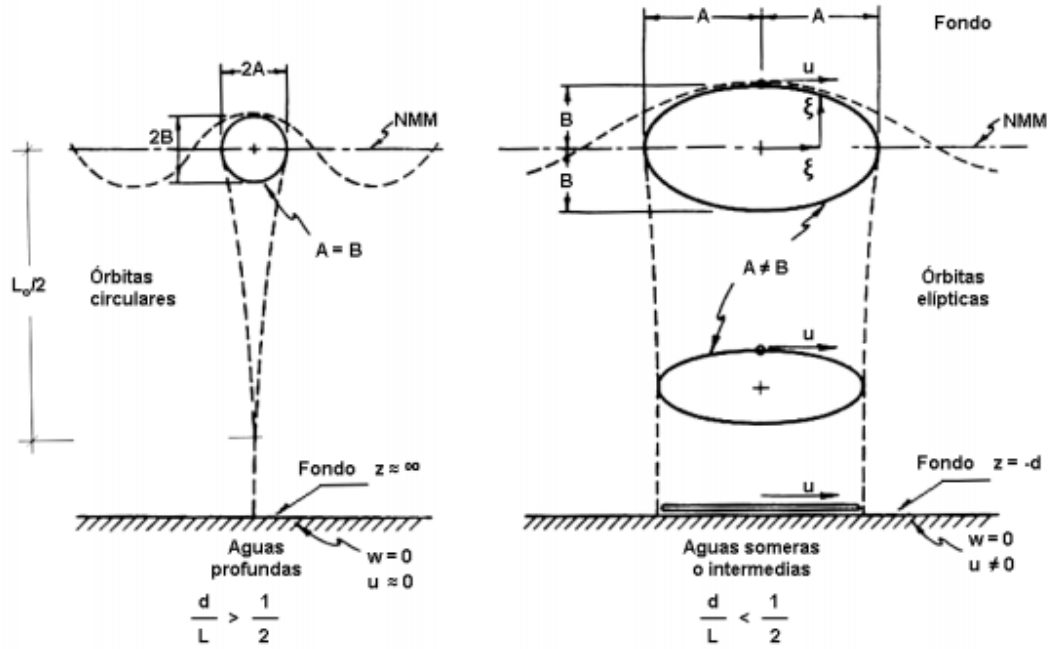


Ilustración 9: Comparación de la trayectoria de las partículas para el caso de aguas profundas(izquierda) y el caso de aguas someras(derecha)

3.2.2. Teoría de Stokes de segundo orden

Ahora bien, para comprender la teoría de Stokes de segundo orden se debe considerar el movimiento del oleaje como un espectro de olas de distintos periodos y alturas. Esta teoría de segundo orden implica el considerar las perturbaciones y movimiento de las olas como una serie, de las cuales para este caso se emplea hasta el segundo término, la cual bajo ciertos criterios cuenta con una alta satisfacción en torno a los resultados. Para el caso de estudio la desnivelación para aguas someras viene dada por:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2}{k^2 h^3} \cos(2(kx - \omega t)) \quad (29)$$

Donde aplicando los mismos procedimiento que, para el caso lineal, podemos hallar relaciones para encontrar los principales parámetros.

Para el caso de la longitud de onda y de la celeridad son las mismas expresiones encontradas para el caso de primer orden o lineal.

Para el caso del componente horizontal de la velocidad obtenemos la siguiente expresión:

$$u(x, t) = \frac{\omega H}{2kh} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{\omega H^2}{k^3 h^4} \cos(2(kx - \omega t)) \quad (30)$$

Para el caso de estudio de aguas someras las expresiones de energía y potencia de la ola viene siendo:

$$E_T = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda * \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (31)$$

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 c_g}{8} * \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (32)$$

Donde aparece el termino c_g o celeridad de grupo viene dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2k_w h}{\sinh(k_w h)} \right) \quad (33)$$

Para el caso de aguas someras este valor de celeridad de grupo tiende a ser simplemente la celeridad de onda.

3.3. Movimiento de un cuerpo en el mar

Para el estudio del aprovechamiento energético de boyas undimotrices se debe tener en cuenta que un cuerpo que permanece suspendido libremente en el mar posee 6 grados de libertad, los cuales se dividen en 2 divisiones generales.

Primeramente, podemos analizar tres grados de libertad asociados a la traslación:

- Surge u oleaje: Corresponde al movimiento paralelo al eje horizontal en la misma dirección que el avance de la ola. Se produce por una excitación en la dirección del eje longitudinal desde su punto de equilibrio.
- Sway o balanceo: Corresponde al movimiento paralelo al eje horizontal transversal del cuerpo con respecto a la dirección de avance de la ola. Se produce debido a una excitación desde la posición de reposo con respecto al eje transversal desde su punto de equilibrio.
- Heave o de “tirón”: Corresponde al movimiento de vaivén oscilatorio paralelo al eje vertical del cuerpo. Se produce debido al desplazamiento de su posición con respecto a la línea de reposo.

Luego de analizar la traslación nos encontramos con tres grados de libertad asociados a la rotación:

- Roll o alabeo: Corresponde al movimiento de rotación que ocurre en el eje horizontal longitudinal al avance de la ola, generando un “giro” hacia los costados del cuerpo con respecto a este mismo eje.
- Pitch o cabeceo: Como su nombre lo sugiere, este movimiento de rotación ocurre con respecto al eje horizontal transversal al movimiento de avance de la ola. Tiende a verse como el cuerpo intenta rotar desde “la cabeza”.
- Yaw o de guiñada: Corresponde al movimiento oscilatorio rotacional sobre el eje vertical del cuerpo.

En la figura x se puede apreciar cómo actúan los 6 grados de libertad sobre el cuerpo.

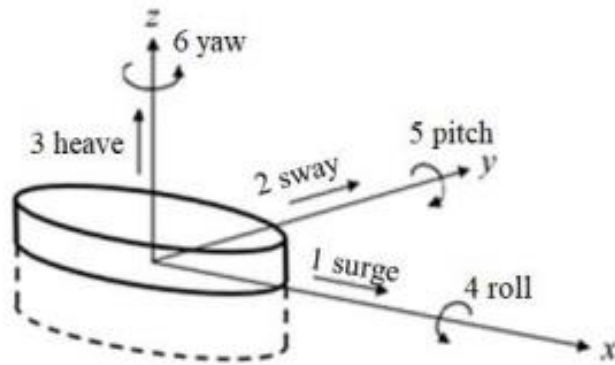


Ilustración 10: Grados de libertad de un cuerpo suspendido en el mar.

Para el caso de estudio de una ola incidente sobre un cuerpo flotante anclado se puede representar como un sistema masa-resorte amortiguado de un grado de libertad asociado al eje vertical del cuerpo.

3.3.1 Fuerzas involucradas

El sistema hidrodinámico de estudio contemplará las fuerzas relacionadas con la interacción de un cuerpo rígido flotante con el fluido y con las fuerzas externas generadas por el sistema de anclaje y por el circuito de potencia o *power take off*.

Las distintas fuerzas que interactúan se pueden clasificar en fuerzas de superficie, fuerzas de cuerpo y fuerzas externas.

3.3.1.1 Fuerzas de superficie

Estas fuerzas corresponden a la fuerza de excitación producto de la ola, también llamadas fuerzas de *scattering* y es la fuerza que el cuerpo experimentaría si estuviera fijo en su posición. Esta fuerza se descompone en dos componentes, una dependiente de las olas incidentes y la otra dependiente del fenómeno de olas difractadas denominadas fuerza de Froud-Krylov y la fuerza de difracción.

- Fuerza de Froud-Krylov: Esta fuerza se obtiene bajo el supuesto que el cuerpo es lo suficientemente pequeño para no afectar el campo de presiones propio de

la ola, considerando esta fuerza netamente la integración del campo de presión de la ola incidente, despreciando los efectos de difracción y radiación.

$$F_{F-K} = -\rho \cdot \iint_A \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \cdot n \cdot \delta S \quad (34)$$

Donde:

- ρ : Densidad de agua de mar
- ϕ_w : Potencial de la ola
- t : tiempo
- n : Fuerza normal a la superficie del mar
- S : superficie del cuerpo.
- Fuerzas de difracción: Esta fuerza es la generada por la difracción de las olas, debido al choque de la ola incidente con el cuerpo flotante.

$$F_{dif} = -\rho \cdot \iint_A \frac{\partial \phi_{dif}}{\partial t} \cdot n \cdot \delta S \quad (35)$$

Donde:

- ϕ_{dif} : Potencial de la ola difractada.

3.3.1.2 Fuerzas de cuerpo

Las fuerzas de cuerpo son las relacionadas al volumen o masa de los cuerpos en contacto, siendo las para este caso las siguientes:

- Fuerza de restauración hidrostática: Esta fuerza se basa en el principio de Arquímedes, el cual indica que la fuerza de empuje se produce debido al volumen de agua desplazado por su densidad, este empuje es ocasionado debido a la presión hidrostática del fluido en el que está inmerso el cuerpo.

$$F_{empuje} = F_{arq} = \rho * g * V_d(t) \quad (36)$$

Donde:

- $V_d(t)$: Volumen desplazado por el cuerpo en función del tiempo.

Al estar en un movimiento de oscilación la fuerza de restauración, aparece el termino de Acoplamiento resonante, el cual consiste en pocos términos a la fuerza ejercida por el peso, quedando la siguiente expresión.

$$F_{res} = F_{arq} - F_g = \rho * g * V_d(t) - m * g \quad (37)$$

$$F_{res} = -k * Z \quad (38)$$

Donde el factor de restauración hidrostática k viene dado por:

$$k = \rho \cdot g \cdot A_w \quad (39)$$

Donde:

- A_w : Área plana de la línea de agua.

- Fuerza de radiación y masa agregada: Esta fuerza está asociada al movimiento oscilatorio de un cuerpo considerando ausencia de un campo de ola incidente. La oscilación del cuerpo genera olas por radiación, siendo una superposición de olas irradiadas, siendo la fuerza de reacción que afecta al cuerpo la denominada fuerza de radiación. Esta fuerza se compone primeramente por la fuerza generada por el movimiento de agua producto la oscilación del cuerpo, mientras que el segundo termino tiene relación con el factor de amortiguación o coeficiente de amortiguación, esto bajo el supuesto de un estado sinusoidal.

$$F_{rad} = -m_{rad} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - R_{rad} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad (40)$$

Donde:

- m_{rad} : Masa agregada o desplazada del fluido
- R_{rad} : Coeficiente de amortiguación
- Fuerzas viscosas o de arrastre: Esta fuerza está asociada a la ejercida por el arrastre del fluido, el cual está relacionado directamente con la viscosidad del fluido y la geometría del cuerpo.

$$F_{visc} = -\frac{1}{2} * \rho * C_D * A_D * [\dot{x} - V_0] \cdot (\dot{x} - V_0) \quad (41)$$

Donde:

- $\dot{x}$: Velocidad del equipo en $\left[\frac{m}{s}\right]$
- V_0 : Velocidad del agua incidente en $\left[\frac{m}{s}\right]$
- A_D : Matriz de áreas características

3.3.1.3 Fuerzas externas

Las fuerzas externas que afectan al sistema son aquellas fuerzas ejercidas o involucradas directamente con la interacción Boya-fluido, las cuales varían según el tipo de método de anclaje y la tecnología implementada. Para el caso de estudio, la

aplicación de la boya genera dos tipos de fuerza externa como lo vendría siendo el sistema hidráulico para la absorción de potencia y las fuerzas ejercidas por el amarre denominadas fuerza de amarre o de mooring.

- Fuerza PTO: Esta fuerza es la asociada ejercida por el sistema hidráulico, producida por fuerza realizada en el pistón. Este sistema está asociada a su vez con circuito de potencia o por sus siglas en ingles *Power Take Off*

$$P_{PTO} = -F_{PTO} \cdot X_{rel} \quad (42)$$

Donde la fuerza PTO viene dada por:

$$F_{PTO} = \Delta p_{embolo} \cdot A_{embolo} \quad (43)$$

Donde:

- Δp_{embolo} : Presión del émbolo hidráulico.
 - A_{embolo} : Área del émbolo.
 - X_{rel} : Posición relativa.
- Fuerza de amarre (F_m): Esta fuerza es la ejercida por el sistema de anclaje, las cuales para este estudio se considerarán como cables tipo anclas o bien como componente de amortiguación, cuya ecuación se expresa como:

$$F_m = -K_m - C_m \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad (44)$$

Donde:

- K_m : Rigidez del cable.
- C_m : Coeficiente de amortiguación.

3.3.2 Relaciones de movimiento de un absorbedor puntual

El estudio de la interacción de una ola incidente sobre un cuerpo flotante se puede representar como la sumatoria de las fuerzas ya mencionadas bajo el supuesto sinusoidal, lo que visto mecánicamente se representa como un oscilador mecánico con sistema de masa-resorte amortiguado bajo la suposición de restringir el sistema a un grado de libertad.

En otras palabras, las fuerzas de interacción del sistema vienen representado por la acción y reacción del movimiento relativo entre el cuerpo y la ola como también de la influencia del fenómeno incidente por sobre el cuerpo. Lo que se puede representar ejemplificado en la figura N°x.

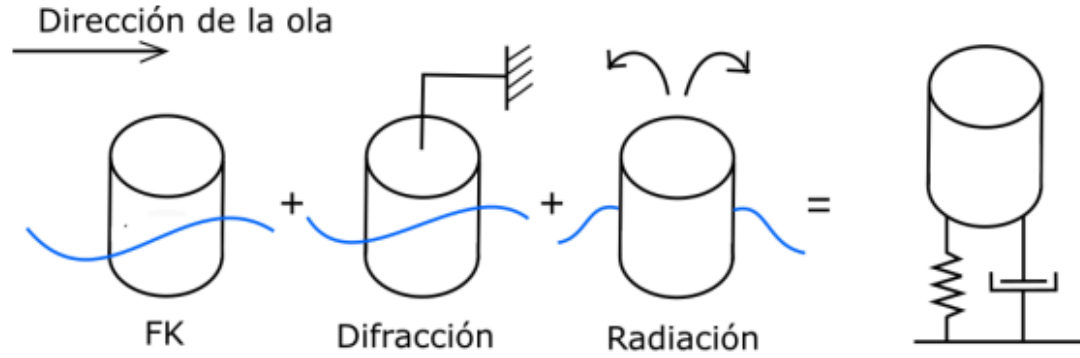


Ilustración 11: Representación de la interacción ola-cuerpo.

De lo anterior y de acuerdo a la segunda ley de Newton podemos expresar el sistema mediante la siguiente ecuación:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + C_{amort} \frac{dz}{dt} + Kz(t) = F_{exc} \sin(\omega t) \quad (45)$$

Donde:

- $m \frac{d^2 z}{dt^2}$: Fuerza inercial del sistema.
- $C_{amort} \frac{dz}{dt}$: Fuerza de amortiguación del sistema.
- $Kz(t)$: Fuerza de restauración o fuerza de acoplamiento resonante.
- $F_{exc} \sin(\omega t)$: Fuerza externa al sistema

Donde al reemplazar las fuerzas mencionadas en el punto anterior, sabiendo que las fuerzas de excitación del sistema corresponden a las generadas por la ola, las fuerzas inerciales corresponden a la fuerza de radiación y de restauración y las fuerzas de acoplamiento externo se refieren a la fuerza producto el power take off y al sistema de amarre. Podemos obtener una ecuación resultante o más bien dicho la ecuación (44) puede quedar descrita como:

$$(M + m_{rad}) \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + (R_{rad} + C_{amor}) \cdot \frac{dz}{dt} + K_{sist} \cdot z(t) = F_{dif} + F_{F-K} + F_{arq} + F_v + F_{PTO} + F_m \quad (46)$$

3.4 Análisis de forzamiento externo debido al anclaje

Para el correcto estudio de la interacción boya-ola y su aprovechamiento energético se debe tener en consideración los diversos tipos de conexiones y anclajes que se usan actualmente para el estudio y la capacitación energética de absorbedores puntuales como las boyas.

3.4.1 Resonancia y control de fase

Para el correcto aprovechamiento energético del sistema, se conoce de forma general que la potencia absorbida por un convertidor ya sea para cuerpo oscilante o masa de agua oscilante, se maximiza cuando ocurre el fenómeno de resonancia, es decir cuando el convertidor se desplaza en fase con el movimiento de la ola o dicho de otra forma, cuando la frecuencia natural del dispositivo es similar a la frecuencia de la ola incidente. Sin embargo, que ocurra este fenómeno trae diversas dificultades ya que en primer lugar la frecuencia natural del oleaje es variable ya que es una superposición de diversas ondas debido a la irregularidad de estas, como también el poder construir un dispositivo que se acople a dichas frecuencias.

Debido a esta situación que surge la técnica de control de fase, la cual tiene como finalidad acercar al sistema a la resonancia. Esto se puede lograr restringiendo el cuerpo no solo a un grado de libertad, sino que también se debería restringir la carrera del dispositivo ajustando así la frecuencia de este mismo.

Para lograr el objetivo del control de fase se debe tener en cuenta diversos factores que afectan al periodo o frecuencia del oleaje irregular como lo son:

- Características hidrodinámicas del dispositivo flotante y de absorción.
- La interacción dispositivo-ola.
- El oleaje irregular y su comportamiento estadístico.

Por lo que al analizar estos factores, junto a una baja fiabilidad de la predicción del comportamiento del oleaje dificulta la implementación real y concreta del control de fase siendo un problema sin resolver en la actualidad, surgiendo como desafío.

3.4.2 Conexiones

Otro factor importante para analizar en un absorbedor puntual como una boya, es el evitar el fenómeno de la boya errante o errática, lo que implica que el dispositivo WEC “Wave Energy Converter” debe mantener una posición estable de equilibrio. Para lograr realizar este objetivo se debe conectar mediante cables o cadenas, ya sea a puntos fijos en el fondo marino o bien a un sistema de boyas auxiliares.

Se distinguen dos tipos de conexiones empleados actualmente, las cuales vienen siendo:

- Líneas sintéticas: Este tipo de conexión se caracteriza por sus propiedades de flotación y sus propiedades elásticas, ya que principalmente reducen el efecto del peso del amarre sobre el sistema. Por otro lado, este tipo de material ofrece una resistencia elástica, en donde esta respuesta es la que genera el acción del agarre gracias al esfuerzo de fluencia, lo cual lo convierte en el parámetro relevante a la hora de diseñar la instalación del amarre, mostrando mayor utilidad para aguas profundas.

Las cuerdas sintéticas más empleadas actualmente son el poliéster, el polietileno de alto modulo (HMPE), la aramida y el nylon, polietileno de alta densidad (Dyneema), el kevlar entre otros.

- Catenaria no lineal: Para este tipo de amarre, la propiedad de resistencia es generada por el propio peso del amarre, siendo la catenaria la curva que representa el curvamiento generado por la cadena o cable producto de una distribución uniforme del peso y/o empuje. Las catenarias poseen diversos factores a la hora de analizarlas para su implementación, como lo son algunos de ellos:

- Masa por unidad de largo $\left[\frac{kg}{m}\right]$
- Área de sección transversal equivalente.
- Rigidez
- Máxima tensión
- Coeficientes de rigidez axial no lineales

- Cable metálico: Este tipo de material consiste en un conjunto de elementos de transmisión de fuerza y movimiento. La relevancia de esta máquina simple radica en que se debe conocer y entender la diversidad de tipo que existen actualmente en el mercado, ya que así se puede dar un correcto uso adecuada para las diversas solicitudes que se deben enfrentar. Debiendo tener en cuenta diversos parámetros tales como el diámetro, el grado del alambre, la dirección del cableado, entre otras. El cable metálico se compone estructuralmente de:

- ❖ Alambre: Corresponde al componente básico del cable, el cual se fabrica de distintos grados y propiedades, siendo una el porcentaje de carbono o también la resistencia a la corrosión, tracción, torsión o cualquier otra exigencia.
- ❖ Torón: Este componente se forma al torcer helicoidalmente un número determinado de alambres.

- ❖ Alma: Corresponde al componente que actúa como eje central en donde se enrollan los diversos torones torcidos helicoidalmente.

Finalmente, el cable metálico ya como etapa final se identifica según el diámetro de este, la cantidad de torones y/o alambres por torones, tipo de alma que posea pudiendo ser de acero, de fibra natural o fibra sintética. La composición del material de acero o bien si posee recubrimiento, entre otras posibles características.

- Cadenas: Este elemento consiste en la unión de diversos eslabones para permitir la transmisión de fuerza, movimiento y potencia. Este elemento entrega una buena rigidez en cuanto a la curva catenaria con una alta resistencia a la abrasión dependiendo del material.

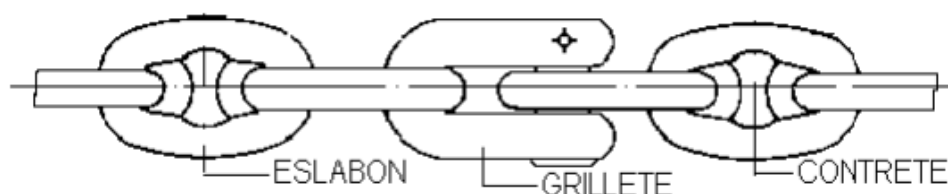


Ilustración 12: Componentes que forman una cadena náutica.

A continuación, se puede observar una tabla a modo de resumen de los tres tipos de material para las conexiones o amarre

Tabla 4: Resumen de las líneas de amarre

Mooring Lines	Installation	Remarks
Chain	Easy	High abrasion, intermediate fatigue resistance, low elasticity, and low cost
Wire Rope	Intermediate	High abrasion, high fatigue resistance, low-intermediate elasticity, and intermediate cost
Synthetic Rope	Hard	Polypropylene nylon: Low fatigue resistance, low abrasion, high elasticity, and cheap cost
		Polyester: High fatigue resistance, abrasion, and elasticity, and costs are intermediate
		Aramid HMPE: Very high fatigue resistance, intermediate abrasion, low elasticity, and expensive cost

Según la tabla N°4 el estudio y análisis del tipo de amarre se realizará pensando en emplear el modelo de catenaria empleando Cable metálico o cadenas, debido a la dificultad de prototipar de forma correcta algún elemento de línea sintética.

Tabla 5: Componentes de amarre v/s costos

Mooring Components	Characteristics	Costs
<i>Mooring line</i>		
Chain	Depending on required proof strength Grade 3, 3S or 4 should be used for offshore moorings. Chains provide a good catenary stiffness effect and have good abrasion and bending properties. Suitable for long term moorings but require regular inspections.	Medium
Wire Rope	Spiral Strand, Six Strand and Multi-Strand wire ropes available but only the Spiral Strand is suitable for long term mooring. Due to the elasticity of wire ropes it can be used in tensioned mooring applications. Extreme bending must be avoided.	Low
Synthetic Rope	Typical fibre ropes are Polyester, Aramid, HMPE or Nylon ropes. The weight of the ropes in water is around zero allowing them to be close to neutrally buoyant or buoyant. The weight and elasticity properties make them more common for very deep water tether applications. Short term experience in real conditions results in a high safety factor being applied. Considerable change in axial stiffness after installation requires re-tensioning. Axial compression and hysteretic heating at extreme storm condition needs to be avoided and fishbites can be a problem.	High

3.4.3 Análisis analítico de la catenaria.

Para realizar el análisis correspondiente a la catenaria enfrentada a la generación de oleaje en aguas intermedias o profundas se deben considerar tres tipos diferentes, los cuales son estáticos, cuasi estáticos y dinámicos. Lo cual para el sistema presentado se considerará que las fuerzas principales a las que se someten el sistema de amarre son solo a su peso y se despreciara el acción de la corriente marina, además de que se tiene una restricción de movimiento, por lo que se considerara un sistema de catenaria estático.

El análisis correspondiente se deriva desde el diagrama de cuerpo libre (DCL)

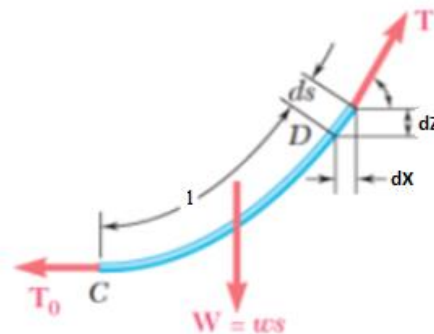


Ilustración 13: DCL de la catenaria.

Se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La catenaria nunca estará tensa o en línea completamente recta.
- El ancla o punto de anclaje no se mueve ni se moverá de su posición.
- La tensión aplicada en el anclaje es siempre horizontal.

Para estas consideraciones además se supone que el fondo marino es horizontal, el cable se encuentra en el plano X-Z, la rigidez y los efectos dinámicos son ignorados.

3.4.4 Amarres

Actualmente existe el desafío ingenieril de poder hallar y elaborar el punto de equilibrio entre la influencia que este tiene sobre el aprovechamiento energético con respecto al grado de restricción permitido del sistema. Es por esto que, siguiendo la línea de estudio, se debe considerar el amarre parte del sistema desde momentos iniciales de algún proyecto.

Debido a la importancia del tipo de amarre para los dispositivos WEC, estos se pueden clasificar en tres tipos, los cuales vienen siendo:

- Pasivos: Este tipo de amarre se caracteriza en que su objetivo único y principal es el de fijar la posición o limitar el movimiento libre, donde este no afecta a la absorción energética por parte del WEC
- Activos: Este tipo de amarre se caracteriza por poseer una alta relevancia directa en la absorción energética por parte del WEC. Por lo que este tipo de amarre busca lograr alcanzar el fenómeno de resonancia, optimizando el sistema
- Reactivos: Este tipo de amarre es de suma relevancia en el sistema de transformación energética, apropiado principalmente cuando el PTO aprovecha o se vincula al movimiento relativo entre el cuerpo o WEC y la ola o fondo marino o bien sobre un punto fijo.

Además de los tres tipos anteriores mencionados el amarre en si se puede clasificar según su configuración, pudiendo ser amarre de punto simple (Single point mooring) o amarre disperso (spread mooring) en donde este último evita el movimiento horizontal del WEC, por lo que no se dará énfasis por el alcance del estudio. Por otro lado, el amarre SPM es al que se le dará énfasis ya que este permite un movimiento direccional que es el que se requiere en un grado de libertad.

3.4.4.1 Análisis amarre tradicional

Este tipo de sistema de amarre consiste básicamente en conectar una boya flotante, la cual corresponde al dispositivo captador de energía, mediante una cadena o algún tipo de cable la cual se une al lecho marino mediante un punto de anclaje, pudiendo ser está a un bloque de hormigón o bien a un sistema de anclas.

Además, se debe analizar los diversos tipos de material existentes, tomando en consideración que las cadenas suelen ser resistentes y difícil de cortar sin embargo poseen un mayor poder destructivo sobre el fondo marino, mientras que los cables o cuerdas no impactan de manera destructiva sobre el fondo, pero por el contrario suelen romperse a menores tiempos.

Para este tipo de amarre se recomiendan las siguientes relaciones entre el largo del amarre con respecto a la profundidad.

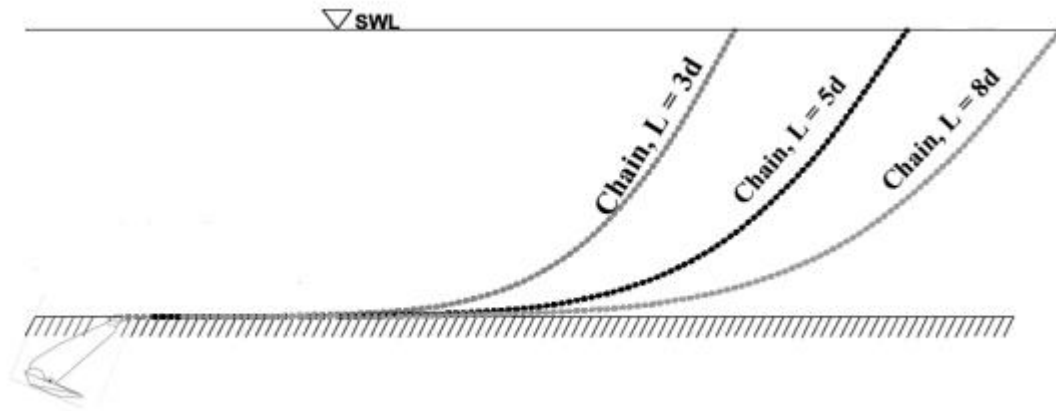


Ilustración 14: Largo del sistema de amarre con respecto a la profundidad.

3.4.4.2 Análisis fondeo en SALM

El fondeo tipo SALM o Single Anchor Leg Mooring consiste en un sistema de amarre donde existe un punto de anclaje que viene dada por un ancla de succión, contando con dos líneas de amarre (“tether” y “hawser”, cuerda y cable) y una boya auxiliar sumergida (véase figura N°x). Para este sistema, la fuerza de restauración viene generada de la fuerza de “boyancia” de la boya y la elasticidad de los amarres.

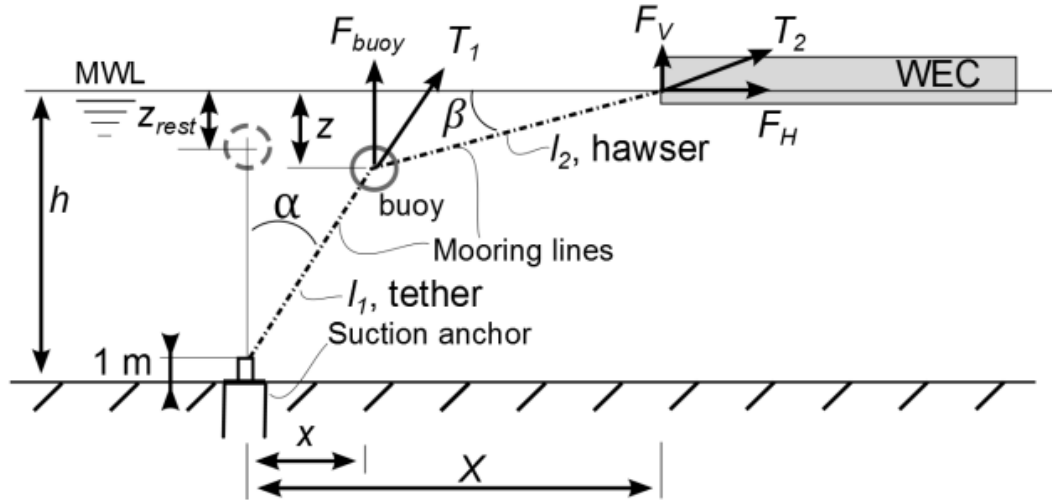


Ilustración 15: Configuración representativa del sistema SALM

Donde:

- Tether: Corresponde al amarre, ya sea cable o cadena, asociado a la boyas auxiliar, otorgándole a esta mayor libertad de movimiento dentro de un área acotada sobre el lecho marino.
- Hawser: Este término hace referencia a un amarre, ya sea cable o cuerda rígida, hecha generalmente de acero.

Los cálculos relacionados al sistema SALM se pueden obtener mediante un proceso iterativo, mientras que las fuerzas y diversos ángulos señalados en la figura N°x se pueden obtener de forma geométrica mediante las siguientes ecuaciones.

- La elongación (l_i) de las líneas de amarre se calcula empleando su elasticidad (f_i) y la tensión aplicada (T_i). Donde el subíndice 0 se refiere a la longitud sin estirar.

$$l_i = l_{0_i}(1 + f_i * T_i) \quad (47)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x_1}{l_1}\right) \quad (48)$$

- La profundidad de la boyas auxiliar (z) se determina mediante la siguiente ecuación, donde z_{rest} representa la profundidad de la boyas en reposo.

$$z = z_{rest} + l_1 - l_1 * \sin(\alpha) \quad (49)$$

- La fuerza sobre la boya auxiliar se determina mediante un balance de fuerza simple, obteniendo la siguiente relación:

$$T_1 = \frac{F_{buoy}}{\cos(\alpha)} \quad (50)$$

- La fuerza horizontal que afecta al dispositivo WEC viene dada por:

$$F_H = T_1 * \sin(\alpha) \quad (51)$$

- El ángulo entre el segundo cable o “hawser” y la línea del nivel del agua se calcula como:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{z}{l_2}\right) \quad (52)$$

- Donde finalmente podemos encontrar que la fuerza que aplicada por el sistema de amarre sobre el dispositivo captador de energía undimotriz viene dado por:

$$T_2 = \frac{F_H}{\cos(\beta)} \quad (53)$$

3.4.4.3 Efectos del amarre y el movimiento amortiguado resonante de la boya.

El sistema de amarre considera los componentes mecánicos flexibles que permiten unir los dispositivos flotantes ya sea a otros dispositivos o bien al sistema de anclaje con respecto al suelo marino.

El objetivo de estos sistemas es permitir que las boyas permanezcan posicionadas en torno a un área de control y así evitar el fenómeno de boya errática, por lo que las líneas de amarre influyen en el movimiento de las boyas restringiendo sus movimientos ya que poseen efectos restauradores para las boyas con respecto al accionar de las olas.

- Modo Surge

Primero analizaremos el coeficiente de restauración producido por el movimiento surge. Este coeficiente viene dado por:

$$K_S = \frac{(P+P_1)}{\sqrt{l^2+d^2}} \quad (54)$$

$$P_1 = \frac{A * E}{l} * (\sqrt{l^2 + d^2} - l) \quad (55)$$

$$P = \frac{W}{2} \quad (56)$$

Donde:

- W: Peso de la boya.
- $\frac{A * E}{l}$: Rigidez axial de la línea de amarre.
- l: longitud de la cuerda de amarre.
- d: Desplazamiento arbitrario tipo surge.
- A: Área del amarre.
- E: Modulo de Young o módulo de elasticidad del material.

- Modo Heave

Por otro lado, tenemos además el coeficiente de restauración referente al movimiento o modo heave de la boya.

$$K_H = \rho * g * A_w + \frac{A * E}{l} \quad (57)$$

Donde:

- ρ : Densidad del agua de mar.
- g: Aceleración de gravedad.
- A_w : Área del plano de agua.

Es esperable que los coeficientes de restauración incrementen producto al accionamiento de las líneas de amarre.

3.5 RAO'S

Para validar la respuesta del dispositivo flotante y/o captador es necesario el aterrizar el fenómeno de tal forma que se permita evaluar de manera cuantitativa y así poder

analizar y comprender de mejor forma el comportamiento de la boya frente al oleaje. Este parámetro se denomina *operador de amplitud de respuesta* o *Response Amplitud Operator (RAO)*

3.5.1. RAO'S HEAVE

Para el movimiento tipo HEAVE se puede estimar el RAO como:

$$RAO_{heave} = \frac{Z_{heave}}{H_s} \quad (58)$$

Donde:

- Z_{heave} : Amplitud del movimiento vertical “heave”.
- H_s : Amplitud de la ola.

Siendo este la comparación entre la altura relativa del dispositivo WEC sobre la línea de agua y la altura de la ola, lo cual se estudiará en dominio de la frecuencia, debido a que esto permite visibilizar todo el espectro de olas monocromáticas presentes.

3.6 Modelación física

El modelado físico del absorbedor puntual o en general de cualquier modelo hidráulico permite representar de forma escalada la realidad, permitiendo el análisis de un sistema semejante reducido, con la finalidad de lograr entender el comportamiento a escala de fenómenos hidráulicos reales.

Esta técnica tiene su fundamento teórico en el análisis dimensional y las leyes de semejanza, las cuales permiten obtener las relaciones necesarias de las distintas cantidades físicas que componen tanto las medidas geométricas como las cinéticas y dinámicas del fluido.

Para determinar que un modelo es completamente similar debe evitar sufrir de efectos de escala, es decir, que se mantenga la relación entre las fuerzas que intervienen en el modelo como en el prototipo, y además debe satisfacer con la semejanza geométrica, siendo estas el largo característico, área y volumen, la semejanza cinética, siendo la velocidad, tiempo, aceleración, caudal entre otras y la semejanza dinámica que involucra la relación entre las fuerzas del prototipo y el modelo.

En la hidrodinámica se pueden encontrar las siguientes fuerzas más relevantes:

- Fuerzas de inercia (F_i)
- Fuerza gravitacional (F_g)
- Fuerza de viscosidad (F_v)
- Fuerza de presión (F_{pr})
- Fuerza elástica (F_E)

Bajo el supuesto de que se cumple la semejanza dinámica, se requiere que exista una relación constante entre todas las fuerzas del fluido.

$$\frac{\text{fuerza inercial}_p}{\text{fuerza inercial}_m} = \frac{\text{fuerza gravitacional}_p}{\text{fuerza gravitacional}_m} = \dots = cte \quad (59)$$

Para simplificar la obtención de estas situaciones y teniendo en cuenta que la fuerza más relevante son las asociadas a la inercia es que se generan los números adimensionales que gobiernan y representan el comportamiento de los fluidos, entre los cuales podemos encontrar los siguientes:

- Numero de Froude, F_r : $F_r = \left(\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza gravitacional}} \right)^{\frac{1}{2}}$
- Numero de Reynolds, R_e : $R_e = \left(\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{fuerza de viscosidad}} \right)$
- Numero de Euler, E : $E = \left(\frac{\text{Fuerza de presión}}{\text{Fuerza inercial}} \right)$

En la práctica, el poder relacionar adimensionalmente 3 o más fuerzas y obtener una semejanza total es improbable que ocurra debido a que se debería escalar todas las variables del sistema y componentes. Por lo que se debe trabajar en base a la fuerza más relevante para el estudio.

3.6.1 Modelo de semejanza de Froude

Bajo las consideraciones de un prototipo de absorbedor puntual en donde la fuerza que adquiere mayor relevancia es la asociada a la fuerza gravitacional es que el modelado se puede emplear el número de Froude, siendo la semejanza dinámica para este modelo de $F_r = 1$.

$$\frac{\text{Numero de Froude}_p}{\text{Numero de Froude}_m} = 1$$

Donde se puede determinar que las escalas a emplear en las distintas cantidades físicas vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (60)$$

Donde:

- v : Velocidad de corriente
- g : aceleración de gravedad
- L : Dimensión característica de la boya.

3.6.2 Análisis adimensional comportamiento elástico

A pesar de lo mencionado anteriormente, si bien el modelo que rige de forma global es el análisis de similitud de Froude, se debe estudiar de igual forma el comportamiento elástico de los elementos empleados en el amarre. Por lo que se deberá estudiar la relación entre la propiedad elástica de los materiales en función de la escala a emplear según el análisis de Froude.

Primeramente, se debe entender que para que exista una similitud lo más perfecta posible en los fenómenos hidrodinámicos se deben cumplir con las siguientes condiciones:

1. La similitud dinámica global se cumple si la relación de las fuerzas de inercia entre el prototipo y el modelo es igual a la relación de la suma de las fuerzas que influyen o están activas.

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g + F_v + F_E + F_{pr})_p}{(F_g + F_v + F_E + F_{pr})_m} \quad (61)$$

2. Por otro lado, se requiere además que se cumpla con la condición de que todas las relaciones individuales de cada fuerza entre el prototipo y modelo deben de ser iguales, es decir:

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g)_p}{(F_g)_m} = \frac{(F_v)_p}{(F_v)_m} = \frac{(F_E)_p}{(F_E)_m} = \frac{(F_{pr})_p}{(F_{pr})_m} \quad (62)$$

O dicho de otra forma se debe cumplir con:

$$\lambda_{F_i} = \lambda_{F_g} = \lambda_{F_v} = \lambda_{F_E} = \lambda_{F_{pr}} \quad (63)$$

Considerando los supuestos anteriores, podemos obtener la siguiente relación, analizando primeramente la fuerza ejercida por el peso del cuerpo.

$$\frac{F_{peso_p}}{F_{peso_m}} = \frac{(F_g)_p}{(F_g)_m} = \frac{(L^3 * \gamma)_p}{(L^3 * \gamma)_m} = \frac{(L^3)_p * (\gamma)_p}{(L^3)_m * (\gamma)_m} \Rightarrow \lambda_{F_g} = \lambda_L^3 * \lambda_\gamma \quad (64)$$

Con γ el peso específico.

Considerando ahora la fuerza ejercida internamente la elasticidad del material empleado para el amarre obtenemos:

$$\frac{(F_E)_p}{(F_E)_m} = \frac{(E * A)_p}{(E * A)_m} = \frac{(E)_p * (A)_p}{(E)_m * (A)_m} = \frac{E_p * L_p^2}{E_m * L_m^2} \Rightarrow \lambda_{F_E} = \lambda_E * \lambda_L^2 \quad (65)$$

Al comparar la ecuación (64) con la ecuación (65) basándonos en la segunda condición para similitud perfecta obtenemos la siguiente relación:

$$\lambda_{F_g} = \lambda_{F_E} \Rightarrow \lambda_L^3 * \lambda_\gamma = \lambda_E * \lambda_L^2 \quad (66)$$

Donde finalmente se obtiene la relación entre la escala de elasticidad en función de la escala geométrica (λ_L) y la escala de peso específico o inversa de la densidad (λ_γ).

$$\lambda_E = \lambda_L * \lambda_\gamma = \lambda_L * \frac{1}{\lambda_\rho} \quad (67)$$

4 Estado del arte

4.1. Panorama energético mundial boyas undimotrices

Según datos de la Agencia Internacional de energía (AIE) a nivel mundial se prevé un crecimiento del 8% en torno al uso de energías renovables, siendo dos tercios un aumento referido al uso de energía solar y eólica. Con esto la energía estimada producida sería de 8.300 TWh. De esto además se puede observar que Europa es líder en avances en lo relacionado a la energía undimotriz, teniendo más del 25% de patentes relacionadas a la energía oceánica, de las cuales un 98% corresponde a energía mareomotriz, equivalente a 512,5 MW instalados.

Por otro lado, la energía undimotriz cuenta con más de 35 convertidores de energía, sumando entre todos una capacidad aproximada de 2,3 MW de los cuales destacan países como España, Suecia, Portugal e Israel. Destacando importantes proyectos como la cooperación entre Painhas, grupo de ingeniería de Portugal y Eco Wave Power radicada en Israel, en donde se está realizando un proyecto para transformar 20 MW mediante tecnología undimotriz en el puerto de Oporto, Portugal, proyecto que debiese terminar sus primeras fases a finales del año 2021. Mientras que Suecia tiene la mayor planta en operación.

4.1.1. Proyectos y patentes actuales

➤ Proyecto Lunding Energy:

La empresa petrolera noruega Lunding Energy en colaboración con Ocean Harvesting Technologies, investigan sobre la utilización de energía undimotriz por sistemas de boyas en alta mar, con la finalidad de disminuir la huella de carbón de la empresa noruega. Proyecto que para el año 2022 debiese tener datos concretos sobre la electrificación limpia, segura y estable para sus operaciones. Una vez finalizada esta etapa de estudio debiese ponerse en marcha el desarrollo a una gran escala.

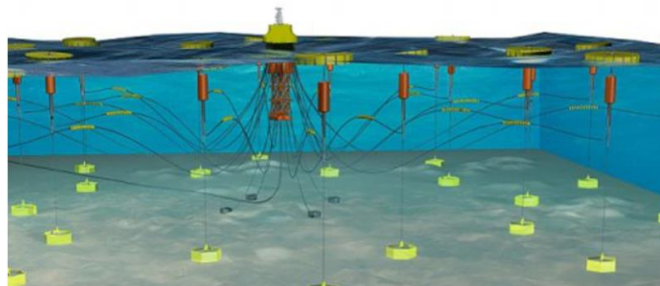


Ilustración 16: Imagen referencial del proyecto de Lunding Energy.

Para el caso de Latinoamérica, podemos presenciar dos proyectos importantes de energía undimotriz, el primero ubicado en Brasil y el segundo ubicado en Argentina.

➤ Central undimotriz de Puerto Pecém:

Consta en brazos mecánicos ubicados en el muelle de este puerto, los cuales están en contacto con el mar mediante boyas circulares, las cuales mediante el movimiento oscilatorio vertical producido por las olas permiten el accionamiento de bombas hidráulicas que permite transformar la energía undimotriz en energía hidráulica para finalmente transformarla en energía eléctrica. La cual produciría 100 kW abasteciendo las principales funciones del puerto junto a 60 familias.

➤ Proyecto undimotriz de la universidad tecnológica nacional de Buenos Aires:

enfocado en el estudio y realización de prototipos para aprovechar de mejor manera la energía undimotriz. Consta en una boya de 10 toneladas ancladas a un brazo fijo, transformando la energía de la ola en energía rotatoria para finalmente impulsar el generador. Si bien este equipo solo ha sido prototipado en escala 1 es a 10, comenzó la etapa de fabricación del equipo final.

Cabe destacar que, si bien el desarrollo tecnológico en cuanto a la energía undimotriz sigue siendo muy incipiente, el enfoque está dirigido al estudio de los factores que influyen o afectan al sistema de boyas ya que la mayoría de las patentes o prototipos están enfocados en el monitoreo continuo e inmediato de las condiciones y el aprovechamiento energético.

4.1.2. Innovación de las patentes.

➤ Patente: WO/2021/078899

Fabricado por Subsea 7 norway AS, posee un sistema de anclaje en varias direcciones, donde el cuerpo flotante transmite la energía de las olas en dos sectores, primero a una turbina y luego a un sistema mecánico, el cual al generar la energía eléctrica se transmite por cableado ubicado en el fondo marino. Permitiendo el aprovechamiento undimotriz off-shore.

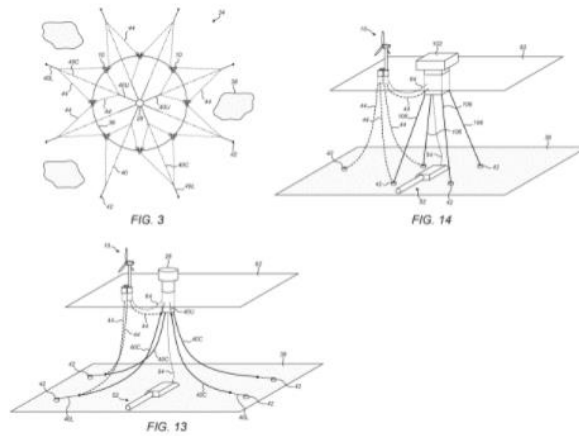


Ilustración 17: Diseño conceptual de la patente WO/2021/078899

➤ Patente: WO / 2019/018226

Elaborada por SHELDON-COULSON, Garth Alexander, MOFFAT y Brian Lee de los Estados Unidos

Módulo de flotación que se auto abastece con la energía necesaria para su funcionamiento, el cual cuenta con un aparato informático integrado, este aparato cuenta con diseños novedosos para reducir costos y complejidad de enfriar sus circuitos de computación, esto lo realiza con su diseño que permite la proximidad al cuerpo de agua como también a los fuertes vientos.

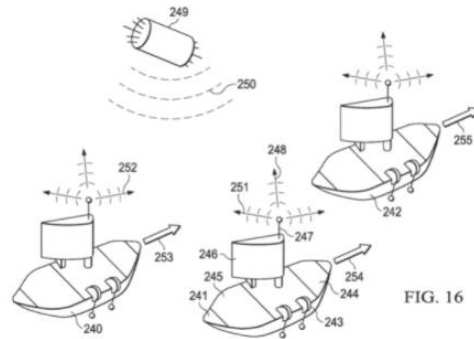


Ilustración 18: Diseño conceptual de la patente WO / 2019/018226

4.2. Panorama energético nacional boyas undimotrices

Chile actualmente posee un potencial de aprovechamiento de energía undimotriz de 240 GW a lo largo de los más de 4.000 Km, siendo vagamente aprovechado, teniendo recién un proyecto enfocado en investigación posicionando al País dentro de los líderes dentro de este ámbito, sin embargo, en cuanto a producción energética estamos atrasados con respecto al resto del mundo y al potencial que contamos.

➤ Proyecto Open Sea Lab:

Enel Green Power adquirió el primer convertidor de olas a escala completa en Chile, el dispositivo corresponde a uno de tipo Power Buoy o PB, el cual proviene del proveedor Ocean Power technologies, estadounidense. El equipo fue instalado en abril de 2021 a dos kilómetros de Las Cruces en la Quinta Región. Posee un largo total de 13 metros, de los cuales 10 metros están bajo el nivel del mar, los cuales en su totalidad están flotando y anclados sobre una profundidad de 35 metros. Con una potencia media continua de 8,4 kWh/day y una carga máxima útil de 3 kW.

El dispositivo instalado transforma la energía cinética de la ola proveniente del movimiento vertical, permite generar el movimiento de forma ascendente y descendente de la boya, generando que esta mueva el mástil, el cual está anclado a un sistema mecánico de movimiento rotatorio, el cual impulsa un generador eléctrico. Este generador carga continuamente una batería integrada, la cual a su vez suministra la energía necesaria para el monitoreo del funcionamiento de la boya, permitiendo así obtener una ventaja a nivel mundial sobre el estudio del funcionamiento real de este tipo de equipos. El equipo posee un peso de 8.300 Kg

El proyecto busca obtener información en tiempo real de diversos factores, como la potencia generada, magnitud y dirección de las olas, fuerzas ejercidas en las líneas de anclaje, entre otros factores relevantes. Este proyecto se llevará a cabo por el centro MERIC o centro de investigación e innovación en energía marina.

➤ Proyecto de Puerto Ventanas: “Generación de energía undimotriz en un mercado competitivo”

Puerto Ventanas en convenio con Alu Energy, desarrollarán un proyecto para la generación de energía undimotriz, el cual cuenta con el financiamiento de CORFO, el cual se estima que para febrero de 2022 este completada la etapa de proyectos comenzando con la etapa de implementación. Este proyecto es pionero en Chile donde una empresa busca aportar a la descarbonización mediante este tipo de energía.

➤ Proyecto Brazo al Mar BAM II y BAM III

Operativo ubicado en el muelle Barón, a cargo de la Universidad Técnica Federico Santa María en asociación con la Maestranza Diésel. Consta de una estructura sobre

ruedas que mide 14,7 metros de largo, 3 metros de alto y 1,7 metros de ancho. Esta estructura cuenta con un brazo del que penden las boyas, las cuales mediante un sistema de poleas y de trinquetes y engranajes transmiten el movimiento de las olas a una fuente de energía. Teniendo una potencia de 3 kW.

El mecanismo consiste en aprovechar la energía cinética del movimiento vertical de elementos flotantes o boyas, transformando este movimiento mediante la acción de poleas y engranajes, los cuales con un sistema mecánico se transforma la energía de la ola en energía eléctrica. Junto a esto contamos con un controlador de carga, el cual se encarga de cargar una batería de ciclo profundo de 48V y 600 Ah

Para el año 2022 se espera realizar un tercer prototipo gracias a la inversión de la CORFO.



Ilustración 19: Proyecto BAM II

4.3. Avances científicos

Actualmente, la investigación centrada en la captación energética en base a las olas ha presentado diversos avances a nivel científico-tecnológico, más allá de las diversas patentes existentes, lo cual permitirá acercarse a los niveles comerciales y efectivos.

A continuación, se presentarán diversos papers (jiu) y trabajos asociadas a la investigación realizada en este documento y/o trabajos relacionados a esta.

1. **COMPARISON AND SENSITIVITY INVESTIGATIONS OF A CALM AND SALM TYPE MOORING SYSTEM FOR WAVE ENERGY CONVERTERS:**

En este trabajo del año 2014 se realiza un análisis cuasi-estático junto a una investigación de la sensibilidad de la relación de los amarres tipo SALM y tipo CALM, midiendo la rigidez del sistema y del tamaño que representa cada uno. Observando además un ejemplo práctico de las variables a analizar y controlar.

2. **SPECIFYING AND TESTING POLYESTER MOORING ROPE FOR THE BARRACUDA AND CARATINGA FPSO DEEPWATER MOORING SYSTEMS:**

Esta investigación del año 2003 realizada para un proyecto en concreto se centra en el estudio de las diferencias, ventajas y desventajas de emplear un material en base de poliéster en comparación con los cables de aceros, aplicado a un proyecto undimotriz. Analizando variables como la rigidez y carga de roturas.

3. **ANALISYS AND WAVE TANK VERIFICATION OF THE PERFORMANCE OF POINT ABSORBER WEC'S WITH DIFFERENT CONFIGURATIONS:**

Esta investigación del año 2021 se centra en analizar 4 distintas configuraciones para un dispositivo captador del tipo absorbedor puntual y su posterior verificación de los datos y resultados junto a sus respectivas conclusiones.

4. **INFLUENCE OF BUOY SIZE ON ACCELERATED WAVE POWER GENERATION DEVICE:**

En esta investigación del año 2021 se propone un diseño para un sistema de generación lineal de energía de las olas mediante boyas, siendo esta captación acelerada por poleas, verificando posteriormente un mediante un análisis experimental.

5. **ADVANCEMENTS OF WAVE ENERGY CONVERTERS BASED ON POWER TAKE OFF (PTO) SYSTEMS: A REVIEW**

Este artículo tiene como objetivo analizar y comparar los diversos tipos de dispositivos y sistemas existentes, enfocándose específicamente en los distintos puntos de toma de energía o “power take off”.

6. INFLUENCIA DE LA FORMA DE UNA BOYA EN LA EFICIENCIA DE SU CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LAS OLAS DE DOBLE MOVIMIENTO

Esta investigación tiene como objetivo el encontrar una relación entre la geometría del cuerpo flotante con respecto a su rendimiento energético, analizando tanto la acción de la ola como de la marejada. Para esto se recrean situaciones idénticas para 3 tipos de geometrías distintas.

4.4. Normativa vigente

4.4.1. Normativa internacional

A nivel internacional podemos encontrar diversas sociedades u organizaciones que se encargan de estandarizar y establecer diversas normas asociadas a las múltiples actividades tanto a nivel de ingeniería como fuera de estas.

- Normas DNV (Det Norske Veritas): Esta organización se ha encargado de establecer diversas normas y clasificaciones para buques y estructuras flotantes en general y para usos específicos, señalando además criterios de clasificación y diseño de los sistemas de amarre.
 - DNV-OS-E301 – Position mooring
 - DNV-OS-E302 – Offshore mooring chain
 - DNV-OS-E303 – Offshore mooring fibre ropes
 - DNV-OS-E304 – Offshore mooring Steel wire ropes
 - DNV-OS-E305 – Damage assessment of fibre ropes for offshore mooring.
- Normas ISO (international organization for standardization): Organización que se encarga de estandarizar y otorgar los criterios correspondientes para el diseño de sistemas de anclajes y amarres para embarcaciones y estructuras offshore.

4.4.2. Normativa nacional

En cuanto al ámbito nacional, no se cuenta con una normativa clara con respecto a la energía undimotriz o bien con el diseño o criterios relacionados a las estructuras, anclajes o sistemas de amarres referentes a las embarcaciones o estructuras marinas.

A pesar de esto, en Chile se encuentra una ley general con respecto a las energías renovables, dentro de las cuales la energía undimotriz forma parte.

- Ley 20.257: Esta ley promueve e incentiva el uso y el estudio sobre las energías renovables ERNC, ampliando la matriz energética y buscando la descarbonización.

5. Propuesta a plantear

La propuesta que se señalara a continuación tiene su fundamento en los requerimientos tecnológicos y científicos, en donde debemos plantear, primeramente, los desafíos a alcanzar, siendo estos la relación entre la cantidad de energía mermada debido al anclaje fijo, debido a que este sistema de sujeción puede limitar la oscilación vertical por parte de la boya. Por otro lado, se plantea el de qué manera se ve influenciada esta merma de energía según el sistema empleado de sujeción, observando la relación entre las fuerzas externas al sistema boya-ola.

La propuesta para poder corroborar este planteamiento consiste en emplear una metodología experimental de forma práctica en un canal de olas, donde se elaborará un prototipo dimensionado de tal forma que se pueda aplicar las leyes de semejanza y similitud. Este prototipo se anclará dentro del canal de olas, donde se tendrán sensores y el equipo pertinente para poder medir los parámetros relacionados tanto cinética como dinámicamente, obteniendo datos prácticos del aprovechamiento energético y su diferencia según los diversos sistemas, analizando cables, catenarias y boyas secundarias de anclaje, como también la posibilidad de adquirir mayor conocimiento sobre el fenómeno de capa límite y su desprendimiento. Estos resultados, además, se podrán comparar con los obtenidos numéricamente mediante softwares comerciales como lo son ANSYS en su modalidad AQWA y FLUENT. Esta comparación se propone con la finalidad de poder acercarse desde distintas perspectivas a un mejor entendimiento de este tipo de tecnologías, aportando así al avance necesario relacionado al campo undimotriz, específicamente a las boyas undimotrices.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general modelar físicamente en un canal hidráulico de olas la relación entre el forzamiento externo, principalmente por cables con catenaria y boyas auxiliares, y la dinámica oscilatoria de una boya undimotriz en presencia del oleaje irregular en aguas someras.

6.2. Objetivos específicos

- Actualizar el estado del arte sobre la interacción hidrodinámica de boyas con anclaje articulado y oleaje irregular.
- Diseñar la estructura flexible de cable y boya(s) auxiliar(es) buscando optimizar la interacción energética de la boya undimotriz para distintos estados de mar.
- Diseñar e implementar una secuencia experimental para probar los sistemas de anclajes y medir su influencia sobre la interacción energética boya-olas irregulares.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con las simulaciones numéricas de estudios previos y publicados en la literatura.
- Ajustar la configuración estructural del anclaje articulado en base a un análisis de sensibilidad de las fuerzas externas sobre el sistema de boyas undimotrices, y probar experimentalmente las mejoras propuestas.

7. Metodología

7.1. General

En el presente apartado se definirá la metodología experimental a emplear para llevar a cabo los objetivos del presente documento, metodología desarrollada enfocada en la interacción energética entre un dispositivo captador de energía undimotriz de tipo absorbedor puntual y los distintos forzamientos externos asociados a estos sistemas. La metodología aquí planteada basa sus fundamentos en el documento “*Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters*” propuesta por la universidad de Edinburgh y el documento “*Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems*” planteado por la European Marine Energy Centre (EMEC). Los procedimientos a realizar cimentan su base en la teoría de análisis dimensional y semejanza, empleando las relaciones dimensionales de la similitud en base al número de Froude debido a la relevancia de las fuerzas gravitacionales e inerciales en el modelo de absorbedor puntual por sobre las otras fuerzas hidrodinámicas.

Las actividades e investigaciones realizadas presentan sus bases en estudios numérico-experimentales previos como el estudio “Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso” y “Modelación numérica del forzamiento externo en la interacción energética y dinámica de boyas cautivas con oleaje en aguas someras”. En el estudio de se diseñó un modelo a escala de un prototipo de boya undimotriz a escala $\lambda = 1:50$, la cual fue sometida a un canal de olas que representa las condiciones del sector Punta Curaumilla. Continuando con la investigación de los trabajos previos se trabajó con 3 modelos de boyas a modo de dispositivos convertidores de energía, siendo estos los modelos: A_1, A_2, B_1 . Siendo estos modelos empleados en el trabajo investigativo de Yerko Tomelic en el trabajo mencionado previamente.

El trabajo acá descrito se basa en el modelamiento físico a escala reducida en un canal de olas, el cual simulara las características de oleaje en los estados de mar que serán descritos a continuación, los cuales simulan estados representativos del sector Punta Curaumilla enfrentados al modelo A_1 empleando un sistema de amarre con catenaria directa de tres materiales distintos. Repitiendo los estados principales analizados en los trabajos previos conservando la altura significativa más recurrente en dicho sector y variando el periodo enfrentados a los distintos modelos de boyas y sistemas de anclaje articulados.

Primeramente, se debe realizar la calibración y preparación del canal de olas, en donde se buscará calibrar los sensores, paleta y software con la finalidad de obtener oleaje irregular que obedezca las características propias de estos fenómenos, específicamente las correspondientes a las costas de Valparaíso.

Para cada modelo mencionado se realizarán las mismas pruebas, las cuales vienen siendo, las pruebas P01-Prueba de fondeo estándar, P02- Prueba de fondeo SALM-1 y P03-Prueba de fondeo SALM-2, donde se enfrentarán los diversos modelos a distintos estados del mar, variando en cada prueba el sistema empleado para sujeción de los dispositivos de captación energética del oleaje y así analizar su interacción amarrecaptación. Para las pruebas P01 a P03 se realizará la toma de datos empleando el software de rastreo Tracker, comparando los parámetros cinemáticos y dinámicos.

Finalmente se extrapolarán los resultados obtenidos de los diversos modelos para las pruebas P01 a la prueba P03, donde se trasladarán los valores obtenidos por los modelos a sus respectivos valores de prototipos a escala real, analizando los distintos estados de mar. Realizando con esto el análisis comparativo entre modelo-prototipo y datos teóricos a obtener junto a otros parámetros que permitan señalar un rendimiento tentativo para su estudio.

La metodología empleada se puede visualizar en la siguiente imagen N°20:

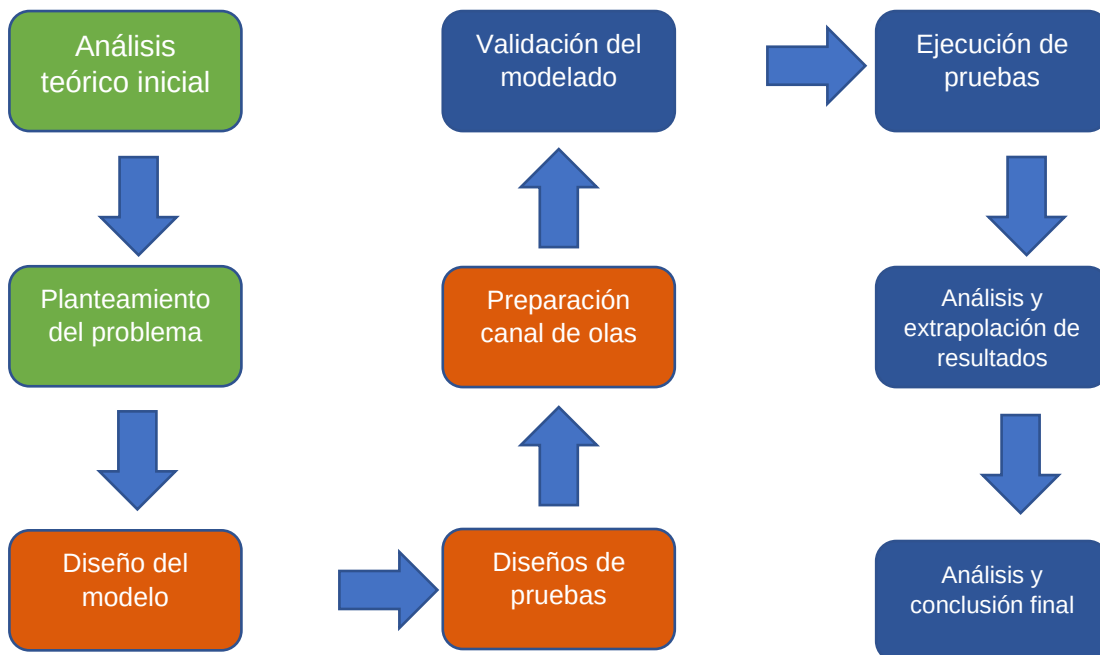


Ilustración 20: Metodología de investigación.

Donde podemos distinguir tres grandes planos dentro de la investigación, primeramente, lo que se aprecia en color verde viene siendo la comprensión y dimensionamiento del problema a enfrentar, estudiando la factibilidad técnica a emplear conservando el enfoque de los trabajos predecesores. El segundo sector o enfoque representado por el color naranja, se refiere a la fase de diseño y construcción del planteamiento básico inicial, en donde se realizan las estimaciones y cálculos necesarios para poder llevar a cabo la experiencia. Finalmente encontramos el enfoque representado con color azul que simboliza la validación y puesta en marcha de los procedimientos propuestos a realizar en la experiencia junto a los resultados y su posterior interpretación.

7.2. Parámetros y propósito de pruebas

El propósito de las pruebas se clasifica en dos dimensiones principales, donde la primera dimensión corresponde al análisis de tres tipos de anclaje articulado para dispositivos de captación undimotriz, lo que se realizara mediante las pruebas P01- Prueba de amarre tradicional, P02-Prueba de fondeo SALM-1 y P03-Prueba de fondeo SALM-2, cuyos propósitos se basan en estudiar el comportamiento de la interacción entre el sistema de amarre y la captación energética atribuible al dispositivo WEC junto al análisis de diversos parámetros cinemáticos y dinámicos, analizando además la relación del sistema de sujeción empleado y las condiciones de mar a los que se someterá cada modelo considerando oleaje irregular en aguas someras. Mientras que la segunda dimensión corresponde al análisis entre los distintos materiales empleados para los diversos tipos de amarre articulados, repitiendo las 3 pruebas anteriores variando el material, siendo cadenas, cable metálico y cable sintético.

A continuación, se presentarán los parámetros relevantes a analizar para los grupos de geometría, cinemática y dinámica.

- Geometría:
 1. Dimensiones de la boya auxiliar y sistema de amarre flexible[m]
 2. Calado de la boya [m]
 3. Área plana de la boya [m^2]
 4. Volumen sumergido de la boya [m^3]
- Cinemática:
 1. Desplazamiento medio vertical de la boya de captación [m]
 2. Componentes de velocidad vertical, horizontal y magnitud de velocidad de la boya [$\frac{m}{s}$]

3. Componentes de aceleración vertical, horizontal y magnitud de aceleración de la boya [$\frac{m}{s^2}$]

- Dinámica:

1. Masa total de la boya [kg]
2. Masa agregada [kg]
3. Coeficiente de amortiguación hidrodinámico [$\frac{kg}{s}$]
4. Fuerza neta de la boya [N]
5. Potencia de oleaje disponible [W]
6. Potencia absorbida por el sistema [W]

Además, para cuantificar el desempeño de cada modelo en cuanto a la absorción de potencia respecto de la potencia de oleaje disponible se presentan los coeficientes de ancho de casco y ancho de captura.

7.2.1. Fase y escala empleada

Como se mencionó en los apartados anteriores, para la propuesta de modelamiento en este trabajo de investigación abordando las etapas iniciales de un modelo a escala reducida de un absorbedor puntual para captación energética del oleaje, se empleará un factor de escalamiento de $\lambda = 1:50$, debido a las limitaciones dimensionales del canal de olas. Con este factor es posible lograr de manera aceptable los criterios de similitud propuestos, permitiendo así además cumplir con las limitaciones en torno a la potencia del canal de olas obteniendo una altura del nivel del agua en el canal de 42 [cm].

El modelado se empleará bajo los criterios de similitud en torno al número adimensional de Froude, debido a que cumple con las exigencias dinámicas del problema escogido, analizando bajo estos criterios las fuerzas inerciales y las fuerzas relacionadas a la gravedad, adaptándose de mejor forma a la interacción del oleaje y el absorbedor puntual.

A continuación, se presenta las relaciones de escalamiento para las diversas variables a estudiar en el presente trabajo de investigación, las cuales se obtuvieron en el documento bibliográfico N°x “Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems”, empleando las relaciones de análisis dimensional.

Tabla 6: Escalamiento dimensional de similitud.

Parámetro	Dimensión	Escalamiento
Geometría		
Longitud	$[L]$	λ
Área	$[L^2]$	λ^2
Volumen	$[L^3]$	λ^3
Rotación	$[L^0]$	1
Cinemática		
tiempo	$[T]$	$\sqrt{\lambda}$
Velocidad	$[LT^{-1}]$	$\sqrt{\lambda}$
Aceleración	$[LT^{-2}]$	1
Caudal	$[L^3T^{-1}]$	$\lambda^{5/2}$
Dinámica		
Masa	$[M]$	λ^3
Fuerza	$[MLT^{-2}]$	λ^3
Presión	$[ML^{-1}T^{-2}]$	λ
Potencia	$[ML^2T^{-3}]$	$\lambda^{7/2}$

7.3. Pruebas y objetivos de medición.

7.3.1. Prueba 00-Calibración canal de olas.

1. Objetivos

Esta actividad preliminar tiene como objetivo el preparar el canal de olas de la universidad de Valparaíso, permitiendo así la generación de oleaje irregular según los estados de mar solicitados y a su vez poder tener control sobre dichos parámetros. Se deberá generar una señal representativa de oleaje irregular según la altura y periodo significativo y calibrar la relación de lectura del motor de la paleta en función de la señal entregada. Obteniendo finalmente la relación entre la señal creada y la ola generada por la paleta.

2. Variables para medir

- Amplitud de voltaje [V]
- Número de Stroke [cm]
- Altura significativa modelo [cm]
- Periodo significativo modelo [s]

3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.
- Software LabVIEW.
- Sensores internos del canal de olas.
- Software MATLAB.

4. Procedimiento

- Primeramente, se analiza los datos que lee el software LabVIEW ya que para generación de oleaje regular pide dos parámetros de ingreso los cuales son amplitud en voltaje y frecuencia monocromática. Por lo que se debe determinar el cómo insertar los datos para generación irregular ya que para esta se pide que se suba un archivo con el formato de texto con dos columnas.
- Se procede a recrear señales de oleaje regular mediante Matlab y su posterior adaptación a las variables que lee la paleta, transformando la amplitud de la onda en el parámetro Stroke, el cual es el avance o movimiento horizontal de la paleta, permitiendo visualizar que parámetros corresponde a cada columna del archivo.
- Una vez obtenida la relación teórica entre el Stroke generado y la amplitud en Voltaje para la generación de oleaje regular, se procede a encontrar los rangos operacionales de la paleta para la generación de oleaje irregular junto a los parámetros de control, variando entre las diversas variables, dejando constante primeramente una altura y periodo a generar, variando las variables propias de generación como el número de datos, la serie de tiempo, la relación teórica del Stroke y la onda generada. El archivo para la generación de oleaje irregular se obtiene empleando la distribución teórica JONSWAP para generar este tipo de

fenómenos y que cumplan con la distribución de frecuencias para la alturas siguiendo distribución Rayleigh.

- Siguiendo con la generación de oleaje irregular se procede a tomar un archivo con datos de oleaje irregular reales, los cuales se adaptan aplicando factores de conversión para obtener la altura y periodo significativo esperado, con la finalidad de comparar con la generación recreada mediante la distribución JONSWAP.
- Finalmente se comparan ambos resultados medidos empleando los sensores discerniendo entre lo más aproximado a la realidad que pueda ser replicado.

7.3.2. Prueba 01-Prueba fondeo estándar.

1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar los diversos parámetros cinemáticos y dinámicos derivados del movimiento inducido por el oleaje. Además de esto se procede a cuantificar el rendimiento o desempeño de captura (RAO). Por último, se analizará la influencia del sistema tradicional de amarre con respecto a la boyancia y respuesta libre de la boya y la dependencia con los materiales a emplear para el sistema articulado de anclaje.

2. Variables para medir

- Amplitud de desplazamiento medio [mm]
- Velocidad del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s}\right]$
- Aceleración del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s^2}\right]$
- Fuerza neta sobre el dispositivo. [N]
- Potencia de oleaje disponible $\left[\frac{W}{m}\right]$
- Potencia del dispositivo WEC [W]
- RAO [-]

3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.

- Pesa gramera digital.
- Cámara de video GoPro HERO 5, 4K a 30fps nativo 1080p a 120fps.
- Software de rastreo Tracker.

4. Procedimiento

- Se genera los archivos que le permitan a la paleta recrear oleaje irregular siguiendo los parámetros deseados según los estados de mar a modelar.
- Se instalan las 3 boyas en sus respectivas ubicaciones evitando el efecto de una sobre las otras, fijando el sistema de amarre articulado empleando los tres materiales, cable sintético, cable de acero y cadena sin contrate.
- Se realizan pruebas iniciales de calibración para asegurarse que se esté generando los estados de mar pertinentes.
- Finalmente se procede a inducir oleaje irregular representativo de los distintos estados de mar en intervalos de 4 [min], registrando el movimiento de las boyas empleando las cámaras GoPro ubicadas al costado del canal grabando de forma frontal y dos cámaras ubicadas por encima del canal grabando desde la parte superior de las boyas.
- Por último, se procede a analizar mediante el software de rastreo Tracker, variando entre cada ensayo el modelo de boya a emplear.

Las pruebas se realizarán y se ordenarán en el siguiente formato:

Tabla 7: Procedimiento de ejecución prueba fondeo estándar.

Orden de ejecución	Estado de mar	Modelo de boya	Tiempo de muestra
1°	E_{11}	A_1	4 [min]
2°	E_{12}	A_1	4 [min]
3°	E_{13}	A_1	4 [min]
4°	E_{21}	A_1	4 [min]
5°	E_{22}	A_1	4 [min]
6°	E_{23}	A_1	4 [min]
7°	E_{31}	A_1	4 [min]
8°	E_{32}	A_1	4 [min]
9°	E_{33}	A_1	4 [min]

10°	E_{41}	A_1	4 [min]
11°	E_{42}	A_1	4 [min]
12°	E_{43}	A_1	4 [min]

7.3.3. Prueba 02-Prueba fondeo SALM-1.

1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar los diversos parámetros cinemáticos y dinámicos derivados del movimiento inducido por el oleaje. Además de esto se procede a cuantificar el rendimiento o desempeño de captura (RAO). Por último, se analizará la influencia del sistema SALM de amarre articulado con respecto a la interacción entre la boya y la ola, comparando los comportamientos con los diversos sistemas de amarre. Además, se busca establecer la relación con los materiales a emplear para el sistema articulado de anclaje.

2. Variables para medir

- Amplitud de desplazamiento medio [mm]
- Velocidad del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s}\right]$
- Aceleración del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s^2}\right]$
- Fuerza neta del dispositivo WEC. [N]
- Potencia de oleaje disponible $\left[\frac{W}{m}\right]$
- Potencia del dispositivo WEC [W]
- RAO [-]

3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.
- Pesa gramera digital.
- Cámara de video GoPro HERO 5, 4K a 30fps nativo 1080p a 120fps.

- Software de rastreo Tracker.

4. Procedimiento

- Se genera los archivos que le permitan a la paleta recrear oleaje irregular siguiendo los parámetros deseados según los estados de mar a modelar.
- Se instalan las 3 boyas en sus respectivas ubicaciones evitando el efecto de una sobre las otras, fijando el sistema de amarre articulado empleando los tres materiales, cable sintético, cable de acero y cadena sin contrate.
- Se realizan pruebas iniciales de calibración para asegurarse que se esté generando los estados de mar pertinentes.
- Finalmente se procede a inducir oleaje irregular representativo de los distintos estados de mar en intervalos de 4 [min], registrando el movimiento de las boyas empleando las cámaras GoPro ubicadas al costado del canal grabando de forma frontal y dos cámaras ubicadas por encima del canal grabando desde la parte superior de las boyas.
- Por último, se procede a analizar mediante el software de rastreo Tracker, variando entre cada ensayo el modelo de boya a emplear.

Las pruebas se realizarán y se ordenarán en el siguiente formato:

Tabla 8: Procedimiento de ejecución prueba fondeo SALM-1.

Orden de ejecución	Estado de mar	Modelo de boya	Tiempo de muestra
1°	<i>Sin oleaje</i>	Oleaje sin boya	1 [min]
2°	E_{11}	A_2	4 [min]
3°	E_{12}	A_2	4 [min]
4°	E_{13}	A_2	4 [min]
5°	<i>Sin oleaje</i>	Oleaje sin boya	1 [min]
6°	E_{11}	B_1	4 [min]
7°	E_{12}	B_1	4 [min]
8°	E_{13}	B_1	4 [min]

7.3.4. Prueba P03-Prueba fondeo SALM-2

1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar los diversos parámetros cinemáticos y dinámicos derivados del movimiento inducido por el oleaje. Además de esto se procede a cuantificar el rendimiento o desempeño de captura (RAO). Por último, se analizará la influencia del sistema SALM de amarre articulado con respecto a la interacción entre la boya y la ola, comparando los comportamientos con los diversos sistemas de amarre. Además, se busca establecer la relación con los materiales a emplear para el sistema articulado de anclaje.

2. Variables para medir

- Amplitud de desplazamiento medio [mm]
- Velocidad del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s}\right]$
- Aceleración del dispositivo WEC $\left[\frac{mm}{s^2}\right]$
- Fuerza neta sobre el dispositivo WEC [N]
- Potencia de oleaje disponible $\left[\frac{W}{m}\right]$
- Potencia del dispositivo WEC [W]
- RAO [-]

3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.
- Pesa gramera digital.
- Cámara de video GoPro HERO 5, 4K a 30fps nativo 1080p a 120fps.

- Software de rastreo Tracker.

4. Procedimiento

- Se genera los archivos que le permitan a la paleta recrear oleaje irregular siguiendo los parámetros deseados según los estados de mar a modelar.
- Se instalan las 3 boyas en sus respectivas ubicaciones evitando el efecto de una sobre las otras, fijando el sistema de amarre articulado empleando los tres materiales, cable sintético, cable de acero y cadena sin contrate con la diferencia que ahora se dejara el tether fijo empleando cadenas, variando el hawser.
- Se realizan pruebas iniciales de calibración para asegurarse que se esté generando los estados de mar pertinentes.
- Finalmente se procede a inducir oleaje irregular representativo de los distintos estados de mar en intervalos de 4 [min] registrando el movimiento de las boyas empleando las cámaras GoPro ubicadas al costado del canal grabando de forma frontal.
- Por último, se procede a analizar mediante el software de rastreo Tracker, variando entre cada ensayo el modelo de boya a emplear.

Las pruebas se realizarán y se ordenarán en el siguiente formato:

Tabla 9: Procedimiento de ejecución prueba fondeo SALM-2.

Orden de ejecución	Estado de mar	Modelo de boya	Tiempo de muestra
1°	<i>Sin oleaje</i>	Oleaje sin boya	1 [min]
2°	E_{11}	A_2	4 [min]
3°	E_{12}	A_2	4 [min]
4°	E_{13}	A_2	4 [min]
5°	<i>Sin oleaje</i>	Oleaje sin boya	1 [min]
6°	E_{11}	B_1	4 [min]
7°	E_{12}	B_1	4 [min]
8°	E_{13}	B_1	4 [min]

7.4. Plan y programación de trabajo.

La planificación comienza primeramente con el diseño y/o fabricación de los modelos junto a sus componentes de amarre y sujeción.

Ahora bien, entrando a la planificación, a continuación, se presentará las fechas donde se realizarán los experimentos:

- **Fecha:** 6 de octubre al 28 de octubre 2022
- **Actividad:** Familiarización/calibración de los ensayos.
- **Descripción:** En esta primera instancia se procede a realizar la calibración necesaria para la generación de oleaje irregular, que siga la conducta representativa del oleaje de la costa de Valparaíso junto a la fabricación/duplicación de los modelos de boyas a emplear para su posterior análisis de forma simultánea.

- **Fecha:** 2 de noviembre 2022/3 de noviembre 2022
- **Actividad:** Realización de la prueba P01-Prueba de fondeo tradicional.
- **Descripción:**
Se realizará dentro del laboratorio, en donde se calibrará los sensores y softwares internos para la realización efectiva de oleaje irregular. Para esto se realizarán múltiples ensayos midiendo la altura y periodo característica del oleaje deseado y comparando con lo obtenido dentro del laboratorio.

- **Fecha:** 7 de noviembre 2022
- **Actividad:** Realización de la prueba P02-Prueba fondeo SALM
- **Descripción:**
En el primer día de trabajo se busca preparar la instalación, dejando el canal de olas listo para su utilización para las pruebas P01-Prueba fondeo estándar y posteriormente al finalizar la prueba P01, dejar instalado el sistema para realizar la prueba P02-Prueba de fondeo SALM, empleando para esta ocasión cable de acero como primer material. Para esto se realizarán las siguientes actividades:
 1. Configurar al final del canal de oleaje, opuesto a la paleta generadora el sistema disipador de olas, para evitar la superposición de oleaje que se refleja en el borde. A este borde denominaremos “playa”.

2. Realizar la verificación y/o mantención a los equipos empleados en la paleta, siendo estos el pistón de la paleta, viendo sus niveles de aceite y grasa.
3. Instalación de cámara frontal para el registro de las pruebas y resistores de monitoreo de oleaje.
4. Instalación de los diversos sistemas de anclajes.
5. Comenzar las mediciones pertinentes a la oscilación forzada con anclaje articulado simple/estándar de cada modelo a estudiar.

En esta jornada se estima realizar la prueba de oscilación forzada con sistema estándar o tradicional de amarre para los modelos A_1, A_3, B_2 según las indicaciones dadas en el apartado 7.3.3. además de dejar preparado las condiciones y sistemas necesarias para realizar la prueba P03-Prueba de fondeo SALM para el modelo A_1 en los estados de mar propuestos en el apartado 7.3.4. Esta actividad tiene una duración aproximada de 3 horas.

- **Fecha:** 8 de noviembre 2022/9 de noviembre 2022
- **Actividad:** Realización de prueba P03-Prueba de fondeo SALM-2.
- **Descripción:**

A continuación, se presenta una tabla resumen con las actividades propuestas junto a los materiales necesarios a emplear.

Tabla 10: Tabla resumen de actividades y ensayos.

Etapas	Actividad	Materiales	Descripción
1	P01-fondeo estándar	– Tres de cada modelo de boyas A_1, A_2, B_1 – Cable de acero de 72 cm. – Cadena de acero 89 cm. – Cable sintético de 72 cm.	Se instalan las 3 boyas del mismo modelo equidistantes entre si diagonalmente, anclando directamente la superficie inferior de cada boya al fondo del canal de olas mediante anclaje simple empleando catenarias de diversos materiales para cada boya sometidas a los estados de mar previamente descritos, realizando muestreo durante 4 minutos por cada estado de mar. Una vez generado el ultimo estado de mar se procede a cambiar los modelos de boyas repitiendo el proceso hasta completar el último modelo con el ultimo estado de mar a evaluar.
2	P02-fondeo SALM-1	– Tres de cada modelo de boyas A_1, A_2, B_1 – Cable de acero de 35 cm. – Cadena de acero 1x35 cm, 3x40 cm. – Cable sintético de 35 cm.	Se instalan las 3 boyas del mismo modelo equidistantes entre si diagonalmente, anclando cada modelo de boya a una boya auxiliar mediante una catenaria mientras la boya auxiliar se directamente la superficie inferior de cada boya al fondo del canal de olas mediante anclaje simple empleando catenarias de diversos materiales para cada boya sometidas a los estados de mar previamente descritos, realizando muestreo durante 4 minutos por cada estado de mar. Una vez generado el ultimo estado de mar se procede a cambiar los modelos de boyas repitiendo el proceso hasta completar el último modelo con el ultimo estado de mar a evaluar.
3	P03-fondeo SALM-2	– Tres de cada modelo de boyas A_1, A_2, B_1 – Cable de acero de 40 cm. – Cadena de acero 1x40 cm, 3x35 cm. – Cable sintético de 40 cm.	Se instalan las 3 boyas del mismo modelo equidistantes entre si diagonalmente, anclando cada modelo de boya a una boya auxiliar mediante una catenaria mientras la boya auxiliar se directamente la superficie inferior de cada boya al fondo del canal de olas mediante anclaje simple empleando catenarias de diversos materiales para cada boya sometidas a los estados de mar previamente descritos, realizando muestreo durante 4 minutos por cada estado de mar. Una vez generado el ultimo estado de mar se procede a cambiar los modelos de boyas repitiendo el proceso hasta completar el último modelo con el ultimo estado de mar a evaluar.

8. Especificaciones técnicas-físicas del modelo

8.1. Especificaciones técnicas físicas del modelo

La geometría del dispositivo flotante o WEC corresponde a una boya cilíndrica basada en los trabajos previamente citados. Destacando primeramente que estas características corresponden al escalamiento que permite su estudio en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso, escala que corresponde a 1:50

8.1.1. Modelo de boya.

Como se mencionó anteriormente las boyas a emplear se basan en los trabajos previos donde se realizó el escalamiento y pruebas pertinentes para obtener los diversos parámetros geométricos relevantes. A continuación, en la tabla N°11 y N°12 se presentan los parámetros descritos en la tesis de David Olivos

Tabla 11: Parámetros geométricos establecidos para el modelo A modelado.

Parámetros geométricos	Modelo (1:50)	Prototipo (1:1)
ϕ_{Boya}	5,52 [cm]	2,75 [m]
h_{Boya}	2,36 [cm]	1,178 [m]
Área Plana	23,92 [cm^2]	5,94 [m^2]
Volumen total	56,480 [cm^3]	6,997 [m^3]

Tabla 12: Parámetros geométricos establecidos para el modelo B modelado.

Parámetros geométricos	Modelo (1:50)	Prototipo (1:1)
ϕ_{Boya}	3,132 [cm]	1,57 [m]
h_{Boya}	7,33 [cm]	3,67 [m]
Área Plana	8,62 [cm^2]	2,155 [m^2]
Volumen total	56,47 [cm^3]	7,06 [m^3]

A continuación, se pueden observar los planos referentes a cada modelo junto a como se realizaron cada modelo.

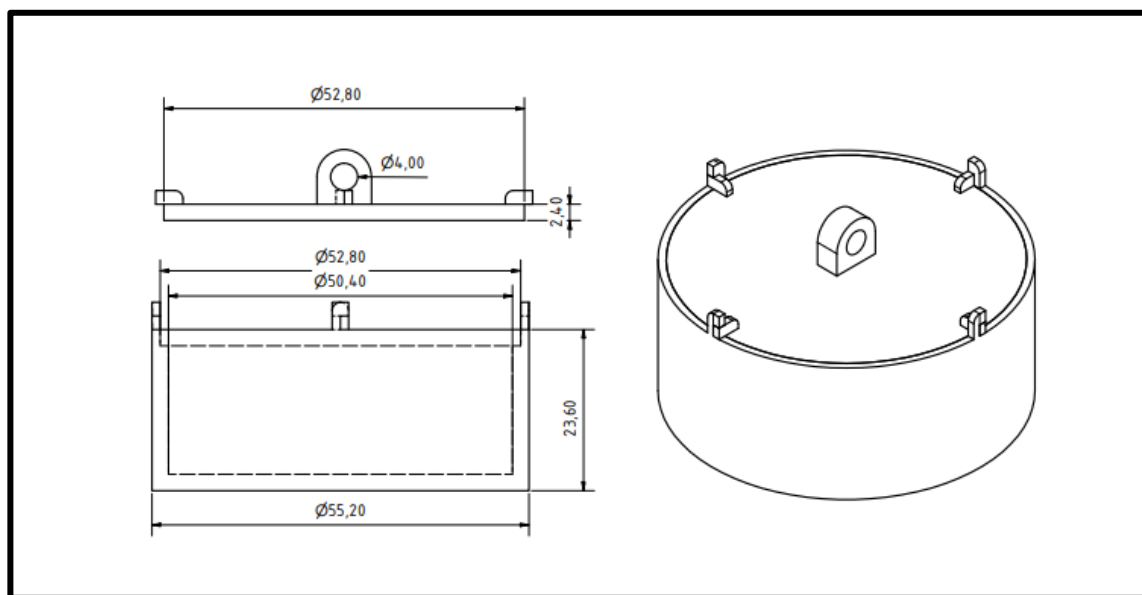


Ilustración 21: Dimensiones geométricas modelo A

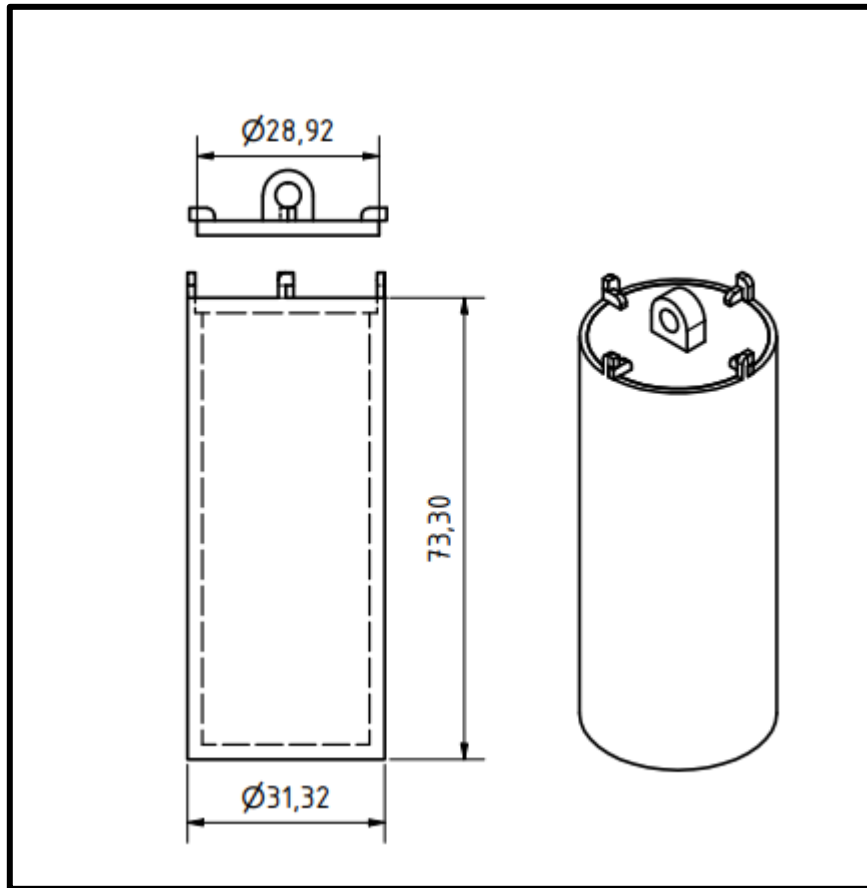


Ilustración 22: Dimensiones geométricas modelo B.

Para la realización de las pruebas se emplearán los modelos A_1 , A_2 y B_1 de los cuales los dos primeros conservan la geometría del modelo A mientras que el ultimo emplea la geometría del modelo B.

Los modelos A_1 y A_2 se diferencian en cuanto a sus propiedades de masa afectando directamente a la profundidad de calado y volumen sumergido y en consecuencia al empuje resultante.

Tabla 13: Parámetros de cuerpo obtenidos para el modelo A.

Parámetros de cuerpo	A_1 (1: 1)	A_1 (1: 50)	A_2 (1: 1)	A_2 (1: 50)
Masa	2.499 [kg]	20,48 [gr]	3.536 [kg]	28,3 [gr]
ρ_{cuerpo}	357,15 [$\frac{kg}{m^3}$]	0,36 [$\frac{g}{cm^3}$]	500 [$\frac{kg}{m^3}$]	0,5 [$\frac{g}{cm^3}$]
L_{calado}	0,45 [m]	9,07 [mm]	0,57 [m]	11,4 [mm]

CoB (Z)	0,23 [m]	4,54 [mm]	0,285 [m]	5,7 [mm]
Volumen sumergido	2,67 [m^3]	21,7 [cm^3]	3,41 [m^3]	27,28 [cm^3]
% Volumen sumergido	38,42	38,42	48,74	48,74

Tabla 14: Parámetros de cuerpo obtenidos para el modelo B.

Parámetros de cuerpo	B_1 (1: 1)	B_1 (1: 50)
Masa	4.598 [kg]	36,78 [gr]
ρ_{cuerpo}	650 [$\frac{kg}{m^3}$]	0,65 [$\frac{g}{cm^3}$]
L_{calado}	2,62 [m]	52,3 [mm]
CoB (Z)	1,31 [m]	26,15 [mm]
Volumen sumergido	5,635 [m^3]	45,08 [cm^3]
% Volumen sumergido	79,83	79,83

8.1.2. Modelo del sistema de amarre.

1. Criterio diseño fondeo tradicional

Para el diseño del sistema de catenaria se cuenta con ciertos criterios iniciales de diseño, los cuales se detallarán a continuación:

- El ángulo generado entre la superficie del fondo y la catenaria es de 25°.
- Se debe iterar entre el ángulo generado desde el inicio del amarre hasta el dispositivo WEC, siendo este de 20° permitiendo así el generar tensión vertical con valor igual a 0 en el amarre con el fondo.
- El largo total de la catenaria se determina mediante la ecuación general para catenaria.

$$s = \frac{T_H}{w} \sinh \left(\frac{xw}{T_H} \right)$$

2. Criterio diseño fondeo SALM

Se debe tener ciertos criterios a la hora de diseñar el sistema de fondeo tipo SALM, los cuales vienen siendo:

- El ángulo entre el cabo y el cable de sujeción en la excursión máxima del WEC es igual a 160 grados. Aunque los ángulos de hasta 180 grados son físicamente posibles, la fuerza horizontal resultante aumenta demasiado exponencialmente después de 160 grados (ilustrado en la figura 3). Por lo tanto, esto puede no puede formar parte del rango utilizable del sistema de amarre, por lo que se excluyó.
- La carga de diseño de los cabos se establece igual a la tensión máxima resultante en ellos bajo la condición de diseño.
- La profundidad de la boya en reposo, z_{rest} , se calcula teniendo en cuenta la altura máxima de las olas (33% de $1,86 \cdot H_s$ de una tormenta de cien años) y la mitad de la altura de la boya, donde ésta se supone que la boya es una esfera.
- La longitud del “hawser” es de 21 m.
- El volumen de la boya se calcula en función de la fuerza de flotación necesaria para cumplir las especificaciones del sistema de amarre. La fuerza gravitatoria combinada del sistema se compone de el peso propio de la boya, el peso del anclaje, la mitad del peso del cable de amarre y 250 kg de equipo adicional.
- La longitud del anclaje es el resultado de la profundidad del agua, la profundidad de inmersión de la boya en reposo y la altura de la conexión en el lecho marino.

Se debe tener ciertas consideraciones y supuestos para analizar el sistema tipo SALM:

- No se considera línea de amarre posterior.
- Se ignoran los efectos dinámicos en la línea.
- Las fuerzas de la corriente resultantes del movimiento de la cadena en el agua y en el lecho marino son despreciadas.
- Se supone que la línea de amarre está conectada al WEC al nivel medio del agua o centro de la base.

3. Selección de materiales

Primeramente, se seleccionan los materiales a trabajar como prototipo, basando el estudio en catálogos existentes a nivel comercial para 3 grandes materiales, sintéticos, cable de acero y cadenas con y sin contrate. A los cuales se le realizara el escalamiento necesario para poder encontrar una similitud lo más cercana posible a la perfecta.

- Cuerda sintética: Para este tipo de amarre se selecciona el mismo material empleado en el estudio “*Modelación numérica del forzamiento externo en la interacción energética y dinámica de boyas cautivas con oleaje en aguas someras*”, para su posterior modelación manteniendo así los alcances de este estudio.
- Se analizará el amarre prototipo de una cuerda Superline Steelite Xtra del catálogo TREFIL CABLE, de donde se obtiene sus propiedades y características, donde esta cuerda es fabricada con fibra de polietileno de alto modulo HMPE.

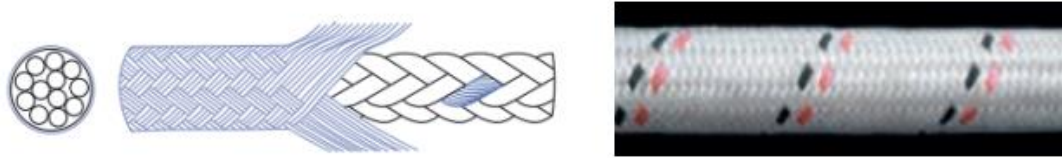


Ilustración 23: Cable sintético trenzado con núcleo de 12 cordones.

Los parámetros más relevantes de este material son:

Tabla 15: Parámetros cable sintético a prototipar.

Diámetro nominal [mm]	Peso [kg/m]	Carga de rotura [kN]	Modulo elasticidad [kg/mm ²]
44	1,04	1315	3200

Una vez definido el material a emplear prototipo, se escala los valores para obtener las dimensiones del modelo, siguiendo el escalamiento planteado en la sección 7.2.1. donde se obtuvo los siguientes valores.

Tabla 16: Valores modelo del cable empleado.

Diámetro	0,88	Mm
Peso	0,000416	kg/m
Carga de rotura	0,01052	kN
Módulo de Young	3200	kg/mm ²

Teniendo los valores necesarios se procede a encontrar materiales que se ajusten a los parámetros geométricos y dinámicos, obteniendo como resultado el uso de cordeles de nylon cuyas características finales son:

Tabla 17: Valores modelo del cable real obtenido empleando nylon.

Diámetro	1	Mm
Peso	0,00151773	kg/m
Carga de rotura	-	kN
Módulo de Young	2900	kg/mm ²

- Cable de acero: Para el amarre tipo cable se empleará el cable modelo 6x17 AA empleado para fondeo permanente del catálogo PRODINSA, cuyas características más relevantes son:
 - Alta resistencia a la tracción.
 - Alta resistencia al rozamiento.
 - Máxima resistencia a la oxidación.

Tabla 18: Parámetros modelo del cable de acero empleado en el trabajo de Esteban Parra.

Diámetro nominal [mm]	Peso [kg/m]	Carga de rotura [kN]	Modulo elasticidad [kg/mm ²]
32	4,3	667,38	6000

De igual forma que para el cable sintético, una vez que se estima el material a emplear prototipo, se escala los valores para obtener las dimensiones del modelo, siguiendo el mismo procedimiento.

Tabla 19: Valores modelo del cable de acero empleado en el trabajo de Esteban Parra.

Diámetro	0,64	Mm
Peso	0,00172	kg/m
Carga de rotura	0,00533904	kN
Módulo de Young	6000	kg/mm2

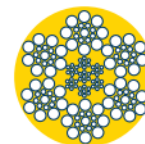
Teniendo los valores necesarios se procede a encontrar materiales que se ajusten a los parámetros geométricos y dinámicos, obteniendo como resultado el uso de cordeles de nylon cuyas características finales son:

Tabla 20: Valores modelo del cable real obtenido empleando alambre acerado.

Diámetro	0,76	Mm
Peso	0,00113354	kg/m
Carga de rotura	-	kN
Módulo de Young	2202,5	kg/mm2



Salmonplast® 6x17 AA



Ø Nom	Peso lineal	MBL
(pulg.)	(kg/m)	(tm)
3/4"	1,67	29,1
7/8"	2,25	39,6
1"	2,61	46,2
1 1/8"	3,67	61,6
1 1/4"	4,3	68,1

Ilustración 24: Extracto del catálogo PRODINSA del cable Salmonplast 6x17 AA.

- Cadenas: Se analizará solo la cadena sin contrate empleada en el trabajo “modelación numérica del forzamiento externo en la interacción energética y dinámica de boyas cautivas con oleaje en aguas someras”.

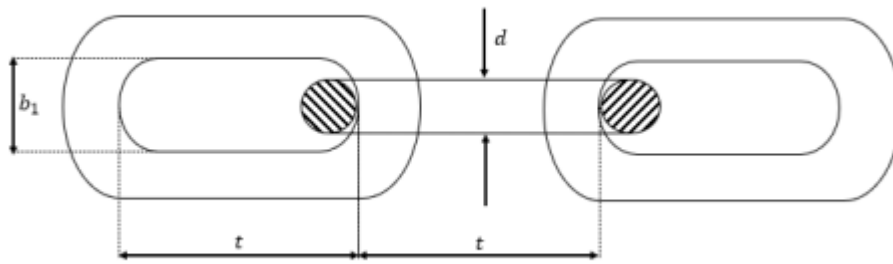


Tabla 21: Especificaciones cadena escala prototipo.

Diámetro de cadena (d) [mm]	Largo interior (t) [mm]	Ancho interior (b_1) [mm]	Peso [kg/m]	Carga de rotura [kN]	Carga de prueba [kN]
16	64	25,6	5,2	132,3	66,2

Teniendo ya los materiales a prototipar se procede a buscar los equivalentes para el análisis físico en el laboratorio siguiendo el escalamiento de igual forma se realizó para el resto de los materiales.

Tabla 22: Valores modelo de la cadena sin contrrete empleada en el trabajo de Esteban Parra.

diámetro de cadena	0,32	mm
Largo interior	1,28	mm
Peso	0,00208	kg/m
Carga de rotura	0,0010584	kN
Módulo de young	2100	kg/mm ²

Teniendo los valores necesarios se procede a encontrar materiales que se ajusten a los parámetros geométricos y dinámicos, obteniendo como resultado el uso de cordeles de nylon cuyas características finales son:

Tabla 23: Valores modelo de la cadena real obtenidos empleando cadena metálica.

diámetro de cadena	0,5	mm
Largo interior	3,25	mm
Peso	0,016	kg/m
Carga de rotura		kN
Módulo de Young	2100	kg/mm ²

- Boya auxiliar sistema SALM: Para la estimación de las dimensiones de la boya auxiliar implementada en el sistema SALM se escogieron esferas de poliestireno expandido (Plumavit) cuya densidad se promedió en 10 kg/m^3 de diversos diámetros de tal forma que se cumpliera con los criterios de diseño propuestos en el apartado **8.1.2**. Una vez que se obtuvieron las esferas de distintos diámetros cercanos a los estimados se corrigió estocásticamente la densidad del material recalculando el diámetro de las boyas.

Tabla 24: Características boya auxiliar SALM.

	Preliminar	Final
Diámetro	25 [mm]	33 [mm]
Densidad	$10 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$18 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

8.2. Características generales de operación

8.2.1. Estados de mar

Para la selección del estado empleado en el sistema se modelaron los estados de mar evaluados en el trabajo de tesis “Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso”, en donde a continuación presentaremos un gráfico que permite apreciar la curva de potencia de oleaje en función de la altura de ola y el periodo significativo para el sector de punta Curaumilla.

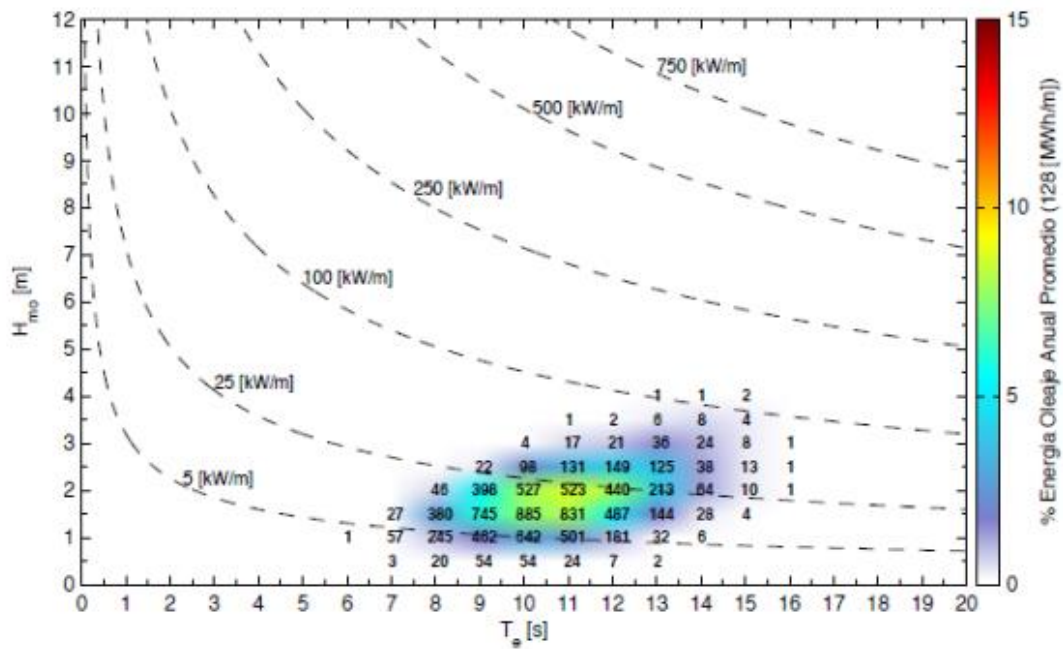


Ilustración 25: Curva de potencia del oleaje en función de la altura y periodo significativo.

De lo anterior y basándonos en el trabajo previamente mencionado considerando a su vez las limitaciones del canal junto con otras solicitaciones posibles para los dispositivos WEC se seleccionaron las siguientes combinaciones de altura de ola y periodo característico.

Tabla 25: Características de oleaje para altura y periodo.

	Periodo,i [s]				Altura de ola,j [cm]		
	1	2	3	4	1	2	3
Prototipo	8	10,53	12	13,5	168	250	350
Modelo	1,13	1,48	1,69	1,909	3,36	5	7

Tabla 26: Estados de mar a emplear en el estudio.

Estados de mar	Periodo [s]	altura de ola [cm]
E11	1,13	3,36
E12	1,13	5
E13	1,13	7
E21	1,48	3,36
E22	1,48	5
E23	1,48	7
E31	1,697	3,36
E32	1,697	5
E33	1,697	7
E41	1,909	3,36
E42	1,909	5
E43	1,909	7

En donde se empleará el código $E_{i,j}$ para determinar las diversas combinaciones específicas para los diversos periodos y alturas. Dando especial énfasis en los estados $E_{1,2}$, $E_{2,1}$, $E_{2,2}$, $E_{3,2}$ cómo se mencionó a comienzos de la sección de metodología, debido a que estos estados corresponden al de menor captación energética, al más frecuente y al de mayor captación energética respectivamente según los estudios realizados en “Modelación numérica del forzamiento externo en la interacción energética y dinámica de boyas cautivas con oleaje en aguas someras”.

8.2.2. Capacidad de generación de olas y registro digital

La obtención del tren de oleaje requerido para la realización de las pruebas se realiza mediante el accionamiento de un motor lineal Linmot P10-70x320, el cual se ubica en la parte superior del canal de olas en el extremo opuesto al sector denominado “playa”. Este motor se encuentra sobre dos rieles sostenidos en las paredes laterales del canal. Este motor realiza la labor de impulsar la paleta generadora de las ondas que inducen el oleaje en la masa de agua al interior del tanque. A continuación se presenta las características del motor empleado:

- **Motor lineal Linmot P10-70x320:** Este motor tiene una longitud nominal de 1530 [mm] (Stroke), una fuerza peak de 2162 [N], fuerza continua de 673 [N]

y una velocidad y aceleración máxima de 5,9 [m/s] y 939 [m/s^2] respectivamente.



Ilustración 26: Motor lineal Linmot P10-70x320.

Para el correcto funcionamiento el motor es comandado por un servo drive, cuyas características son:

- **Servo Drive E-1400-GP-QN-1S:** Este servo drive es de la marca Linmot al igual que el motor empleado, con alimentación trifásica, teniendo la comunicación mediante protocolos CANopen y LinRS con una configuración por Ethernet.



Ilustración 27: Servo Drive E-1400-GP-QN-1S

Para que el sistema opere, se emplea una interfaz desarrollada empleando el software Labview, el cual transforma una señal sinusoidal de amplitud ajustable medida de entre 0 a 5 [V] y una frecuencia ajustable entre 0 a 1 [hz] durante un tiempo de simulación en minutos, las cuales al traducir esta señal se obtiene el estado de oleaje deseado y monitoreado por resistores.

- **Resistores de monitoreo de oleaje:** Dentro del canal se ubican 4 resistores de la empresa HR Wallingford junto con un adquisidor de señales NI USB-6008, el cual posee 12 bits de resolución, una tasa de muestreo de 10000 muestras por

segundo. Estos resistores entregan información de forma puntual, es decir, que miden el comportamiento en el punto exacto donde esta ubicado.



Ilustración 28: Resistor de medición.

Para la obtención de datos y gráficos de posicionamiento e interacción de la boya con respecto al oleaje se emplea una cámara de video digital GoPRO HERO 5 Black cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación:

- Dimensiones: 62 x 44,6 x 33,7 [mm]
- Peso: 117 [g]
- Batería: Recargable de 1220 [mAh]
- Resolución de video: 4K a 30 fps y nativo 1080p a 120 fps.



Ilustración 29: Cámara GoPRO HERO 5 Black.

9. Resultados

9.1. Calibración canal de olas

Primeramente, se obtuvo experimentalmente la curva de trabajo junto al rango de operación con la que trabaja la paleta, comparándolas con la curva entregada teórica, permitiendo así obtener el número de datos y el espaciamiento Stroke-temporal, observando que nos encontramos dentro de los márgenes teóricos y encontrando además el punto de inflexión.

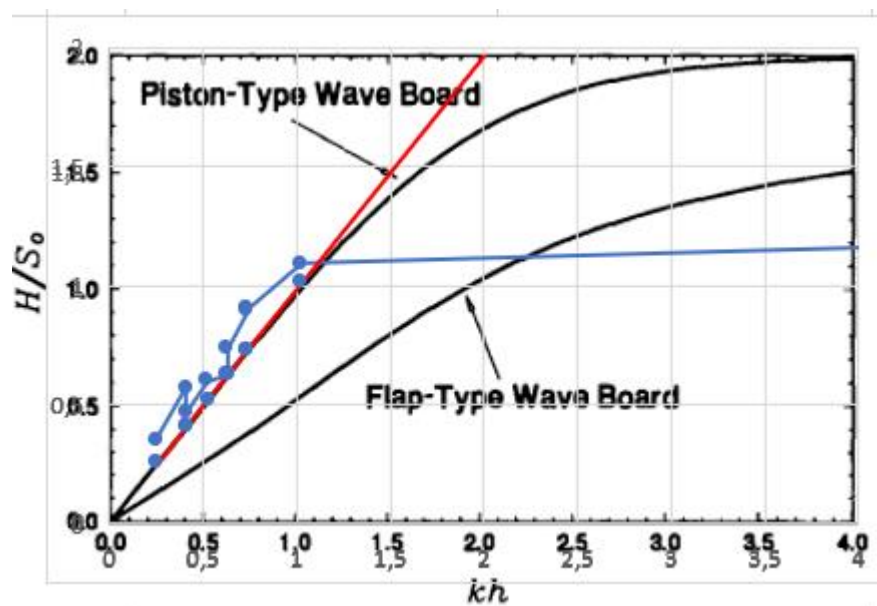


Ilustración 30: comparación entre curvas obtenidas, (i) en negro la gráfica de operación de la paleta tipo pistón, (ii) en rojo el comportamiento teórico, (iii) en azul el comportamiento obtenido mediante resistores.

Gracias a la ilustración N°30 se puede observar que nos encontramos operando dentro de los límites técnicos de la paleta tipo pistón.

En la siguiente prueba, la cual consistió en conservar la altura y periodo significativo variando el número de datos, tiempo de medición del archivo (dependiente del número de datos) y espaciamiento entre cada paso de tiempo del archivo se obtuvieron los siguientes resultados:

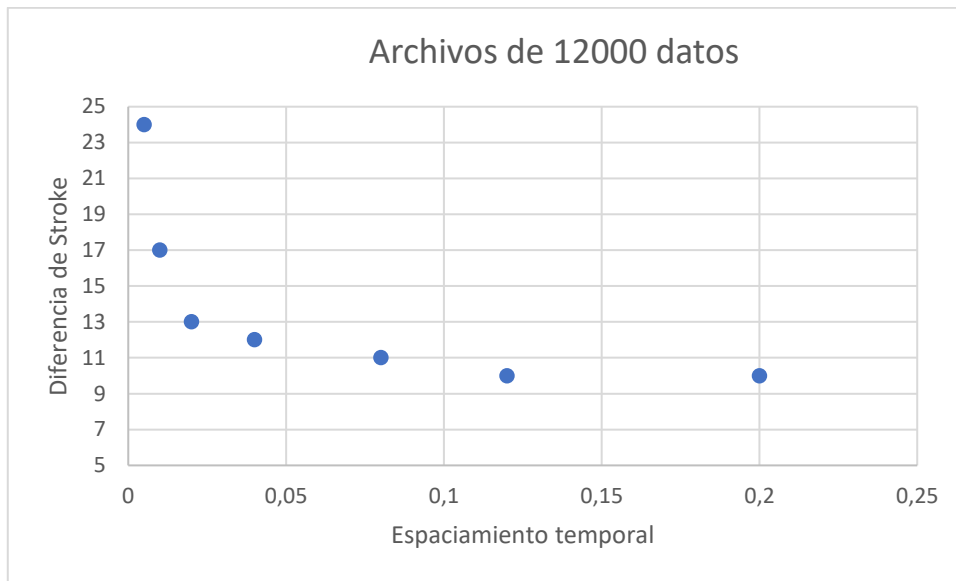


Ilustración 31: Experimentos con 12.000 datos por archivo.

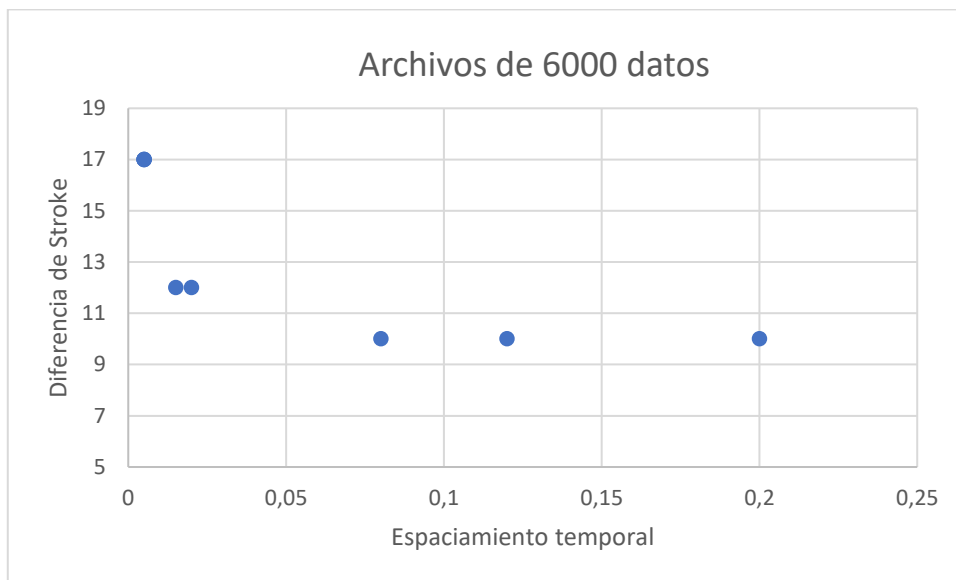


Ilustración 32: Experimentos con 6.000 datos por archivo.

Finalmente se analizó los resultados para diversos periodos, indicando que se obtuvo una precisión certera con respecto al control de los periodos esperados para recrear, como se aprecia en el grafico a continuación.

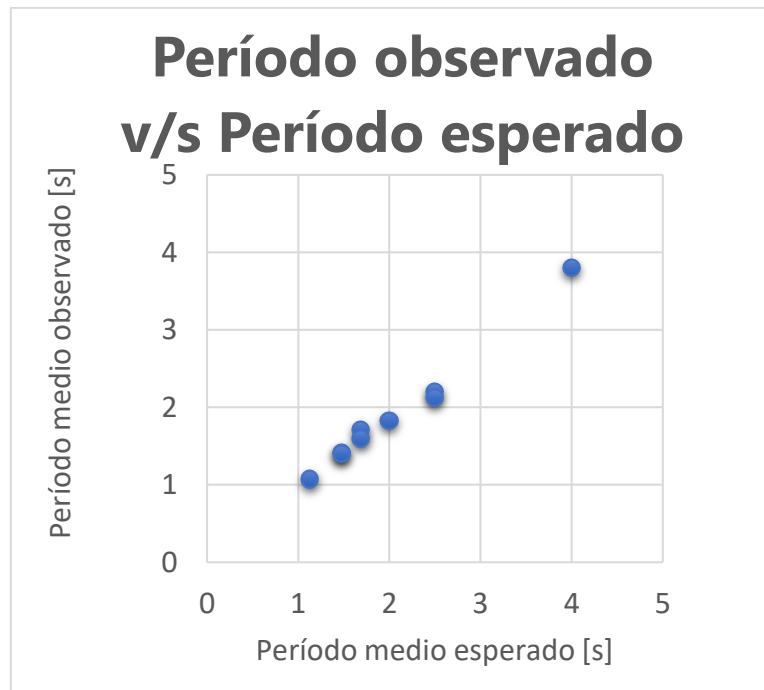


Ilustración 33: Comparación entre el periodo leído por los resistores y el periodo esperado. Elaboración propia

9.2.1. Calibración archivo de oleaje irregular

En esta etapa se obtuvo como resultado final el recrear el espectro JONSWAP según los parámetros gobernantes para la quinta región de Chile, con la finalidad de tener una base teórica para la recreación de oleaje irregular.

- **JONSWAP**

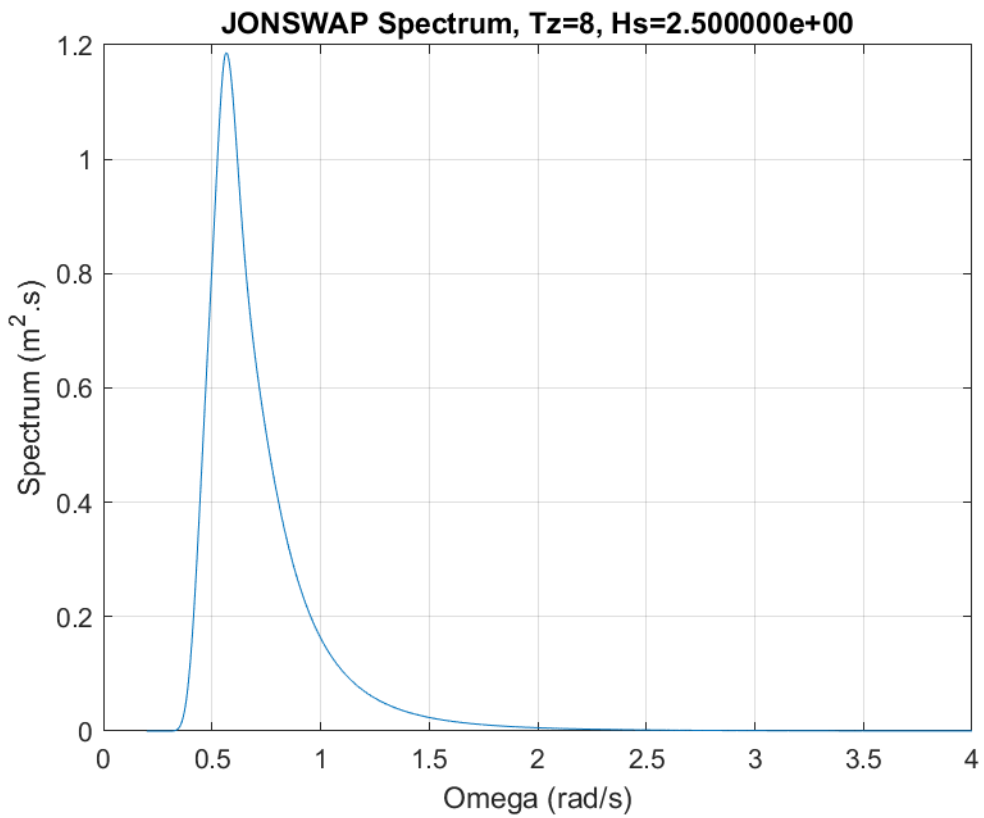


Ilustración 34: Espectro distribución JONSWAP.

Una vez que se recreara las condiciones base de diseño para la generación de oleaje irregular se procedió a generar la señal empleando el software MATLAB

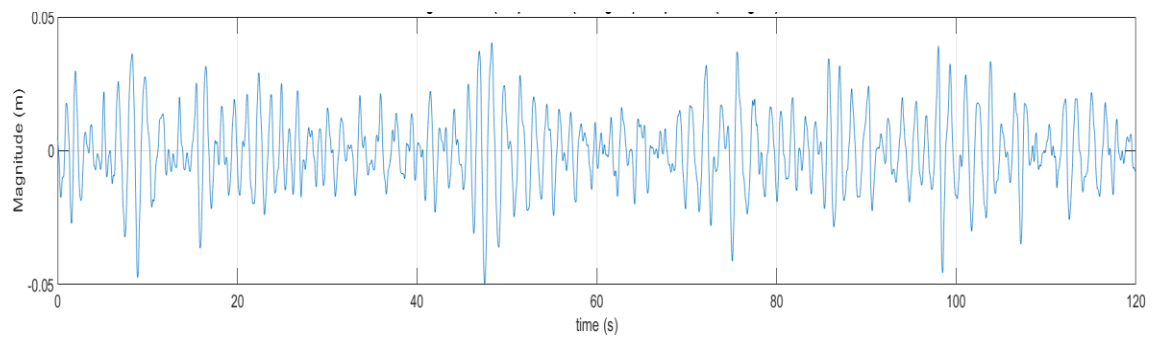


Ilustración 35: Archivo generado de oleaje irregular mediante MATLAB.

Finalmente, una vez que se generó oleaje irregular se procedió a emplear los conocimientos de la calibración previa para recrear la señal en su forma física

dentro del canal de olas, obteniendo la siguiente lectura por parte de los resistores.

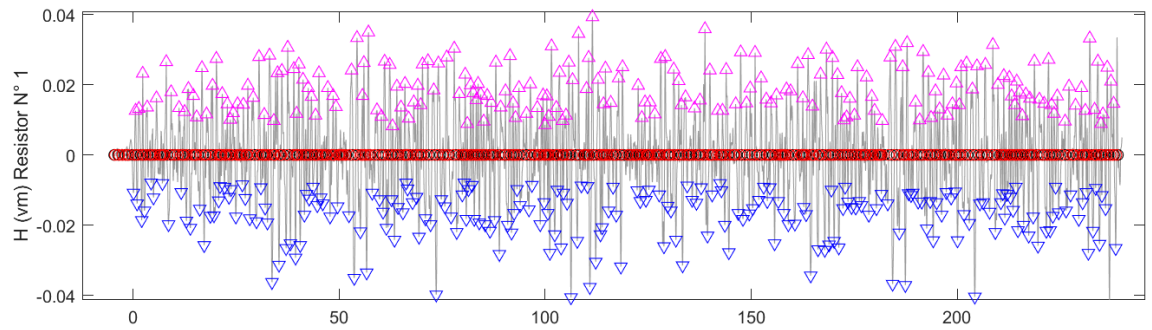


Ilustración 36: Archivo leído de los resistores.

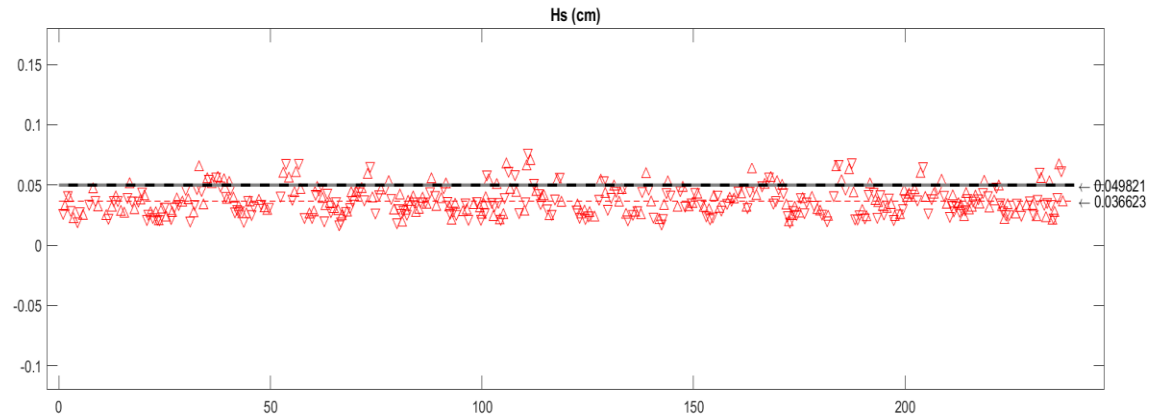


Ilustración 37: Lectura de altura significativa de ola irregular generada.

9.2. Resultados pruebas P01, P02 y P03

A continuación, se presentarán de manera representativa los resultados obtenidos mediante el empleo del software Tracker para el modelo de boyas A1 sometido al oleaje representativo del estado E22 empleando cable de acero para el amarre.

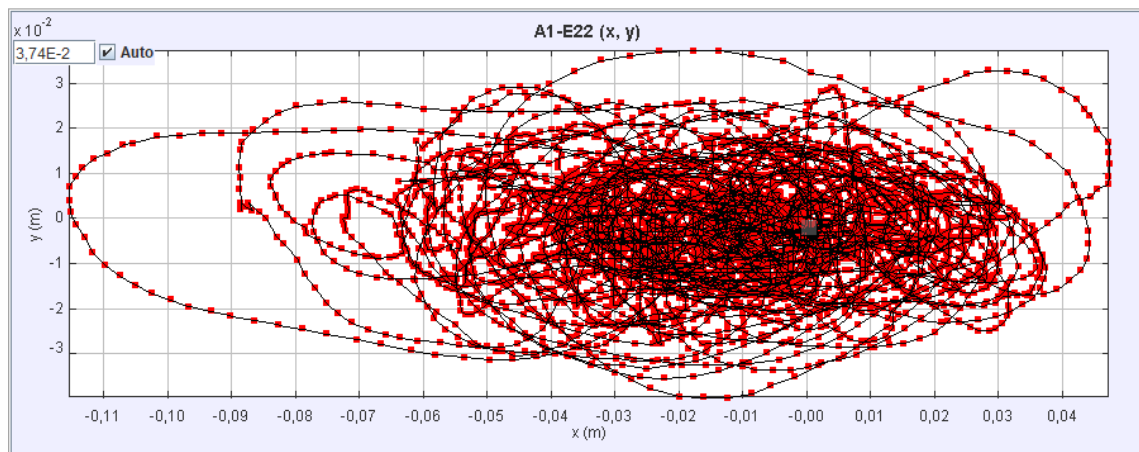


Ilustración 38: Trayectoria del dispositivo WEC, modelo A1 estado E22.

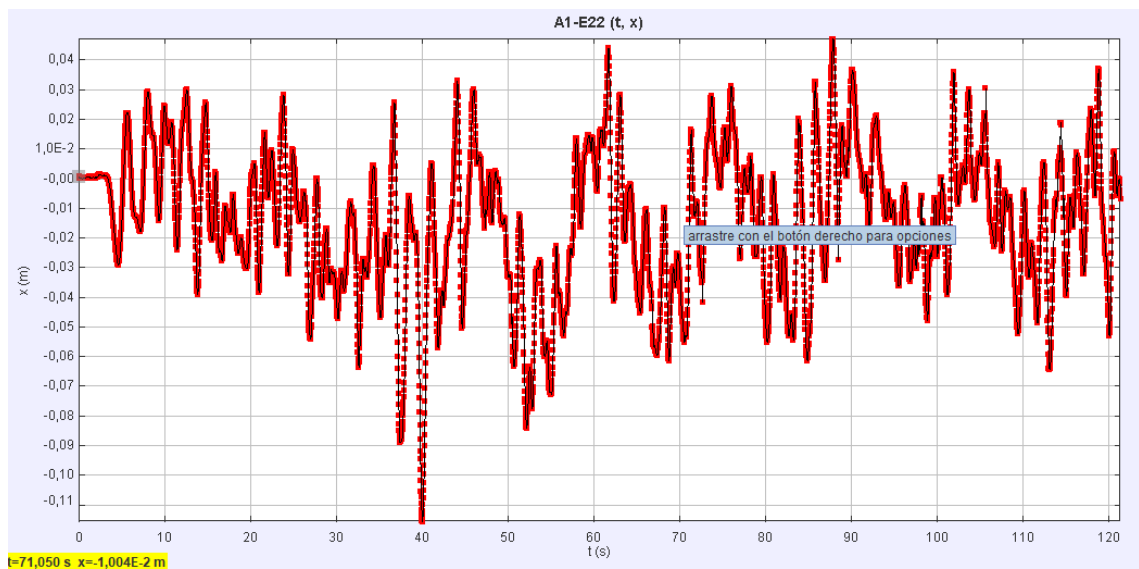


Ilustración 39: Desplazamiento horizontal del modelo A1 estado E22

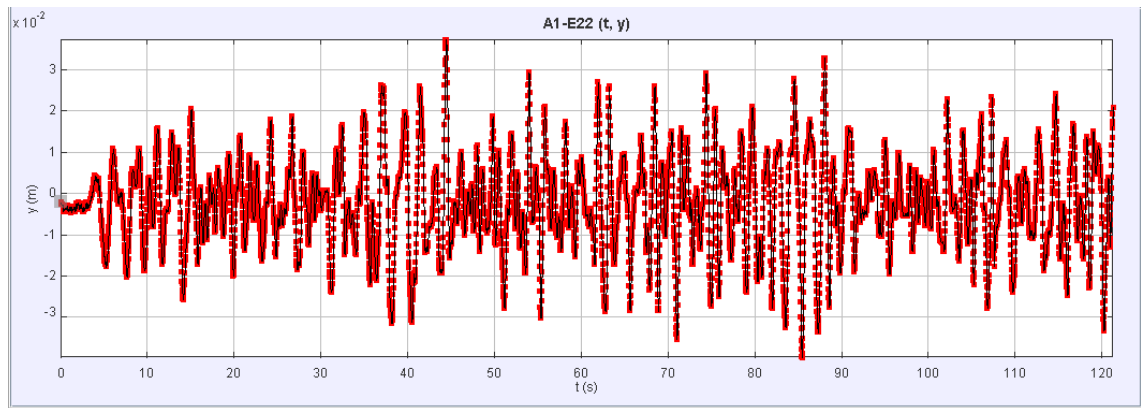


Ilustración 40: Desplazamiento vertical del modelo A1 estado E22.

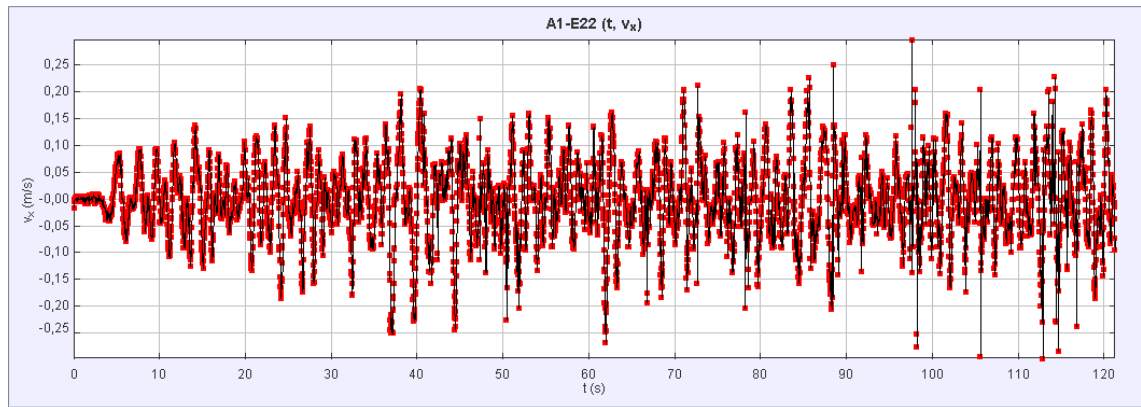


Ilustración 41: Velocidad horizontal del modelo A1 estado E22.

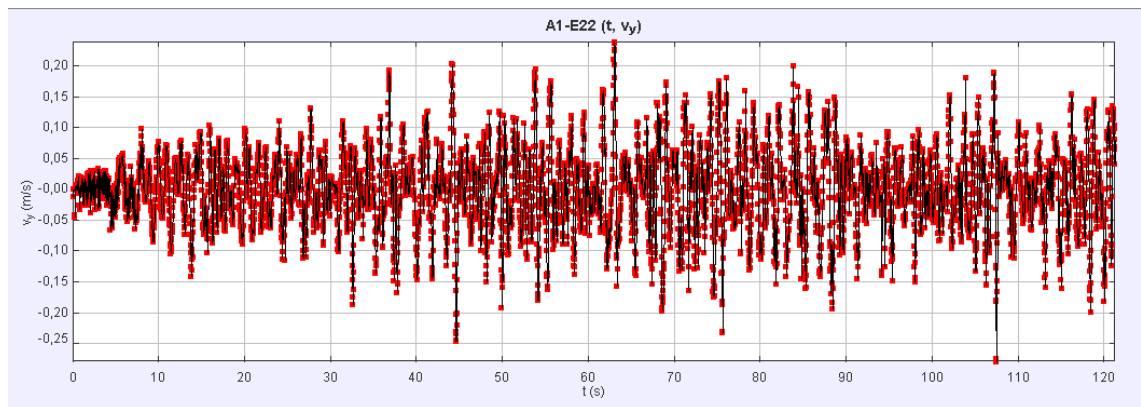


Ilustración 42: Velocidad vertical del modelo A1 estado E22.

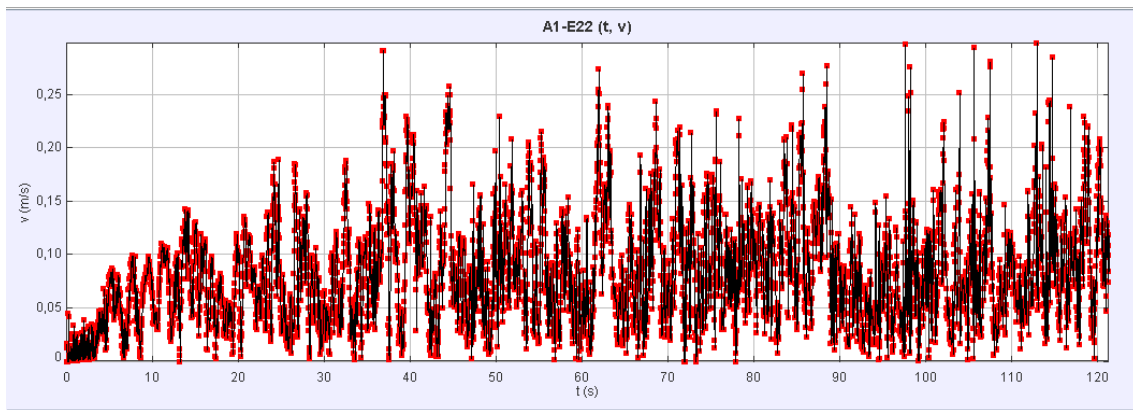


Ilustración 43: Velocidad total del modelo A1 estado E22.

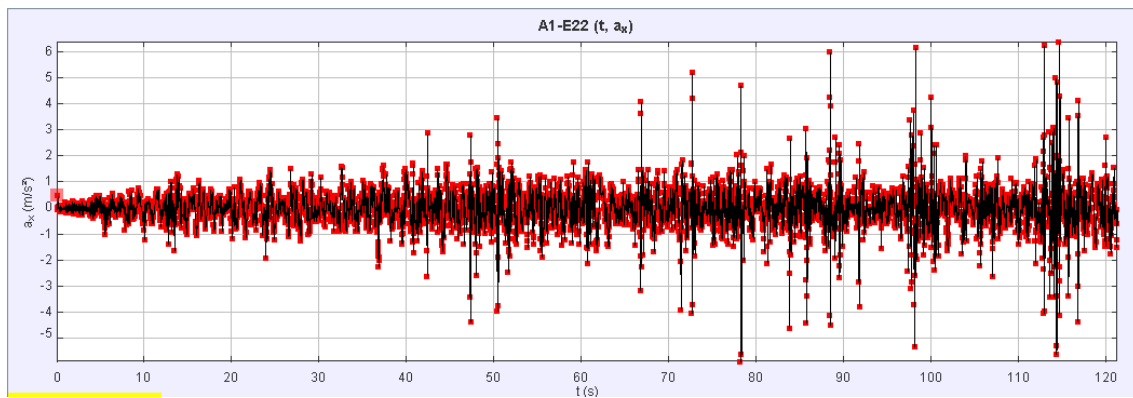


Ilustración 44: Aceleración horizontal del modelo A1 estado E22

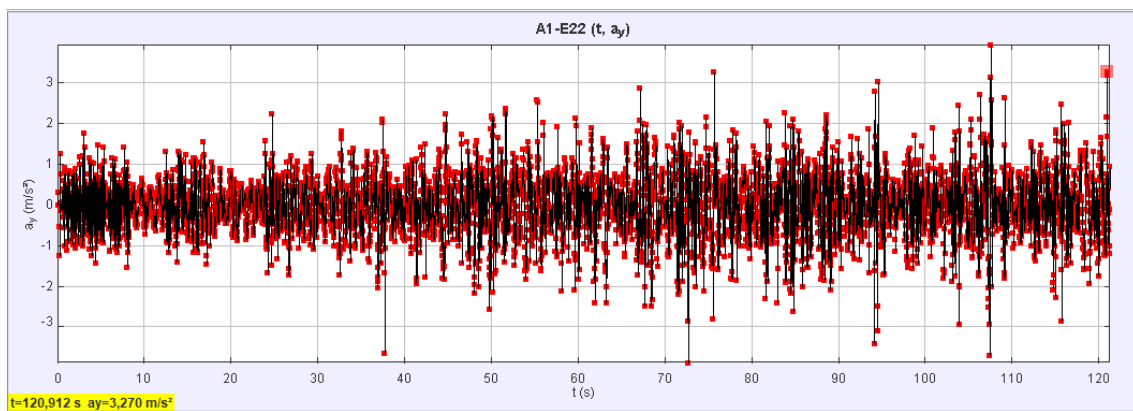


Ilustración 45: Aceleración vertical del modelo A1 estado E22

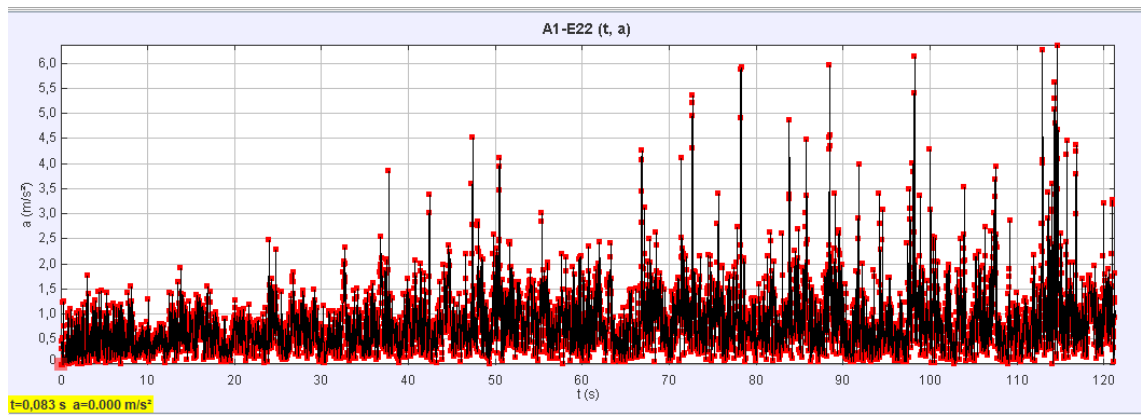


Ilustración 46: Aceleración total del modelo A1 estado E22

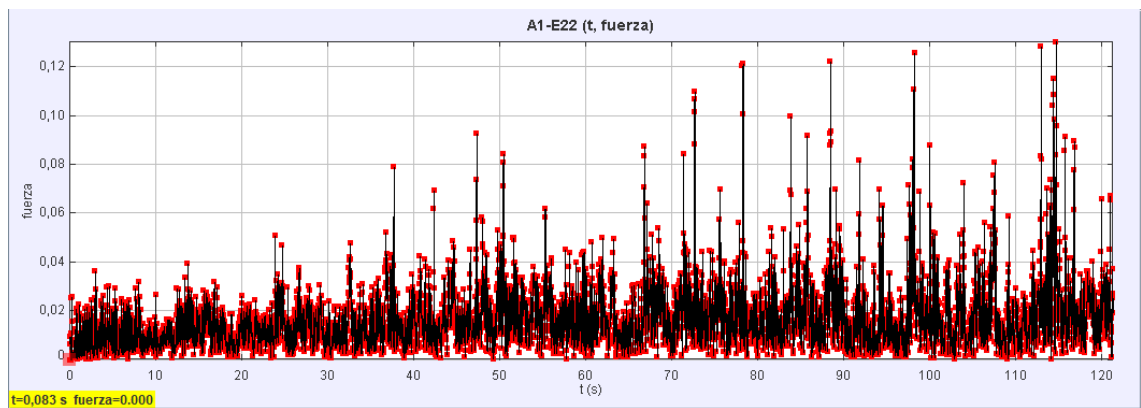


Ilustración 47: Fuerza total sobre el modelo A1 estado E22.

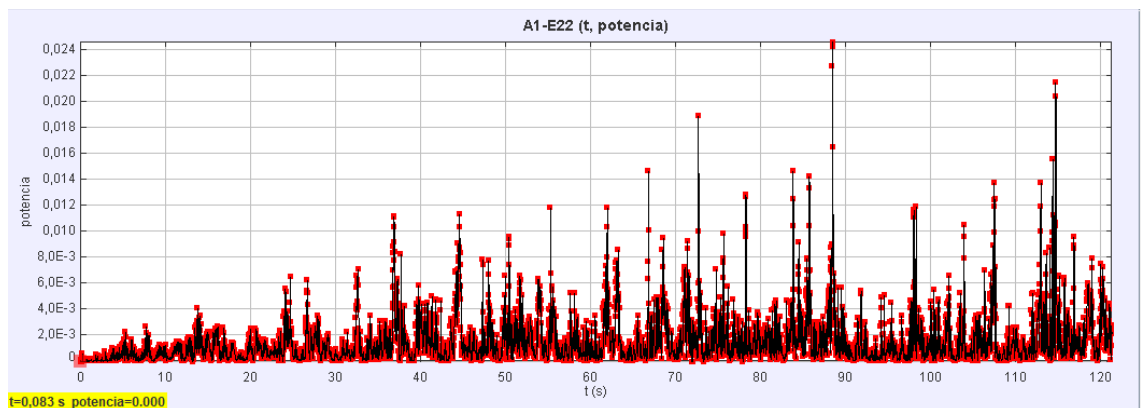


Ilustración 48: Potencia obtenida por el movimiento del dispositivo modelo A1 estado E22.

10. Análisis de resultados

10.1. Calibración oleaje irregular.

Esta prueba tenía la finalidad de crear una señal de oleaje irregular y su respectiva caracterización de forma física, permitiendo controlar los parámetros de altura significativa y periodo zero-crossing. A continuación, en la figura N°49 se presenta el resultado de la señal creada a escala prototipo junto a la escala modelo del estado de mar E22

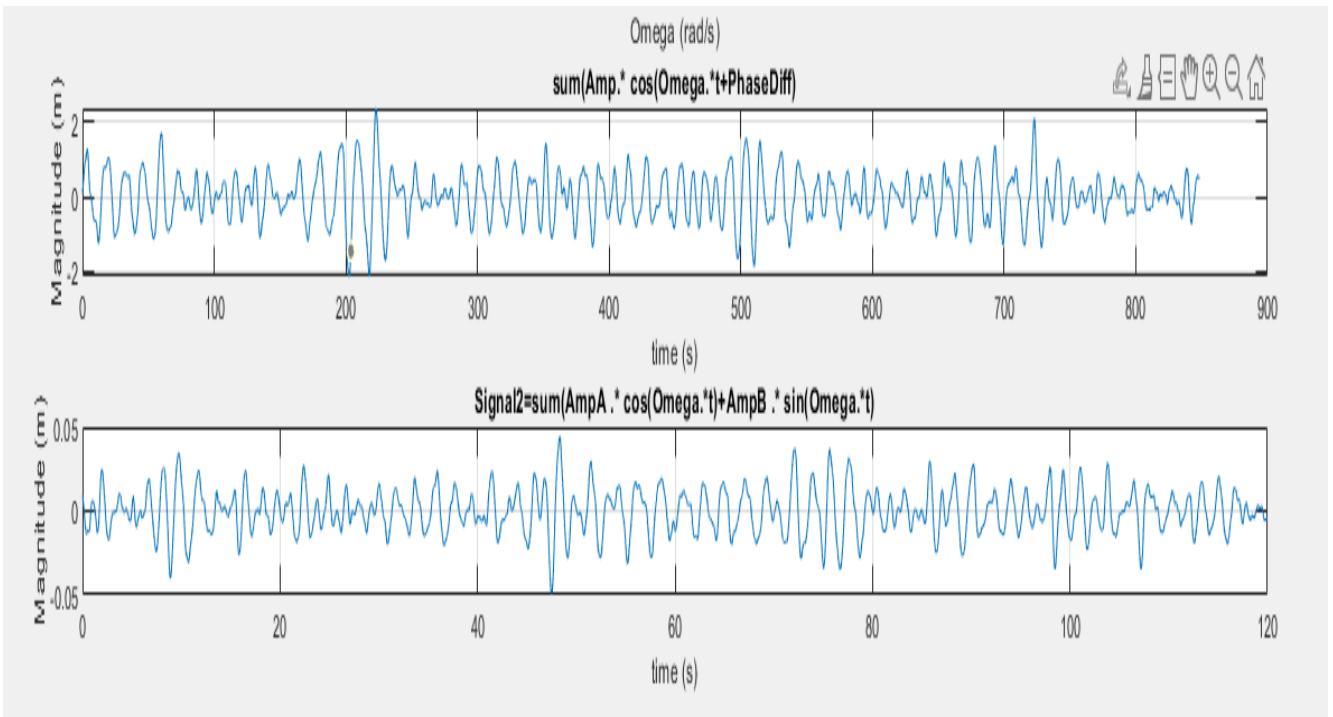


Ilustración 49: Comparación entre ola generada a escala prototipo y escala modelo.

Junto a esto se obtuvieron los porcentajes de error entre la representación física de la señal generada mediante MATLAB y la ola recreada en el canal de olas.

Primeramente, se señala las alturas obtenidas de la lectura del resistor y se comparan con las alturas y periodos deseados.

- Prueba P01-A1

	Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
Acero	3,19	1,11	3,36	1,13	5,05952381	1,7699115
	4,68	1,1	5	1,13	6,4	2,65486726
	6,49	1,2	7	1,13	7,28571429	6,19469027
	3,18	1,35	3,36	1,48	5,35714286	8,78378378
	5,06	1,46	5	1,48	1,2	1,35135135
	6,49	1,49	7	1,48	7,28571429	0,67567568
	3,03	1,5	3,36	1,697	9,82142857	11,6087213
	4,77	1,55	5	1,697	4,6	8,66234532
	6,83	1,57	7	1,697	2,42857143	7,48379493
	3,1	1,7	3,36	1,909	7,73809524	10,9481404
	4,99	1,7	5	1,909	0,2	10,9481404
	7,07	1,75	7	1,909	1	8,32896805
Sintético	3,19	1,11	3,36	1,13	5,05952381	1,7699115
	4,68	1,1	5	1,13	6,4	2,65486726
	6,49	1,2	7	1,13	7,28571429	6,19469027
	3,18	1,35	3,36	1,48	5,35714286	8,78378378
	5,06	1,46	5	1,48	1,2	1,35135135
	6,49	1,49	7	1,48	7,28571429	0,67567568
	3,03	1,5	3,36	1,697	9,82142857	11,6087213
	4,77	1,55	5	1,697	4,6	8,66234532
	6,83	1,57	7	1,697	2,42857143	7,48379493
	3,1	1,7	3,36	1,909	7,73809524	10,9481404
	4,99	1,7	5	1,909	0,2	10,9481404
	7,07	1,75	7	1,909	1	8,32896805

CADENA	3,19	1,11	3,36	1,13	5,05952381	1,7699115
	4,68	1,1	5	1,13	6,4	2,65486726
	6,49	1,2	7	1,13	7,28571429	6,19469027
	3,18	1,35	3,36	1,48	5,35714286	8,78378378
	5,06	1,46	5	1,48	1,2	1,35135135
	6,49	1,49	7	1,48	7,28571429	0,67567568
	3,03	1,5	3,36	1,697	9,82142857	11,6087213
	4,77	1,55	5	1,697	4,6	8,66234532
	6,83	1,57	7	1,697	2,42857143	7,48379493
	3,1	1,7	3,36	1,909	7,73809524	10,9481404
	4,99	1,7	5	1,909	0,2	10,9481404
	7,07	1,75	7	1,909	1	8,32896805

- **Prueba P01-A2**

	Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
ACERO	4,71	1,15	5	1,13	5,8	1,7699115
	4,84	1,38	5	1,48	3,2	6,75675676
	4,98	1,52	5	1,697	0,4	10,4301709
SINTETICO	4,71	1,15	5	1,13	5,8	1,7699115
	4,84	1,38	5	1,48	3,2	6,75675676
	4,98	1,52	5	1,697	0,4	10,4301709

CADENA	4,71	1,15	5	1,13	5,8	1,7699115
	4,84	1,38	5	1,48	3,2	6,75675676
	4,98	1,52	5	1,697	0,4	10,4301709

- Prueba P01-B1**

Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
4,97	1,19	5	1,13	0,6	5,30973451
4,61	1,39	5	1,48	7,8	6,08108108
4,67	1,53	5	1,697	6,6	9,8408957
4,97	1,19	5	1,13	0,6	5,30973451
4,61	1,39	5	1,48	7,8	6,08108108
4,67	1,53	5	1,697	6,6	9,8408957
4,97	1,19	5	1,13	0,6	5,30973451
4,61	1,39	5	1,48	7,8	6,08108108
4,67	1,53	5	1,697	6,6	9,8408957

- Prueba P02-A2**

Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
4,93	1,18	5	1,13	1,4	4,42477876
4,94	1,35	5	1,48	1,2	8,78378378
4,96	1,53	5	1,697	0,8	9,8408957
4,93	1,18	5	1,13	1,4	4,42477876

4,94	1,35	5	1,48	1,2	8,78378378
4,96	1,53	5	1,697	0,8	9,8408957
4,93	1,18	5	1,13	1,4	4,42477876
4,94	1,35	5	1,48	1,2	8,78378378
4,96	1,53	5	1,697	0,8	9,8408957

- **Prueba P02-B1**

Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
4,97	1,17	5	1,13	0,6	3,53982301
5,05	1,43	5	1,48	1	3,37837838
4,89	1,57	5	1,697	2,2	7,48379493
4,97	1,17	5	1,13	0,6	3,53982301
5,05	1,43	5	1,48	1	3,37837838
4,89	1,57	5	1,697	2,2	7,48379493
4,97	1,17	5	1,13	0,6	3,53982301
5,05	1,43	5	1,48	1	3,37837838
4,89	1,57	5	1,697	2,2	7,48379493

- **Prueba P03-A2**

Altura real	periodo real	Altura deseada	Periodo deseado	%error H	%error T
4,78	1,15	5	1,13	4,4	1,7699115
4,8	1,35	5	1,48	4	8,78378378
4,79	1,56	5	1,697	4,2	8,07307012

4,78	1,15	5	1,13	4,4	1,7699115
4,8	1,35	5	1,48	4	8,78378378
4,79	1,56	5	1,697	4,2	8,07307012

10.2. Prueba P01 Fondeo tradicional.

10.2.1. Modelo A1

Para este modelo se realizaron 12 ensayos aplicando 3 tipos de materiales para el anclaje de fondeo simple.

• ESTADO E11

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	3,19	1,11	0,00054443
Prototipo	159,5	7,85	481,21

○ Cable de Acero

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,0089	0,0259	-0,040	0,0659
Heave	0,0011	0,0233	-0,0257	0,049

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,445	1,295	-2	3,295

Heave	0,055	1,165	-1,285	2,45
-------	-------	-------	--------	------

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,0514	0,2145	0	0,0306
prototipo	0,36345	1,51674	0	0,21637

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,5560	1,8151	0	0,3
prototipo	0,5560	1,8151	0	0,3

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,0114	0,0372	0	0,0061
prototipo	1425,0	4650,0	0,0	762,5
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,0006298	0,0062	0	0,00063248
prototipo	556,67	5480,08	0,00	559,04

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,1568
Desempeño de captura	20,9574

RAO

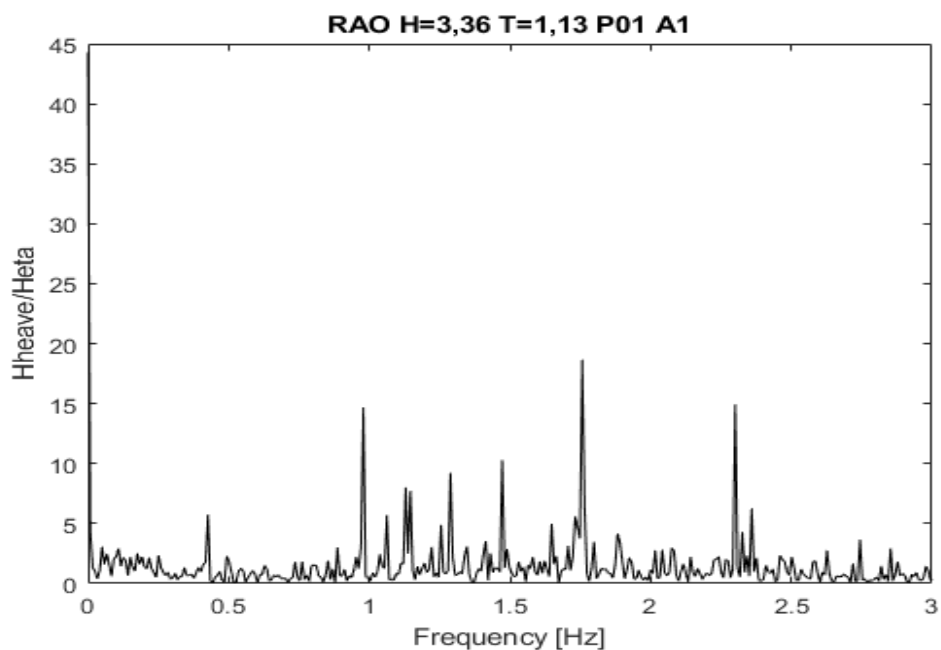


Ilustración 50: Respuesta RAO para modelo A1 prueba P01 altura 3,36 [cm] y periodo 1,13 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,0112	0,0389	-0,0593	0,0982
Heave	0,0007902	0,0283	-0,0247	0,0530

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,56	1,945	-2,965	4,91
Heave	0,03951	1,415	-1,235	2,65

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,0549	0,2143	0	0,0325
prototipo	0,38820	1,51533	0	0,22981

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,4329	2,4371	0	0,2542
prototipo	0,4329	2,4371	0	0,2542

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,0089	0,0499	0	0,0052
prototipo	1112,5	6237,5	0	650
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,0005744	0,0057	0	0,0006352
prototipo	507,70	5038,14	0,00	561,44

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0550
Desempeño de captura	19,1127

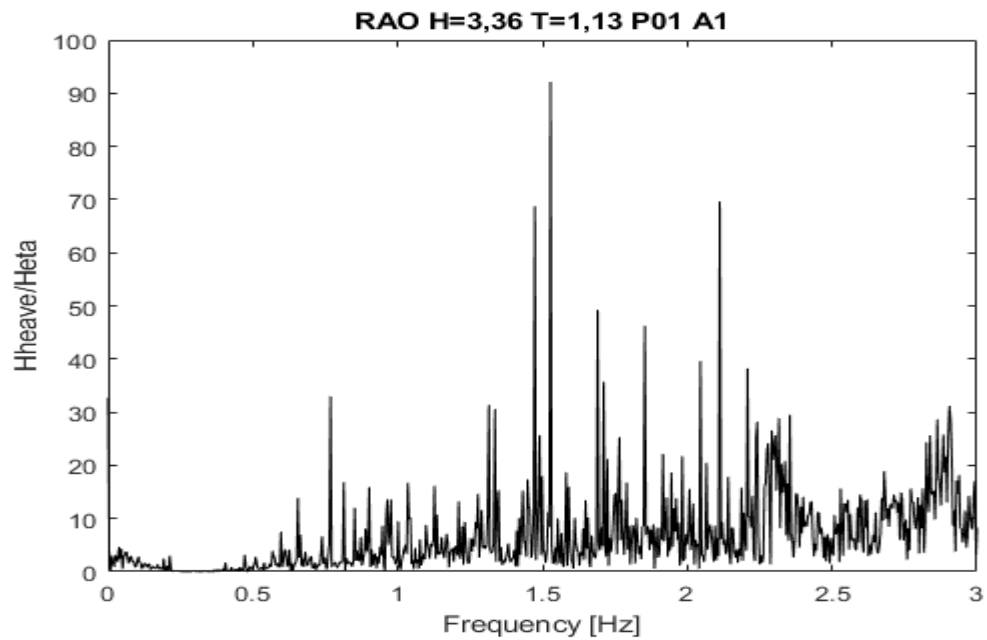


Ilustración 51: respuesta RAO modelo A1 prueba P01 sintético altura 3,36 [cm] periodo 1,13 [seg]

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,0114	0,0207	-0,0508	0,0715
Heave	0,0020	0,0235	-0,0232	0,0467

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,57	1,035	-2,54	3,575
Heave	0,1	1,175	-1,16	2,335

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,0634	0,2213	0	0,0389
prototipo	0,44831	1,56483	0,00000	0,27506

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,9201	3,9905	0	0,623
prototipo	0,9201	3,9905	0	0,623

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,0188	0,0817	0	0,0128
prototipo	2350	10212,5	0	1600
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,0013	0,0113	0	0,0013
prototipo	1149,05	9987,88	0,00	1149,05

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,3892
Desempeño de captura	43,2826

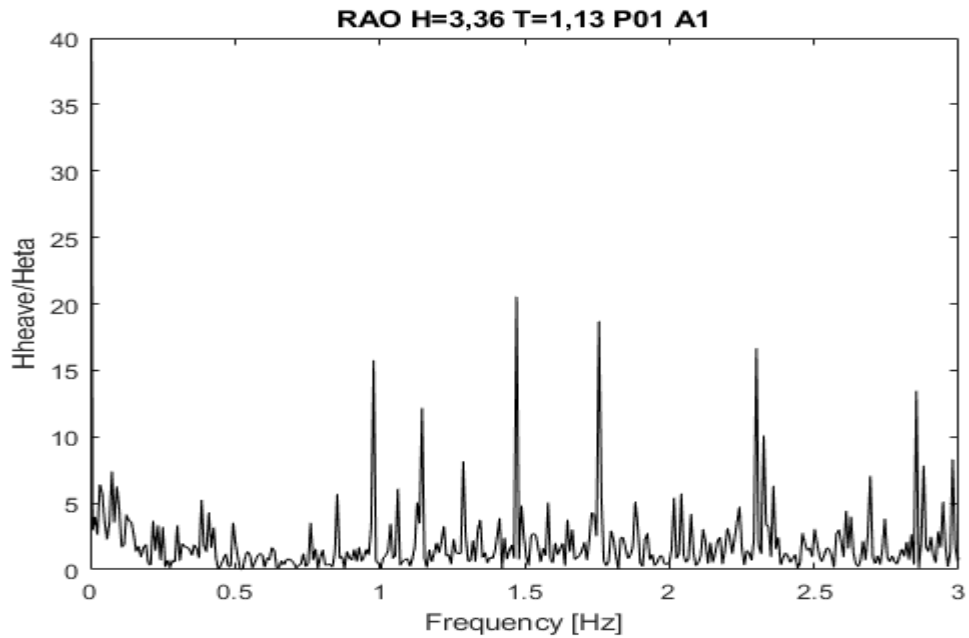


Ilustración 52: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 Cadena altura 3,36 [cm] periodo 1,13 [seg].

- **ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,68	1,11	0,0012
Prototipo	234	7,78	1060,66

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,0197	0,0348	-0,0941	0,1290
Heave	0,0004504	0,0378	-0,03	0,0678

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,985	1,74	-4,705	6,45
Heave	0,02252	1,89	-1,5	3,39

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,0829	0,3205	0	0,0456
prototipo	0,58619	2,26628	0,00000	0,32244

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,7497	3,4132	0	0,4050
prototipo	0,7497	3,4132	0	0,4050

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,0154	0,0699	0	0,0083
prototipo	1925	8737,5	0	1037,5
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,0014	0,0144	0	0,0014
prototipo	1237,44	12727,92	0,00	1237,44

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2110
Desempeño de captura	21,9392

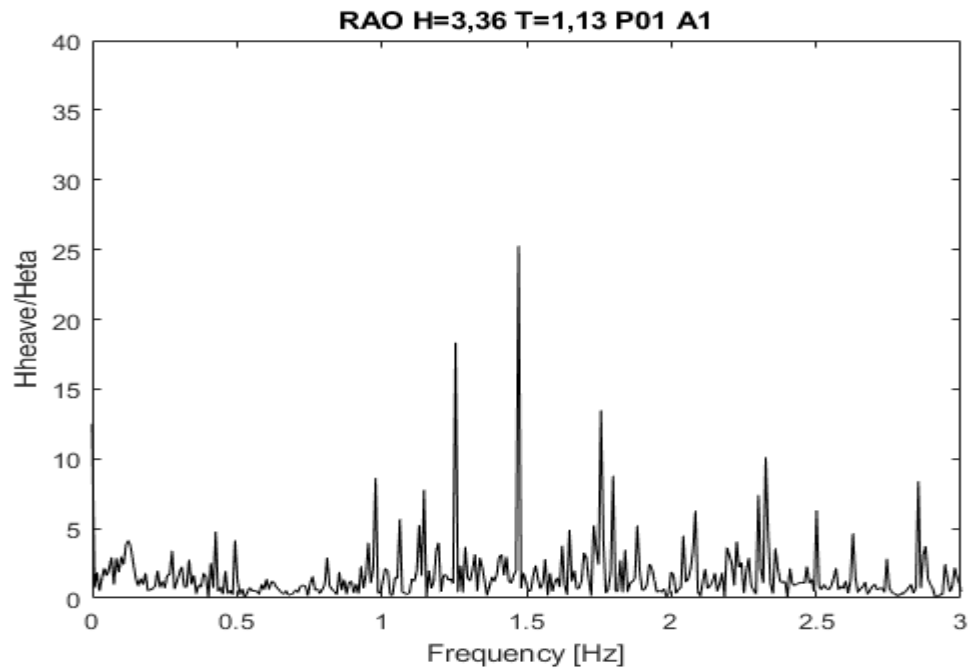


Ilustración 53: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,0242	0,0426	-0,1222	0,1648
Heave	0,0013	0,0329	-0,0367	0,0696

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,21	2,13	-6,11	8,24

Heave	0,065	1,645	-1,835	3,48
-------	-------	-------	--------	------

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,0818	0,3861	0	0,0504
prototipo	0,57841	2,73014	0,00000	0,35638

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,8761	5,4566	0	0,5398
prototipo	0,8761	5,4566	0	0,5398

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,0179	0,1118	0	0,0111
prototipo	2237,5	13975	0	1387,5
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,0017	0,0261	0	0,0019
prototipo	1502,60	23069,36	0,00	1679,38

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2110
Desempeño de captura	21,9392

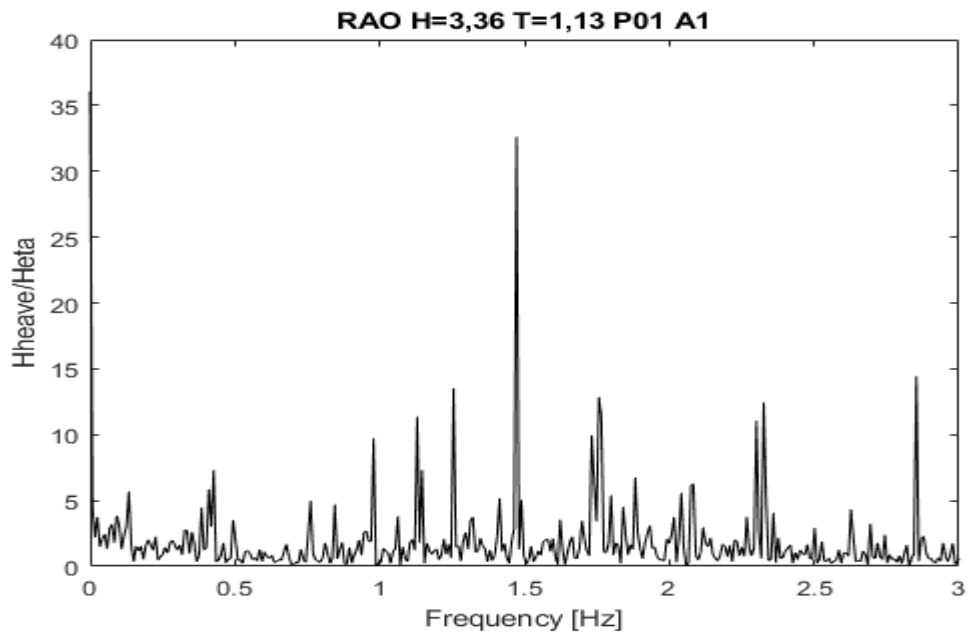


Ilustración 54: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01901	0,02967	-0,07897	0,10864
Heave	0,00055	0,03531	-0,03410	0,06941

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,95060	1,48370	-3,94855	5,43225
Heave	0,02745	1,76538	-1,70508	3,47046

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08686	0,37265	0,00000	0,05152
prototipo	0,61421	2,63505	0,00000	0,36432

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,01427	5,35043	0,00000	0,67265
prototipo	1,01427	5,35043	0,00000	0,67265

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02077	0,10958	0,00000	0,01378
prototipo	2596,53254	13697,11250	0,00000	1721,99302
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00204	0,02354	0,00000	0,00224
prototipo	1803,58993	20802,52466	0,00000	1978,73817

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,7572
Desempeño de captura	31,8333

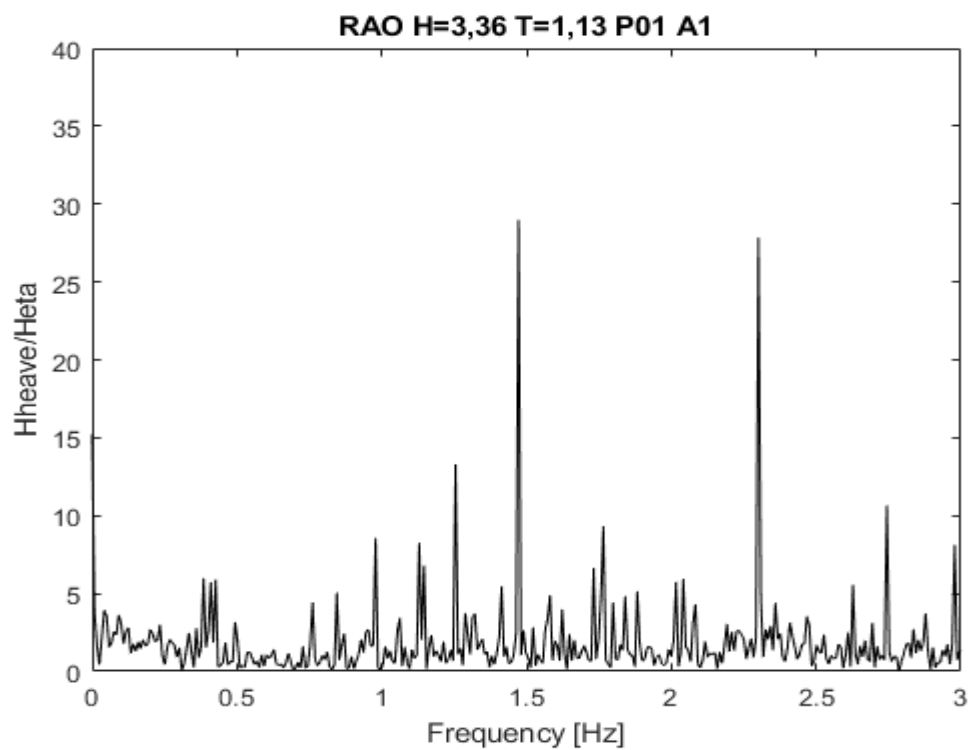


Ilustración 55: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

- **ESTADO E13**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	6,49	1,2	0,0024
Prototipo	324,50	8,49	2121,32

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03197	0,03309	-0,12281	0,15589
Heave	0,00140	0,05504	-0,04952	0,10456

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,59864	1,65447	-6,14027	7,79474
Heave	0,07011	2,75212	-2,47583	5,22795

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11633	0,42972	0,00000	0,06980
prototipo	0,82256	3,03859	0,00000	0,49354

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,09227	8,28535	0,00000	0,76807
prototipo	1,09227	8,28535	0,00000	0,76807

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02237	0,16968	0,00000	0,01573
prototipo	2796,20989	21210,51250	0,00000	1966,24748
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00304	0,03270	0,00000	0,00354
prototipo	2686,24157	28899,60441	0,00000	3129,12419

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2475
Desempeño de captura	22,5997

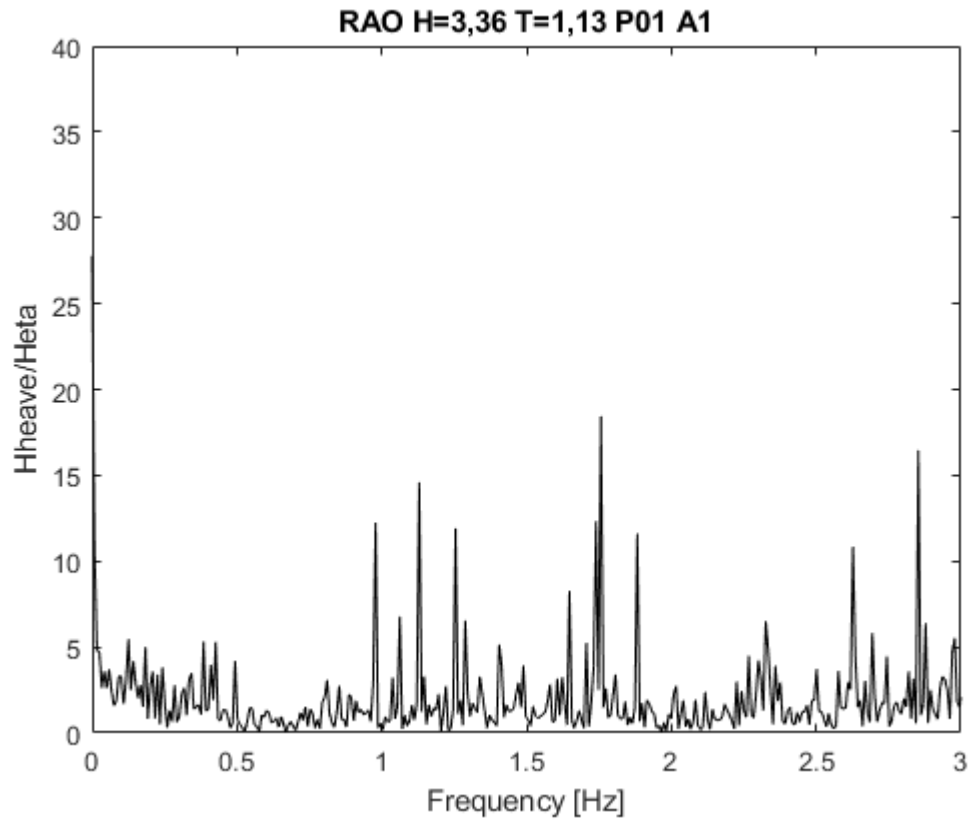


Ilustración 56: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 7 [cm] período 1,13 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,06113	0,02281	-0,15072	0,17353
Heave	0,00071	0,05579	-0,05153	0,10732

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	3,05666	1,14060	-7,53610	8,67670
Heave	0,03545	2,78947	-2,57648	5,36595

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11424	0,47535	0,00000	0,06734
prototipo	0,80780	3,36123	0,00000	0,47619

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,92508	4,21350	0,00000	0,57154
prototipo	0,92508	4,21350	0,00000	0,57154

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01895	0,08629	0,00000	0,01171
prototipo	2368,21	10786,56	0,00	1463,14
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00252	0,02671	0,00000	0,00273
prototipo	2230,76	23606,46	0,00	2413,26

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0360
Desempeño de captura	18,7677

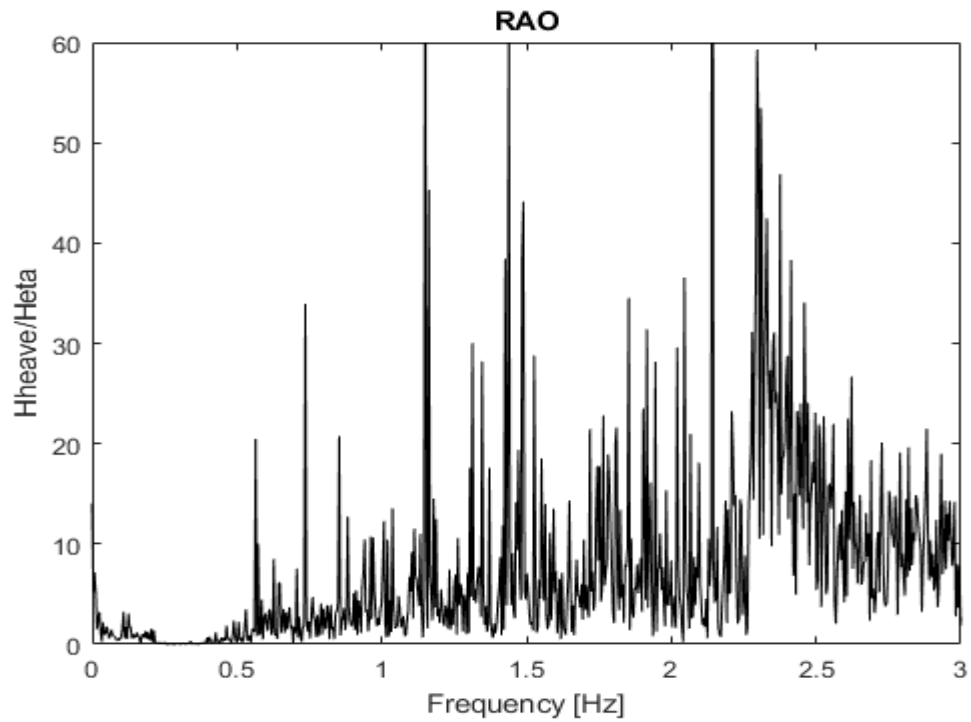


Ilustración 57: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 7 [cm] período 1,13 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02682	0,04183	-0,13407	0,17590
Heave	0,00559	0,07178	-0,04366	0,11544

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,34105	2,09163	-6,70338	8,79501
Heave	0,27961	3,58890	-2,18295	5,77186

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,13234	0,58365	0,00000	0,07869
prototipo	0,93577	4,12704	0,00000	0,55642

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,40647	9,01960	0,00000	0,95456
prototipo	1,40647	9,01960	0,00000	0,95456

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02880	0,18472	0,00000	0,01955
prototipo	3600,57	23090,16	0,00	2443,67
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00446	0,06576	0,00000	0,00561
prototipo	3946,49	58120,23	0,00	4955,30

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,8328
Desempeño de captura	33,2023

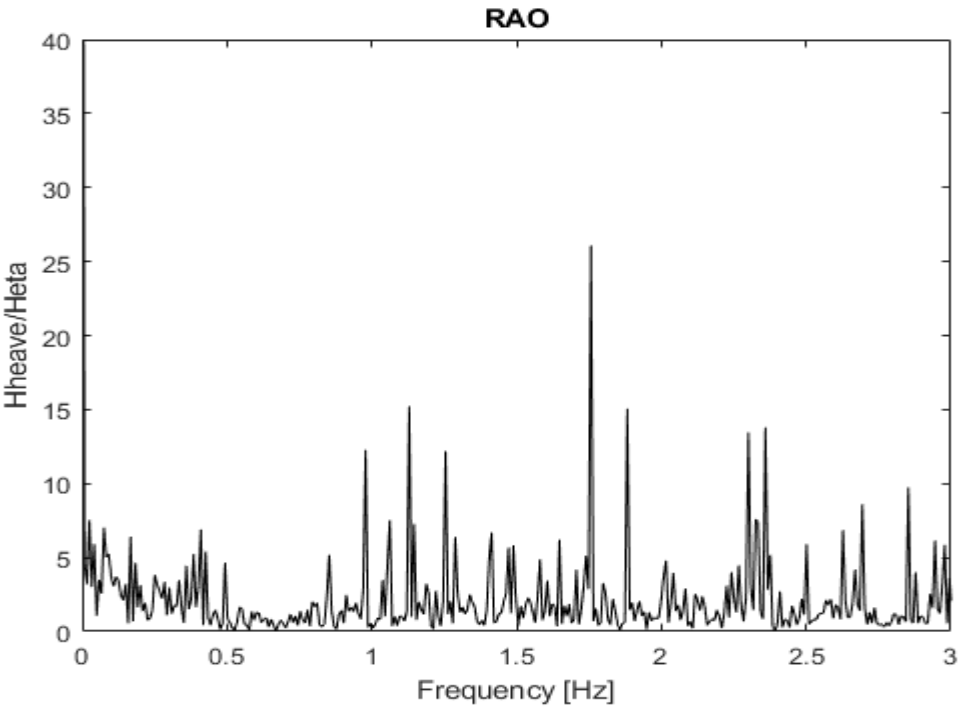


Ilustración 58: Respuesta RAO prueba P01 modelo A1 altura 7 [cm] período 1,13 [seg].

• ESTADO E21

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	3,18	1,35	0,000658
Prototipo	159,0	9,55	581,6

- Cable de Acero

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00989	0,03318	-0,07820	0,11137
Heave	0,00247	0,02252	-0,02073	0,04325

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,49471	1,65882	-3,90976	5,56857
Heave	0,12351	1,12602	-1,03658	2,16260

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05039	0,24851	0,00000	0,02868
prototipo	0,35629	1,75725	0,00000	0,20281

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,51777	4,69769	0,00000	0,35423
prototipo	0,51777	4,69769	0,00000	0,35423

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01060	0,09621	0,00000	0,00725
prototipo	1325,48	12026,08	0,00	906,82

potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00058	0,01881	0,00000	0,00066
prototipo	512,03	16626,76	0,00	581,55

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,8804
Desempeño de captura	15,9490

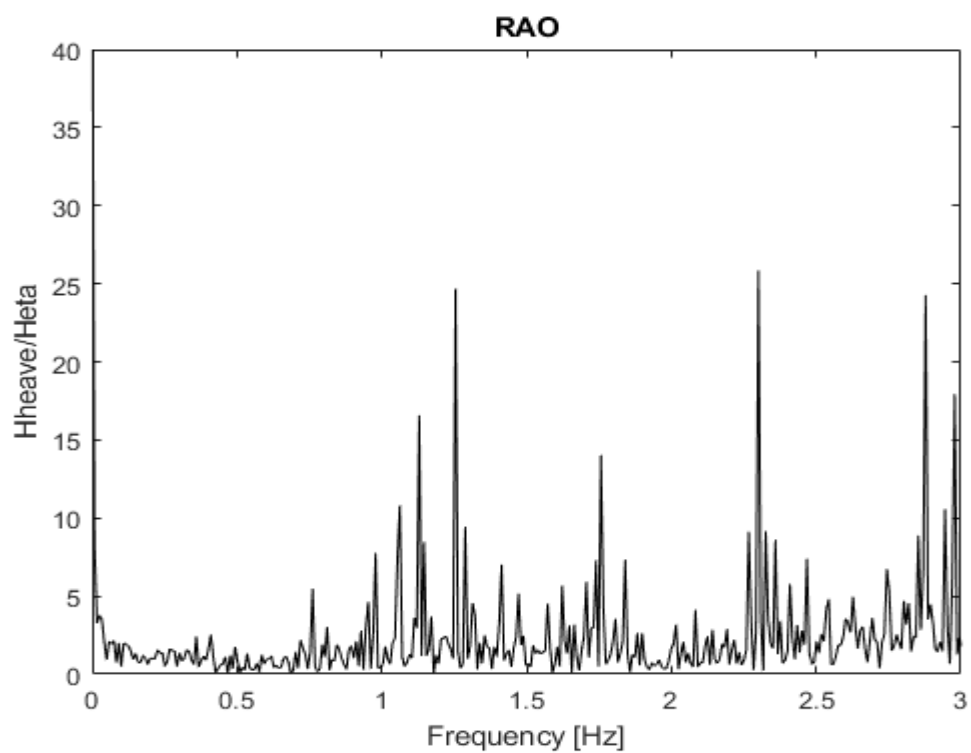


Ilustración 59: Respuesta RAO prueba p01 modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,48 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01139	0,02767	-0,06367	0,09134
Heave	0,00166	0,02255	-0,02566	0,04821

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,56932	1,38348	-3,18348	4,56696
Heave	0,08301	1,12768	-1,28287	2,41054

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05144	0,20390	0,00000	0,02999
prototipo	0,36371	1,44182	0,00000	0,21205

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,69323	2,88774	0,00000	0,39450
prototipo	0,69323	2,88774	0,00000	0,39450

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01420	0,05914	0,00000	0,00808
prototipo	1774,66	7392,61	0,00	1009,93

Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00077	0,00751	0,00000	0,00073
prototipo	676,21	6642,13	0,00	642,47

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,163
Desempeño de captura	21,0631

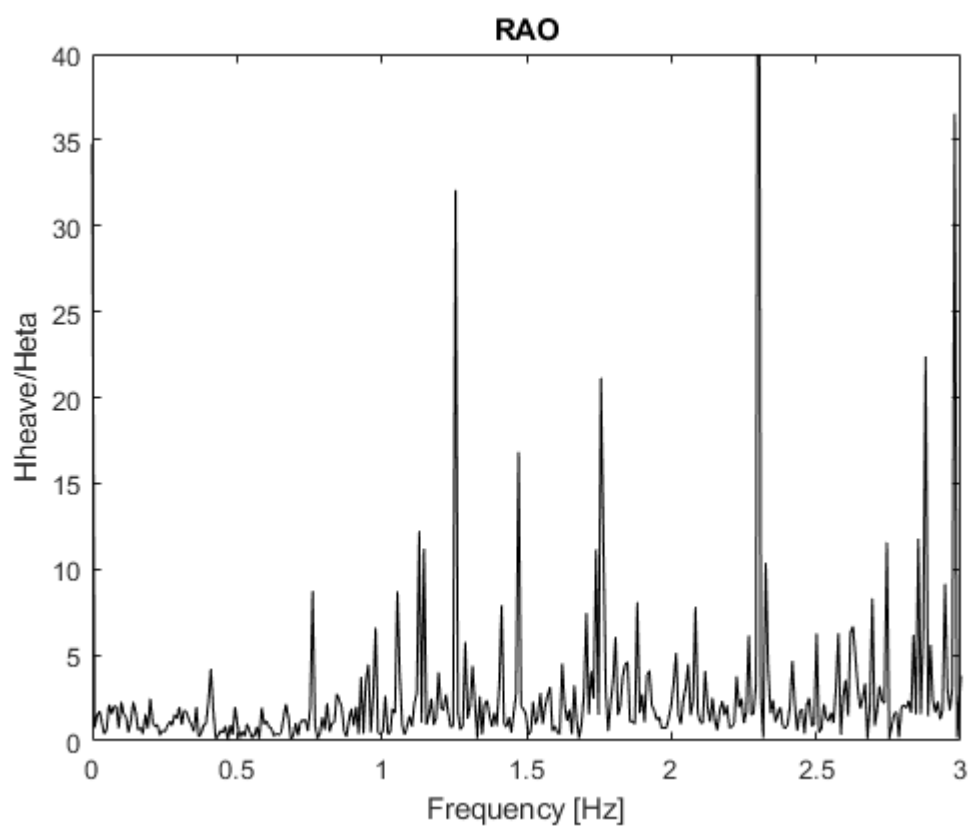


Ilustración 60: Respuesta RAO prueba p01 sintético modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,48 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01126	0,02525	-0,05473	0,07999
Heave	0,00049	0,02868	-0,02257	0,05125

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,56294	1,26270	-2,73655	3,99925
Heave	0,02474	1,43424	-1,12838	2,56262

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05921	0,23869	0,00000	0,03515
prototipo	0,41869	1,68780	0,00000	0,24853

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,87257	4,41300	0,00000	0,57799
prototipo	0,87257	4,41300	0,00000	0,57799

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01787	0,09038	0,00000	0,01184
prototipo	2233,79	11297,29	0,00	1479,64

Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00115	0,01033	0,00000	0,00118
prototipo	1012,05	9131,96	0,00	1045,75

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,3563
Desempeño de captura	31,52410

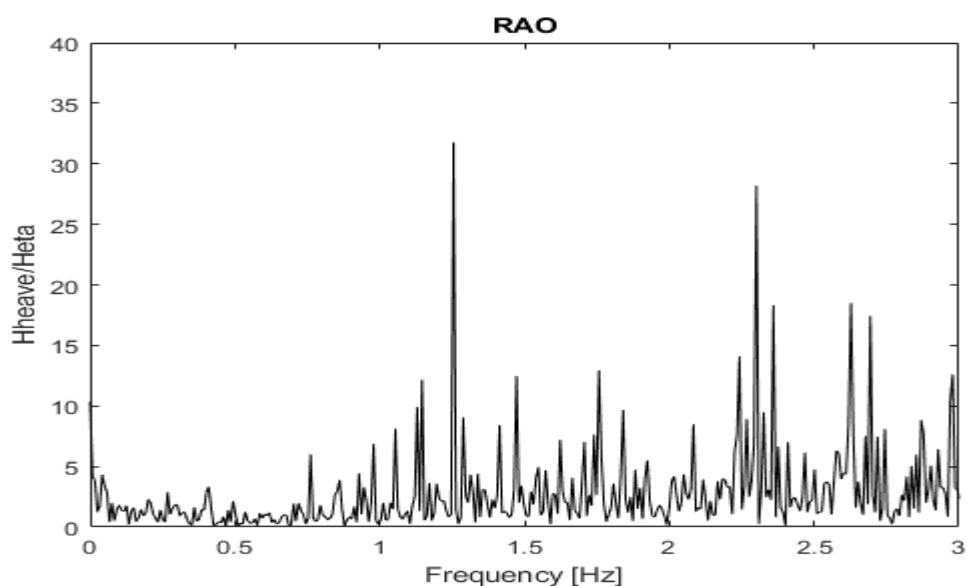


Ilustración 61: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,48 [seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	5,06	1,46	0,0018
Prototipo	253	10,32	1590,99

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01397	0,04731	-0,11550	0,16281
Heave	0,00221	0,03740	-0,03966	0,07707

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,69865	2,36544	-5,77483	8,14026
Heave	0,11067	1,87021	-1,98305	3,85325

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08164	0,29854	0,00000	0,04942
prototipo	0,57728	2,11101	0,00000	0,34945

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,81733	6,37051	0,00000	0,63402
prototipo	0,81733	6,37051	0,00000	0,63402

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01674	0,13047	0,00000	0,01298
prototipo	2092,36	16308,51	0,00	1623,10

Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00154	0,02466	0,00000	0,00188
prototipo	1356,84	21800,49	0,00	1659,81

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,852
Desempeño de captura	15,4348

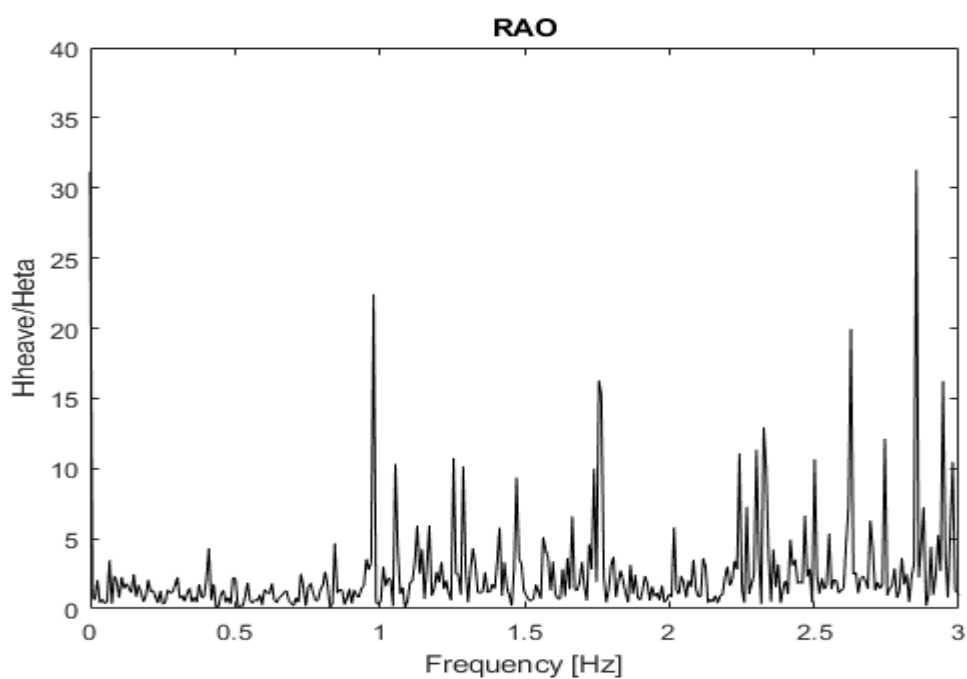


Ilustración 62: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	0,03402	0,03134	-0,11428	0,14563
Heave	0,00028	0,03626	-0,03158	0,06784

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,70103	1,56722	-5,71410	7,28132
Heave	0,01382	1,81315	-1,57903	3,39217

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08058	0,27792	0,00000	0,04640
prototipo	0,56975	1,96516	0,00000	0,32813

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,77335	4,73909	0,00000	0,46669
prototipo	0,77335	4,73909	0,00000	0,46669

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01584	0,09706	0,00000	0,00956
prototipo	1979,77	12132,08	0,00	1194,73
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00138	0,01083	0,00000	0,00140
prototipo	1223,82	9574,20	0,00	1233,31

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,7685
Desempeño de captura	13,9217

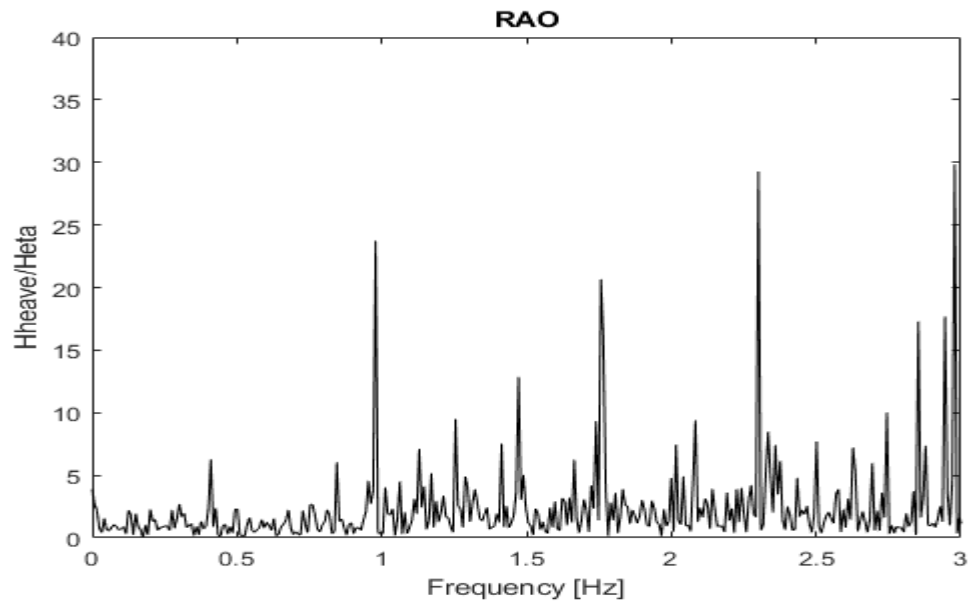


Ilustración 63: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 5 [Cm] período 1,48 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00473	0,06152	-0,06018	0,12169
Heave	0,00219	0,05527	-0,03490	0,09017

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	0,23662	3,07576	-3,00879	6,08455
Heave	0,10932	2,76349	-1,74495	4,50844

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09427	0,36732	0,00000	0,05567
prototipo	0,66660	2,59736	0,00000	0,39365

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,06920	5,90495	0,00000	0,68316
prototipo	1,06920	5,90495	0,00000	0,68316

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02190	0,12093	0,00000	0,01399
prototipo	2737,16	15116,68	0,00	1748,90
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00228	0,02507	0,00000	0,00251
prototipo	2016,84	22159,94	0,00	2221,51

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2664
Desempeño de captura	22,9428

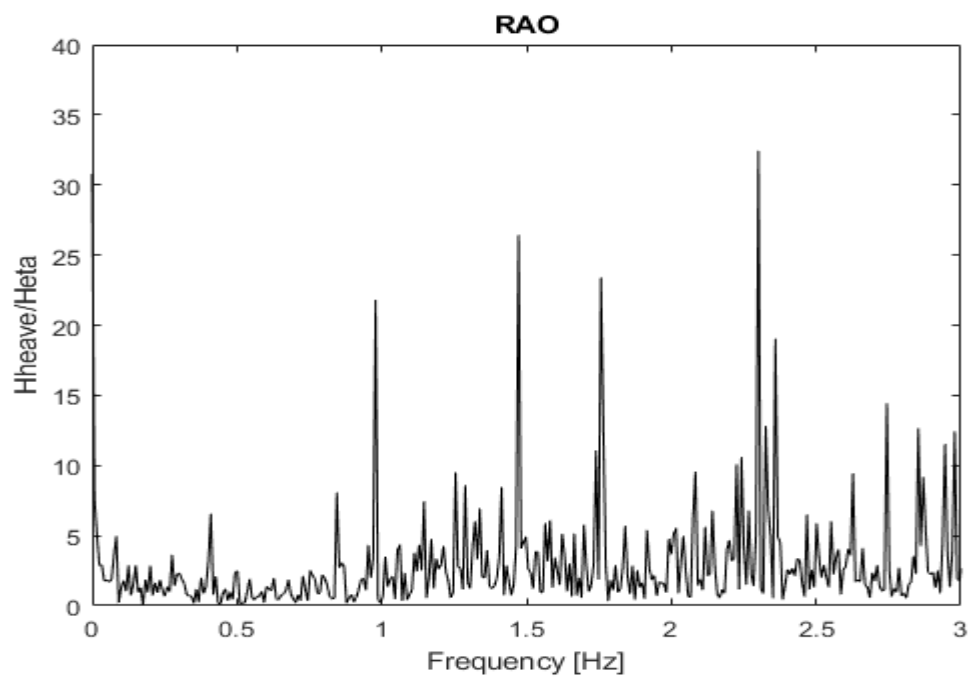


Ilustración 64: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

- **ESTADO E23**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	6,49	1,49	0,003
Prototipo	324,5	10,54	2651,65

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01477	0,06407	-0,13081	0,19487
Heave	0,00058	0,05455	-0,04394	0,09849

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,73848	3,20330	-6,54038	9,74367
Heave	0,02923	2,72764	-2,19707	4,92472

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10312	0,40580	0,00000	0,06044
prototipo	0,72920	2,86943	0,00000	0,42738

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,95009	5,82551	0,00000	0,61979
prototipo	0,95009	5,82551	0,00000	0,61979

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01946	0,11931	0,00	0,01269
prototipo	2432,23	14913,31	0,00	1586,66
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00222	0,02964	0,00	0,00242
prototipo	1959,14	26202,49	0,00	2141,84

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,7328
Desempeño de captura	13,2745

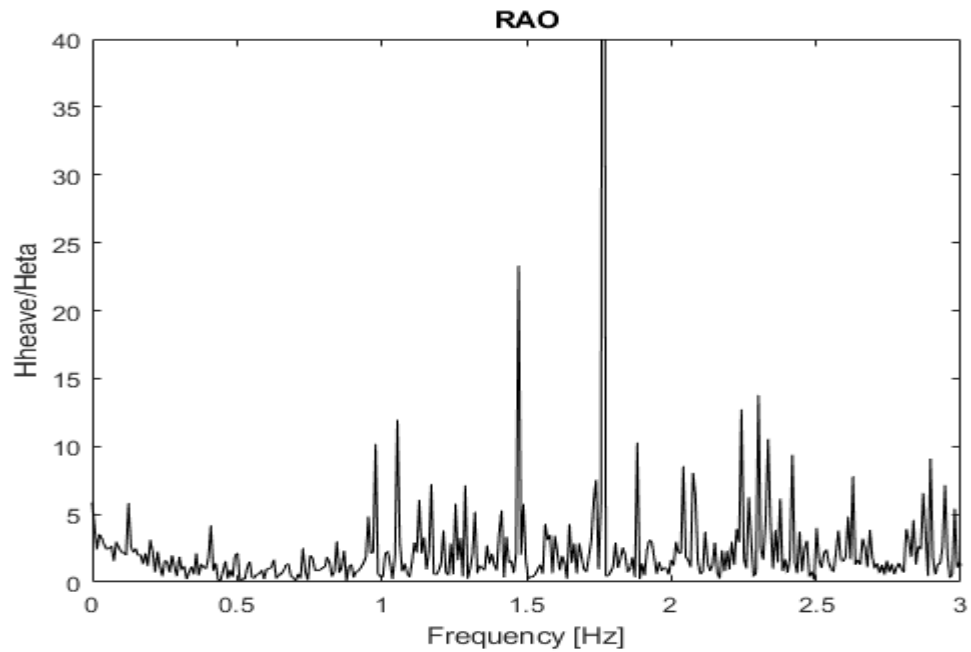


Ilustración 65: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 7 [cm] período 1,48 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,04085	0,04322	-0,13347	0,17669
Heave	0,00097	0,05637	-0,04428	0,10065

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,04254	2,16121	-6,67331	8,83452
Heave	0,04834	2,81856	-2,21389	5,03245

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10617	0,40426	0,00000	0,06158
prototipo	0,75072	2,85854	0,00000	0,43544

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,01327	6,50780	0,00000	0,69020
prototipo	1,01327	6,50780	0,00000	0,69020

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02075	0,13328	0,00000	0,01414
prototipo	2593,97	16659,96	0,00	1766,92
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00247	0,03522	0,00000	0,00293
prototipo	2184,21	31130,90	0,00	2593,76

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,8169
Desempeño de captura	14,7995

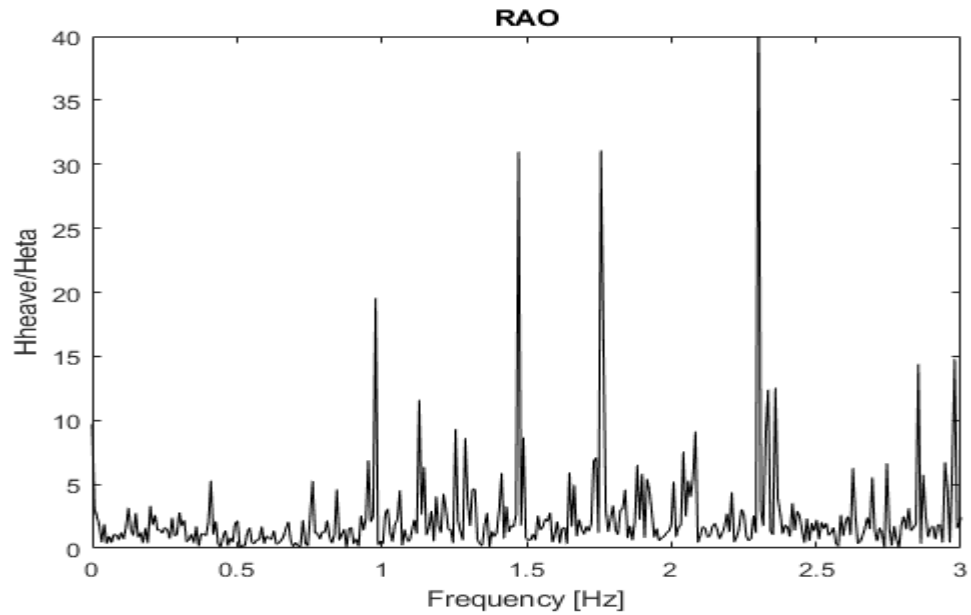


Ilustración 66: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 7 [cm] período 1,48 [seg].

- Cadena
 - Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00159	0,07764	-0,11555	0,19319
Heave	0,00118	0,06452	-0,05049	0,11502

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,07925	3,88210	-5,77758	9,65968

Heave	0,05917	3,22620	-2,52460	5,75080
-------	---------	---------	----------	---------

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11834	0,61120	0,00000	0,07165
prototipo	0,83678	4,32180	0,00000	0,50663

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,22060	8,91421	0,00000	0,81899
prototipo	1,22060	8,91421	0,00000	0,81899

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02500	0,18256	0,00000	0,01677
prototipo	3124,74	22820,39	0,00	2096,61
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00333	0,07388	0,00000	0,00441
prototipo	2944,98	65301,49	0,00	3896,84

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,1015
Desempeño de captura	19,9542

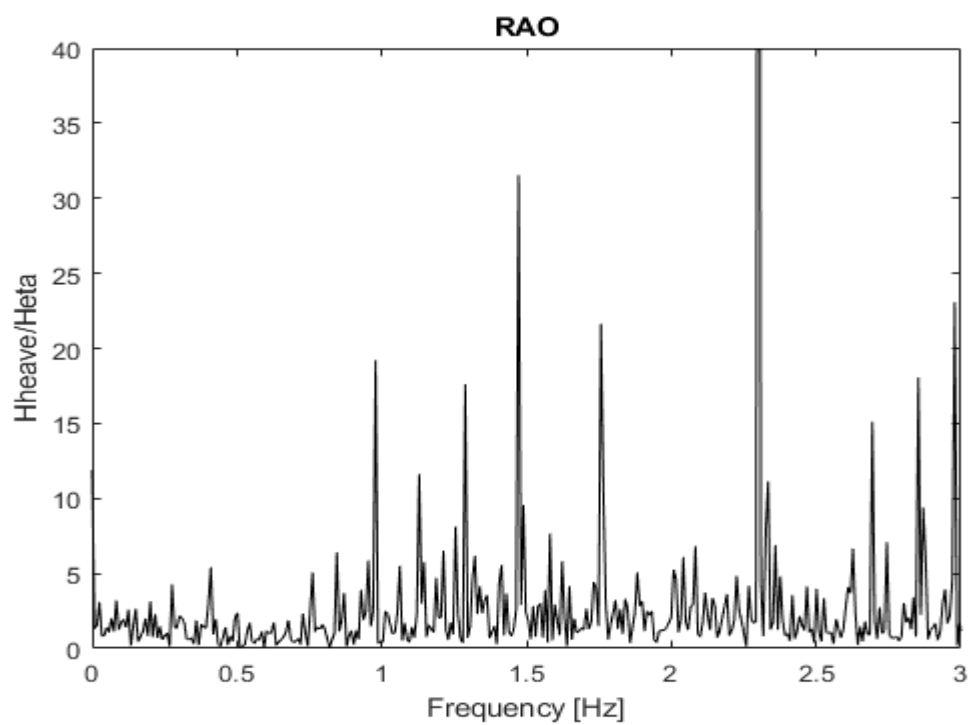


Ilustración 67: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 7 [cm] período 1,48 [seg].

- **ESTADO E31**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	3,03	1,5	0,000664
Prototipo	151,5	10,61	586,69

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01035	0,03077	-0,08301	0,11378
Heave	0,00269	0,02181	-0,02409	0,04589

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,51767	1,53858	-4,15065	5,68922
Heave	0,13459	1,09044	-1,20428	2,29472

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05293	0,19973	0,00000	0,03006
prototipo	0,37425	1,41231	0,00000	0,21254

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,59588	3,68184	0,00000	0,38429
prototipo	0,59588	3,68184	0,00000	0,38429

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01220	0,07540	0,00000	0,00787
prototipo	1525,45	9425,52	0,00	983,78
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00068	0,00717	0,00000	0,00068
prototipo	597,60	6341,78	0,00	601,89

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0275
Desempeño de captura	18,4528

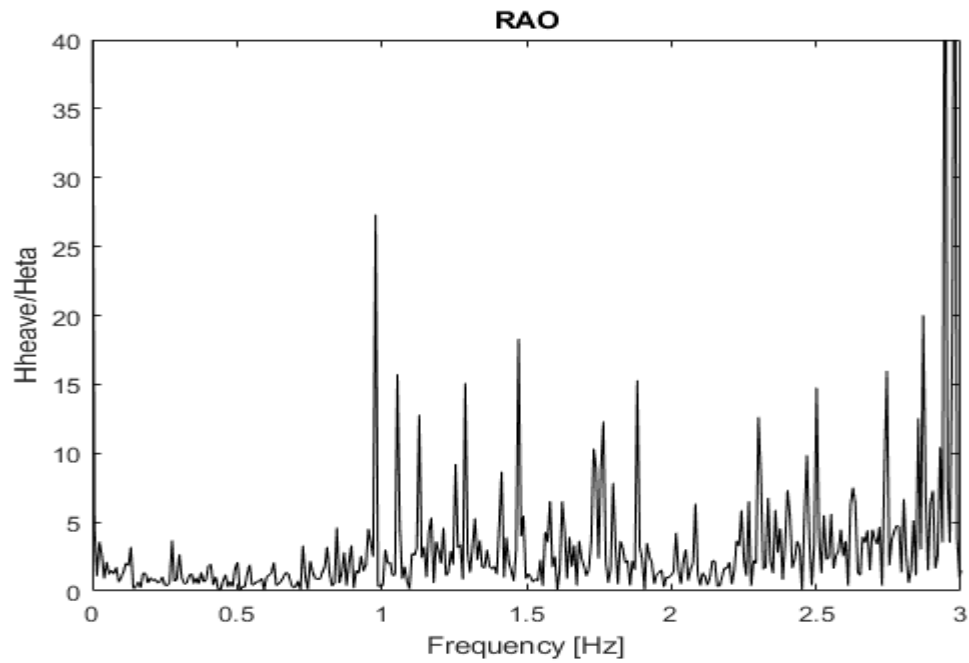


Ilustración 68: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,697 [Seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01785	0,02624	-0,06510	0,09134
Heave	0,00046	0,02445	-0,02340	0,04785

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	0,89246	1,31219	-3,25481	4,56700
Heave	0,02290	1,22229	-1,16997	2,39226

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05206	0,18528	0,00000	0,02933
prototipo	0,36815	1,31011	0,00000	0,20741

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,65019	3,68417	0,00000	0,36483
prototipo	0,65019	3,68417	0,00000	0,36483

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01332	0,07545	0,00000	0,00747
prototipo	1664,49	9431,47	0,00	933,97
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00072	0,00623	0,00000	0,00066
prototipo	634,94	5502,83	0,00	586,10

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0822
Desempeño de captura	19,6058

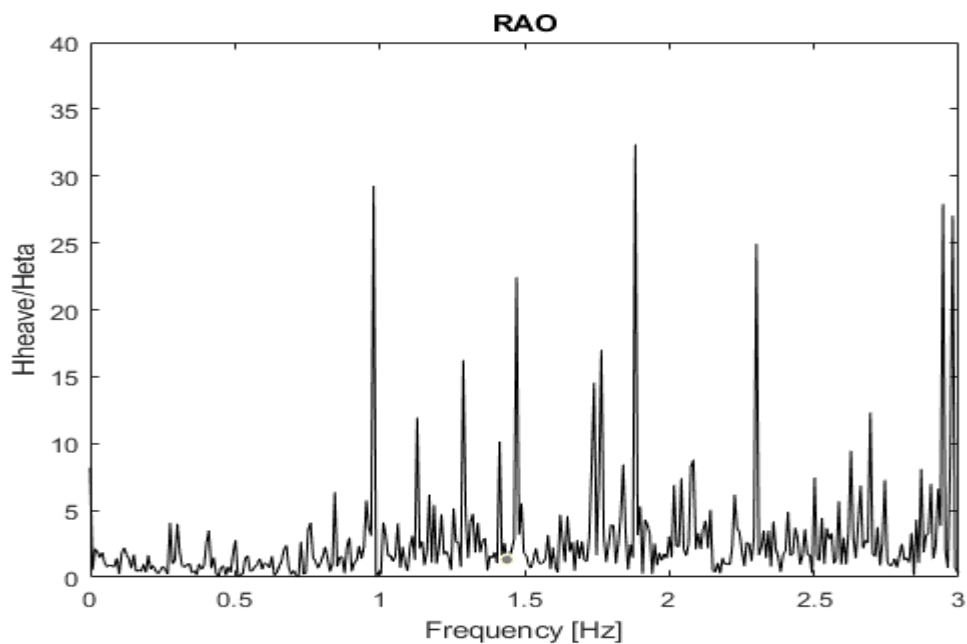


Ilustración 69: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,697 [seg].

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01324	0,02977	-0,06285	0,09262
Heave	0,00152	0,03071	-0,02183	0,05254

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,66191	1,48832	-3,14253	4,63085
Heave	0,07598	1,53538	-1,09155	2,62693

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05859	0,22890	0,00000	0,03443
prototipo	0,41431	1,61860	0,00000	0,24345

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,78459	3,46464	0,00000	0,50920
prototipo	0,78459	3,46464	0,00000	0,50920

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01607	0,07096	0,00000	0,01043
prototipo	2008,55	8869,47	0,00	1303,54
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00102	0,01052	0,00000	0,00106
prototipo	899,91	9302,56	0,00	935,33

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,5339
Desempeño de captura	27,7876

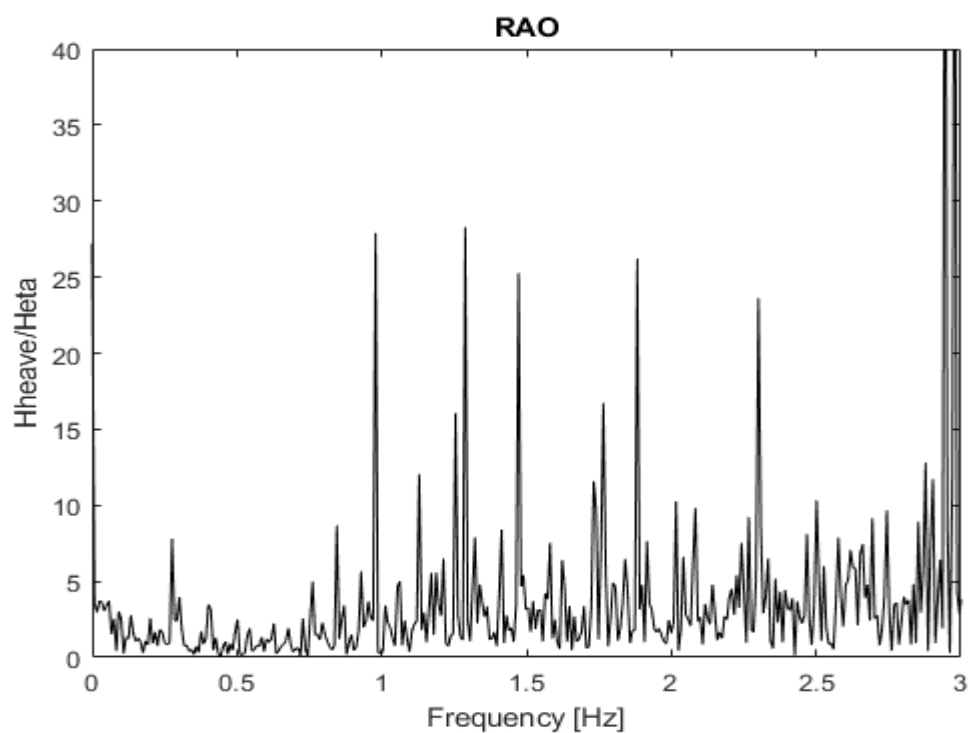


Ilustración 70: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,697 [seg].

- **ESTADO E32**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,77	1,55	0,0017
Prototipo	238,5	10.96	1502,6

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00092	0,06146	-0,08546	0,14692
Heave	0,00019	0,03704	-0,03144	0,06848

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,04605	3,07280	-4,27315	7,34595
Heave	0,00940	1,85207	-1,57178	3,42385

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07601	0,24531	0,00000	0,04250
prototipo	0,53747	1,73459	0,00000	0,30049

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,67377	3,52072	0,00000	0,37539
prototipo	0,67377	3,52072	0,00000	0,37539

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,01380	0,07210	0,00000	0,00769
prototipo	1724,86	9013,04	0,00	961,00
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00112	0,00881	0,00000	0,00101
prototipo	990,96	7787,49	0,00	892,33

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6596
Desempeño de captura	11,9486

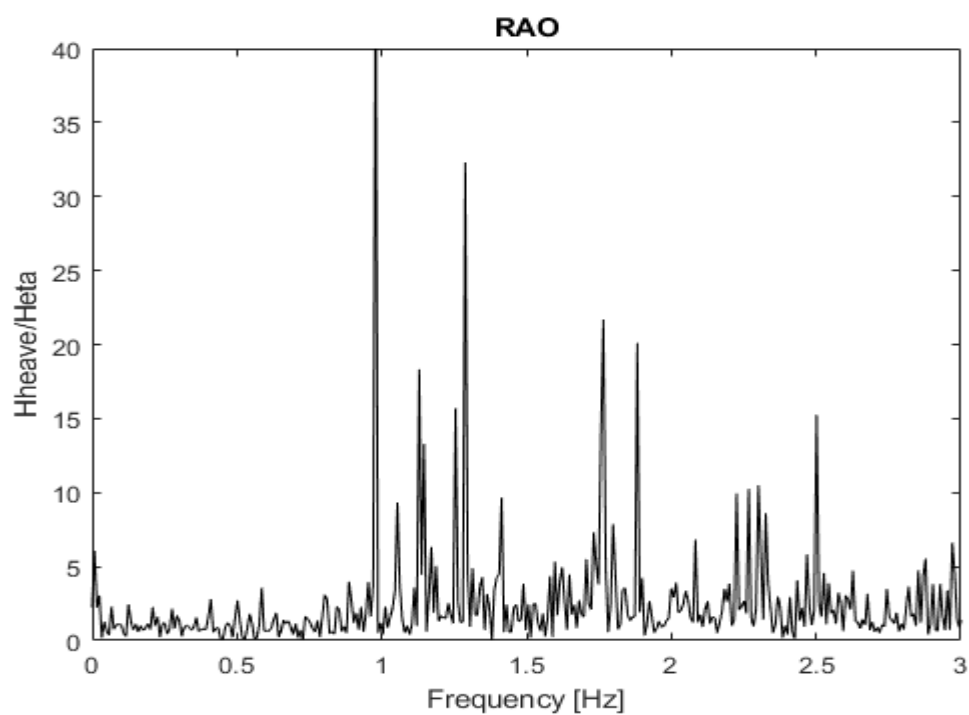


Ilustración 71: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02644	0,03572	-0,10515	0,14086
Heave	0,00078	0,03356	-0,03410	0,06766

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,32177	1,78580	-5,25726	7,04306
Heave	0,03909	1,67817	-1,70482	3,38300

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07532	0,23374	0,00000	0,04216
prototipo	0,53260	1,65277	0,00000	0,29809

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,70881	3,66720	0,00000	0,40487
prototipo	0,70881	3,66720	0,00000	0,40487

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,01452	0,07510	0,00000	0,00829
prototipo	1814,55	9388,02	0,00	1036,46
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00117	0,01016	0,00000	0,00113
prototipo	1036,26	8980,39	0,00	997,86

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6897
Desempeño de captura	12,4948

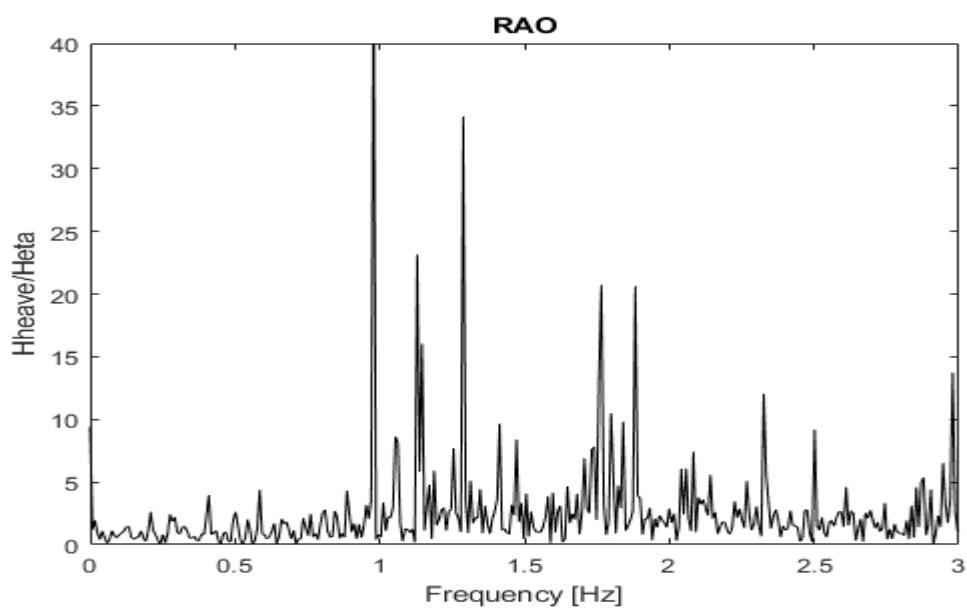


Ilustración 72: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01047	0,04698	-0,09307	0,14005
Heave	0,00294	0,05327	-0,03427	0,08755

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,52330	2,34907	-4,65353	7,00260
Heave	0,14723	2,66372	-1,71369	4,37742

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08534	0,30549	0,00000	0,04931
prototipo	0,60347	2,16012	0,00000	0,34870

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,90115	4,93775	0,00000	0,60397
prototipo	0,90115	4,93775	0,00000	0,60397

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,01846	0,10113	0,00000	0,01237
prototipo	2306,95	12640,64	0,00	1546,17
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00177	0,01972	0,00000	0,00194
prototipo	1567,26	17426,54	0,00	1712,91

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0431
Desempeño de captura	18,8973

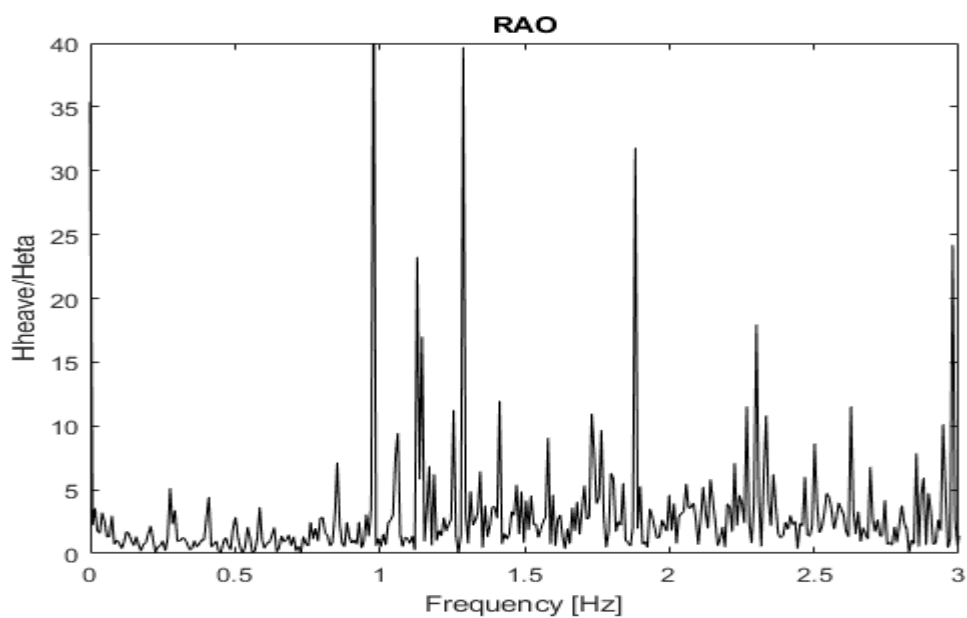


Ilustración 73: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 5 [cm] período 1,697 [Seg].

• ESTADO E33

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	6,83	1,57	0,0035

Prototipo	341,5	11,10	3093,59
-----------	-------	-------	---------

○ Cable de Acero

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00340	0,07468	-0,12410	0,19878
Heave	0,00048	0,05453	-0,04365	0,09818

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,16983	3,73406	-6,20503	9,93909
Heave	0,02420	2,72650	-2,18240	4,90890

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10279	0,39713	0,00000	0,05909
prototipo	0,72683	2,80813	0,00000	0,41786

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,83002	3,49781	0,00000	0,47380
prototipo	0,83002	3,49781	0,00000	0,47380

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01700	0,07164	0,00000	0,00970
prototipo	2124,85	8954,40	0,00	1212,93
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00189	0,01827	0,00000	0,00184
prototipo	1670,54	16148,83	0,00	1629,42

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,5354
Desempeño de captura	9,6994

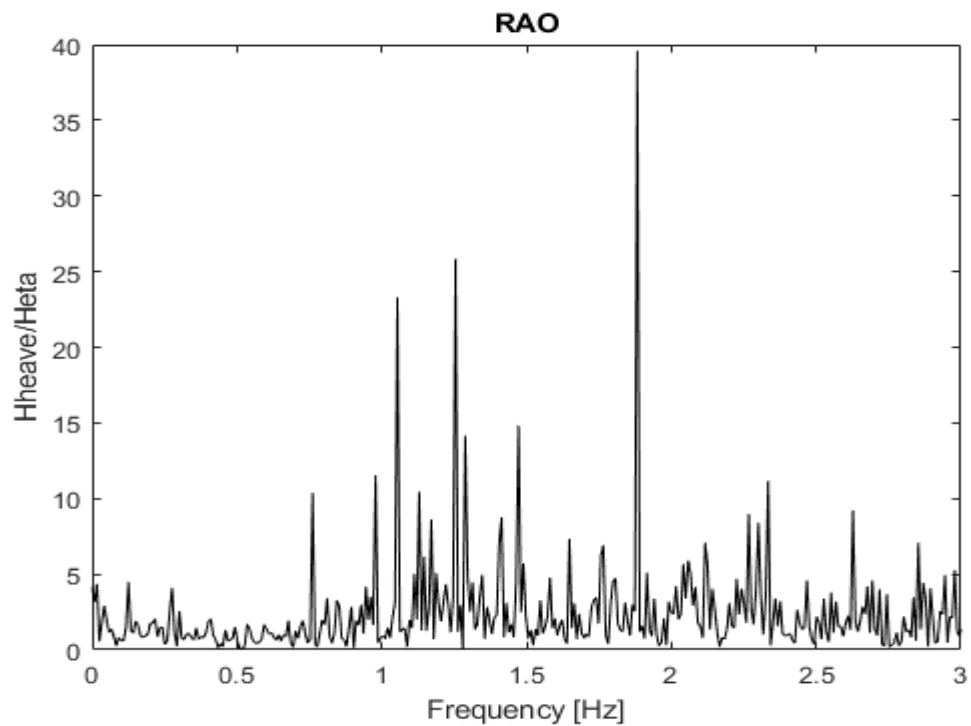


Ilustración 74: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 7 [cm] período 1,697 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02537	0,07403	-0,14358	0,21761
Heave	0,00036	0,05779	-0,04504	0,10283

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,26861	3,70155	-7,17912	10,88067
Heave	0,01802	2,88969	-2,25194	5,14162

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10614	0,40991	0,00000	0,06151
prototipo	0,75051	2,89847	0,00000	0,43491

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,92889	5,77803	0,00000	0,58662
prototipo	0,92889	5,77803	0,00000	0,58662

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,01902	0,11833	0,00000	0,01201
prototipo	2377,97	14791,75	0,00	1501,74
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00222	0,03759	0,00000	0,00240
prototipo	1964,25	33226,28	0,00	2120,40

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6295
Desempeño de captura	11,4047

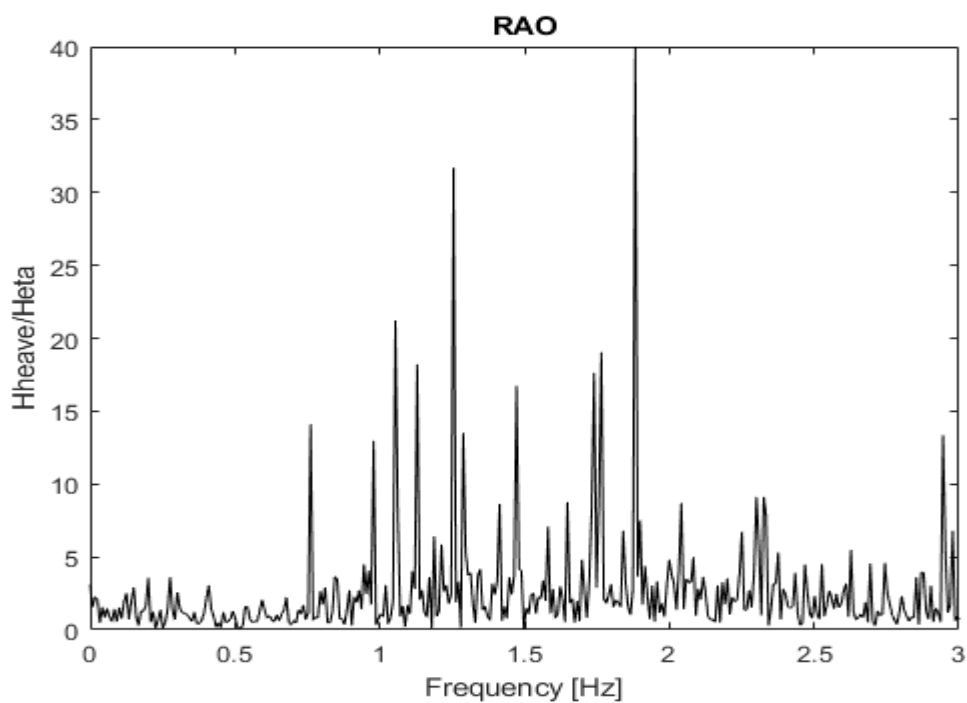


Ilustración 75: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 7 [cm] período 1,697 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03111	0,04498	-0,16543	0,21041
Heave	0,00343	0,07788	-0,03998	0,11785

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,55536	2,24914	-8,27126	10,52040
Heave	0,17174	3,89391	-1,99877	5,89268

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11762	0,51211	0,00000	0,07147
prototipo	0,83169	3,62116	0,00000	0,50533

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,13008	6,19276	0,00000	0,78844
prototipo	1,13008	6,19276	0,00000	0,78844

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02314	0,12683	0,00000	0,01615
prototipo	2893,00	15853,46	0,00	2018,40
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00310	0,04342	0,00000	0,00382
prototipo	2735,92	38378,19	0,00	3374,41

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,8769
Desempeño de captura	15,8851

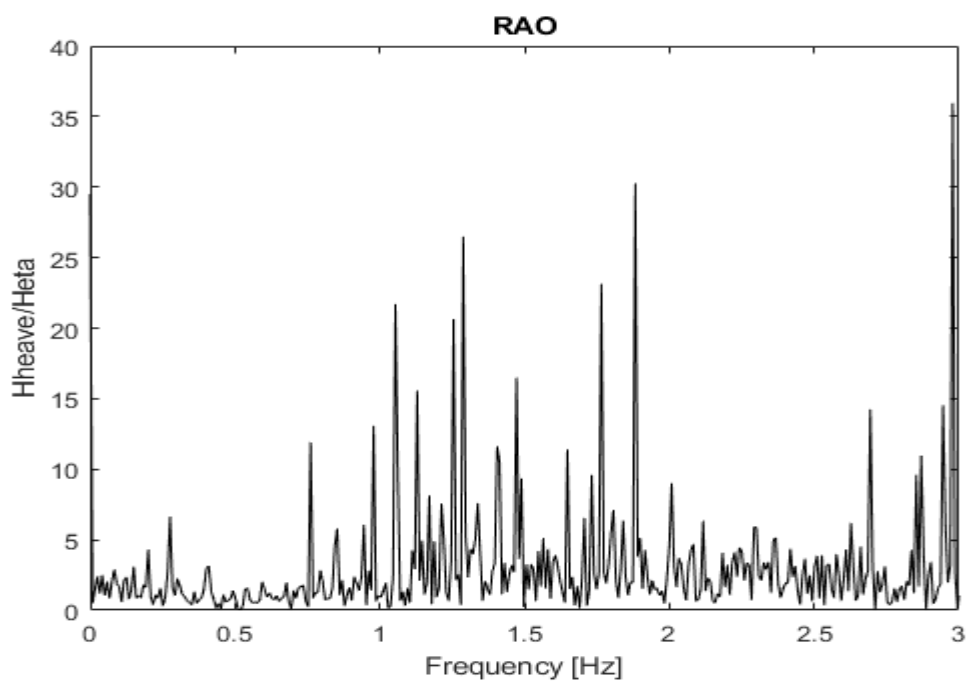


Ilustración 76: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 7 [cm] período 1,697 [seg].

- **ESTADO E41**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	3,1	1,7	0,000787
Prototipo	155	12,02	696

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00436	0,03575	-0,06379	0,09954
Heave	0,00293	0,02006	-0,02131	0,04137

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,21809	1,78766	-3,18957	4,97723
Heave	0,14636	1,00294	-1,06564	2,06859

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05027	0,17137	0,00000	0,02679
prototipo	0,35546	1,21177	0,00000	0,18941

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,52142	2,14873	0,00000	0,30006
prototipo	0,52142	2,14873	0,00000	0,30006

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01068	0,04401	0,00000	0,00615
prototipo	1334,83	5500,75	0,00	768,15
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00055	0,00470	0,00000	0,00050
prototipo	484,80	4156,91	0,00	439,21

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6966
Desempeño de captura	12,6187

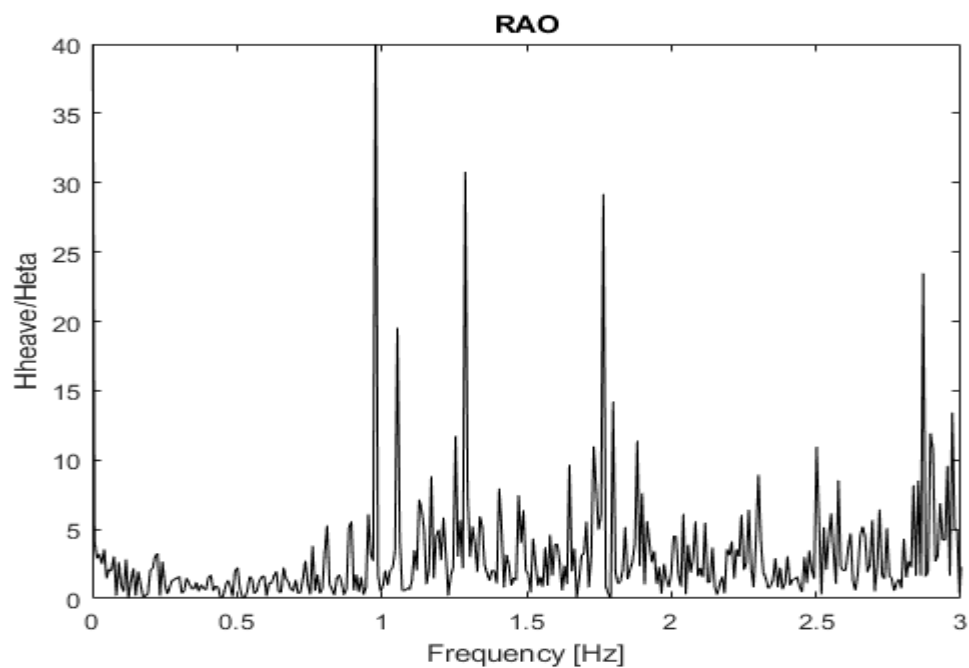


Ilustración 77: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,697 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01904	0,02778	-0,06928	0,09706
Heave	0,00010	0,02426	-0,02197	0,04622

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,95197	1,38890	-3,46390	4,85280
Heave	0,00495	1,21275	-1,09842	2,31117

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05219	0,15597	0,00000	0,02886
prototipo	0,36903	1,10288	0,00000	0,20406

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,64337	2,58594	0,00000	0,36094
prototipo	0,64337	2,58594	0,00000	0,36094

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01318	0,05296	0,00000	0,00739
prototipo	1647,04	6620,01	0,00	924,01
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00071	0,00517	0,00000	0,00064
prototipo	630,82	4572,80	0,00	562,62

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,9064
Desempeño de captura	16,4196

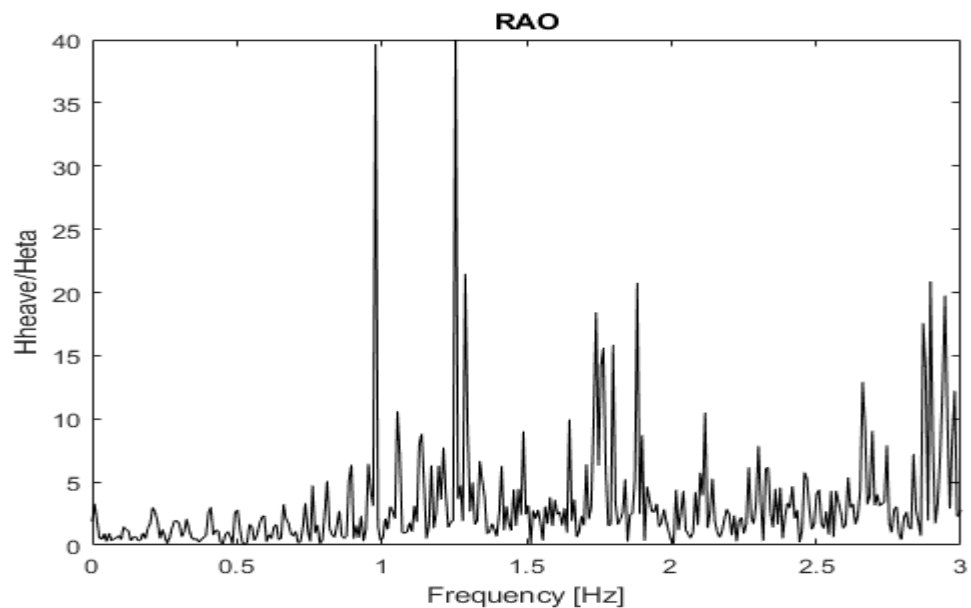


Ilustración 78: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,909 [Seg].

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00166	0,04133	-0,04775	0,08907
Heave	0,00127	0,03058	-0,02264	0,05322

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,08306	2,06626	-2,38725	4,45352
Heave	0,06337	1,52910	-1,13210	2,66119

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,05650	0,19934	0,00000	0,03186
prototipo	0,39951	1,40955	0,00000	0,22525

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,68327	3,62735	0,00000	0,46150
prototipo	0,68327	3,62735	0,00000	0,46150

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01399	0,07429	0,00000	0,00945
prototipo	1749,17	9286,03	0,00	1181,45
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00085	0,00908	0,00000	0,00089
prototipo	755,53	8029,26	0,00	787,22

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0855
Desempeño de captura	19,6655

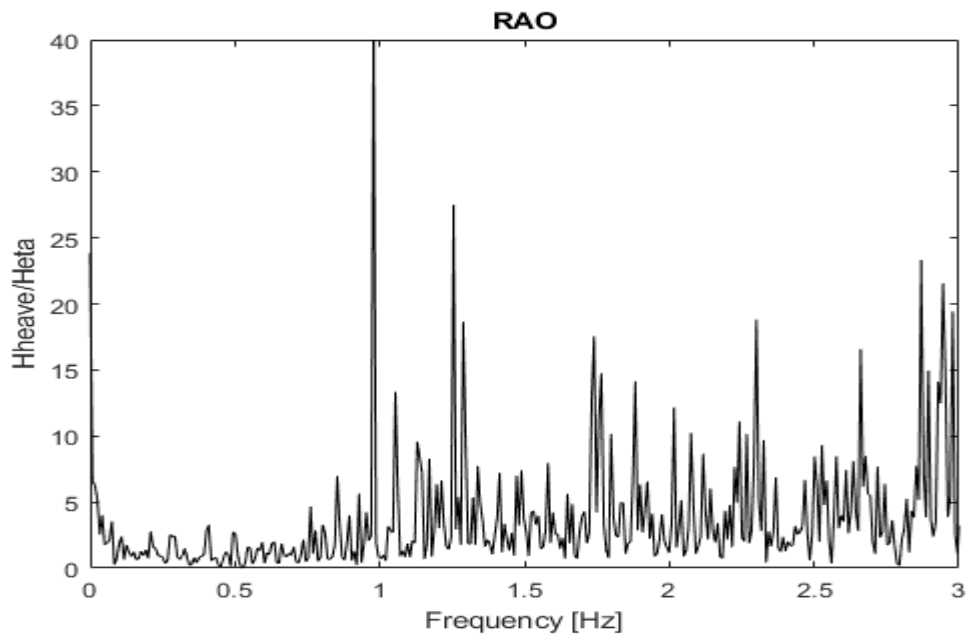


Ilustración 79: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 3,36 [cm] período 1,909 [seg].

- **ESTADO E42**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,99	1,7	0,002
Prototipo	249,5	12,02	1767,77

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01005	0,04894	-0,10118	0,15011
Heave	0,00037	0,03273	-0,03177	0,06450

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,50234	2,44698	-5,05876	7,50574
Heave	0,01868	1,63626	-1,58859	3,22485

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07672	0,26681	0,00000	0,04229
prototipo	0,54247	1,88664	0,00000	0,29902

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,64643	3,03449	0,00000	0,40990
prototipo	0,64643	3,03449	0,00000	0,40990

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01324	0,06215	0,00000	0,00839
prototipo	1654,85	7768,30	0,00	1049,34
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00110	0,01323	0,00000	0,00110
prototipo	971,49	11690,92	0,00	969,37

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,5387
Desempeño de captura	9,7592

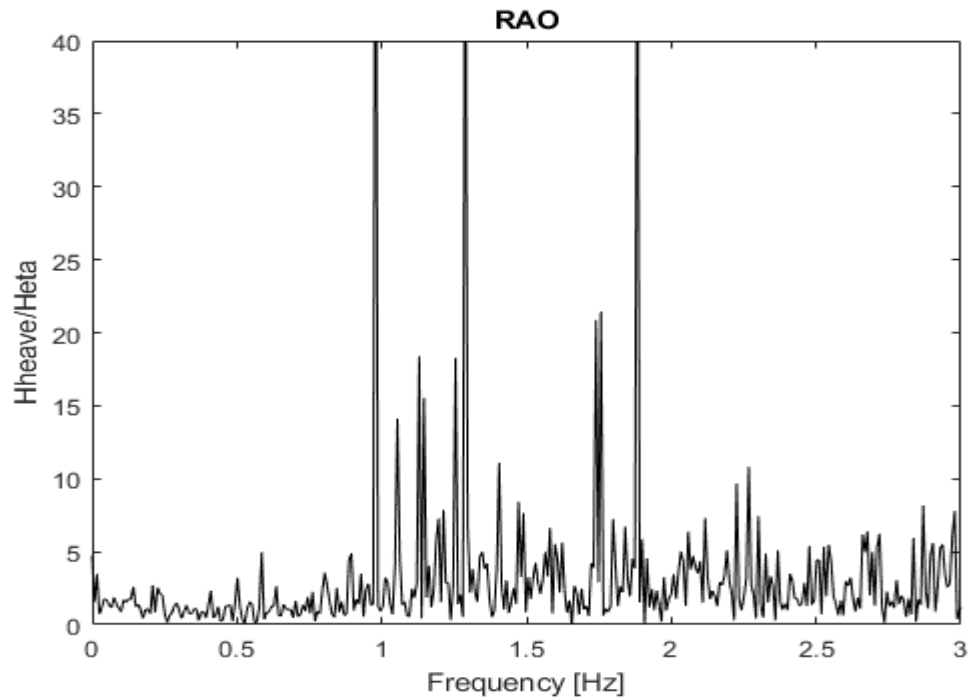


Ilustración 80: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 5 [cm] período 1,909 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02032	0,04718	-0,12728	0,17447
Heave	0,00047	0,03687	-0,03916	0,07603

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,01595	2,35920	-6,36410	8,72329
Heave	0,02365	1,84337	-1,95810	3,80146

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08051	0,26008	0,00000	0,04362
prototipo	0,56926	1,83908	0,00000	0,30843

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,76833	3,84612	0,00000	0,45148
prototipo	0,76833	3,84612	0,00000	0,45148

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01574	0,07877	0,00000	0,00925
prototipo	1966,92	9846,06	0,00	1155,78
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00135	0,01518	0,00000	0,00131
prototipo	1191,71	13415,29	0,00	1154,92

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6608
Desempeño de captura	11,9715

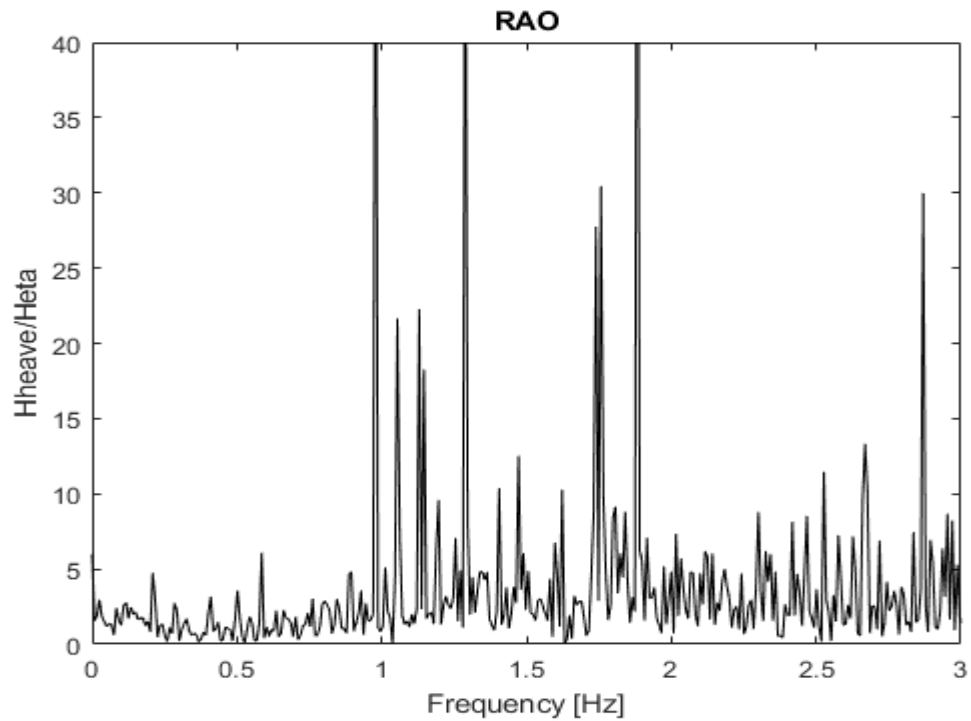


Ilustración 81: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 5 [cm] período 1,909 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00436	0,07088	-0,08685	0,15773
Heave	0,00167	0,04868	-0,03631	0,08499

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,21782	3,54388	-4,34250	7,88637
Heave	0,08339	2,43390	-1,81542	4,24932

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08639	0,28911	0,00000	0,04864
prototipo	0,61084	2,04431	0,00000	0,34390

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,93050	5,73976	0,00000	0,62475
prototipo	0,93050	5,73976	0,00000	0,62475

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01906	0,11755	0,00000	0,01279
prototipo	2382,09	14693,78	0,00	1599,37
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00180	0,01963	0,00000	0,00199
prototipo	1590,47	17350,77	0,00	1755,16

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,8691
Desempeño de captura	15,7441

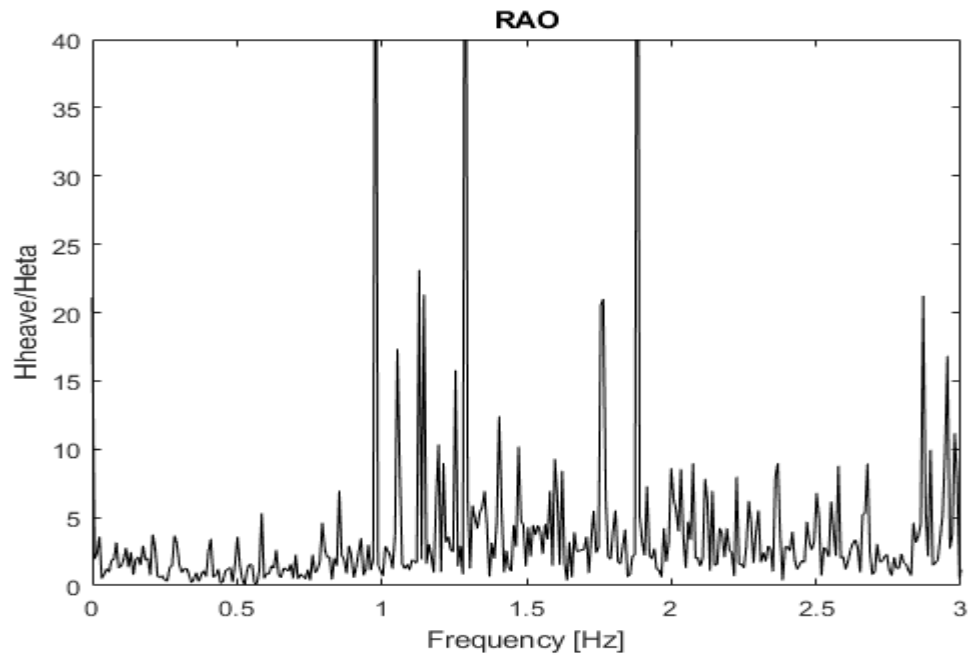


Ilustración 82: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 5 [cm] período 1,909 [seg].

- **ESTADO E43**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	7,07	1,75	0,0042
Prototipo	353,5	12,37	3712,31

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01121	0,07798	-0,12810	0,20608
Heave	0,00081	0,05440	-0,03943	0,09383

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,56045	3,89906	-6,40481	10,30387
Heave	0,04074	2,72002	-1,97157	4,69159

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11500	0,40629	0,00000	0,06136
prototipo	0,81315	2,87289	0,00000	0,43385

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,90222	4,09732	0,00000	0,55486
prototipo	0,90222	4,09732	0,00000	0,55486

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,01848	0,08391	0,00000	0,01136
prototipo	2309,68	10489,13	0,00	1420,44
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00227	0,02462	0,00000	0,00218
prototipo	2007,97	21759,65	0,00	1923,74

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,5388
Desempeño de captura	9,7613

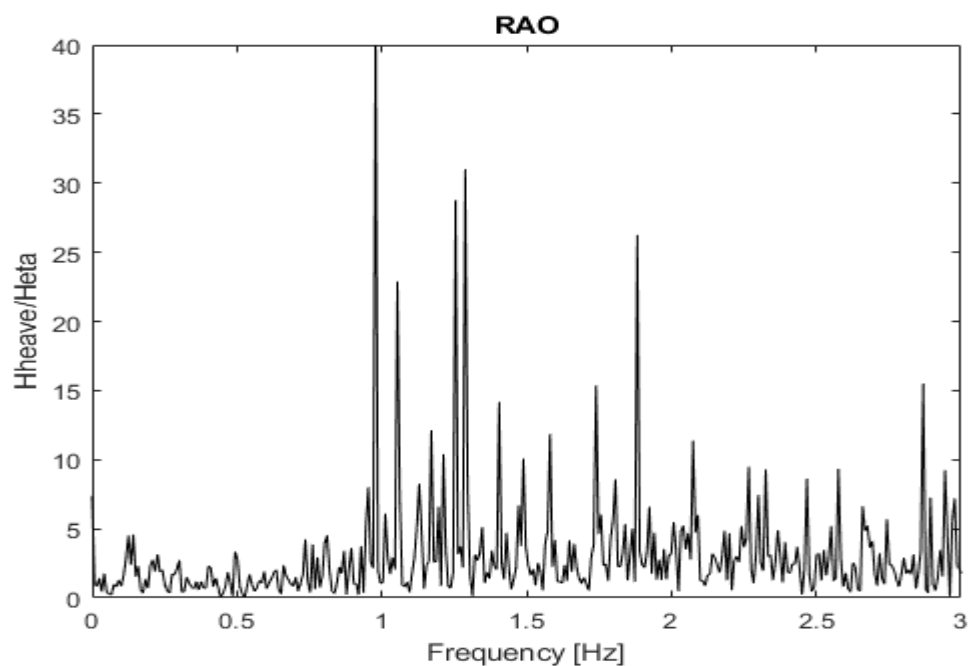


Ilustración 83: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A1 altura 7 [cm] período 1,909 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02061	0,07466	-0,14728	0,22193
Heave	0,00084	0,05778	-0,04640	0,10418

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,03035	3,73279	-7,36378	11,09657
Heave	0,04194	2,88892	-2,32013	5,20906

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11249	0,41996	0,00000	0,06442
prototipo	0,79540	2,96954	0,00000	0,45549

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,99965	6,75036	0,00000	0,66020
prototipo	0,99965	6,75036	0,00000	0,66020

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02047	0,13825	0,00000	0,01352
prototipo	2559,10	17280,93	0,00	1690,11
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00256	0,03325	0,00000	0,00294
prototipo	2261,74	29391,56	0,00	2599,58

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,6069
Desempeño de captura	10,9950

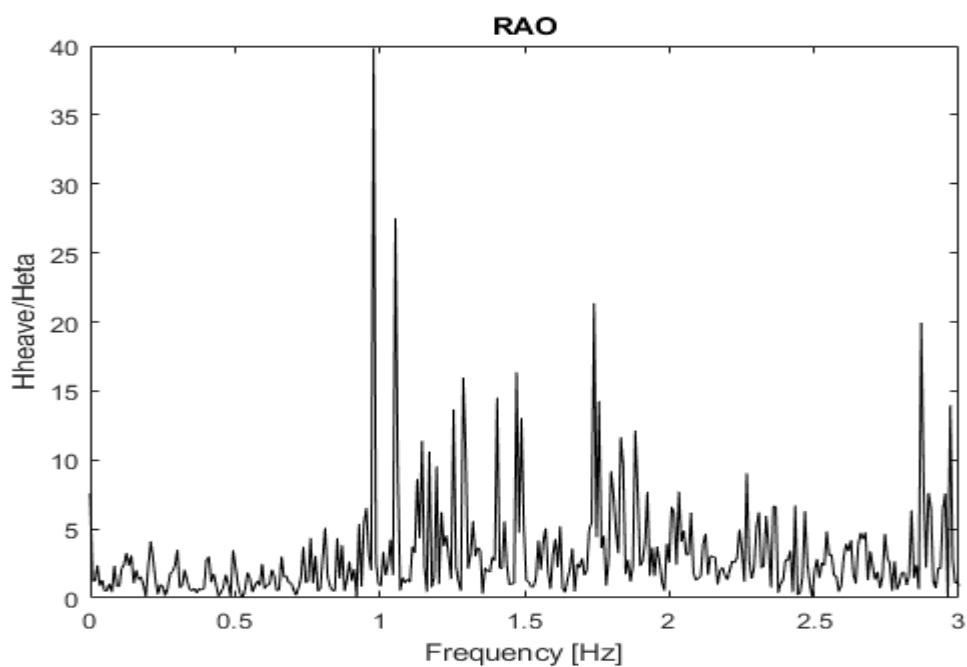


Ilustración 84: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A1 altura 7 [cm] período 1,909 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01164	0,11232	-0,09123	0,20355
Heave	0,00163	0,07565	-0,04717	0,12282

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,58216	5,61596	-4,56139	10,17734
Heave	0,08132	3,78257	-2,35847	6,14103

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,12607	0,54655	0,00000	0,07187
prototipo	0,89145	3,86466	0,00000	0,50817

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,18743	7,10463	0,00000	0,80596
prototipo	1,18743	7,10463	0,00000	0,80596

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02432	0,14550	0,00000	0,01651
prototipo	3039,82	18187,86	0,00	2063,27
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00344	0,04957	0,00000	0,00412
prototipo	3038,13	43809,69	0,00	3643,33

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,7342
Desempeño de captura	13,3001

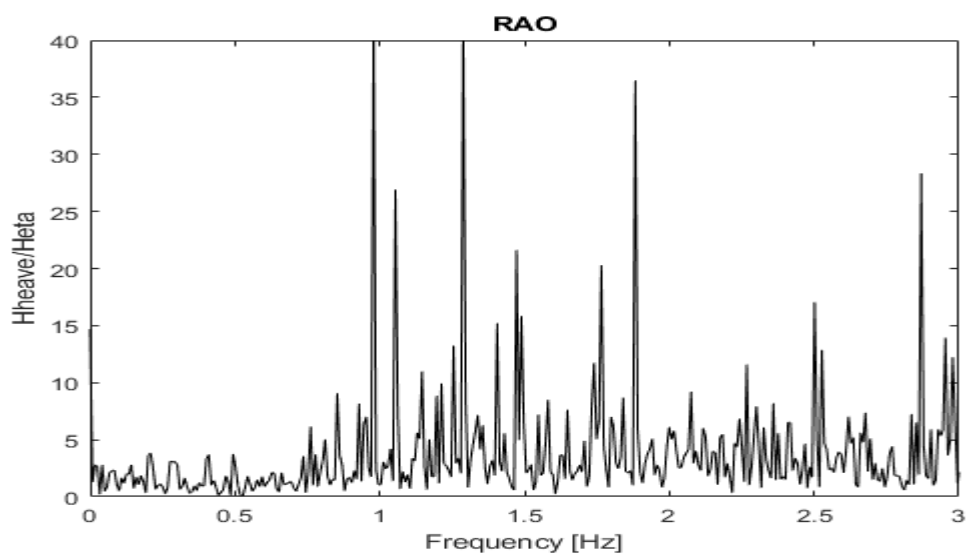


Ilustración 85: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A1 altura 7 [cm] período 1,909 [seg].

A continuación, se presenta a modo de compacto los resultados obtenidos para los valores medios de velocidad, aceleración, fuerza, potencia junto a sus respectivos anchos y desempeño de captura.

Desde el punto de vista cinemático se observa que la velocidad y aceleración con la que se desplaza el dispositivo WEC se afectan mayoritariamente por la variación de altura significativa de cada estado de Mar, mientras que si bien existe una dependencia inversa con respecto al aumento del periodo esta no es de gran relevancia.

Desde el punto de vista dinámico se puede apreciar que existe un comportamiento similar al visto en los parámetros cinemáticos, observando a simple vista que el amarre con cadenas sin contretes posee una mayor captación energética sin poseer un gran incremento con respecto a los parámetros cinemáticos como velocidad o aceleración.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia _WEC [W]	Potencia _disp [W/m]	ancho de captura [m]	desempeño de captura
Acero	E11	0,051400	0,556000	0,011400	0,000630	0,000544	1,1568	20,9574
	E12	0,082900	0,749700	0,015400	0,001400	0,001200	1,2110	21,9392
	E13	0,116300	1,092300	0,022400	0,003000	0,002400	1,2475	22,5997
	E21	0,050400	0,517800	0,010600	0,000579	0,000658	0,8804	15,9490
	E22	0,081600	0,817300	0,016700	0,001500	0,001800	0,852	15,4348
	E23	0,103100	0,950100	0,019500	0,002200	0,003000	0,7328	13,2745
	E31	0,052900	0,595900	0,012200	0,000676	0,000664	1,0275	18,4528
	E32	0,076000	0,673800	0,013800	0,001100	0,001700	0,6596	11,9486
	E33	0,102800	0,830000	0,017000	0,001900	0,003500	0,5354	9,6994
	E41	0,050300	0,521400	0,010700	0,000548	0,000787	0,6966	12,6187
	E42	0,076700	0,646400	0,013200	0,001100	0,002000	0,5387	9,7592
	E43	0,115000	0,902200	0,018500	0,002300	0,004200	0,5388	9,7613
Sintético	E11	0,054900	0,432900	0,008900	0,000574	0,000544	1,0550	19,1127
	E12	0,081800	0,876100	0,017900	0,001700	0,001200	1,44390	26,1585
	E13	0,114200	0,925100	0,018900	0,002500	0,002400	1,0360	18,7677
	E21	0,051400	0,693200	0,014200	0,000765	0,000658	1,163	21,0631
	E22	0,080600	0,773300	0,015800	0,001400	0,001800	0,7685	13,9217
	E23	0,106200	1,013300	0,020800	0,002500	0,003000	0,8169	14,7995
	E31	0,052100	0,650200	0,013300	0,000718	0,000664	1,0822	19,6058
	E32	0,075300	0,708800	0,014500	0,001200	0,001700	0,6897	12,4948
	E33	0,106100	0,928900	0,019000	0,002200	0,003500	0,6295	11,4047
	E41	0,052200	0,643400	0,013200	0,000714	0,000787	0,9064	16,4196
	E42	0,080500	0,768300	0,015700	0,001300	0,002000	0,6608	11,9715
	E43	0,112500	0,999600	0,020500	0,002600	0,004200	0,6069	10,9950
Ca de na	E11	0,063400	0,920100	0,018800	0,001300	0,000544	2,3892	43,2826

	E12	0,086900	1,014300	0,020800	0,002000	0,001200	1,7572	31,8333
	E13	0,132300	1,406500	0,028800	0,004500	0,002400	1,8328	33,2023
	E21	0,059200	0,872600	0,017900	0,001100	0,000658	1,3563	31,52410
	E22	0,094300	1,069200	0,021900	0,002300	0,001800	1,2664	22,9428
	E23	0,118300	1,220600	0,025000	0,003300	0,003000	1,1015	19,9542
	E31	0,058600	0,784600	0,016100	0,001000	0,000664	1,5339	27,7876
	E32	0,085300	0,901200	0,018500	0,001800	0,001700	1,0431	18,8973
	E33	0,117600	1,130100	0,023100	0,003100	0,003500	0,8769	15,8851
	E41	0,056500	0,683300	0,014000	0,000855	0,000787	1,0855	19,6655
	E42	0,086400	0,930500	0,019100	0,001800	0,002000	0,8691	15,7441
	E43	0,126100	1,187400	0,024300	0,003400	0,004200	0,7342	13,3001

Tabla 27: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo.

Finalmente se procede a extrapolar los resultados a su escala prototipo para su análisis y comparación con respecto a los ensayos numéricos y su correcto dimensionamiento para fines prácticos y de estudio.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]	ancho de captura [m]	desempeño de captura
Acero	E11	0,363453	0,556000	1425,	556,687491	481,212681	1,1568	20,9574
	E12	0,586192	0,749700	1925	1237,436867	1060,660172	1,2110	21,9392
	E13	0,822365	1,092300	2800	2651,650429	2121,320344	1,2475	22,5997
	E21	0,356382	0,517800	1325	512,024859	581,595328	0,8804	15,9490
	E22	0,576999	0,817300	2087	1325,825215	1590,990258	0,852	15,4348
	E23	0,729027	0,950100	2437,5	1944,543648	2651,650429	0,7328	13,2745
	E31	0,374059	0,595900	1525	597,602457	586,686496	1,0275	18,4528
	E32	0,537401	0,673800	1725	972,271824	1502,601910	0,6596	11,9486
	E33	0,726906	0,830000	2125	1679,378605	3093,592168	0,5354	9,6994
	E41	0,355675	0,521400	1337,5	484,792409	695,996366	0,6966	12,6187
	E42	0,542351	0,646400	1650	972,271824	1767,766953	0,5387	9,7592
	E43	0,813173	0,902200	2312,5	2032,931996	3712,310601	0,5388	9,7613
Sintetico	E11	0,388202	0,432900	1112,5	507,684991	481,212681	1,0550	19,1127
	E12	0,578413	0,876100	2237,5	1502,601910	1060,660172	1,44390	26,1585
	E13	0,807516	0,925100	2362,5	2209,708691	2121,320344	1,0360	18,7677

	E21	0,363453	0,693200	1775	676,215054	581,595328	1,163	21,0631
	E22	0,569928	0,773300	1975	1237,436867	1590,990258	0,7685	13,9217
	E23	0,750947	1,013300	2600	2209,708691	2651,650429	0,8169	14,7995
	E31	0,368403	0,650200	1662,5	634,937695	586,686496	1,0822	19,6058
	E32	0,532451	0,708800	1812,5	1060,660172	1502,601910	0,6897	12,4948
	E33	0,750240	0,928900	2375	1944,543648	3093,592168	0,6295	11,4047
	E41	0,369110	0,643400	1650	630,818798	695,996366	0,9064	16,4196
	E42	0,569221	0,768300	1962,5	1149,048519	1767,766953	0,6608	11,9715
	E43	0,795495	0,999600	2562,5	2298,097039	3712,310601	0,6069	10,9950
Cadena	E11	0,448306	0,920100	2350	1149,048519	481,212681	2,3892	43,2826
	E12	0,614476	1,014300	2600	1767,766953	1060,660172	1,7572	31,8333
	E13	0,935502	1,406500	3600	3977,475644	2121,320344	1,8328	33,2023
	E21	0,418607	0,872600	2237,5	972,271824	581,595328	1,3563	31,52410
	E22	0,666802	1,069200	2737,5	2032,931996	1590,990258	1,2664	22,9428
	E23	0,836507	1,220600	3125	2916,815472	2651,650429	1,1015	19,9542
	E31	0,414365	0,784600	2012,5	883,883476	586,686496	1,5339	27,7876
	E32	0,603162	0,901200	2312,5	1590,990258	1502,601910	1,0431	18,8973
	E33	0,831558	1,130100	2887,5	2740,038777	3093,592168	0,8769	15,8851
	E41	0,399515	0,683300	1750	755,525918	695,996366	1,0855	19,6655
	E42	0,610940	0,930500	2387,5	1590,990258	1767,766953	0,8691	15,7441
	E43	0,891662	1,187400	3037,5	3005,203820	3712,310601	0,7342	13,3001

Tabla 28: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo

10.2.2. Modelo A2

- **ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,71	1,15	0,0012
Prototipo	235,5	8,13	1061

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02353	0,01970	-0,09665	0,11635
Heave	0,00005	0,03133	-0,03426	0,06559

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,17660	0,98517	-4,83247	5,81764
Heave	0,00252	1,56653	-1,71292	3,27945

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07922	0,27273	0,00000	0,04634
prototipo	0,56016	1,92851	0,00000	0,32766

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,77754	3,51375	0,00000	0,49839
prototipo	0,77754	3,51375	0,00000	0,49839

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02200	0,09944	0,00000	0,01410
prototipo	2750,54	12429,88	0,00	1763,05

potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00195	0,01781	0,00000	0,00202
prototipo	1726,13	15741,28	0,00	1782,24

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,5882
Desempeño de captura	28,7714

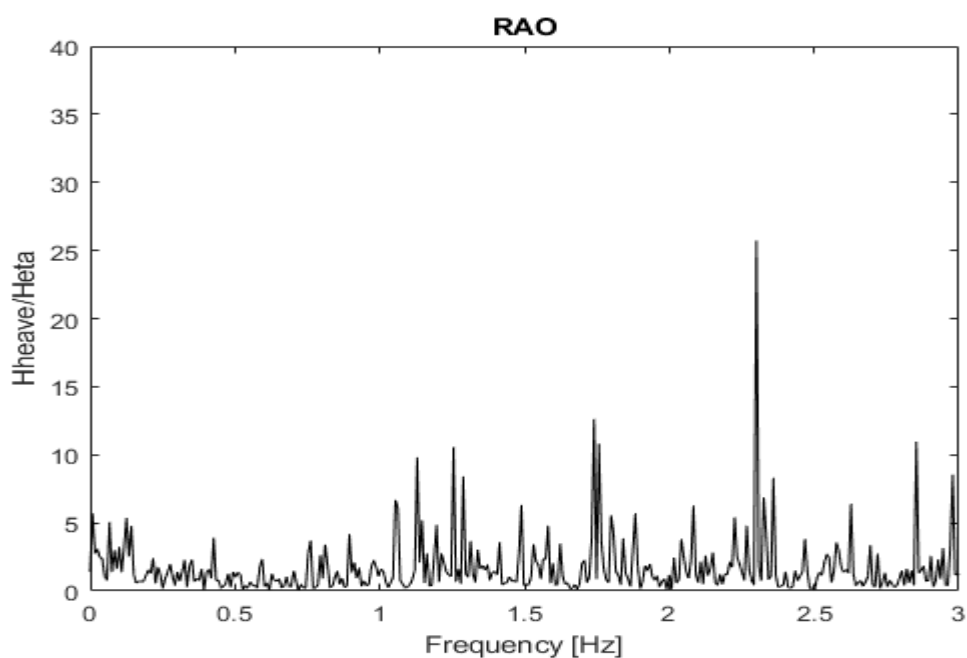


Ilustración 86: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	0,01805	0,02977	-0,11989	0,14966
Heave	0,00212	0,04918	-0,03567	0,08485

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,90270	1,48832	-5,99467	7,48299
Heave	0,10597	2,45915	-1,78354	4,24269

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08392	0,41909	0,00000	0,05141
prototipo	0,59339	2,96344	0,00000	0,36349

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,00029	5,62326	0,00000	0,66456
prototipo	1,00029	5,62326	0,00000	0,66456

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02831	0,15914	0,00000	0,01881
prototipo	3538,54	19892,28	0,00	2350,87
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00269	0,05128	0,00000	0,00344
prototipo	2380,95	45322,12	0,00	3039,95

- Eficiencia energética

Ancho de captura	2,1907
Desempeño de captura	39,6862

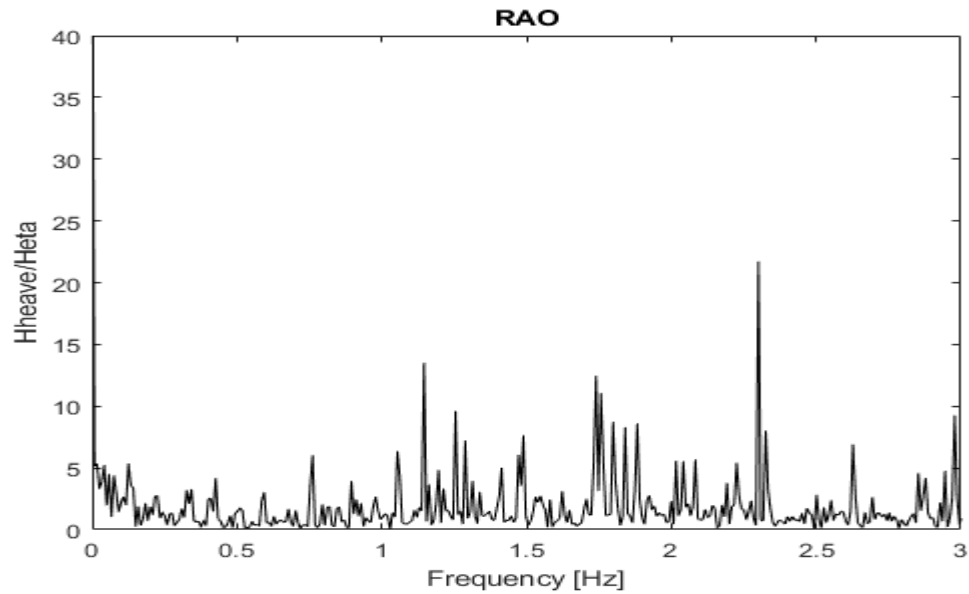


Ilustración 87: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A2 altura 5 [cm] periodo 1,13 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03097	0,01204	-0,11758	0,12962
Heave	0,00197	0,03979	-0,03210	0,07189

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,54855	0,60191	-5,87903	6,48093
Heave	0,09849	1,98941	-1,60496	3,59437

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09071	0,34831	0,00000	0,05313
prototipo	0,64141	2,46294	0,00000	0,37565

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,98588	4,56950	0,00000	0,63292
prototipo	0,98588	4,56950	0,00000	0,63292

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02790	0,12932	0,00000	0,01791
prototipo	3487,53	16164,61	0,00	2238,97
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00287	0,02863	0,00000	0,00301
prototipo	2533,66	25304,28	0,00	2664,51

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,7342
Desempeño de captura	13,3001

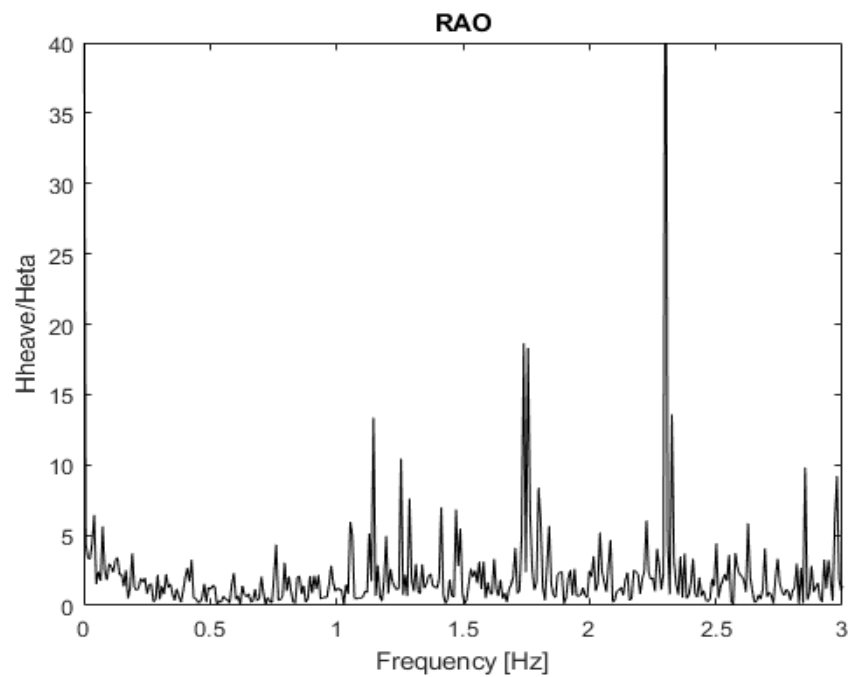


Ilustración 88: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [Seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,84	1,38	0,0016
Prototipo	242	9,76	1414

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01099	0,04849	-0,09822	0,14672
Heave	0,00034	0,04058	-0,03605	0,07663

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,54955	2,42472	-4,91103	7,33575
Heave	0,01708	2,02910	-1,80261	3,83170

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08328	0,26843	0,00000	0,04629
prototipo	0,58887	1,89810	0,00000	0,32732

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,80690	3,95537	0,00000	0,48869
prototipo	0,80690	3,95537	0,00000	0,48869

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02284	0,11194	0,00000	0,01383
prototipo	2854,40	13992,13	0,00	1728,73
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00206	0,01778	0,00000	0,00201
prototipo	1821,01	15718,38	0,00	1774,57

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,3222
Desempeño de captura	23,9537

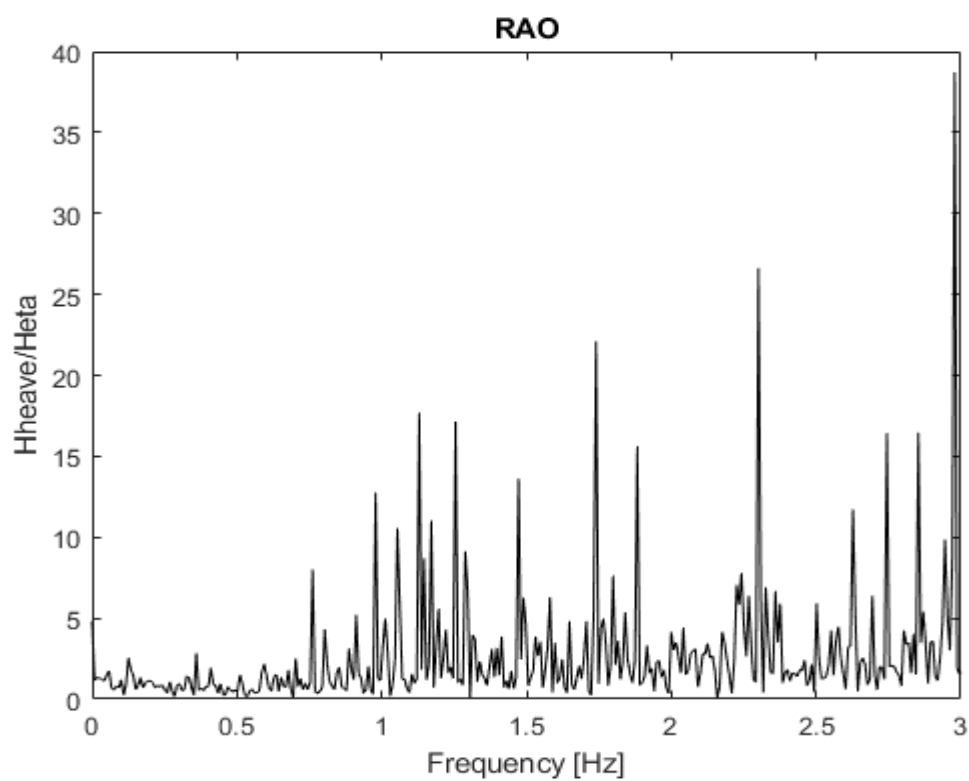


Ilustración 89: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,4 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01440	0,04775	-0,07235	0,12010
Heave	0,00026	0,04742	-0,03553	0,08295

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,72016	2,38741	-3,61772	6,00513
Heave	0,01315	2,37077	-1,77664	4,14741

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08306	0,35832	0,00000	0,04823
prototipo	0,58734	2,53371	0,00000	0,34104

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,00019	6,17836	0,00000	0,65245
prototipo	1,00019	6,17836	0,00000	0,65245

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02831	0,17485	0,00000	0,01846
prototipo	3538,18	21855,93	0,00	2308,06
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00256	0,03772	0,00000	0,00279
prototipo	2262,24	33336,27	0,00	2466,97

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,6426
Desempeño de captura	29,7575

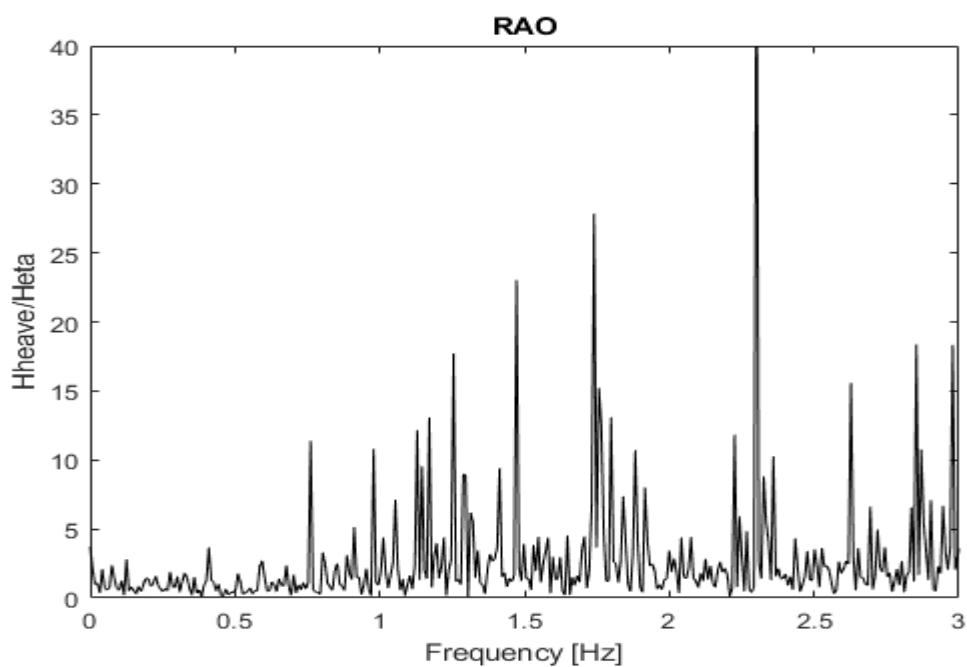


Ilustración 90: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A2 altura 5 [cm] periodo 1,48 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01247	0,04617	-0,08743	0,13360
Heave	0,00233	0,03708	-0,03022	0,06730

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,62342	2,30846	-4,37134	6,67981
Heave	0,11629	1,85410	-1,51082	3,36491

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08522	0,31390	0,00000	0,04925
prototipo	0,60261	2,21962	0,00000	0,34824

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,92881	4,35681	0,00000	0,57709
prototipo	0,92881	4,35681	0,00000	0,57709

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02629	0,12330	0,00000	0,01633
prototipo	3285,67	15412,23	0,00	2041,47
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00245	0,02036	0,00000	0,00259
prototipo	2168,69	17992,87	0,00	2292,00

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,5747
Desempeño de captura	28,5270

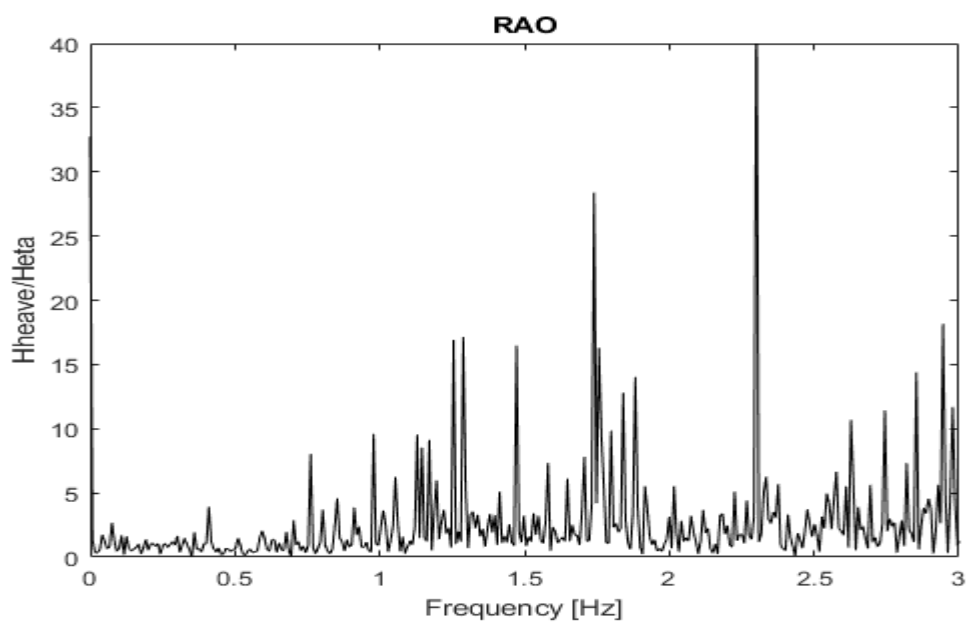


Ilustración 91: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

• ESTADO E32

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,98	1,52	0,0018

Prototipo	249	10,75	1591
-----------	-----	-------	------

○ Cable de Acero

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01378	0,03939	-0,08618	0,12557
Heave	0,00111	0,04175	-0,03562	0,07738

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,68884	1,96942	-4,30887	6,27830
Heave	0,05574	2,08768	-1,78114	3,86882

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08157	0,24506	0,00000	0,04349
prototipo	0,57676	1,73283	0,00000	0,30755

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,75583	3,20962	0,00000	0,45949
prototipo	0,75583	3,20962	0,00000	0,45949

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02139	0,09083	0,00000	0,01300
prototipo	2673,73	11354,01	0,00	1625,43
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00186	0,01401	0,00000	0,00176
prototipo	1640,93	12384,75	0,00	1553,67

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0218
Desempeño de captura	18,5104

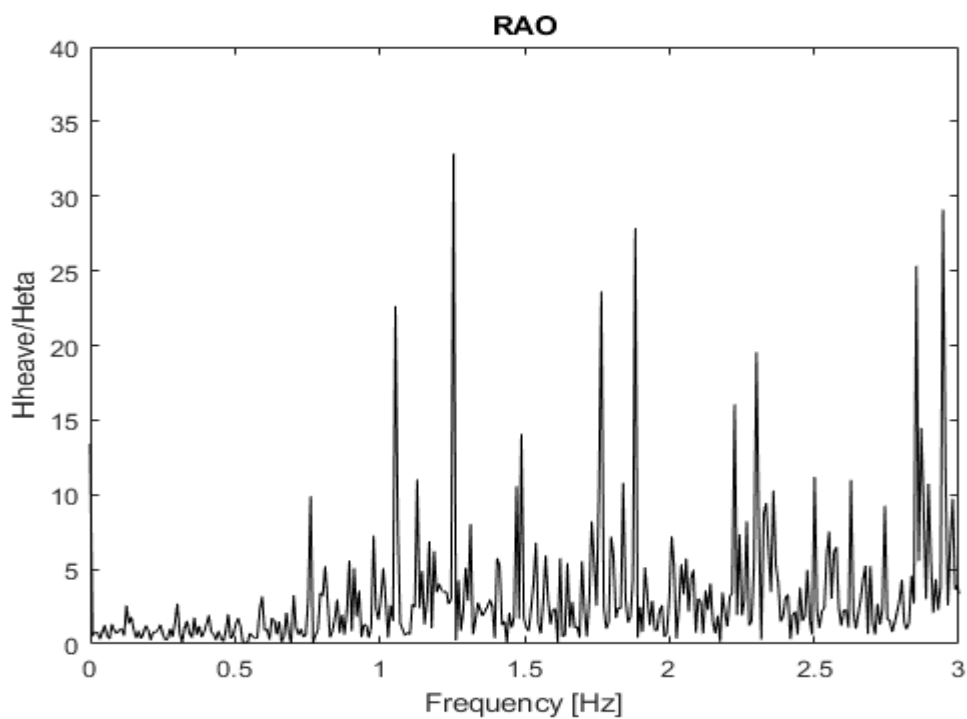


Ilustración 92: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01416	0,04562	-0,07370	0,11931
Heave	0,00156	0,05957	-0,04091	0,10049

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,70813	2,28083	-3,68491	5,96575
Heave	0,07801	2,97870	-2,04569	5,02440

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08588	0,40940	0,00000	0,05091
prototipo	0,60729	2,89492	0,00000	0,36001

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,01651	7,04580	0,00000	0,69322
prototipo	1,01651	7,04580	0,00000	0,69322

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02877	0,19940	0,00000	0,01962
prototipo	3595,89	24924,53	0,00	2452,25
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00270	0,04536	0,00000	0,00320
prototipo	2389,03	40092,23	0,00	2827,14

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,4876
Desempeño de captura	26,9493

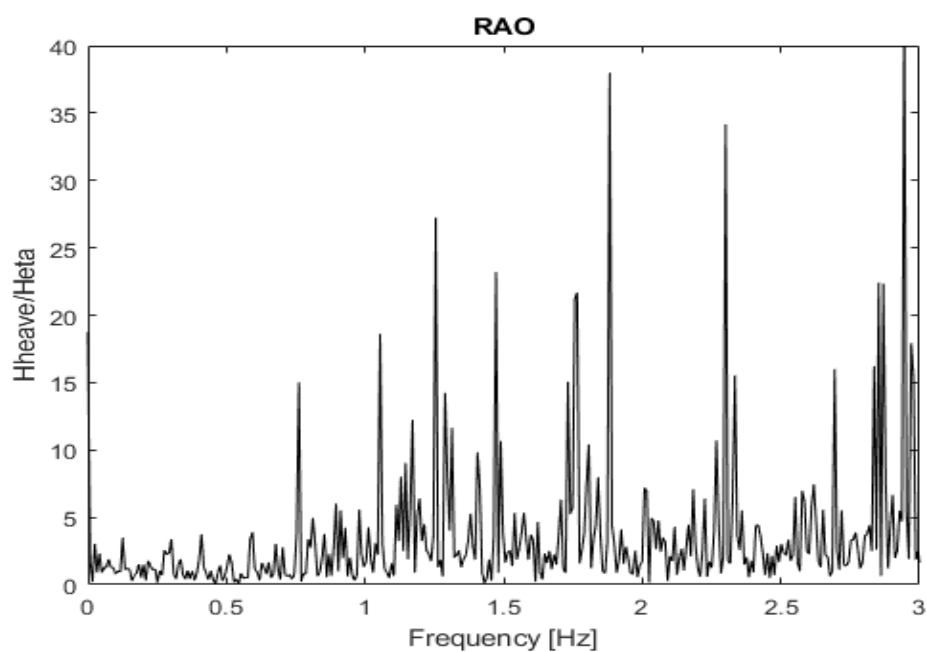


Ilustración 93: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00165	0,06337	-0,08419	0,14757
Heave	0,00080	0,03818	-0,03356	0,07174

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,08251	3,16868	-4,20967	7,37836
Heave	0,04016	1,90922	-1,67780	3,58702

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08904	0,32942	0,00000	0,05151
prototipo	0,62958	2,32933	0,00000	0,36420

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,98498	5,20346	0,00000	0,62538
prototipo	0,98498	5,20346	0,00000	0,62538

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02787	0,14726	0,00000	0,01770
prototipo	3484,35	18407,24	0,00	2212,30
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00269	0,03295	0,00000	0,00277
prototipo	2376,73	29124,48	0,00	2445,43

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	0,7342
Desempeño de captura	13,3001

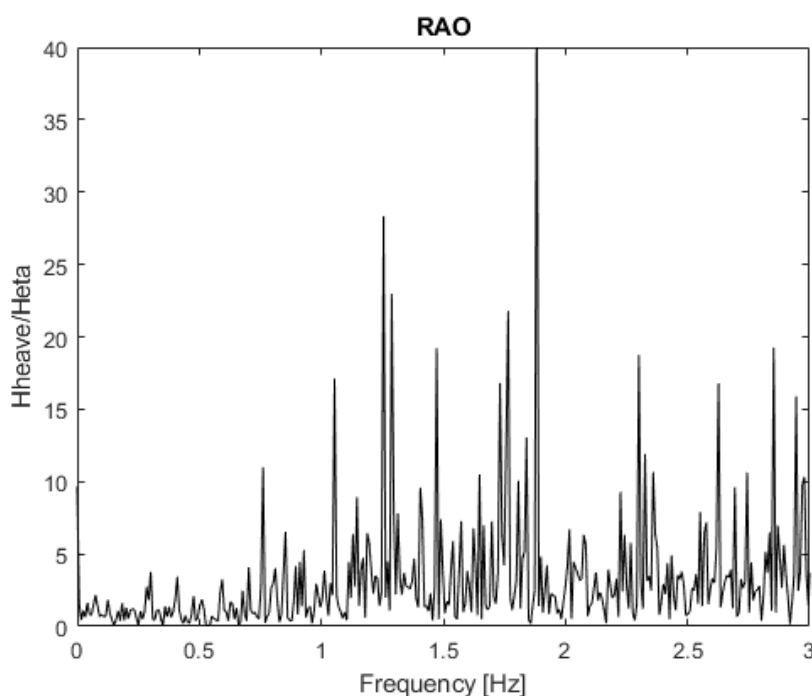


Ilustración 94: respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

Para la aplicación del modelo A2 en la prueba P01 se observa que el comportamiento se aleja levemente comparándolo con el modelo A1, ya que se observa que al aumentar el periodo el dispositivo WEC aumento levemente sus parámetros cinemáticos para luego disminuirlos nuevamente.

En cuanto a los parámetros dinámicos estos entregaron mayores valores en comparación con el modelo A1, los cuales resaltan aún más en comparación con los parámetros cinemáticos.

Tabla 29: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo A2

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]	ancho de captura [m]	desempeño de captura
Acero	E12	0,0792	0,7775	0,022	0,002	0,0012	1,5882	28,7714
	E22	0,0833	0,8069	0,0228	0,0021	0,0016	1,3222	23,9537
	E32	0,0816	0,7558	0,0214	0,0019	0,0018	1,0218	18,5104
Sintético	E12	0,0839	1,0003	0,0283	0,0027	0,0012	2,1907	39,6862
	E22	0,0831	1,0002	0,0283	0,0026	0,0016	1,6426	29,7575
	E32	0,0859	1,0165	0,0288	0,0027	0,0018	1,4876	26,9493
Cadena	E12	0,0907	0,9859	0,0279	0,0029	0,0012	2,33120	42,23160
	E22	0,0852	0,9288	0,0263	0,0025	0,0016	1,5747	28,5270
	E32	0,089	0,985	0,0279	0,0027	0,0018	1,4799	26,8106

Finalmente se procede a extrapolar los resultados a su escala prototipo para su análisis y comparación con respecto a los ensayos numéricos y su correcto dimensionamiento para fines prácticos y de estudio.

Tabla 30: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo A2.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]
Acero	E12	0,56002857	0,556	2750	1767,766953	1060,660172
	E22	0,58901995	0,7497	2850	1856,155301	1414,213562
	E32	0,57699913	1,0923	2675	1679,378605	1590,990258
Sintético	E12	0,59326259	0,4329	3537,5	2386,485387	1060,660172
	E22	0,58760574	0,8761	3537,5	2298,097039	1414,213562
	E32	0,60740473	0,9251	3600	2386,485387	1590,990258
Cadena	E12	0,64134585	0,9201	3487,5	2563,262082	1060,660172
	E22	0,60245498	1,0143	3287,5	2209,708691	1414,213562
	E32	0,62932504	1,4065	3487,5	2386,485387	1590,990258

10.2.3. Modelo B1

- **ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,97	1,19	0,0014
Prototipo	248,5	8,41	1237

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02955	0,03738	-0,10825	0,14563

Heave	0,00008	0,03228	-0,04066	0,07294
-------	---------	---------	----------	---------

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,47771	1,86905	-5,41256	7,28161
Heave	0,00420	1,61404	-2,03280	3,64684

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11435	0,39427	0,00000	0,06416
prototipo	0,80858	2,78791	0,00000	0,45368

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,00594	4,52643	0,00000	0,60485
prototipo	1,00594	4,52643	0,00000	0,60485

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03700	0,16648	0,00000	0,02225
prototipo	4624,79	20810,24	0,00	2780,82
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00463	0,03702	0,00000	0,00442
prototipo	4090,14	32718,01	0,00	3904,78

- Eficiencia energética

Ancho de captura	3,26620
Desempeño de captura	59,1707

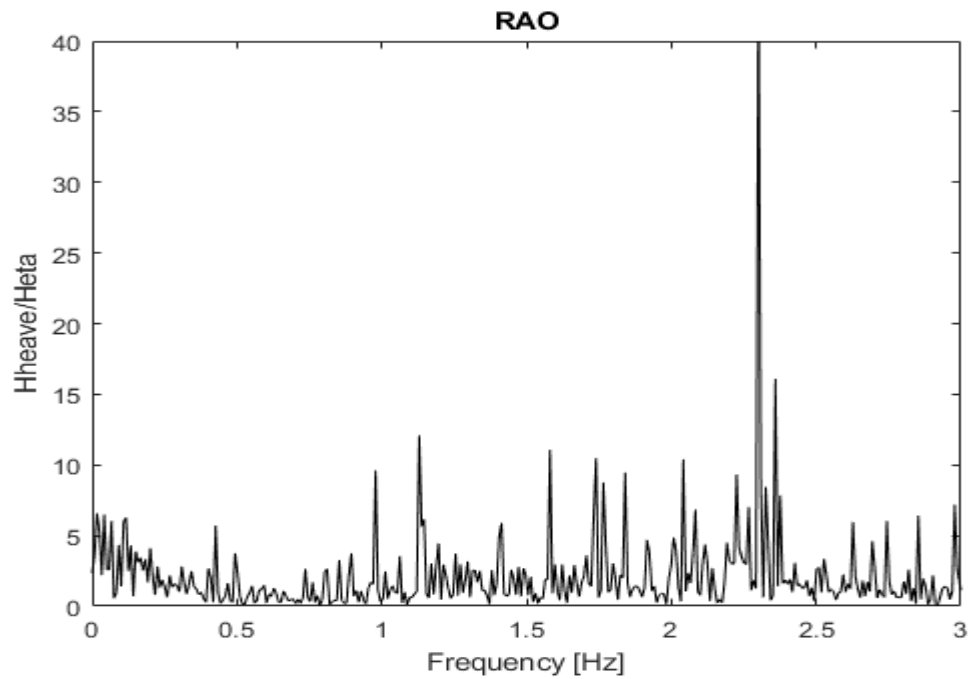


Ilustración 95: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo B1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg]

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,07538	0,02128	-0,19201	0,21329
Heave	0,00087	0,03623	-0,03892	0,07515

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	3,76887	1,06414	-9,60044	10,66457
Heave	0,04350	1,81156	-1,94605	3,75761

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10645	0,45594	0,00000	0,06293
prototipo	0,75271	3,22400	0,00000	0,44497

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,20716	8,58698	0,00000	0,78108
prototipo	1,20716	8,58698	0,00000	0,78108

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,04440	0,31583	0,00000	0,02873
prototipo	5549,94	39478,63	0,00	3591,02
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00524	0,12200	0,00000	0,00598
prototipo	4628,85	107834,23	0,00	5284,27

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	3,6964
Desempeño de captura	66,9640

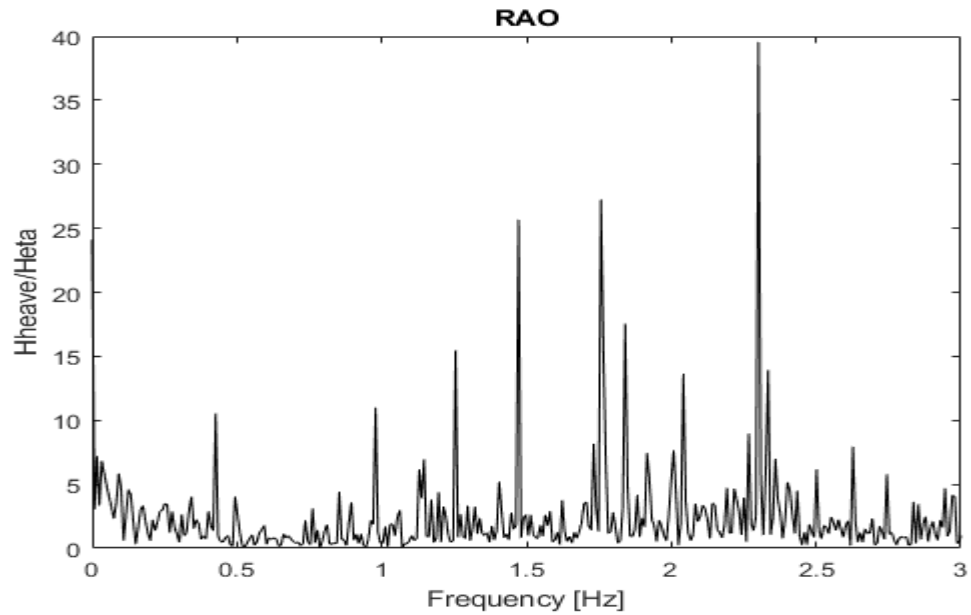


Ilustración 96: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo B1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03659	0,02025	-0,11341	0,13366
Heave	0,00043	0,03990	-0,03789	0,07779

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,82936	1,01272	-5,67039	6,68311

Heave	0,02132	1,99492	-1,89456	3,88948
-------	---------	---------	----------	---------

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11732	0,39961	0,00000	0,07086
prototipo	0,82957	2,82566	0,00000	0,50102

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,32896	5,23127	0,00000	0,82211
prototipo	1,32896	5,23127	0,00000	0,82211

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,04888	0,19241	0,00000	0,03024
prototipo	6109,88	24050,74	0,00	3779,63
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00619	0,04677	0,00000	0,00599
prototipo	5467,64	41335,84	0,00	5291,54

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	4,3662
Desempeño de captura	79,0985

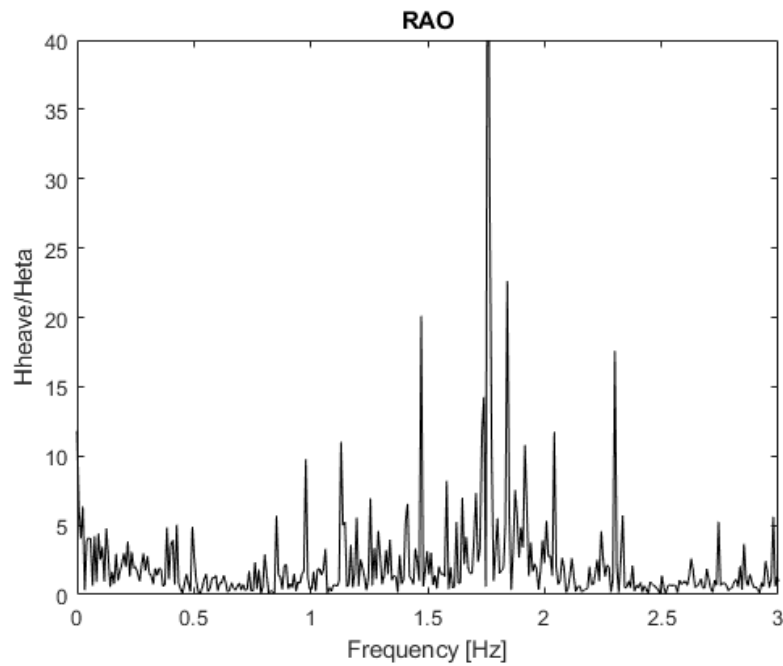


Ilustración 97: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [Seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,61	1,39	0,0014
Prototipo	230,5	9,83	1237

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02173	0,03727	-0,11473	0,15200
Heave	0,00043	0,03035	-0,03413	0,06447

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,08637	1,86351	-5,73666	7,60016
Heave	0,02144	1,51733	-1,70640	3,22374

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09669	0,35410	0,00000	0,05423
prototipo	0,68367	2,50384	0,00000	0,38345

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,88389	4,09148	0,00000	0,54860
prototipo	0,88389	4,09148	0,00000	0,54860

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03251	0,15048	0,00000	0,02018
prototipo	4063,68	18810,59	0,00	2522,19
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00337	0,03650	0,00000	0,00326
prototipo	2980,55	32265,16	0,00	2879,37

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,36840
Desempeño de captura	42,9051

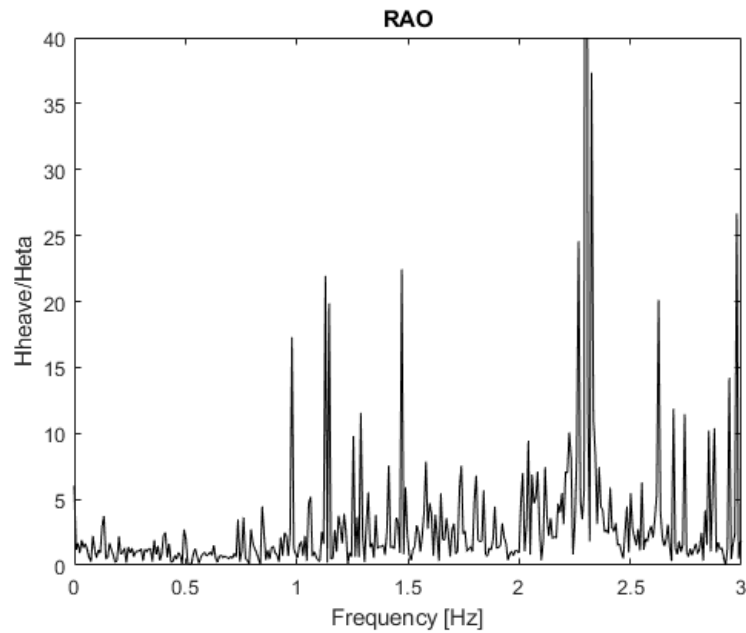


Ilustración 98: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo B1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Cable sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,07538	0,02128	-0,19201	0,21329
Heave	0,00087	0,03623	-0,03892	0,07515

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	3,76887	1,06414	-9,60044	10,66457
Heave	0,04350	1,81156	-1,94605	3,75761

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10645	0,45594	0,00000	0,06293
prototipo	0,75271	3,22400	0,00000	0,44497

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,20716	8,58698	0,00000	0,78108
prototipo	1,20716	8,58698	0,00000	0,78108

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,04440	0,31583	0,00000	0,02873
prototipo	5549,94	39478,63	0,00	3591,02
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00524	0,12200	0,00000	0,00598
prototipo	4628,85	107834,23	0,00	5284,27

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	3,6781
Desempeño de captura	66,6322

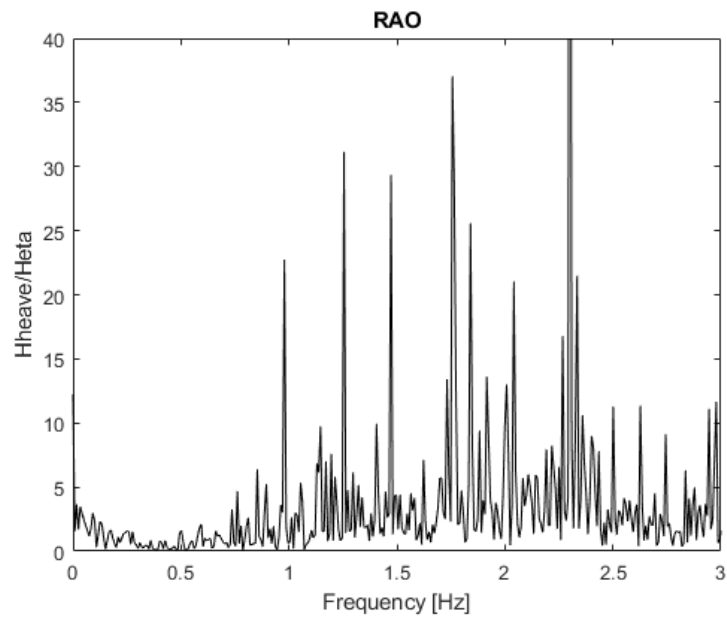


Ilustración 99: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo B1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03177	0,02665	-0,11739	0,14404
Heave	0,00085	0,03719	-0,04375	0,08094

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,58836	1,33259	-5,86966	7,20225
Heave	0,04265	1,85934	-2,18754	4,04688

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10241	0,38417	0,00000	0,06079
prototipo	0,72417	2,71646	0,00000	0,42984

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,16870	4,79315	0,00000	0,72419
prototipo	1,16870	4,79315	0,00000	0,72419

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,04298	0,17629	0,00000	0,02664
prototipo	5373,11	22036,50	0,00	3329,48
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00466	0,03515	0,00000	0,00443
prototipo	4121,54	31070,91	0,00	3917,47

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	4,3446
Desempeño de captura	78,7066

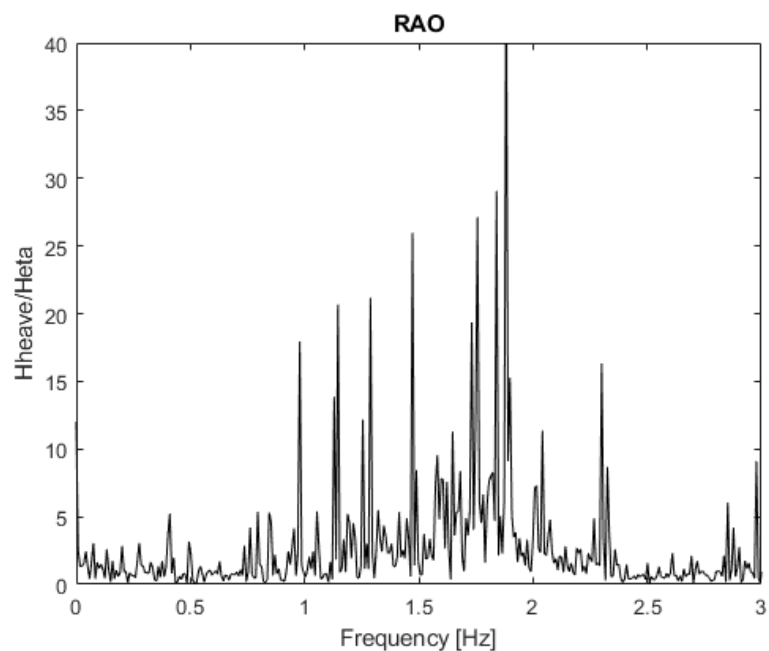


Ilustración 100: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo B1 altura 5 [cm] periodo 1,48 [seg].

- **ESTADO E32**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,67	1,53	0,0016
Prototipo	233,5	10,82	1414

- Cable de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02529	0,03770	-0,08802	0,12573
Heave	0,00010	0,03069	-0,03016	0,06085

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,26456	1,88524	-4,40106	6,28629
Heave	0,00502	1,53444	-1,50820	3,04264

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09111	0,34374	0,00000	0,05001
prototipo	0,64424	2,43058	0,00000	0,35365

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,81030	3,75456	0,00000	0,48268
prototipo	0,81030	3,75456	0,00000	0,48268

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02980	0,13809	0,00000	0,01775
prototipo	3725,36	17261,58	0,00	2219,10
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00290	0,02573	0,00000	0,00262
prototipo	2558,88	22742,21	0,00	2313,08

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,8001
Desempeño de captura	32,6102

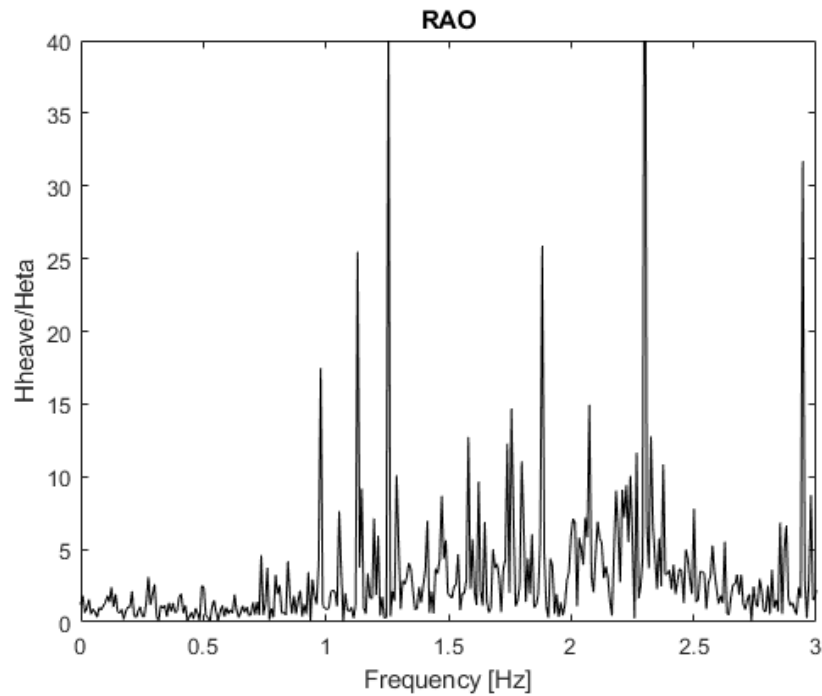


Ilustración 101: Respuesta RAO prueba P01 acero modelo B1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Cable sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00652	0,05948	-0,07922	0,13870
Heave	0,00062	0,03154	-0,03627	0,06781

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,32595	2,97388	-3,96101	6,93489
Heave	0,03088	1,57705	-1,81345	3,39050

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09381	0,35019	0,00000	0,05522
prototipo	0,66330	2,47625	0,00000	0,39043

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,99644	5,65114	0,00000	0,67386
prototipo	0,99644	5,65114	0,00000	0,67386

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03665	0,20785	0,00000	0,02478
prototipo	4581,13	25981,11	0,00	3098,05
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00375	0,04399	0,00000	0,00412
prototipo	3317,22	38881,78	0,00	3639,44

- Eficiencia energética

Ancho de captura	3,2562
Desempeño de captura	58,9897

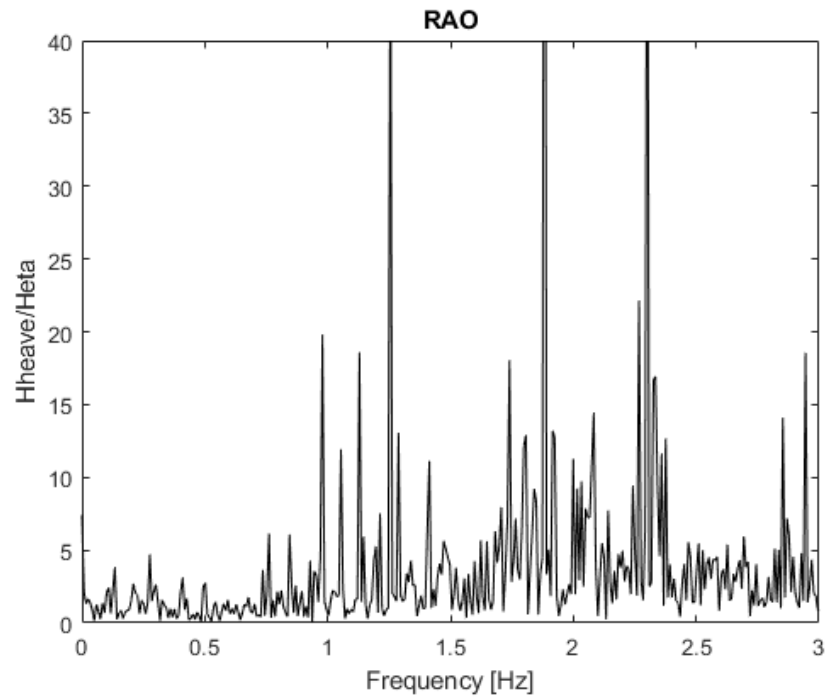


Ilustración 102: Respuesta RAO prueba P01 sintético modelo B1 altura 5 [cm] periodo 1,697 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03096	0,04401	-0,09690	0,14091
Heave	0,00034	0,04258	-0,04533	0,08792

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,54793	2,20068	-4,84496	7,04565
Heave	0,01718	2,12915	-2,26674	4,39589

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09696	0,38221	0,00000	0,05584
prototipo	0,68560	2,70264	0,00000	0,39488

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,08230	7,26274	0,00000	0,70638
prototipo	1,08230	7,26274	0,00000	0,70638

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03981	0,26712	0,00000	0,02598
prototipo	4975,85	33390,45	0,00	3247,56
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00410	0,09430	0,00000	0,00442
prototipo	3620,52	83350,80	0,00	3904,50

- Eficiencia energética

Ancho de captura	3,8463
Desempeño de captura	69,6791

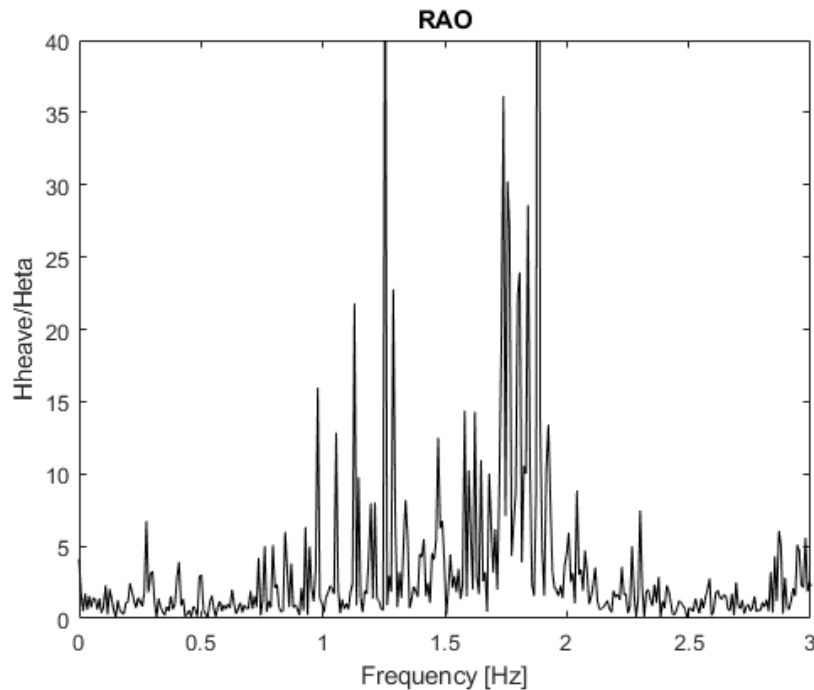


Ilustración 103: respuesta RAO prueba P01 cadena modelo B1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

Para la aplicación del modelo B1 en la prueba P01 se observa que el comportamiento se acerca levemente comparándolo con el modelo A1, ya que se observa que al aumentar el periodo el dispositivo WEC disminuye levemente sus parámetros cinemáticos, siendo estos de mayor cambio que en comparación con el modelo A2

En cuanto a los parámetros dinámicos estos entregaron mayores valores en comparación con el modelo A1, los cuales resaltan aún más en comparación con los parámetros cinemáticos, sin embargo, la validación de estos valores es más dudosa debido a la geometría del dispositivo WEC, puesto que sus dimensiones no permitieron evaluar de correcta forma en los planos superior e inferior.

Tabla 31: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo B1.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]	ancho de captura [m]	desempeño de captura
Acero	E12	0,1144	1,0059	0,037	0,0046	0,0014	32,6620	59,1707
	E22	0,0967	0,8839	0,0325	0,0034	0,0014	23,6840	42,9051
	E32	0,0911	0,8103	0,0298	0,0029	0,0016	1,8001	32,6102
Sintetico	E12	0,1064	1,2072	0,0444	0,0052	0,0014	3,6964	66,9640
	E22	0,1064	1,2072	0,0444	0,0052	0,0014	3,6781	66,6322
	E32	0,0938	0,9964	0,0366	0,0038	0,0016	3,2562	58,9897
Cadena	E12	0,1173	1,329	0,0489	0,0062	0,0014	4,36620	79,09850
	E22	0,1024	1,1687	0,043	0,0047	0,0014	4,3446	78,7066
	E32	0,097	1,0823	0,0398	0,0041	0,0016	3,8463	69,6791

Finalmente se procede a extrapolar los resultados a su escala prototipo para su análisis y comparación con respecto a los ensayos numéricos y su correcto dimensionamiento para fines prácticos y de estudio.

Tabla 32: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo B1.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]
Acero	E12	0,80893016	0,556	4625	4065,863992	1237,436867
	E22	0,68377226	0,7497	4062,5	3005,20382	1237,436867
	E32	0,64417428	1,0923	3725	2563,262082	1414,213562
Sintético	E12	0,75236162	0,4329	5550	4596,194078	1237,436867
	E22	0,75236162	0,8761	5550	4596,194078	1237,436867
	E32	0,66326616	0,9251	4575	3358,757211	1414,213562
Cadena	E12	0,82943625	0,9201	6112,5	5480,077554	1237,436867
	E22	0,72407734	1,0143	5375	4154,252339	1237,436867
	E32	0,68589358	1,4065	4975	3623,922254	1414,213562

10.3. Prueba P02 – Fondeo SALM-1

10.3.1. Modelo A2

- ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,93	1,18	0,0014
Prototipo	246,5	8,34	1237

- Tether de acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01865	0,02680	-0,09030	0,11709
Heave	0,00032	0,03707	-0,03341	0,07047

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,93239	1,33990	-4,51485	5,85474
Heave	0,01595	1,85330	-1,67029	3,52360

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08263	0,28179	0,00000	0,04799
prototipo	0,58427	1,99258	0,00000	0,33933

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,76061	3,83551	0,00000	0,49366
prototipo	0,76061	3,83551	0,00000	0,49366

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02153	0,10854	0,00000	0,01397
prototipo	2690,67	13568,11	0,00	1746,34
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00201	0,01744	0,00000	0,00209
prototipo	1779,22	15414,63	0,00	1848,49

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,4562
Desempeño de captura	26,3804

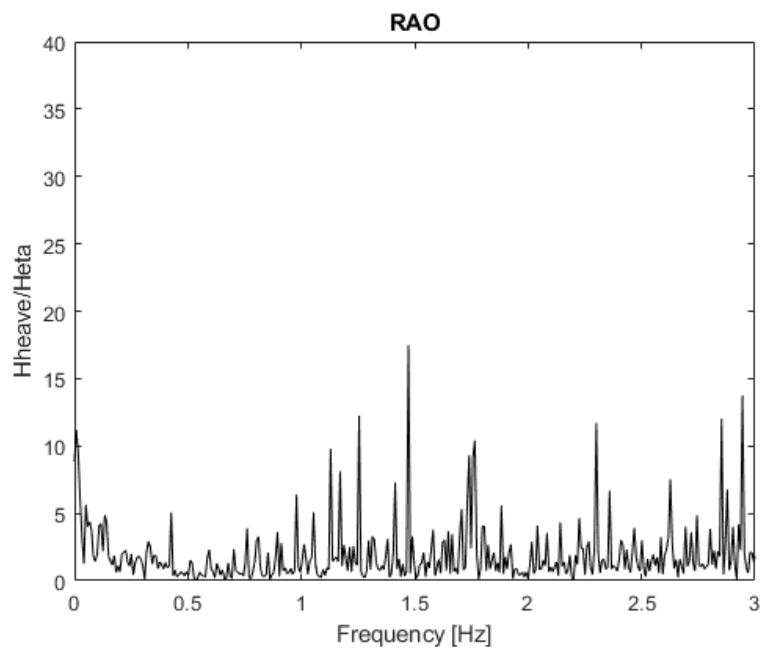


Ilustración 104: Respuesta RAO prueba P02 tether de acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

- Tether sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02942	0,03356	-0,09498	0,12854
Heave	0,00075	0,04359	-0,03423	0,07782

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,47095	1,67784	-4,74919	6,42703
Heave	0,03774	2,17947	-1,71168	3,89115

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08769	0,42857	0,00000	0,05423
prototipo	0,62007	3,03045	0,00000	0,38348

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,94441	5,57907	0,00000	0,63040
prototipo	0,94441	5,57907	0,00000	0,63040

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,02673	0,15789	0,00000	0,01784
prototipo	3340,85	19735,95	0,00	2230,05
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00268	0,03588	0,00000	0,00321
prototipo	2365,12	31712,48	0,00	2841,26

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,9357
Desempeño de captura	35,0675

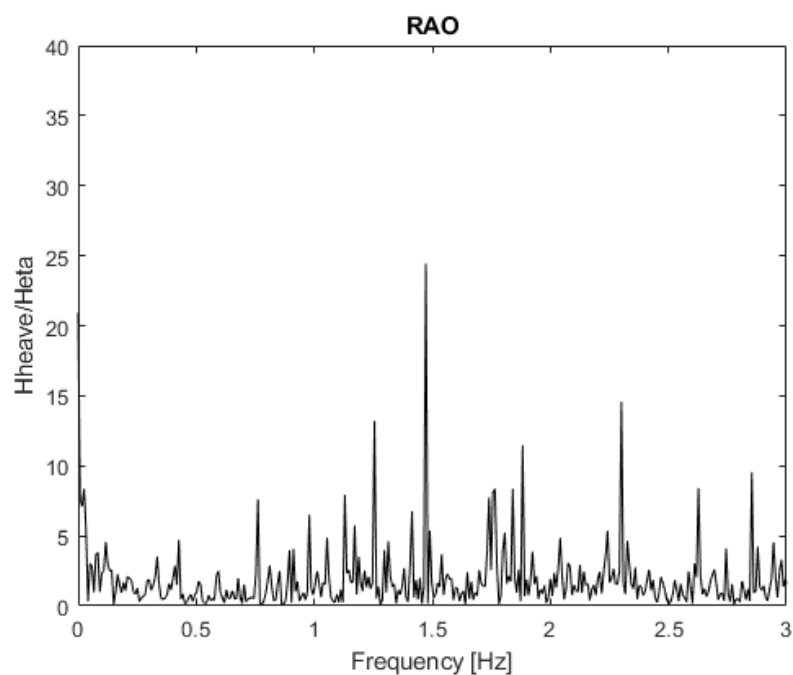


Ilustración 105: Respuesta RAO prueba P02 tether sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

- Tether y Hawser cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03448	0,02372	-0,13316	0,15688
Heave	0,00223	0,03762	-0,03494	0,07256

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,72407	1,18588	-6,65803	7,84390
Heave	0,11155	1,88088	-1,74706	3,62793

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09150	0,43016	0,00000	0,05410
prototipo	0,64699	3,04166	0,00000	0,38254

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,06025	6,90002	0,00000	0,66858
prototipo	1,06025	6,90002	0,00000	0,66858

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,03000	0,19527	0,00000	0,01892
prototipo	3750,62	24408,83	0,00	2365,10
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00308	0,06008	0,00000	0,00351
prototipo	2723,92	53107,06	0,00	3100,53

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,2294
Desempeño de captura	40,3875

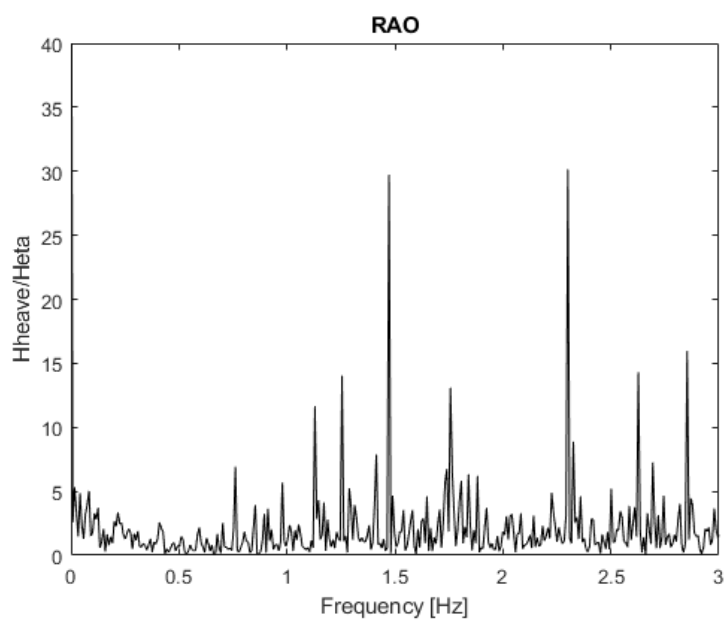


Ilustración 106: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,13 [Seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,94	1,35	0,0016
Prototipo	247	9,55	1414

- Tether de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01871	0,05270	-0,10469	0,15739
Heave	0,00109	0,04313	-0,03864	0,08177

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,93541	2,63516	-5,23441	7,86956
Heave	0,05472	2,15638	-1,93216	4,08854

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08181	0,29155	0,00000	0,04718
prototipo	0,57845	2,06158	0,00000	0,33358

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,73459	3,44084	0,00000	0,48106
prototipo	0,73459	3,44084	0,00000	0,48106

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02079	0,09738	0,00000	0,01361
prototipo	2598,60	12171,98	0,00	1701,76
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00190	0,02249	0,00000	0,00203
prototipo	1681,87	19875,15	0,00	1791,73

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,1983
Desempeño de captura	21,7086

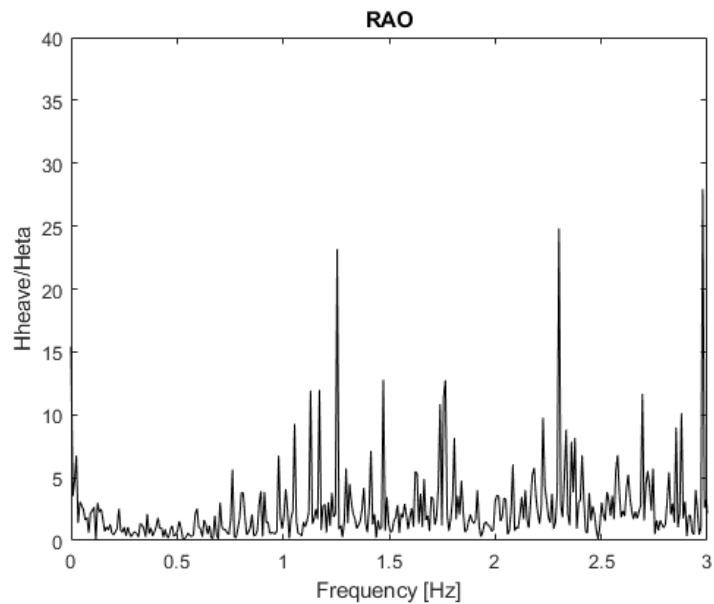


Ilustración 107: Respuesta RAO prueba P02 tethe acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Tether sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02497	0,03471	-0,09323	0,12794
Heave	0,00290	0,04987	-0,03487	0,08475

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,24841	1,73534	-4,66166	6,39701
Heave	0,14492	2,49360	-1,74367	4,23727

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08446	0,33958	0,00000	0,05172
prototipo	0,59725	2,40122	0,00000	0,36571

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,93260	7,11038	0,00000	0,63564
prototipo	0,93260	7,11038	0,00000	0,63564

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02639	0,20122	0,00000	0,01799
prototipo	3299,08	25152,98	0,00	2248,58
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00253	0,04671	0,00000	0,00313
prototipo	2231,94	41290,39	0,00	2767,31

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,6851
Desempeño de captura	30,5276

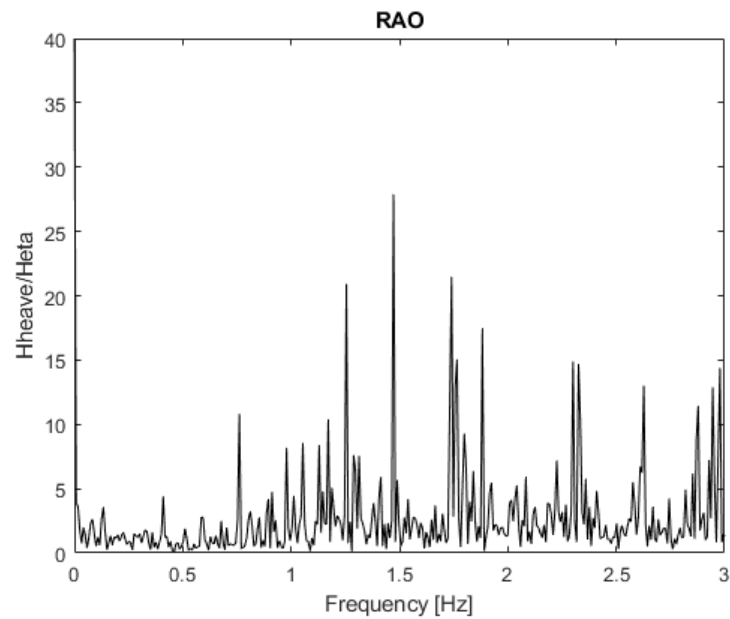


Ilustración 108: Respuesta RAO prueba P02 Tether sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Tether y Hawser de cadenas

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,05312	0,01086	-0,13401	0,14487
Heave	0,00436	0,03939	-0,03083	0,07022

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,65583	0,54316	-6,70052	7,24368
Heave	0,21815	1,96972	-1,54138	3,51111

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08417	0,38490	0,00000	0,05038
prototipo	0,59515	2,72169	0,00000	0,35621

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,96899	6,33119	0,00000	0,60324
prototipo	0,96899	6,33119	0,00000	0,60324

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02742	0,17917	0,00000	0,01707
prototipo	3427,80	22396,59	0,00	2133,97
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00256	0,04137	0,00000	0,00297
prototipo	2259,30	36569,28	0,00	2627,61

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,9408
Desempeño de captura	35,1589

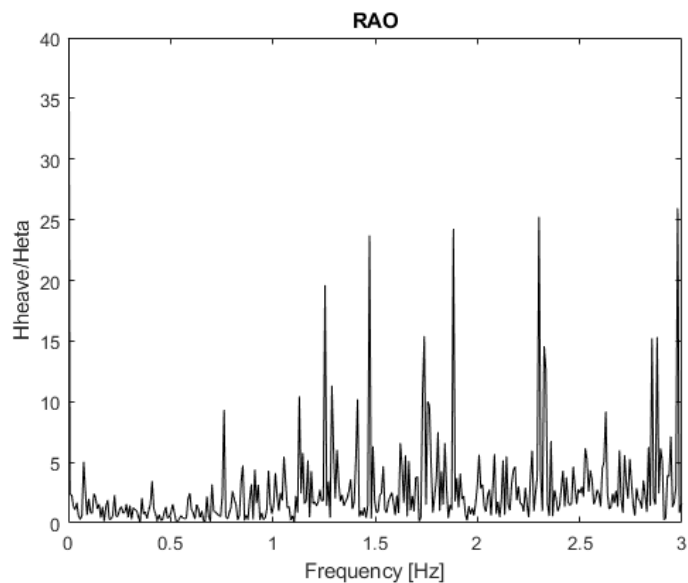


Ilustración 109: Respuesta RAO prueba P01 cadena modelo B1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

- **ESTADO E32**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,96	1,53	0,0018
Prototipo	248	10,82	1591

- Tether de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01066	0,05663	-0,15650	0,21313
Heave	0,00020	0,04411	-0,03905	0,08316

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,53308	2,83133	-7,82521	10,65653
Heave	0,01014	2,20574	-1,95237	4,15811

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08008	0,27942	0,00000	0,04600
prototipo	0,56622	1,97579	0,00000	0,32524

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,67509	3,45134	0,00000	0,43731
prototipo	0,67509	3,45134	0,00000	0,43731

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01910	0,09767	0,00000	0,01238
prototipo	2388,12	12209,13	0,00	1546,98
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00169	0,01584	0,00000	0,00172
prototipo	1496,62	14001,47	0,00	1518,45

- Eficiencia energética

Ancho de captura	0,9333
Desempeño de captura	16,9078

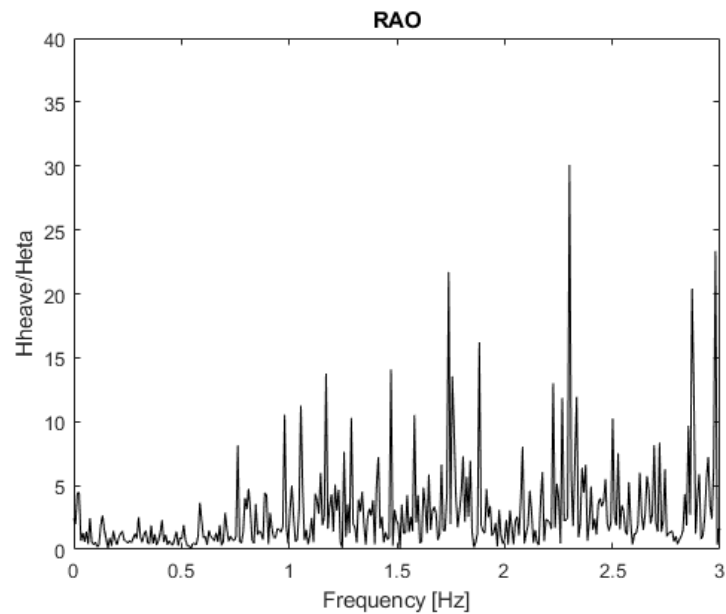


Ilustración 110: Respuesta RAO prueba P02 Tether acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Tether sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03333	0,02359	-0,10829	0,13188
Heave	0,00097	0,05296	-0,03445	0,08741

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	1,66657	1,17966	-5,41432	6,59398
Heave	0,04857	2,64813	-1,72229	4,37042

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08658	0,35194	0,00000	0,05117
prototipo	0,61224	2,48862	0,00000	0,36182

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,91505	5,21115	0,00000	0,58456
prototipo	0,91505	5,21115	0,00000	0,58456

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02590	0,14748	0,00000	0,01654
prototipo	3237,00	18434,45	0,00	2067,89
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00248	0,04138	0,00000	0,00279
prototipo	2188,47	36575,12	0,00	2466,19

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,4749
Desempeño de captura	26,7194

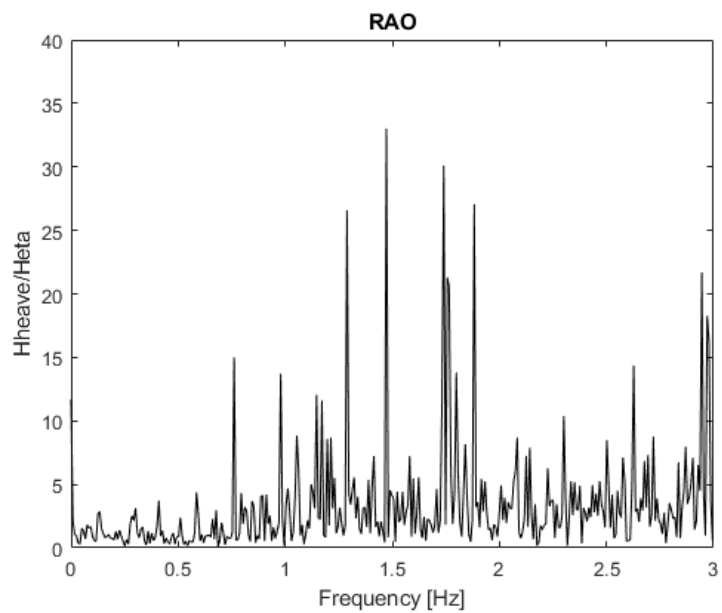


Ilustración 111: Respuesta RAO prueba P02 Tether sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

○ Tether y Hawser de cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,05018	0,03349	-0,12876	0,16225
Heave	0,00308	0,04061	-0,03045	0,07107

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,50907	1,67462	-6,43776	8,11238
Heave	0,15419	2,03074	-1,52252	3,55326

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08314	0,30376	0,00000	0,05016
prototipo	0,58792	2,14794	0,00000	0,35469

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,91480	5,03721	0,00000	0,57978
prototipo	0,91480	5,03721	0,00000	0,57978

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02589	0,14255	0,00000	0,01641
prototipo	3236,09	17819,13	0,00	2050,98
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00238	0,02753	0,00000	0,00255
prototipo	2105,44	24336,90	0,00	2254,18

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,6987
Desempeño de captura	30,7728

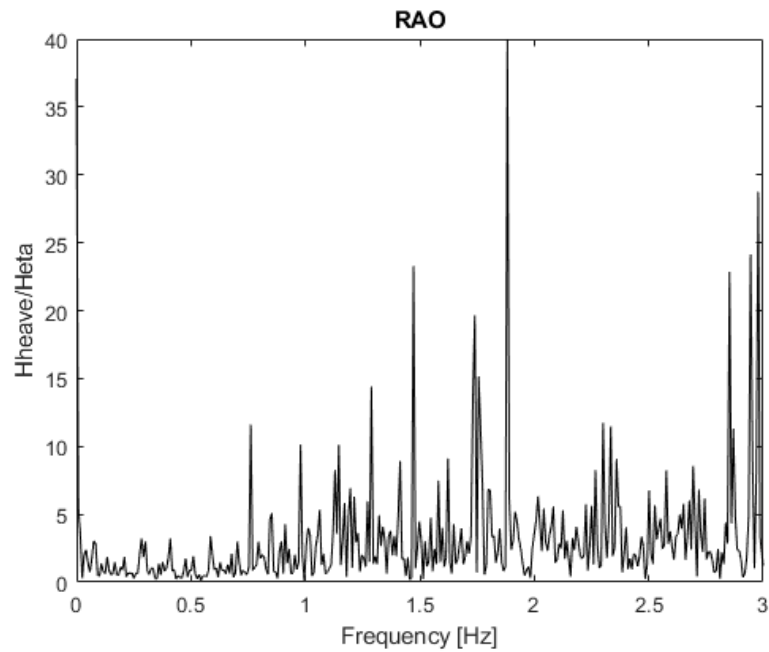


Ilustración 112: Respuesta RAO prueba P02 tether cadena modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

Para esta prueba los valores compactados indican que existe una mayor dependencia entre los parámetros cinéticos y dinámicos con el material del anclaje, comprendiendo también la relevancia del grado de libertad entregada al dispositivo WEC.

Además, se aprecia en cada caso que los valores tanto dinámicos como cinemáticos disminuyen en función de un aumento del período.

Tabla 33: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo A2 SALM-1.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]	ancho de captura	desempeño de captura
Acero	E12	0,0826	0,7606	0,0215	0,002	0,0014	1,4562	26,3804
	E22	0,0818	0,7346	0,0208	0,0019	0,0016	1,1983	21,7086
	E32	0,0801	0,6751	0,0191	0,0017	0,0018	0,9333	16,9078
Sintetico	E12	0,0877	0,9444	0,0267	0,0027	0,0014	1,9357	35,0675
	E22	0,0845	0,9326	0,0264	0,0025	0,0016	1,6851	30,5276
	E32	0,0866	0,9151	0,0259	0,0025	0,0018	1,4749	26,7194
Cadena	E12	0,0915	1,0602	0,03	0,0031	0,0014	2,22940	40,38750
	E22	0,0842	0,969	0,0274	0,0026	0,0016	1,9408	35,1589
	E32	0,0831	0,9148	0,0259	0,0024	0,0018	1,6987	30,7728

Finalmente se procede a extrapolar los resultados a su escala prototipo para su análisis y comparación con respecto a los ensayos numéricos y su correcto dimensionamiento para fines prácticos y de estudio.

Tabla 34: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo A2.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_W EC [W]	Potencia_dis p [W/m]
Acero	E12	0,5840	0,556	2687,5	1767,766	1237,436
	E22	0,5784	0,7497	2600	1679,378	1414,213
	E32	0,5663	1,0923	2387,5	1502,601	1590,990
Sintetico	E12	0,6201	0,4329	3337,5	2386,485	1237,436
	E22	0,5975	0,8761	3300	2209,708	1414,213
	E32	0,6123	0,9251	3237,5	2209,708	1590,990
Cadena	E12	0,6470	0,9201	3750	2740,038	1237,436
	E22	0,5953	1,0143	3425	2298,097	1414,213
	E32	0,5876	1,4065	3237,5	2121,320	1590,990

10.3.2. Modelo B1

- ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,97	1,17	0,0014
Prototipo	248,5	8,27	1237

- Tether de acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,06269	0,01357	-0,14284	0,15641
Heave	0,00067	0,04349	-0,04298	0,08647

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	3,13458	0,67859	-7,14207	7,82065
Heave	0,03356	2,17453	-2,14920	4,32373

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10405	0,35566	0,00000	0,06211
prototipo	0,73578	2,51488	0,00000	0,43921

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,03192	5,26095	0,00000	0,70788
prototipo	1,03192	5,26095	0,00000	0,70788

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,03795	0,19350	0,00000	0,02604
prototipo	4744,24	24187,20	0,00	3254,48
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00437	0,03444	0,00000	0,00458
prototipo	3863,66	30439,90	0,00	4047,88

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	3,1381
Desempeño de captura	56,8497

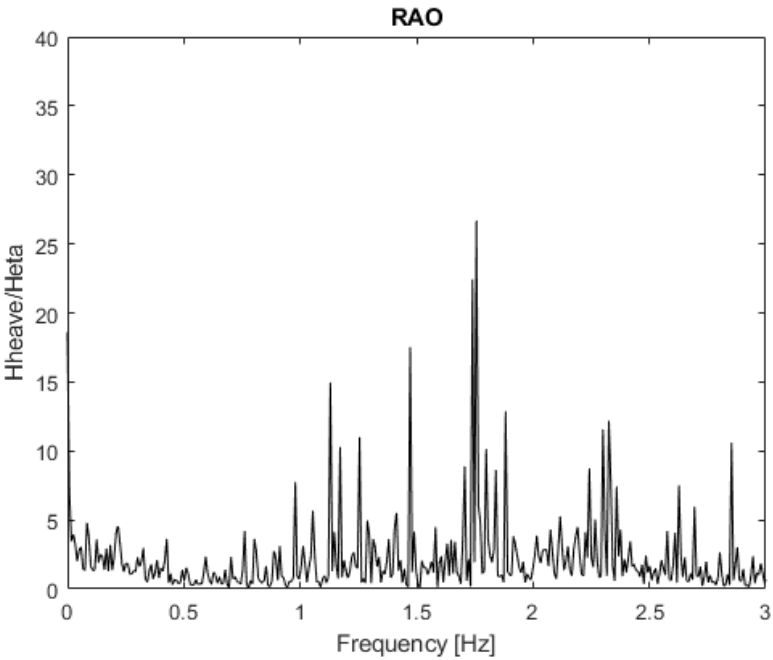


Ilustración 113: Respuesta RAO prueba P02 tether de acero modelo B1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

- Tether sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,05215	0,04118	-0,17544	0,21662
Heave	0,00224	0,03364	-0,04208	0,07572

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,60741	2,05891	-8,77213	10,83104
Heave	0,11219	1,68193	-2,10391	3,78584

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,10884	0,47197	0,00000	0,06683
prototipo	0,76965	3,33732	0,00000	0,47253

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,11222	5,57476	0,00000	0,75213
prototipo	1,11222	5,57476	0,00000	0,75213

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,04091	0,20504	0,00000	0,02766
prototipo	5113,45	25629,95	0,00	3457,93
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00507	0,05434	0,00000	0,00592
prototipo	4480,10	48029,02	0,00	5232,97

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	3,6388
Desempeño de captura	65,9200

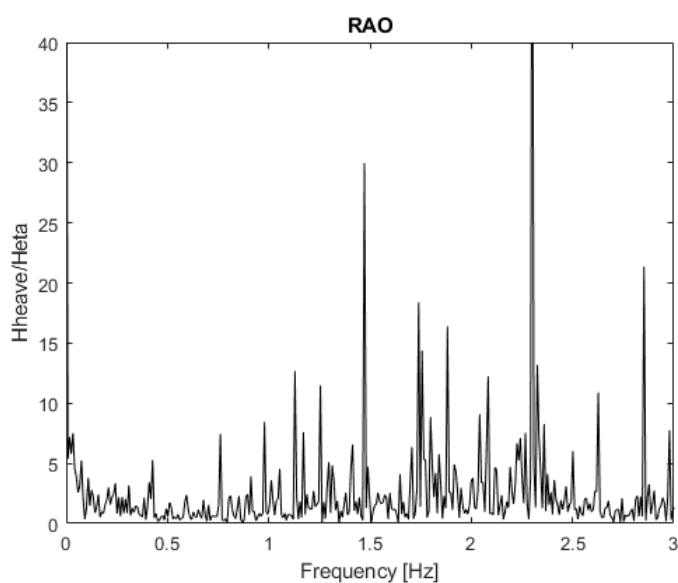


Ilustración 114: Respuesta RAO prueba P02 tether sintético modelo B1 altura 5 [cm] período 1,13 [seg].

- Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02159	0,04108	-0,06571	0,10679
Heave	0,00147	0,03438	-0,03171	0,06609

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,07934	2,05407	-3,28526	5,33933
Heave	0,07341	1,71900	-1,58545	3,30445

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07945	0,35020	0,00000	0,04754
prototipo	0,56182	2,47632	0,00000	0,33616

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,90327	5,23076	0,00000	0,59167
prototipo	0,90327	5,23076	0,00000	0,59167

- Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]

Modelo	0,03322	0,19239	0,00000	0,02176
prototipo	4152,77	24048,43	0,00	2720,21
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00292	0,04291	0,00000	0,00307
prototipo	2579,94	37929,48	0,00	2710,81

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,0955
Desempeño de captura	37,9612

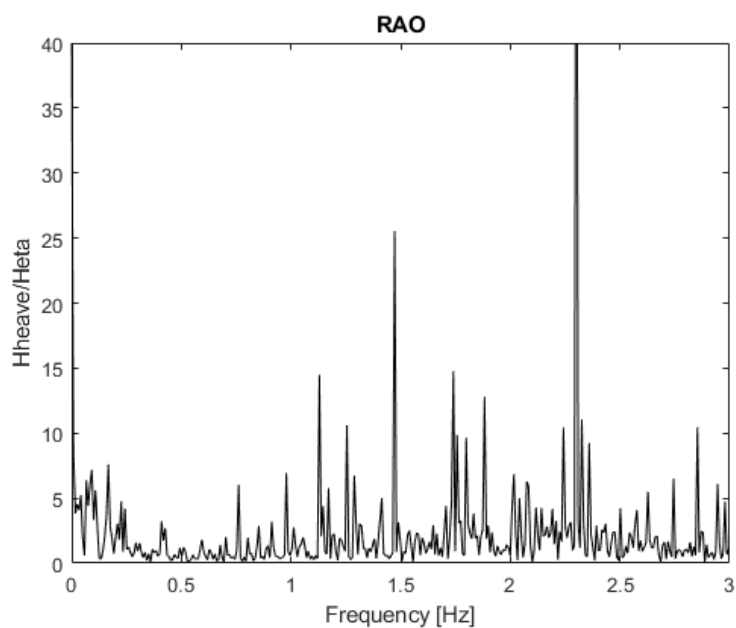


Ilustración 115: Respuesta RAO prueba P02 cadena modelo B1 altura 5 [cm] período 1,13 [Seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	5,05	1,43	0,0018
Prototipo	252,5	10,11	1591

- Tether de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00827	0,06807	-0,10690	0,17497
Heave	0,00004	0,04252	-0,04247	0,08499

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,41364	3,40350	-5,34495	8,74845
Heave	0,00216	2,12586	-2,12344	4,24930

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09441	0,39056	0,00000	0,05431
prototipo	0,66759	2,76171	0,00000	0,38406

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,91308	4,25973	0,00000	0,61013
prototipo	0,91308	4,25973	0,00000	0,61013

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03358	0,15667	0,00000	0,02244
prototipo	4197,89	19584,13	0,00	2805,08
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00346	0,03509	0,00000	0,00361
prototipo	3057,02	31011,94	0,00	3190,11

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,9676
Desempeño de captura	35,6457

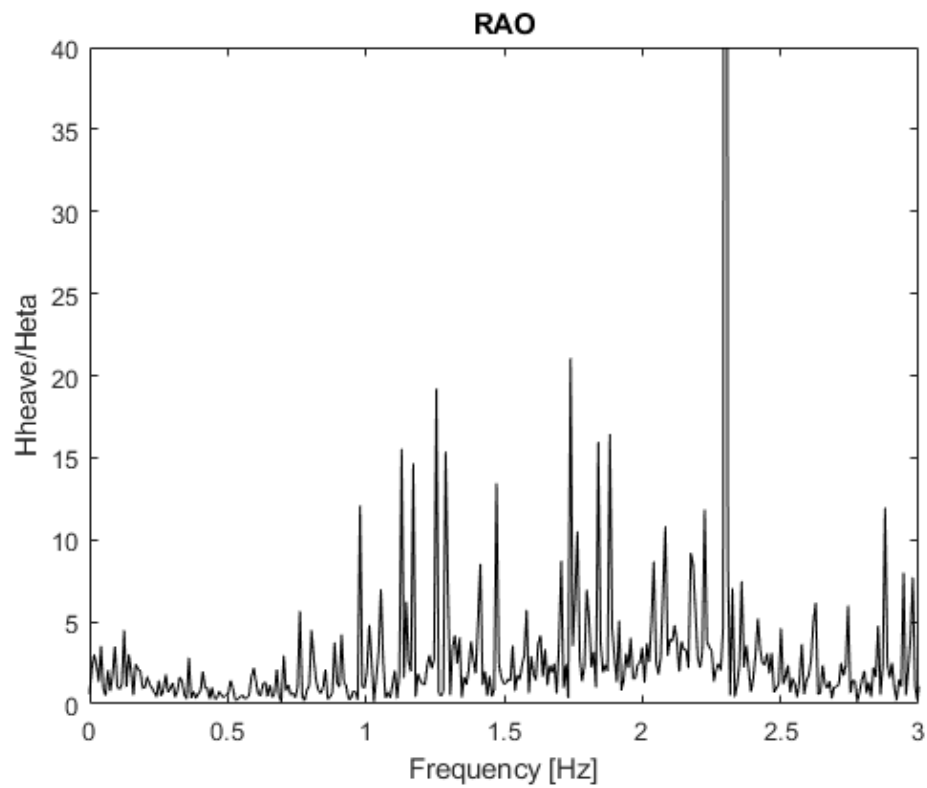


Ilustración 116: Respuesta RAO prueba P02 Tether acero modelo B1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Tether sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02940	0,05708	-0,11612	0,17320
Heave	0,00048	0,04464	-0,03617	0,08081

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,47017	2,85404	-5,80592	8,65996

Heave	0,02385	2,23225	-1,80836	4,04061
-------	---------	---------	----------	---------

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09611	0,36106	0,00000	0,05498
prototipo	0,67960	2,55311	0,00000	0,38875

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,94191	4,34288	0,00000	0,59307
prototipo	0,94191	4,34288	0,00000	0,59307

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03464	0,15973	0,00000	0,02181
prototipo	4330,41	19966,39	0,00	2726,62
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00365	0,03745	0,00000	0,00388
prototipo	3222,45	33101,06	0,00	3426,46

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,0741
Desempeño de captura	37,5747

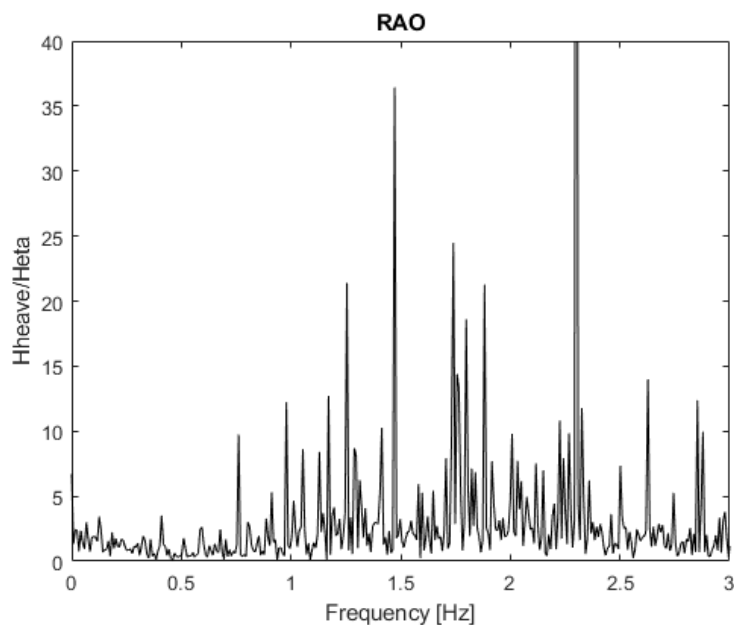


Ilustración 117: Respuesta RAO prueba P02 tether sintético modelo B1 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

○ Tether y Hawser de Cadena

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,05795	0,03909	-0,14590	0,18500
Heave	0,00306	0,03854	-0,03730	0,07584

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,89772	1,95471	-7,29518	9,24988
Heave	0,15300	1,92698	-1,86519	3,79217

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08719	0,37272	0,00000	0,05147
prototipo	0,61655	2,63550	0,00000	0,36398

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,04600	5,68773	0,00000	0,66252
prototipo	1,04600	5,68773	0,00000	0,66252

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03847	0,20919	0,00000	0,02437
prototipo	4808,97	26149,34	0,00	3045,93
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00358	0,04815	0,00000	0,00382
prototipo	3167,56	42556,95	0,00	3375,72

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	2,0388
Desempeño de captura	36,9347

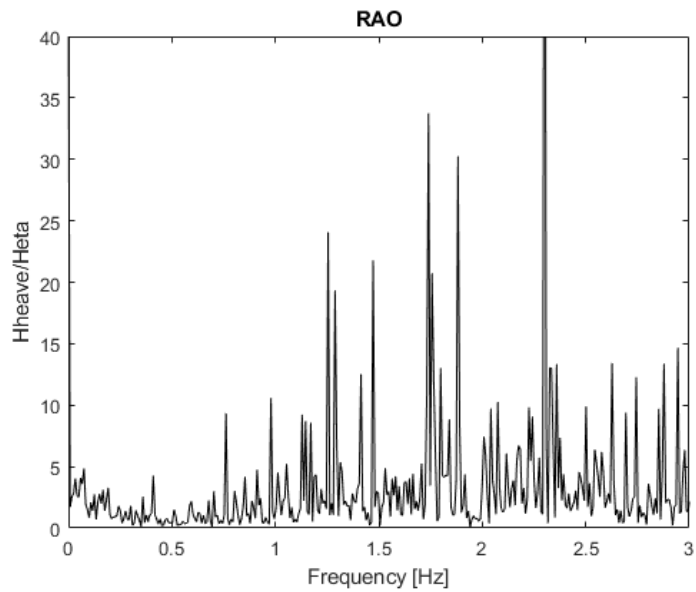


Ilustración 118: Respuesta RAO prueba P02 tether cadena modelo B1 altura 5 [cm] periodo 1,48 [seg].

- **ESTADO E32**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,89	1,57	0,0018
Prototipo	244,5	11,10	1591

- Tether de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,01506	0,05738	-0,12009	0,17746
Heave	0,00078	0,04063	-0,04133	0,08195

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,75300	2,86884	-6,00435	8,87319
Heave	0,03896	2,03137	-2,06632	4,09769

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09098	0,37784	0,00000	0,05268
prototipo	0,64335	2,67176	0,00000	0,37249

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,82051	3,79800	0,00000	0,51523
prototipo	0,82051	3,79800	0,00000	0,51523

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03018	0,13969	0,00000	0,01895
prototipo	3772,28	17461,33	0,00	2368,79
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00294	0,03547	0,00000	0,00298
prototipo	2602,90	31347,80	0,00	2630,98

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,6274
Desempeño de captura	29,4828

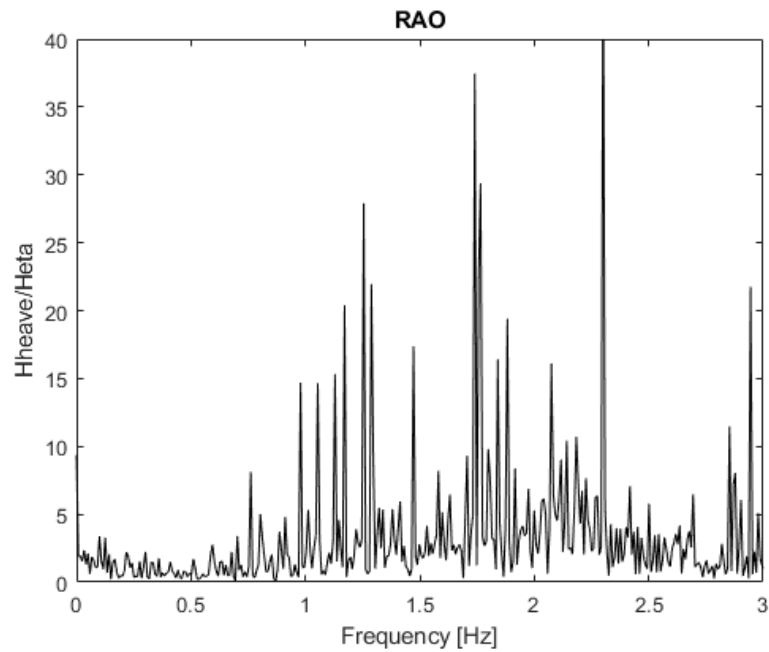


Ilustración 119: Respuesta RAO prueba P02 tether acero modelo B12 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Tether sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,03836	0,03795	-0,13089	0,16885
Heave	0,00210	0,04154	-0,04290	0,08444

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,91791	1,89758	-6,54473	8,44231
Heave	0,10521	2,07699	-2,14517	4,22216

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,09529	0,37642	0,00000	0,05504
prototipo	0,67383	2,66170	0,00000	0,38916

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,93486	3,70294	0,00000	0,58831
prototipo	0,93486	3,70294	0,00000	0,58831

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03438	0,13619	0,00000	0,02164
prototipo	4298,01	17024,26	0,00	2704,73
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00358	0,03945	0,00000	0,00377
prototipo	3167,53	34871,32	0,00	3335,92

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,9805
Desempeño de captura	35,8783

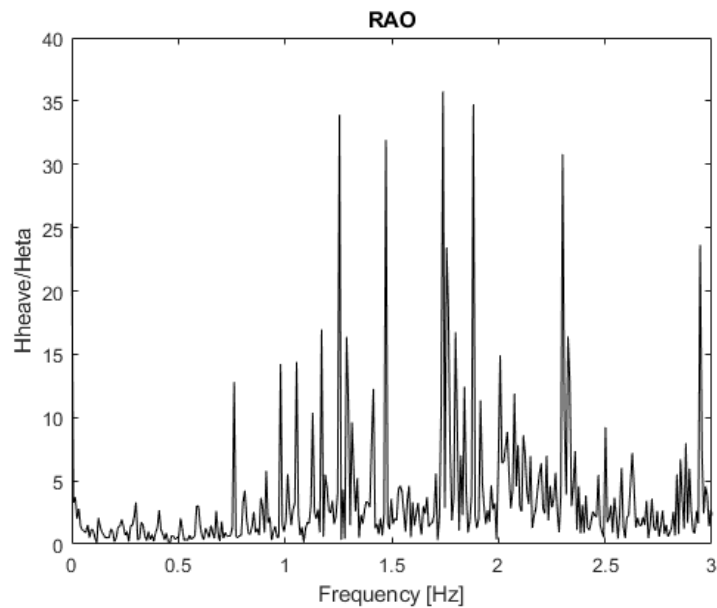


Ilustración 120: Respuesta RAO prueba P02 Tether sintético modelo B1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

- Tether y Hawser de Cadena

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,10177	0,02478	-0,19406	0,21884
Heave	0,00263	0,04136	-0,03383	0,07518

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	5,08845	1,23898	-9,70317	10,94215
Heave	0,13147	2,06783	-1,69131	3,75915

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08558	0,29624	0,00000	0,04878
prototipo	0,60514	2,09471	0,00000	0,34496

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,05896	4,75640	0,00000	0,66189
prototipo	1,05896	4,75640	0,00000	0,66189

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03895	0,17494	0,00000	0,02434
prototipo	4868,56	21867,53	0,00	3043,03
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00350	0,03096	0,00000	0,00346
prototipo	3092,45	27369,43	0,00	3059,27

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,9335
Desempeño de captura	35,0278

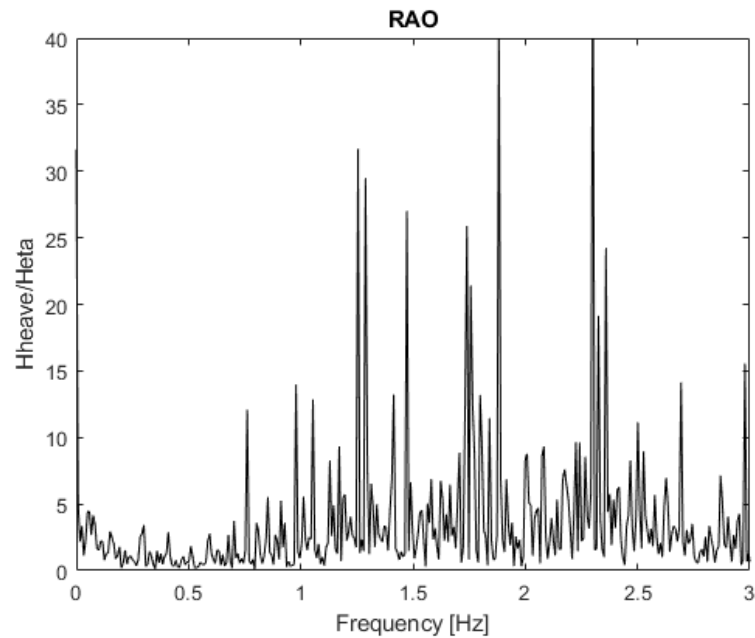


Ilustración 121: Respuesta RAO prueba P02 Tether cadena modelo B1 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

Para el modelo B1 durante la prueba P02 ocurrió el mismo comportamiento que en las pruebas anteriores, observando como disminuye en la potencia y aceleración en función del aumento del periodo significativo, sin embargo, ocurre que al restringir de mayor manera el dispositivo, caso de la cadena, existe una disminución de la potencia del dispositivo, aunque adaptando de mejor manera la lectura del software.

Tabla 35: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo B1 SALM-1.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia _WEC [W]	Potencia _disp [W/m]	ancho de captura	desempeño de captura
Acero	E12	0,1041	1,0319	0,038	0,0044	0,0014	3,1381	56,8497
	E22	0,0944	0,9131	0,0336	0,0035	0,0018	1,9676	35,6457
	E32	0,091	0,8205	0,0302	0,0029	0,0018	1,6274	29,4828
Sintetico	E12	0,1088	1,1122	0,0409	0,0051	0,0014	3,6388	65,9200
	E22	0,0961	0,9419	0,0346	0,0036	0,0018	2,0741	37,5747
	E32	0,0953	0,9349	0,0344	0,0036	0,0018	1,9805	35,8783
Cadena	E12	0,0795	0,9033	0,0332	0,0029	0,0014	2,09550	37,96120
	E22	0,0872	1,046	0,0385	0,0036	0,0018	2,0388	36,9347
	E32	0,0856	1,059	0,0389	0,0035	0,0018	1,9335	35,0278

Finalmente se procede a extrapolar los resultados a su escala prototipo para su análisis y comparación con respecto a los ensayos numéricos y su correcto dimensionamiento para fines prácticos y de estudio.

Tabla 36: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo B1 SALM-1.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disp [W/m]
Acero	E12	0,73609816	0,556	4750	3889,087297	1237,436867
	E22	0,6675088	0,7497	4200	3093,592168	1590,990258
	E32	0,64346717	1,0923	3775	2563,262082	1590,990258
Sintetico	E12	0,76933218	0,4329	5112,5	4507,80573	1237,436867
	E22	0,67952962	0,8761	4325	3181,980515	1590,990258
	E32	0,67387276	0,9251	4300	3181,980515	1590,990258
Cadena	E12	0,56214989	0,9201	4150	2563,262082	1237,436867
	E22	0,61659711	1,0143	4812,5	3181,980515	1590,990258
	E32	0,6052834	1,4065	4862,5	3093,592168	1590,990258

10.4. Prueba P03 – Fondeo SALM-2

10.4.1. Modelo A2

- **ESTADO E12**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,78	1,15	0,0013
Prototipo	239	8,13	1149

- Hawser de acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,04420	0,01487	-0,10760	0,12247
Heave	0,00192	0,03583	-0,03061	0,06645

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	2,20986	0,74367	-5,37976	6,12342
Heave	0,09607	1,79155	-1,53072	3,32227

- Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07379	0,23794	0,00000	0,04188

prototipo	0,52180	1,68246	0,00000	0,29617
-----------	---------	---------	---------	---------

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,67754	3,37726	0,00000	0,42930
prototipo	0,67754	3,37726	0,00000	0,42930

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01917	0,09558	0,00000	0,01215
prototipo	2396,79	11947,07	0,00	1518,64
Potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00161	0,01554	0,00000	0,00164
prototipo	1420,36	13738,79	0,00	1453,02

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2689
Desempeño de captura	22,9865

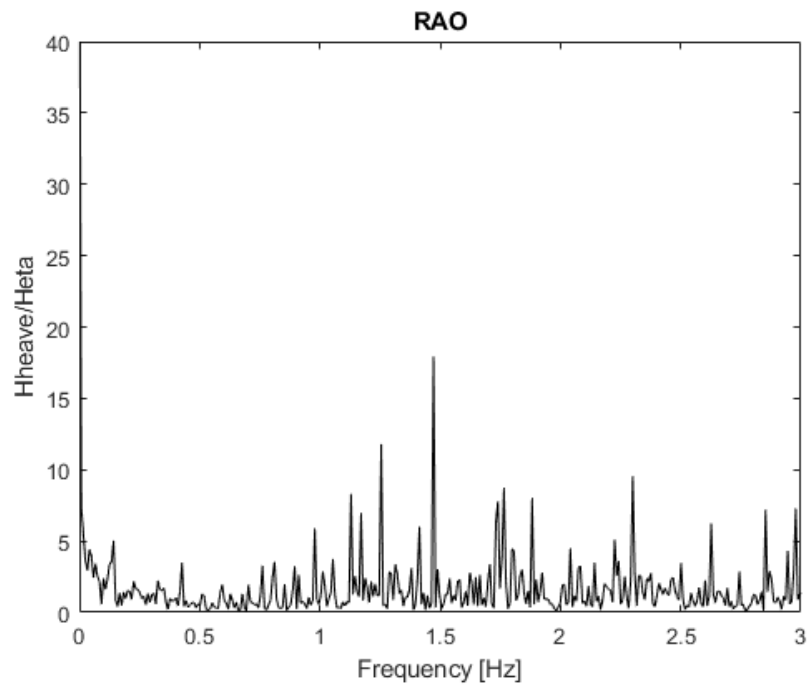


Ilustración 122: Respuesta RAO prueba P03 hawser de acero modelo A2 altura 5 [cm] periodo 1,13 [seg].

○ Hawser sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,10498	0,01478	-0,23436	0,24913
Heave	0,00383	0,07554	-0,04477	0,12031

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	5,24917	0,73882	-11,71779	12,45660
Heave	0,19128	3,77714	-2,23845	6,01560

■ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,11350	0,62994	0,00000	0,07295
prototipo	0,80257	4,45438	0,00000	0,51584

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,37771	10,67034	0,00000	0,96463
prototipo	1,37771	10,67034	0,00000	0,96463

■ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,03899	0,30197	0,00000	0,02730
prototipo	4873,66	37746,34	0,00	3412,38
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00512	0,09205	0,00000	0,00709
prototipo	4526,92	81361,47	0,00	6266,67

■ Eficiencia energética

Ancho de captura	4,0440
Desempeño de captura	73,2617

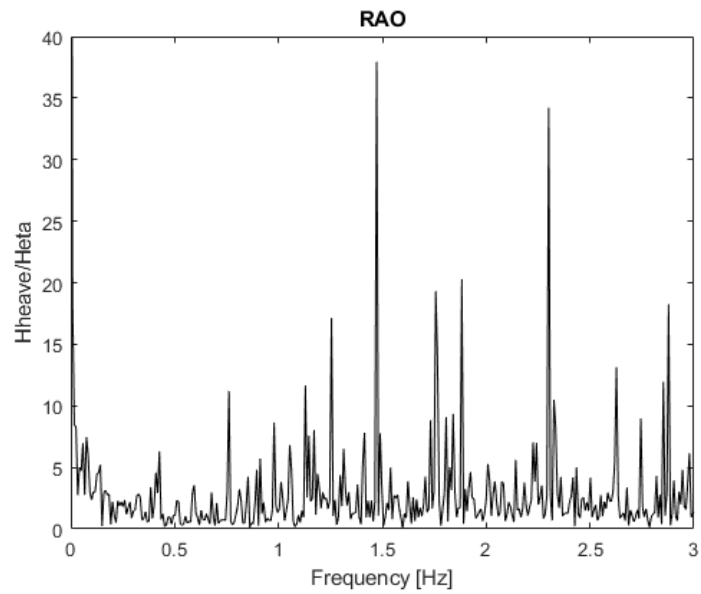


Ilustración 123: Respuesta RAO prueba P03 hawser sintético modelo A2 altura 5 [cm] periodo 1,13 [seg].

- **ESTADO E22**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,8	1,35	0,0015
Prototipo	240	9,55	1326

- Hawser de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02546	0,03612	-0,10210	0,13821
Heave	0,00059	0,04507	-0,03669	0,08177

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,27283	1,80582	-5,10475	6,91057
Heave	0,02949	2,25363	-1,83469	4,08831

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07732	0,25494	0,00000	0,04425
prototipo	0,54677	1,80268	0,00000	0,31292

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,70544	3,29132	0,00000	0,44075
prototipo	0,70544	3,29132	0,00000	0,44075

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01996	0,09314	0,00000	0,01247
prototipo	2495,49	11643,06	0,00	1559,14
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00171	0,01431	0,00000	0,00174
prototipo	1509,30	12647,65	0,00	1533,98

- Eficiencia energética

Ancho de captura	1,1390
Desempeño de captura	20,6342

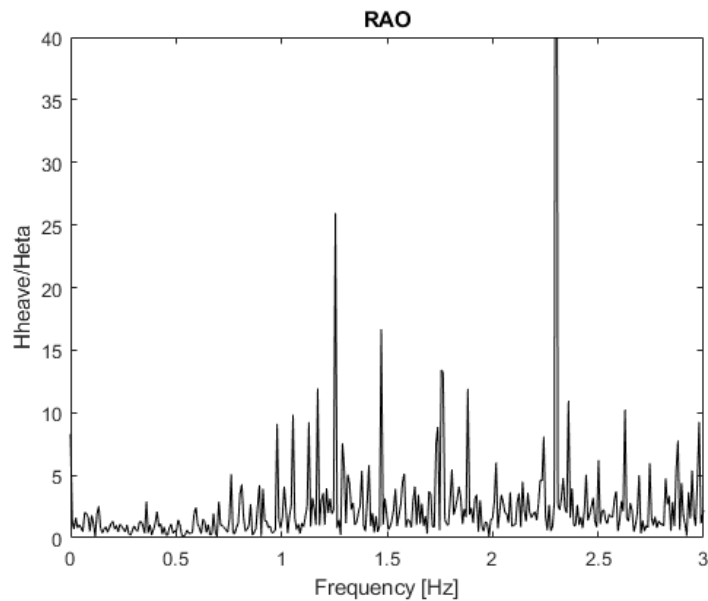


Ilustración 124: Respuesta RAO prueba P03 hawser acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

- Hawser sintético

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,00168	0,07663	-0,08197	0,15860
Heave	0,00020	0,04896	-0,03712	0,08608

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]

Surge	0,08405	3,83149	-4,09856	7,93005
Heave	0,00979	2,44792	-1,85588	4,30380

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08008	0,31956	0,00000	0,04753
prototipo	0,56623	2,25963	0,00000	0,33609

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,88528	4,66310	0,00000	0,57759
prototipo	0,88528	4,66310	0,00000	0,57759

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02505	0,13197	0,00000	0,01635
prototipo	3131,69	16495,71	0,00000	2043,21
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00220	0,02501	0,00000	0,00248
prototipo	1948,58	22109,48	0,00000	2193,56

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,4705
Desempeño de captura	26,6397

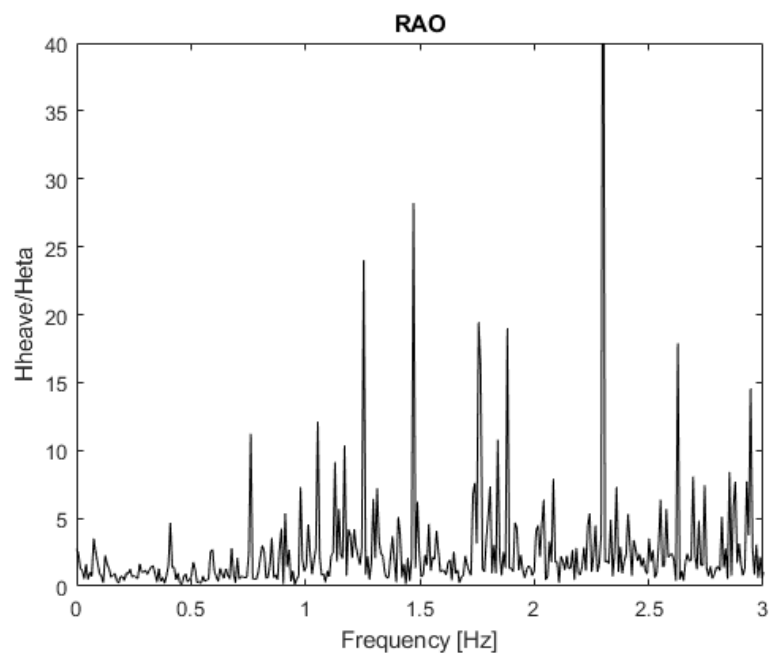


Ilustración 125: Respuesta RAO prueba P03 hawser sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,48 [seg].

- **ESTADO E32**

	Altura significativa [cm]	periodo paso por zero [s]	Potencia [W/m]
Modelo	4,79	1,56	0,0017
Prototipo	239,5	11,03	1503

- Hawser de Acero

- Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02436	0,03478	-0,08494	0,11971
Heave	0,00056	0,03466	-0,03597	0,07062

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,21816	1,73880	-4,24692	5,98572
Heave	0,02784	1,73277	-1,79826	3,53103

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,07436	0,23169	0,00000	0,04034
prototipo	0,52583	1,63828	0,00000	0,28525

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	0,69760	2,76236	0,00000	0,42049
prototipo	0,69760	2,76236	0,00000	0,42049

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,01974	0,07817	0,00000	0,01190
prototipo	2467,77	9771,86	0,00	1487,48
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00157	0,01166	0,00000	0,00149
prototipo	1388,17	10307,59	0,00	1320,17

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,2475
Desempeño de captura	22,5997

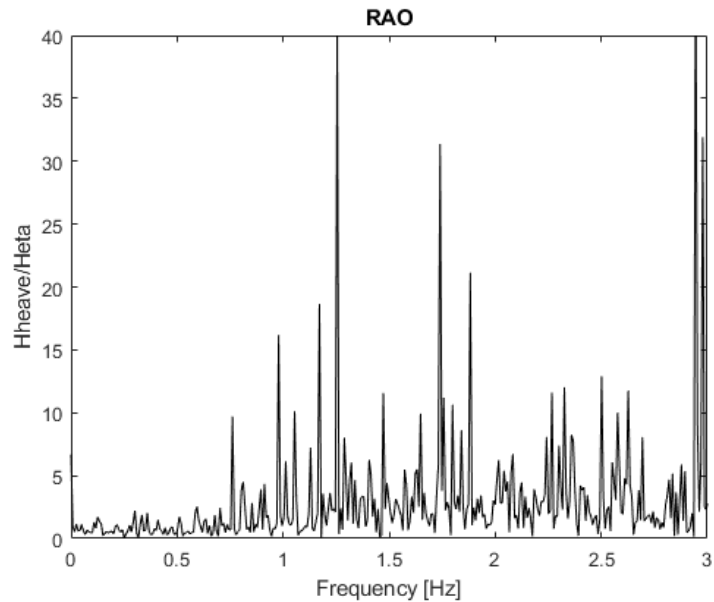


Ilustración 126: Respuesta RAO prueba P03 hawser acero modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

○ Hawser sintético

▪ Desplazamiento

Desplazamiento modelo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	0,02656	0,06195	-0,09844	0,16039
Heave	0,00163	0,04418	-0,04270	0,08689

Desplazamiento prototipo	Posición media [m]	Posición máxima [m]	Posición mínima [m]	Desplazamiento total [m]
Surge	1,32816	3,09747	-4,92198	8,01945

Heave	0,08152	2,20910	-2,13519	4,34429
-------	---------	---------	----------	---------

▪ Parámetros cinemáticos

Velocidad	Velocidad media [m/s]	Velocidad mínima [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Desviación estándar [m/s]
Modelo	0,08917	0,32521	0,00000	0,04955
prototipo	0,63050	2,29955	0,00000	0,35038

Aceleración.	Aceleración media [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Aceleración mínima [m/s ²]	Desviación estándar [m/s ²]
Modelo	1,03779	5,74972	0,00000	0,72987
prototipo	1,03779	5,74972	0,00000	0,72987

▪ Parámetros dinámicos

Fuerza	Fuerza media [N]	Fuerza máxima [N]	Fuerza mínima [N]	Desviación estándar [N]
Modelo	0,02937	0,16272	0,00000	0,02066
prototipo	3671,18	20339,64	0,00	2581,93
potencia	Potencia media [W]	Potencia máxima [W]	Potencia mínima [W]	Desviación estándar
Modelo	0,00289	0,03402	0,00000	0,00329
prototipo	2550,36	30068,34	0,00	2910,23

▪ Eficiencia energética

Ancho de captura	1,0360
Desempeño de captura	18,7677

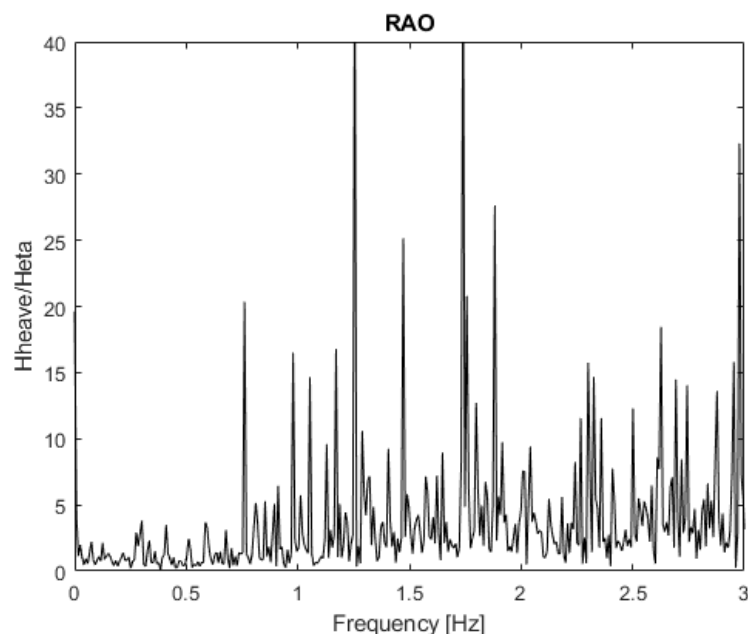


Ilustración 127: Respuesta RAO prueba P03 hawser sintético modelo A2 altura 5 [cm] período 1,697 [seg].

Para la prueba P02 solo se empleó el modelo A2, variando el grado de libertad del dispositivo WEC y de la boya auxiliar, restringiendo esta última de mayor manera. Observando que de igual forma se obtiene el mismo patrón que el caso anterior, en donde el sistema de anclaje que entrega mayor libertad se ajusta a una mayor carga de potencia.

Tabla 37: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala modelo A2 SALM-2.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia _WEC [W]	Potencia _disp [W/m]	ancho de captura	desempeño de captura
Acero	E12	0,0738	0,6775	0,0192	0,0016	0,0013	1,2689	22,9865
	E22	0,0773	0,7054	0,02	0,0017	0,0015	1,1390	20,6342
	E32	0,0744	0,6976	0,0197	0,0016	0,0017	0,9104	16,4921
Sin co teta	E12	0,1135	1,3777	0,039	0,0051	0,0013	4,0440	73,2617

	E22	0,0801	0,8853	0,0251	0,0022	0,0015	1,4705	26,6397
	E32	0,0892	1,0378	0,0294	0,0029	0,0017	1,6725	30,2994

Para finalizar se obtuvieron los valores prototipo para cada parámetro.

Tabla 38: Tabla con los valores medios para velocidad, aceleración, potencia, ancho de captura y desempeño de captura para escala prototipo A2 SALM-2.

	Estados de mar	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Fuerza [N]	Potencia_WEC [W]	Potencia_disip [W/m]
Acero	E12	0,5218448	0,556	2400	1414,213562	1149,048519
	E22	0,54659354	0,7497	2500	1502,60191	1325,825215
	E32	0,52608745	1,0923	2462,5	1414,213562	1502,60191
Sintetico	E12	0,8025662	0,4329	4875	4507,80573	1149,048519
	E22	0,56639253	0,8761	3137,5	1944,543648	1325,825215
	E32	0,63073925	0,9251	3675	2563,262082	1502,60191

• Análisis energético

➤ Según periodo y altura de ola.

Como se pueden apreciar en las gráficas se observa la tendencia que el dispositivo WEC aprovecha de manera más eficiente la energía disponible en el medio, contando con valores promedios de potencia más elevados según menor sea el período, sin embargo, se obtiene que para periodos más grandes se obtienen mayores picks energéticos. Siendo finalmente los estados más energéticos los de menor periodos.

Esta tendencia se mantiene independiente del modelo de boya WEC o del tipo de anclaje o del material con el cual se esté anclando, acentuando un mayor decaimiento en la eficiencia mientras más rígido sea el sistema.

Por el contrario, a lo que sucede con el periodo, mientras se aumente la altura significativa del Estado de mar, se encuentran mayores rendimientos energéticos y más energía “producida” por el dispositivo WEC, esto aplica para cualquier tipo de anclaje y material de los empleados en estos experimentos.

➤ Según tipo de amarre y material de amarre.

Como se aprecia en las tablas anteriormente mostradas, se puede apreciar que el sistema con mejor eficiencia energética, es decir, con mayores desempeños de captura viene siendo el sistema SALM-1 que presenta una mayor rigidez en el tether siendo esta de cadena pesada para los periodos $i=2$ e $i=3$ mientras que para el periodo $i=1$ el sistema más eficiente fue el sistema tradicional.

Además se debe considerar que el emplear cables de acero el sistema tradicional fue más eficiente y se obtuvo una mayor generación energética mientras que los sistemas que emplearon cable sintético y cadenas fueron favorecidos por el sistema SALM en todas sus variables, esto se puede deber al grado de libertad necesario con lo que el dispositivo WEC debe regirse, puesto que mucha libertad impide que aproveche en su totalidad la energía proveniente de la ola, de igual forma, una gran rigidez evita que la energía de la ola se transforme en energía útil.

➤ Según modelo de boyas.

Para los modelos de boya se aprecia que la eficiencia energética, la captación y las sollicitaciones fueron más favorables para el modelo A2 en comparación con los demás modelos, esto ya que el sistema de fuerzas total del cuerpo A2 permitió que esta se acoplara de mejor forma con el movimiento de las olas, además de que este modelo permitió una mayor estabilidad frente al movimiento tanto para sistema tradicional como sistema SALM.

11. Conclusiones

En base a lo realizado en el presente trabajo de investigación, se concluye finalmente que existe una gran relevancia en torno a la libertad o restricción del movimiento permitido sobre el dispositivo WEC, puesto que las diversas pruebas donde se varió dicho parámetro indicaron que existe una relación entre el aprovechamiento energético y el grado de libertad del sistema. Siendo necesario el buscar el equilibrio entre permitir el movimiento libre del dispositivo sin generar tanta oposición frente al tren de olas, esto se logró empleando materiales elásticos o con catenaria de no mucho peso significativo especialmente para el sistema tradicional de fondeo, sin embargo, esta eficiencia se perdió a medida que se aumentaba la altura de ola y el periodo, mientras que por otro lado, el restringir el movimiento con materiales de mayor peso o bien con el sistema SALM esto permitió obtener un movimiento de mayor control del sistema, teniendo una potencia mayor promedio sin tantos picks fuera de lo normal. Finalmente se destaca como mejor sistema en general para distintas condiciones el sistema SALM-1, donde el tether siempre fue mismo material siendo este la cadena, obteniendo mejores rendimientos en términos generales, observando un movimiento más armónico con respecto a la ola y no presenta demasiadas sollicitaciones sobre el sistema, es decir, no presenta “efecto látigo” frente al dispositivo WEC, no se observó un movimiento brusco por parte del sistema de fondeo.

Continuando con los análisis se puede deducir que se la geometría se puede optimizar, debido a que muchas veces el modelo A2 se hundió completa y posteriormente disipaba esa energía o bien que rompía la ola, mientras que el modelo B1 sufría de que solo el extremo superior era quien se movía pivoteando en el extremo inferior, por lo que se deduce que se debe realizar una combinación geométrica que permita la sincronización con el movimiento de la superficie del mar. Además, se observó que mientras más continuo sea el movimiento existe un mayor desempeño energético, lo cual se suma a lo ya mencionado de la geometría puesto que este movimiento continuo y la geometría del modelo A2 permite una mayor resonancia entre ambos movimientos.

El estado de mar con mayor aprovechamiento energético para los 3 materiales empleados es el estado E13, periodo de 1,13 [s] aproximadamente y altura 7 [cm] aproximadamente, de los cuales la catenaria de cadena fue la mayor entre los 3 y el cable sintético el menor.

El modelo A2 obtuvo mejores resultados para la captación energética por sobre A1 y mayor estabilidad por sobre B1, siendo este modelo el que mejor se adapta en cada estado de mar y sistema de anclaje. Obteniendo menor cantidad de picks anómalos y mayor eficiencia energética, además de que el sistema de anclaje de mayor eficiencia resulto el sistema SALM-1 con cadena como tether, sin embargo, el sistema SALM-2 agregándole libertad a menores periodos se obtiene una mayor captación energética decayendo considerablemente junto al periodo.

Viendo desde el punto de vista cinemático se puede concluir que la libertad en el sentido horizontal o libertad del movimiento surge influye directamente sobre el desempeño de captura, puesto que mientras mayor sea el desplazamiento neto menos eficiencia se obtiene, mientras que los parámetros cinemáticos influyen de manera aleatoria puesto, que una mayor aceleración o mayor velocidad no influye tan notoriamente al desempeño de captura.

12. Continuación de trabajo

Se propone como continuidad de estudio el trabajar con distintos dispositivos captadores de geometrías compuestas, ya que si bien ya se estudió previamente algunos tipos de geometrías, se busca lograr aprovechar de manera eficaz el movimiento de las olas, puesto que es lo que transporta la energía aprovechable, siendo el enfoque de estas geometrías el poder seguir el movimiento de la ola sin hundirse completamente ni romper la ola, buscando el equilibrio necesario para su máximo aprovechamiento.

Por otro lado, también se observa la necesidad de mejorar el sistema de anclaje y conexiones, ya que como se mencionó anteriormente, existe una pérdida de la inercia del movimiento al restringir de manera abrupta los grados de libertad tanto del dispositivo WEC como del sistema global de anclaje.

Sumado a lo anterior, el estudio de las propiedades del material con el cual se diseña el sistema de fondeo y anclaje de manera más específica sumaría en gran medida al control de las diversas variables que definen el dominio completo de un sistema WEC.

Además, por el gran potencial con el que cuenta Chile en torno a la energía proveniente del mar, se debe investigar diversos sectores a lo largo de las costas chilenas, por lo que trabajar bajo condiciones más adversas o bien de mayor desafío como lo son las zonas con vientos de mayores velocidades o con la interacción de fuertes corrientes submarinas, de ahí la necesidad de estudiar y capacitar el canal de olas para recrear diversos escenarios.

Finalmente, el sistema WEC de absorbedor puntual requiere de un sistema de extracción de la energía, por lo que a modo de continuación se podría buscar el diseño del Power Take Off, analizando en conjunto con el sistema de sujeción y conexión y que sea flexible a los diversos estados de Mar ya trabajados junto a sus respectivas hipótesis.

13. Bibliografía

1. EMBER. (2021). GLOBAL ELECTRICITY REVIEW.
2. Ministerio de Energía (2015). *Energías renovables en Chile Estado y desafíos*.
3. De la Hoz Tovar, E. (2018). *Fundamentos del funcionamiento de un canal de olas; diseño y montaje de un canal de olas de doce metros de longitud a instalar en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao*. Universidad del País Vasco.
4. Garrido, A. C. (2015). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO EN EL MAR DE UNA EMBARCACIÓN DE ALTA VELOCIDAD MEDIANTE TEORÍA DE FAJAS*. Universidad Austral de Chile.
5. International energy agency. (2021). Global energy review 2021. *Global energy review 2021*.
6. Zamora, R. B. (2013). *“ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN CHILE*. Universidad del Bío Bío.
7. Núñez, M. (2017). Modelado de un convertidor undimotriz del tipo absorbedor puntual en un microprocesador. Universidad politécnica de Madrid.
8. De la Hoz, E. (2018). Fundamentos del funcionamiento de un canal de olas; diseño y montaje de un canal de olas de doce metros de longitud a instalar en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (Master). Universidad del país Vasco.
9. Muñoz, J. J. (2011). Introducción a la ingeniería de costas.
10. Sañudo, T. (2016). ESTUDIO DE LA DIFRACCIÓN EN MODELOS DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE (Master). UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
11. Gómez, J. (2018). Estrategia de diseño de plantas de energía undimotriz para generación distribuida (Master). UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO.
12. Castiella, A. (2013). DISEÑO DEL MODELO Y CONTROL DE UN ABSORBEDOR PUNTUAL DE COLUMNA OSCILANTE DE AGUA UTILIZADO PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ. Universidad Pública de Navarra.
13. Santiago Ojeda, E. 2018. Convertidor de energía del oleaje: análisis del movimiento de la plataforma Stewart-Gough. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 58 pp.

14. Díaz, F. (2015). Generación undimotriz mediante absorbedores puntuales con sistemas hidráulicos de conversión de potencia. Universidad de Sevilla.
15. Aderinto, T., & Li, H. (2018). Ocean Wave Energy Converters: Status and Challenges. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
16. Y. González Dória, M. Herrera Medina, C. Ávila Díaz “Estudio del potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba a través de un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore”, INGE CUC, vol. 16, no. 1, pp. 141–155, 2020. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.010>.
17. Rodriguez Flores, C.; Caicedo Cevallos, F. (2019). Diseño de un prototipo para pruebas de conversión de energía undimotriz. Trabajo final para la obtención del título: Ingeniero Mecánico. [Tesis de grado]. ESPOL. FIMCP
18. Qiao, D., Haider, R., Yan, J., Ning, D., & Li, B. (2020). Review of Wave Energy Converter and Design of Mooring System. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
19. Holmes, B. (2009). Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems.
20. Guerrero, L. (2014). INVESTIGACIÓN HIDRÁULICA Y SEDIMENTOLÓGICA EN MODELO FÍSICO DEL VERTEDERO DE SERVICIO DE LA PRESA SABANA YEGUA. Universidad de Piura.