

2021-09

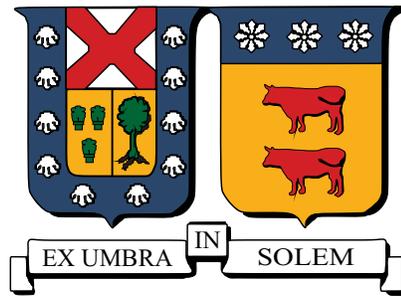
# Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso.

Tomelic Castro, Yerko Alejandro

---

<https://hdl.handle.net/11673/53920>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

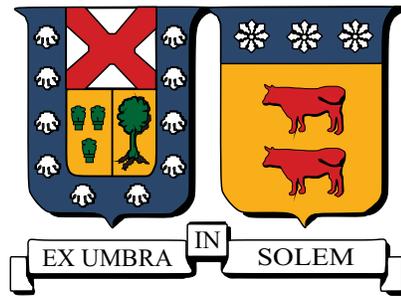
"Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas  
para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de  
Valparaíso".

YERKO ALEJANDRO TOMELIC CASTRO

Ingeniero Mecánico Industrial

Septiembre de 2021





UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

**Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para  
generación undimotriz en aguas someras de la bahía de  
Valparaíso.**

Memoria de Título presentada por  
**YERKO ALEJANDRO TOMELIC CASTRO**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Ingeniero Mecánico Industrial**

Profesor Guía ALEX FLORES MARADIAGA  
Profesor Co-Referente UDO RUDOLF RHEINSCHMIDT

Septiembre de 2021



TÍTULO DE LA TESIS

**Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso**

AUTOR

**YERKO ALEJANDRO TOMELIC CASTRO**

Trabajo de tesis presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Mecánico Industrial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Profesor ALEX FLORES  
MARADIAGA

---

---

---

Valparaíso, Chile, Septiembre de 2021.



*30/09/2021*



---

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco enormemente a quienes directa e indirectamente han contribuido con amor voluntad y gracia a construir la persona que soy. Especial mención merecen mi madre, mi hermano, abuelas, abuelo, tías, tíos, y familia con los que he compartido. A mi novia por su compañía que es gozo en mis días. También a mi profesor por la calidad de su enseñanza y gentil trato, y a mi compañero de investigación y gran amigo por su querida presencia.

Especial mención también para el profesor Patricio, Rodrigo y la Universidad de Valparaíso por prestarnos su canal de olas y dar sustento en tantos aspectos a esta investigación.



---

# RESUMEN

---

El presente trabajo de título desarrolla una metodología experimental conducente a estudiar el fenómeno de interacción entre dispositivos de conversión energética del tipo absorbedor puntual y oleaje regular monocromático de la zona de Punta Curaumilla, definiendo estados de mar que responde a los escenarios de mayor ocurrencia en tanto altura de ola significativa y periodo de oleaje. Esta metodología tiene su fundamento teórico en el principio de semejanza de Froude y el cumplimiento de criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

En una primera parte se presenta el Estado del Arte, referido a los tipos de convertidores de energía undimotriz de acuerdo a su ubicación y mecanismo de aprovechamiento energético. Luego se expone acerca de la disponibilidad del recurso energético undimotriz con las características específicas de ubicación, altura y periodo de oleaje.

Posteriormente se presenta el Marco Teórico sobre el cual se fundamenta el fenómeno de estudio. Una primera sección se refiere a la teoría lineal del oleaje y su clasificación. Le sigue una descripción del movimiento de un cuerpo en el mar y la ecuación de movimiento asociada a un convertidor undimotriz del tipo absorbedor puntual. Además se presentan los fundamentos teóricos de la modelación física y el modelo de semejanza de Froude.

En la metodología se describe cada una de las pruebas conducidas en cuanto a sus objetivos y procedimientos, además del plan de trabajo planificado. También se presentan las especificaciones técnicas de los modelos diseñados junto con las especificaciones del oleaje que se generará en el canal de olas. También se muestra en esta sección las instalaciones en las que se realizan las pruebas, junto con los principales elementos que la componen y los mecanismos de registro y análisis de la información obtenida a partir de ella.

Posteriormente se presentan los resultados de cada una de las pruebas descritas en la sección metodología para cada uno de los modelos de estudio, seguido de un análisis pertinente y la extrapolación de los datos a escala de prototipo.

Finalmente se concluye sobre los resultados obtenidos y el alcance de los objetivos alcanzados que fueron propuestos en la investigación.



---

# ABSTRACT

---

The present work of title develops an experimental methodology conducive to studying the phenomenon of interaction between energy conversion devices of the pint absorber type and regular monochromatic waves of the Punta Curaumilla area, defining sea states that respond to the scenarios of greater occurrence as long as significant wave height and wave period. This methodology has its theoretical foundation in the principle of similarity of Froude and the fulfillment of criteria of geometric, kinematic and dynamic similarity.

In the first part, the State of the Art is presented, referring to the types of wave energy converters according to their location and energy use mechanism. Then it is exposed about the availability of the wave energy resource with the specific characteristics of location, height and wave period.

Subsequently, the Theoretical Framework on which the study phenomena is based is presented. A first section refers to the linear wave theory and its classification. This is followed by a description of the movement of a body in the sea and the action of motion associated with a wave converter of the point absorber type. In addition, the theoretical foundations of physical modeling and the Froude similarity model are presented.

The Chapter Methodology describes each of the tests conducted in terms of its objectives and procedures, in addition to the planned work plan. The technical specifications of the designed models are also presented together with the specifications of the waves that will be generated in the wave channel. The facilities in which the tests will be carried out are also shown in this section, together with the main elements that compose it and the mechanisms for recording and analyzing the information obtained from it.

Subsequently, the chapter Results expose the results obtained from each of the tests described in the methodology section for each of the study models, followed the chapters Analysis and the Extrapolation of Data.

Finally, it is concluded on the results obtained and the scope of the objectives achieved that were proposed in the research.



---

# CONTENIDOS

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XXVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
0.1. Motivación . . . . .	2
0.2. Problemática . . . . .	4
<b>1. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>7</b>
1.1. Tecnología undimotriz . . . . .	7
1.1.1. Según su ubicación . . . . .	7
1.1.2. Según su mecanismo . . . . .	7
1.2. Proyectos de energía undimotriz desarrollados . . . . .	9
1.3. Disponibilidad del recurso energético . . . . .	12
1.3.1. Ubicación y descripción del área de estudio . . . . .	12
1.3.2. Recurso Energético . . . . .	13
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
2.1. Teoría de Olas . . . . .	17

2.1.1.	Definición de parámetros adimensionales . . . . .	19
2.1.2.	Teoría lineal de olas . . . . .	20
2.2.	Movimiento de un cuerpo en el mar . . . . .	21
2.2.1.	Ecuación de movimiento de un absorbedor puntual . . . . .	22
2.2.2.	Absorción de potencia . . . . .	24
2.2.3.	Oscilación óptima para máxima captura de energía . . . . .	25
2.3.	Modelación física . . . . .	29
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
3.1.	General . . . . .	31
3.2.	Propósito de pruebas . . . . .	33
3.2.1.	Fase y escala usada . . . . .	34
3.2.2.	Pruebas y objetivos de medición . . . . .	35
3.2.2.1.	P01-Prueba de plataforma seca . . . . .	35
3.2.2.2.	P02-Prueba de plataforma húmeda - Estabilidad estática . . . . .	37
3.2.2.3.	P03-Prueba de oscilación libre-Estabilidad dinámica . . . . .	38
3.2.2.4.	P04-Prueba de oscilación forzada . . . . .	40
3.2.3.	Plan y programación de trabajo . . . . .	43
3.3.	Modelo . . . . .	46
3.3.1.	Especificaciones técnicas del prototipo y propiedades de masa . . . . .	46
3.3.2.	Especificaciones técnicas del modelo, Cálculo de geometría de escala y Propiedades de masa . . . . .	47
3.3.2.1.	Modelo $A_1$ . . . . .	47
3.3.2.2.	Modelo $A_2$ . . . . .	49
3.3.2.3.	Modelo $A_3$ . . . . .	50
3.3.2.4.	Modelo $B_1$ . . . . .	51

3.3.2.5. Modelo $B_2$ . . . . .	52
3.4. Olas y estados de mar . . . . .	53
3.4.1. Altura y periodo de olas monocromáticas . . . . .	53
3.5. Instalaciones de prueba . . . . .	54
3.5.1. Configuración general del experimento . . . . .	54
3.5.2. Capacidad de generación de olas . . . . .	55
3.5.3. Características de playa y paleta . . . . .	56
3.5.4. Resistores de monitoreo de oleaje . . . . .	57
3.5.5. Descripción de registro digital . . . . .	58
3.5.6. Descripción de software de análisis Tracker . . . . .	58
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>63</b>
4.1. Validación propiedades de masa . . . . .	63
4.1.1. P01-Prueba de plataforma seca . . . . .	63
4.1.2. P02-Prueba de plataforma húmeda . . . . .	64
4.2. P03-Prueba de oscilación libre . . . . .	65
4.2.1. Modelo A1 . . . . .	65
4.2.2. Modelo A2 . . . . .	65
4.2.3. Modelo A3 . . . . .	66
4.2.4. Modelo B1 . . . . .	66
4.2.5. Modelo B2 . . . . .	66
4.3. P04-Prueba de oscilación forzada . . . . .	67
4.3.1. Modelo A1 . . . . .	68
4.3.1.1. Estado de mar $E_{22}$ . . . . .	68
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>73</b>

5.1. Validación de propiedades de masa . . . . .	73
5.1.1. Modelo $A_1$ . . . . .	73
5.1.2. Modelo $A_2$ . . . . .	74
5.1.3. Modelo $A_3$ . . . . .	75
5.1.4. Modelo $B_1$ . . . . .	76
5.1.5. Modelo $B_2$ . . . . .	77
5.2. P03-Oscilación libre . . . . .	79
5.2.1. Modelo A1 . . . . .	79
5.2.2. Modelo A2 . . . . .	80
5.2.3. Modelo A3 . . . . .	82
5.2.4. Modelo B1 . . . . .	84
5.2.5. Modelo B2 . . . . .	86
5.3. P04-Oscilación forzada . . . . .	88
5.3.1. Modelo A1 . . . . .	89
5.3.1.1. Estado de mar $E_{11}$ . . . . .	89
5.3.1.2. Estado de mar $E_{12}$ . . . . .	91
5.3.1.3. Estado de mar $E_{13}$ . . . . .	93
5.3.1.4. Estado de mar $E_{21}$ . . . . .	95
5.3.1.5. Estado de mar $E_{22}$ . . . . .	97
5.3.1.6. Estado de mar $E_{23}$ . . . . .	99
5.3.1.7. Estado de mar $E_{31}$ . . . . .	101
5.3.1.8. Estado de mar $E_{32}$ . . . . .	103
5.3.1.9. Estado de mar $E_{33}$ . . . . .	105
5.3.2. Modelo A2 . . . . .	107
5.3.3. Modelo A3 . . . . .	109

5.3.4. Modelo B1 . . . . .	111
5.3.5. Modelo B2 . . . . .	113
5.3.6. Principales fuentes de error . . . . .	115
<b>6. EXTRAPOLACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>117</b>
6.1. Modelo A1 . . . . .	117
6.1.1. Estado de Mar $E_{11}$ . . . . .	117
6.1.2. Estado de Mar $E_{12}$ . . . . .	119
6.1.3. Estado de Mar $E_{13}$ . . . . .	120
6.1.4. Estado de Mar $E_{21}$ . . . . .	121
6.1.5. Estado de Mar $E_{22}$ . . . . .	123
6.1.6. Estado de Mar $E_{23}$ . . . . .	124
6.1.7. Estado de Mar $E_{31}$ . . . . .	125
6.1.8. Estado de Mar $E_{32}$ . . . . .	127
6.1.9. Estado de Mar $E_{33}$ . . . . .	128
6.2. Modelo A2 . . . . .	129
6.3. Modelo A3 . . . . .	131
6.4. Modelo B1 . . . . .	132
6.5. Modelo B2 . . . . .	133
6.6. Comparación de resultados a escala de prototipo . . . . .	135
6.6.1. Prototipo experimental y simulación numérica . . . . .	135
6.6.2. Prototipo/Modelo $A_1$ , estados de Mar $E_{ij}$ . . . . .	136
6.6.3. Modelos A1,A2, A3 . . . . .	146
6.6.4. Modelos B1, B2 . . . . .	153
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>159</b>

**REFERENCIAS** **163**

**ANEXOS** **165**

6.7. Modelo $A_1$ . . . . .	165
6.7.1. Estado de mar $E_{11}$ . . . . .	165
6.7.2. Estado de mar $E_{12}$ . . . . .	168
6.7.3. Estado de mar $E_{13}$ . . . . .	171
6.7.4. Estado de mar $E_{21}$ . . . . .	174
6.7.5. Estado de mar $E_{23}$ . . . . .	177
6.7.6. Estado de mar $E_{31}$ . . . . .	180
6.7.7. Estado de mar $E_{32}$ . . . . .	183
6.7.8. Estado de mar $E_{33}$ . . . . .	186
6.8. Modelo A2, Estado de Mar $E_{22}$ . . . . .	189
6.9. Modelo A3, Estado de Mar $E_{22}$ . . . . .	193
6.10. Modelo B1, Estado de Mar $E_{22}$ . . . . .	197
6.11. Modelo B2, Estado de Mar $E_{22}$ . . . . .	201

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Esquemas de tecnología undimotriz según su mecanismo. . . . .	9
1.2. Proyectos de tecnología undimotriz desarrollados en el mundo. . . . .	11
1.3. Batimetría Punta Curaumilla [10] . . . . .	12
1.4. Curva de potencia de oleaje en función de probabilidad de excedencia [10] . .	14
1.5. Curva de potencia de oleaje en función de altura de ola y periodo significativo [5]. . . . .	15
2.1. Absorción de energía de un absorbedor puntual. . . . .	26
3.1. Metodología de Investigación . . . . .	32
3.2. a. Pesa gramera digital, b. Pie de metro, c. Escuadra metálica, d. Plataforma metálica. . . . .	36
3.3. Configuración experimental prueba P02-Prueba de plataforma húmeda, modelo A y B. . . . .	38
3.4. Protitipo base [12]. . . . .	46
3.5. Dimensiones principales Modelo A . . . . .	48
3.6. Dimensiones generales Modelo B1 . . . . .	51
3.7. Configuración general prueba P04-prueba de oscilación forzada. . . . .	54
3.8. (A) Motor lineal Linmot P10-70x320, (B) Servo drive E-1400-GP-QN-1S. . . .	55
3.9. (A) Paleta generadora de olas, (B) Vista general del canal de olas. . . . .	56
3.10. Paleta generadora de olas. . . . .	56
3.11. Paleta generadora de olas. . . . .	57
3.12. Sonda de medición resistiva. . . . .	57
3.13. Aplicación de filtros software tracker. . . . .	60

3.14. Aplicación de filtros software tracker. . . . .	61
3.15. Configuración inicial de rastreo modelo $A_1, E_{22}$ . . . . .	62
4.1. Determinación de centro de gravedad modelos $A_1, A_2, A_3$ . . . . .	63
4.2. Determinación de centro de gravedad modelos $B_1$ y $B_2$ . . . . .	64
4.3. P03- $A_1$ , Curva de decaimiento amortiguado. . . . .	65
4.4. P03- $A_2$ , Curva de decaimiento amortiguado. . . . .	65
4.5. P03- $A_3$ , Curva de decaimiento amortiguado. . . . .	66
4.6. P03- $B_1$ , Curva de decaimiento amortiguado. . . . .	66
4.7. P03- $B_2$ , Curva de decaimiento amortiguado. . . . .	66
4.8. P04- $A_1, E_{22}$ ; Trayectoria $(x, y)[m]$ . . . . .	69
4.9. P04- $A_1, E_{22}$ : Desplazamiento horizontal $x[m]$ en el tiempo, $(t, x)$ . . . . .	69
4.10. P04- $A_1, E_{22}$ : Desplazamiento vertical $y[m]$ en el tiempo, $(t, x)$ . . . . .	69
4.11. P04- $A_1, E_{22}$ : Velocidad horizontal $v_x[m/s]$ con respecto al tiempo, $(t, v_x)$ . . .	70
4.12. P04- $A_1, E_{22}$ : Velocidad vertical $v_y[m/s]$ con respecto al tiempo, $(t, v_y)$ . . . . .	70
4.13. P04- $A_1, E_{22}$ : Magnitud de la velocidad $v[m/s]$ con respecto al tiempo, $(t, v)$ . .	70
4.14. P04- $A_1, E_{22}$ : Aceleración horizontal $a_x[m/s^2]$ con respecto al tiempo $(t, a_x)$ . .	71
4.15. P04- $A_1, E_{22}$ : Aceleración vertical $a_y[m/s^2]$ con respecto al tiempo $(t, a_y)$ . . . .	71
4.16. P04- $A_1, E_{22}$ : Magnitud de la aceleración $a[m/s^2]$ con respecto al tiempo $(t, a)$ . .	71
4.17. P04- $A_1, E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta $F_{Neta}[N]$ con respecto al tiempo. . .	72
4.18. P04- $A_1, E_{22}$ : Potencia $P[W]$ con respecto al tiempo. . . . .	72
5.1. Diagrama de cuerpo libre modelo $A_1$ . . . . .	74
5.2. Diagrama de cuerpo libre modelo $A_2$ . . . . .	75
5.3. Diagrama de cuerpo libre modelo $A_3$ . . . . .	76
5.4. Diagrama de cuerpo libre modelo $B_1$ . . . . .	77

5.5. Diagrama de cuerpo libre modelo $B_2$ . . . . .	78
5.6. Ajuste de deacimientto exponencial modelo $A_1$ . . . . .	79
5.7. Ajuste de deacimientto exponencial modelo $A_2$ . . . . .	81
5.8. Ajuste de deacimientto exponencial modelo $A_3$ . . . . .	83
5.9. Ajuste de deacimientto exponencial modelo $B_1$ . . . . .	85
5.10. Ajuste de deacimientto exponencial modelo $B_2$ . . . . .	87
6.1. P04-Desplazamiento horizontal en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	137
6.2. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	138
6.3. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	140
6.4. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	141
6.5. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	142
6.6. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	144
6.7. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	145
6.8. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	146
6.9. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	148
6.10. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	148
6.11. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	149

6.12. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	150
6.13. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	150
6.14. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	151
6.15. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	152
6.16. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	152
6.17. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	154
6.18. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	154
6.19. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	155
6.20. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	155
6.21. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	156
6.22. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	156
6.23. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	157
6.24. P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar . . . . .	158
6.25. P04- $A_1, E_{11}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	166
6.26. P04- $A_1, E_{11}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	166
6.27. P04- $A_1, E_{11}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	166

6.28. P04- $A_1$ , $E_{11}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	167
6.29. P04- $A_1$ , $E_{11}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	167
6.30. P04- $A_1$ , $E_{11}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	167
6.31. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	169
6.32. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	169
6.33. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	169
6.34. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	170
6.35. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	170
6.36. P04- $A_1$ , $E_{12}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	170
6.37. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	172
6.38. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	172
6.39. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	172
6.40. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	173
6.41. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	173
6.42. P04- $A_1$ , $E_{13}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	173
6.43. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	175
6.44. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	175
6.45. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	175
6.46. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	176
6.47. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	176
6.48. P04- $A_1$ , $E_{21}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	176
6.49. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	178
6.50. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	178
6.51. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	178
6.52. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	179

6.53. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	179
6.54. P04- $A_1$ , $E_{23}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	179
6.55. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	181
6.56. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	181
6.57. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	181
6.58. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	182
6.59. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	182
6.60. P04- $A_1$ , $E_{31}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	182
6.61. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	184
6.62. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	184
6.63. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	184
6.64. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	185
6.65. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	185
6.66. P04- $A_1$ , $E_{32}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	185
6.67. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	187
6.68. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	187
6.69. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	187
6.70. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	188
6.71. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	188
6.72. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	188
6.73. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo. . . . .	190
6.74. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	190
6.75. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	190
6.76. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	191
6.77. P04- $A_1$ , $E_{33}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	191

6.78. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	191
6.79. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	192
6.80. P04- $A_3$ , $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo. . . . .	194
6.81. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	194
6.82. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	194
6.83. P04- $A_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	195
6.84. P04- $A_3$ , $E_{22}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	195
6.85. P04- $A_3$ , $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	195
6.86. P04- $A_3$ , $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	196
6.87. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo. . . . .	198
6.88. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	198
6.89. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	198
6.90. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	199
6.91. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	199
6.92. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	199
6.93. P04- $B_1$ , $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	200
6.94. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo. . . . .	202
6.95. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo. . . . .	202
6.96. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo. . . . .	202
6.97. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo. . . . .	203
6.98. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo. . . . .	203
6.99. P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo. . . . .	203
6.100P04- $B_2$ , $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo. . . . .	204



---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Estados de mar de de mayor ocurrencia Punta Curaumilla . . . . .	15
2.1. Parámetros de oleaje de acuerdo a la profundidad [7]. . . . .	21
3.1. Proporciones de escala de similitud [13] . . . . .	35
3.2. P04-Prueba de oscilación forzada:Condiciones ambientales de laboratorio . . .	41
3.3. P04-Prueba de oscilación frozada:Programa de pruebas modelo $B_1, B_2$ . . . .	43
3.4. Programación de trabajo . . . . .	45
3.5. Características técnicas prototipo . . . . .	46
3.6. Parámetros cinemáticos y dinámicos simulación numérica de prototipo base [12].	47
3.7. Geometría y ´propiedades de masa modelo $A_1$ . . . . .	48
3.8. Segundo momento de área $I_x, I_z$ . . . . .	48
3.9. Parámetros característicos de flotabilidad modelo $A_1$ . . . . .	49
3.10. Caracerísticas generales modelo $A_2$ . . . . .	50
3.11. Segundo momento de área $I_x, I_z$ . . . . .	50
3.12. Caracerísticas generales modelo $A_3$ . . . . .	50
3.13. Segundo momento de área $I_x, I_z$ . . . . .	51
3.14. Caracerísticas generales modelo $B_1$ . . . . .	51
3.15. Características de flotabilidad modelo $B_1$ . . . . .	52
3.16. Segundo momento de área $I_x, I_z$ modelo $B_1$ . . . . .	52
3.17. Características generales modelo $B_2$ . . . . .	52
3.18. Segundo momento de área $I_x, I_z$ modelo $B_1$ . . . . .	53
3.19. Características de oleaje monocromático según prototipo y modelo. . . . .	53

3.20. Especificaciones técnicas Gopro Hero 5. . . . .	58
3.21. Sistema de coordendas. . . . .	61
4.1. Resultados prueba P01-Prueba de plataforma seca. . . . .	64
4.2. Resultados prueba P02-Prueba de plataforma húmeda. . . . .	64
4.3. $E_{22}, A_1$ : Condiciones de laboratorio. . . . .	68
4.4. $E_{22}, A_1$ : Parámetros de ajuste inicial. . . . .	68
4.5. $E_{22}, A_1$ : Parámetros de oleaje. . . . .	68
5.1. $A_1$ Parámetros de estabilidad estática. . . . .	74
5.2. $A_2$ Parámetros de estabilidad estática. . . . .	75
5.3. $A_3$ Parámetros de estabilidad estática. . . . .	76
5.4. $B_1$ Parámetros de estabilidad estática. . . . .	77
5.5. $B_2$ Parámetros de estabilidad estática. . . . .	78
5.6. Modelo $A_1$ :Parámetros curva de decaimiento . . . . .	79
5.7. Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo $A_1$	80
5.8. Modelo $A_2$ :Parámetros curva de decaimiento . . . . .	80
5.9. Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo $A_2$	82
5.10. Modelo $A_3$ :Parámetros curva de decaimiento . . . . .	82
5.11. Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo $A_3$	84
5.12. Modelo $B_1$ :Parámetros curva de decaimiento . . . . .	84
5.13. Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo $B_1$	86
5.14. Modelo $B_2$ :Parámetros curva de decaimiento . . . . .	86
5.15. Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo $B_2$	87
5.16. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{11}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	89
5.17. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{11}$ . .	89

5.18. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{11}$ . . . . .	90
5.19. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{11}$ . . . . .	90
5.20. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{12}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	91
5.21. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{12}$ . .	91
5.22. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{12}$ . . . . .	92
5.23. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{12}$ . . . . .	93
5.24. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{13}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	93
5.25. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{13}$ . .	93
5.26. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{13}$ . . . . .	94
5.27. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{13}$ . . . . .	94
5.28. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{21}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	95
5.29. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{21}$ . .	95
5.30. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{21}$ . . . . .	96
5.31. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{21}$ . . . . .	96
5.32. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{22}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	97
5.33. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{22}$ . .	97
5.34. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{22}$ . . . . .	98
5.35. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{22}$ . . . . .	98
5.36. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{23}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	99
5.37. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{23}$ . .	99
5.38. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{23}$ . . . . .	100
5.39. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{23}$ . . . . .	100
5.40. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{31}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	101
5.41. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{31}$ . .	101
5.42. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{31}$ . . . . .	102

5.43. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{31}$ . . . . .	102
5.44. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{32}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	103
5.45. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{32}$ . . . . .	103
5.46. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{32}$ . . . . .	104
5.47. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{32}$ . . . . .	104
5.48. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{33}$ para el modelo $A_1$ . . . . .	105
5.49. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_1, E_{33}$ . . . . .	105
5.50. Parámetros cinemáticos modelos $A_1, E_{33}$ . . . . .	106
5.51. Parámetros dinámicos modelos $A_1, E_{33}$ . . . . .	106
5.52. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{22}$ para el modelo $A_2$ . . . . .	107
5.53. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_2, E_{22}$ . . . . .	107
5.54. Parámetros cinemáticos modelos $A_2, E_{22}$ . . . . .	108
5.55. Parámetros dinámicos modelos $A_2, E_{22}$ . . . . .	108
5.56. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{22}$ para el modelo $A_3$ . . . . .	109
5.57. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $A_3, E_{22}$ . . . . .	109
5.58. Parámetros cinemáticos modelos $A_3, E_{22}$ . . . . .	110
5.59. Parámetros dinámicos modelos $A_3, E_{22}$ . . . . .	110
5.60. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{22}$ para el modelo $B_1$ . . . . .	111
5.61. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $B_1, E_{22}$ . . . . .	111
5.62. Parámetros cinemáticos modelos $B_1, E_{22}$ . . . . .	112
5.63. Parámetros dinámicos modelos $B_1, E_{22}$ . . . . .	112
5.64. Parámetros de oleaje estado de mar $E_{22}$ para el modelo $B_2$ . . . . .	113
5.65. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación $B_2, E_{22}$ . . . . .	113
5.66. Parámetros cinemáticos modelos $B_2, E_{22}$ . . . . .	114
5.67. Parámetros dinámicos modelos $B_2, E_{22}$ . . . . .	114

6.1. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{11}$ . . . . .	117
6.2. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{11}$ . . . . .	118
6.3. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{11}$ . . . . .	118
6.4. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{12}$ . . . . .	119
6.5. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{12}$ . . . . .	119
6.6. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{12}$ . . . . .	120
6.7. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{13}$ . . . . .	120
6.8. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{13}$ . . . . .	121
6.9. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{13}$ . . . . .	121
6.10. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{21}$ . . . . .	122
6.11. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{21}$ . . . . .	122
6.12. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{21}$ . . . . .	122
6.13. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{22}$ . . . . .	123
6.14. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{22}$ . . . . .	123
6.15. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{22}$ . . . . .	124
6.16. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{23}$ . . . . .	124
6.17. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{23}$ . . . . .	125
6.18. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{23}$ . . . . .	125
6.19. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{31}$ . . . . .	126
6.20. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{31}$ . . . . .	126

6.21. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{31}$ . . . . .	127
6.22. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{32}$ . . . . .	127
6.23. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{32}$ . . . . .	127
6.24. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{32}$ . . . . .	128
6.25. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_1$ , estado de mar $E_{33}$ . . . . .	128
6.26. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_1, E_{33}$ . . . . .	129
6.27. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_1, E_{33}$ . . . . .	129
6.28. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_2$ , estado de mar $E_{22}$ . . . . .	130
6.29. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_2, E_{22}$ . . . . .	130
6.30. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_2, E_{22}$ . . . . .	131
6.31. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $A_3$ , estado de mar $E_{22}$ . . . . .	131
6.32. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $A_3, E_{22}$ . . . . .	131
6.33. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $A_3, E_{22}$ . . . . .	132
6.34. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $B_1$ , estado de mar $E_{22}$ . . . . .	132
6.35. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $B_1, E_{22}$ . . . . .	133
6.36. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $B_1, E_{22}$ . . . . .	133
6.37. Parámetros de oleaje modelo/prototipo $B_2$ , estado de mar $E_{22}$ . . . . .	134
6.38. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo $B_2, E_{22}$ . . . . .	134
6.39. Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo $B_2, E_{22}$ . . . . .	135
6.40. Comparación datos de simulación numérica y ensayo experimental. . . . .	136

6.41. Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical prototipo $A_1$ para cada estado de mar. . . . .	136
6.42. Parámetros cinemáticos prototipo $A_1$ para cada estado de mar. . . . .	139
6.43. Parámetros dinámicos prototipo $A_1$ para cada estado de mar. . . . .	143
6.44. Parámetros cinemáticos y dinámicos prototipo $A_1$ , $A_2$ y $A_3$ para estado de mar $E_{22}$ . . . . .	147
6.45. Parámetros cinemáticos y dinámicos prototipo $B_1$ y $B_2$ para estado de mar $E_{22}$ .	153



---

# INTRODUCCIÓN

---

La energía, en sus variadas formas, resulta esencial para el desarrollo de las criaturas que habitan el planeta, en particular para la especie humana. Ésta ha experimentado un crecimiento demográfico acelerado, sobre todo en las últimas décadas. Se estima que en 1950 un total de 2.600 millones de personas habitaban la tierra, en 2019 esa cifra superó los 7700 millones de personas. De acuerdo a la división de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, se prevé para 2030 que esa cifra alcance los 8500 millones de personas, y que supere los 9700 millones de personas en 2050. Las implicancias de dicho aumento de la población son un foco principal de preocupación para el quehacer humano, considerando la necesidad vital de plantear una vía de crecimiento económico industrial sostenible en el tiempo y compatible con las diferentes dinámicas y grupos ontológicos que integran el sistema planeta. [1] Uno de los principales desafíos que surge tiene que ver con el uso y aprovechamiento de la energía. La demanda energética mundial y en consecuencia la producción de la misma, ha experimentado un continuo aumento en las últimas décadas, debido en gran medida al crecimiento económico sostenido de los países en general, sustentado en la disponibilidad natural de recursos y el respectivo aprovechamiento de estos mediante el uso de la tecnología desarrollada. De acuerdo a cifras estimadas por la Agencia Internacional de Energía [2], la producción mundial de energía primaria fue de 13.970 MTep en 2017, el equivalente a 1,9 Tep per cápita. Del suministro total cerca de un 80 % proviene de combustibles fósiles (31,9 % petróleo, 27,2 % carbón y 22,3 % gas natural), un 9,5 % de biocombustibles o desecho, 4,8 % de energía nuclear, 2,5 % de energía hidroeléctrica y un 1,6 % de energías renovables no hídrica (solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, etc.).

En cuanto al consumo de energía final se estimó en 2017 un total mundial de 9.717 MTep, del cual un 40,9 % corresponde a productos derivados del petróleo, un 18,9 % en electricidad, un 15,5 % en gas natural, 10,7 % biocombustibles y desechos, 10,5 % carbón, 3 % en forma de calor, 0,1 % petróleo crudo y 0,5 % como energía renovable no convencional. La actividad industrial junto con el transporte son los sectores que abarcan la mayor parte del consumo final: 29,5 % y 29,3 %, respectivamente en 2017. Le siguen el uso residencial, 21,6 %; comercio y servicios públicos, 8,2 %; agricultura y actividad forestal, 2,1 %; pesca, 0,1 %; y no uso de la energía, 9,2 %. En particular el sector de la electricidad en el consumo de energía final total a nivel mundial (TFC) pasó de un 13 % en 1990 a un 19 % en 2017.[2]

## Panorama energético nacional

El suministro total de energía primaria en Chile en 2018 fue de un total de 38.724 kTep. Un 75,5 % proveniente de fuentes fósiles (42,3 % petróleo, 18,4 % carbón y 11,2 % gas natural); un 20,3 % de biocombustibles y desechos; 5,2 % de hidroeléctrica; finalmente 2,5 % proveniente de energías renovables no hídricas. En cuanto a consumo final de energía, se registró en 2017 un total de 26.709 kTep. Proveniente un 57 % de productos derivados del petróleo; 22,5 % electricidad; 13 % biomasa y desechos; 6,3 % gas natural; 1,1 % carbón, 0,2 % energías renovables no hídricas. La industria en 2017 abarcó un 37,1 % del consumo de energía final. Le sigue el transporte con un 34,3 %; uso residencial 16,5 %; comercial y servicios públicos 7,5 %; no uso de energía 2,1 %; agricultura y forestales 1,4 %; pesca 0,9 %; no especificado 0,2 % [1].

### 0.1. Motivación

Las características de la matriz energética mundial han contribuido negativamente a acentuar una de las problemáticas actuales de mayor relevancia: el cambio climático. Cuyos efectos amenazan directamente al desarrollo de la vida como la conocemos, impactando desde la cadena de producción de alimentos, hasta la generación de daños directos a la población producto del aumento del nivel de mar. En definitiva la actividad humana en cuanto a industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, ha contribuido significativamente en las últimas décadas a la generación de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) se deben destacar los siguientes hechos:

- La concentración de GEI en la atmósfera terrestre está directamente relacionada con la temperatura media mundial de la Tierra.
- Esta concentración ha ido aumentando progresivamente desde la Revolución Industrial y, con ella, la temperatura mundial. De 1880 a 2012 la temperatura media mundial aumentó 0,85 °C. El GEI más abundante y que representa alrededor de dos tercios de todos los tipos de GEI, es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), resultado principalmente de la quema de combustibles fósiles.

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, sólo producto de procesos de combustión, aumentó desde 20.521 Mt en 1990 a 32.840Mt en 2017. Año en el cual cerca de un 40 % proviene del sector eléctrico y de producción de calor, seguido de un 24 % proveniente del sector de transporte y un 19 % de la industria.

En Chile, las emisiones de CO<sub>2</sub> producto de procesos de combustión en 2017 alcanzaron un total de 48 MT. De las cuales un 55,8 % tiene como fuente el petróleo, seguido de un 33,7 % del carbón y 10,5 % de gas natural. El sector que más contribuyó a las emisiones fue el de electricidad y producción de calor, abarcando un 42,2 % del total, seguido del sector transporte con 32,5 %, industria 16,9 %; residencial 4,8 %; otros usos de energía 2,4 %; pesca 1,2 %. Dada la concentración actual y las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, se estima que la temperatura del planeta seguirá aumentando por encima de los niveles preindustriales. En este contexto, las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, en la 21a Conferencia en París el 2015, alcanzaron un acuerdo con el objetivo de combatir el cambio climático y acelerar e intensificar las acciones y las inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. En concreto, sus medidas van orientadas a estabilizar en 2°C el aumento de la temperatura a nivel mundial respecto de niveles preindustriales, como alternativa al eventual escenario de un aumento de 6°C, en caso de continuar la actividad humana sin aplicar medida alguna. En este contexto, se presentan las denominadas energías renovables como recursos limpios, prácticamente inagotables por su relación de aprovechamiento respecto de la tasa de consumo y de gran potencial de uso a lo largo del planeta. Por su naturaleza libre de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son el centro de la transición hacia un sistema energético sostenible. Además, disminuyen la dependencia energética de suministros externos favoreciendo las economías locales. Por su carácter emergente favorecen la creación de empleo y crecen competitivamente a medida que se desarrolla. Entre las tecnologías desarrolladas más comunes destacan la solar, eólica, geotérmica, biomasa y biogás, hidroeléctricas, undimotriz, mareomotriz, bioetanol, biodiesel, entre otras. Los principales desafíos que enfrenta el desarrollo de tecnología asociada a fuentes renovables dice relación con los costos asociados a sus etapas tempranas, la necesidad de grandes extensiones para suplir la baja densidad energética de las fuentes, las emisiones secundarias de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de los dispositivos de trabajo. Hasta 2017 las energías renovables (hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica) abarcaron un 4,1 % del suministro total de energía primaria a nivel mundial. La participación de energías renovables modernas en el consumo de energía final registró un 10,9 % en 2018.

En cuanto a generación eléctrica a partir de fuentes renovables se registró en 2017 una producción total de 5.865.412 GWh a nivel global [2]. Un 71,6 % a partir de fuente hidroeléctricas; 19,2 % eólica, 7,6 % solar fotovoltaica; 1,5 % geotérmica, 0,2 % solar térmica; y menor a 0,1 % de mareomotriz, undimotriz.

## 0.2. Problemática

Bajo el contexto presentado, y considerando que la energía representa cerca de un 60 % del total de emisiones globales de gases de efecto invernadero, el tránsito hacia las energías libres de emisiones de gases de efecto invernadero se plantea como la vía adecuada y urgente de desarrollo en un marco de sustentabilidad. Con ello la necesidad de un desarrollo tecnológico orientado a aprovechar la amplia variedad de fuentes de recursos renovables disponibles en el medio ambiente, cada una bajo condiciones y principios particulares, a fin de consolidar la matriz energética global. Una de las fuentes menos aprovechada en la actualidad, pero sin embargo de un gran potencial energético corresponde a la energía proveniente del mar, en particular, la energía undimotriz. Para la implementación de energía undimotriz el factor predominante es la disponibilidad del recurso. Este está fuertemente ligado a la orientación de la línea de costa hacia mar abierto. La energía puede ser explotada, sobre una base económica viable, cuando los valores son mayores a 15-20 [kW/m] (La medida común para los niveles de potencia de las olas es la potencia media anual por metro de ancho de cresta de olas paralela a la costa) [3] Se estima en el mundo un potencial de energía undimotriz de 29.500 TWh/año (fuente ). Los países con mayor potencial de energía son Canadá, Reino Unido, Australia y Chile. La costa chilena abarca, desde norte a sur, un rango que va desde los 25 kW/M hasta los 110 kW/m [4]. Hasta la fecha se han desarrollado diferentes tecnologías de aprovechamiento de energía undimotriz, cada una basada en diferentes principios de conversión. Entre ellas destacan los puntos absorbedores de boyas resonantes, debido a la simplicidad de su mecanismo, estabilidad, durabilidad, facilidad de transporte e instalación en el mar y gran eficiencia. La importancia de un diseño óptimo de la boya radica en que la eficiencia de este tipo de convertidores depende en gran medida de la capacidad que tenga el cuerpo flotante de absorber la energía contenida en el oleaje. Para extraer la mayor cantidad de energía, la frecuencia natural del punto absorbedor debiese sintonizar con la frecuencia de la ola incidente. Sin embargo, las dimensiones de la boya suelen ser pequeñas en comparación con las longitudes de onda de la ola incidente. Por lo tanto, el ancho de banda de estos tipos de absorbedores es estrecho, con lo que se requiere un control de la frecuencia natural del convertidor de energía undimotriz. En el presente trabajo se realiza un estudio experimental

---

de un modelo a escala de un equipo de generación undimotriz del tipo punto absorbedor para determinar los parámetros de diseño tales como forma, dimensiones, peso, frecuencia natural, masa agregada y coeficiente de arrastre, entre otros, a fin de lograr el fenómeno de resonancia y reducir los efectos de amortiguación para estados del mar característicos en aguas someras en las costas chilenas., para así, maximizar la extracción energética del dispositivo.

## Objetivos Generales

El objetivo general del presente trabajo es diseñar y estudiar experimentalmente un modelo de boya que permita aprovechar energéticamente la resonancia con el oleaje en la zona de baja profundidad y reducir la amortiguación para distintos estados característicos del mar en aguas someras en las costas chilenas.

## Objetivos Específicos

- Investigar el estado del arte y marco teórico asociado a la dinámica marina y el funcionamiento de la tecnología undimotriz.
- Investigar los parámetros de olas característicos de aguas someras en la costa de Valparaíso.
- Diseñar una boya estable con geometría que logre resonar con la frecuencia natural de las olas.
- Diseñar las pruebas estandarizadas en canal hidráulico de olas para el modelo de boya a escala.
- Ensayar y analizar el funcionamiento de la boya para aplicar ajustes de diseño que permitan disminuir los efectos de amortiguación, reflexión y difracción del cuerpo flotante.
- Probar y comparar los resultados experimentales con las simulaciones numéricas previamente obtenidas para caracterización de los modelos propuestos para la boya resonante.
- Proponer la configuración óptima para integrar y operar dichas boyas en tecnología undimotriz.

# Capítulo 1

---

## ESTADO DEL ARTE

---

### 1.1. Tecnología undimotriz

#### 1.1.1. Según su ubicación

Los dispositivos de energía undimotriz pueden ser categorizados de acuerdo a diferentes criterios. Uno de ellos es de acuerdo a la locación respecto de la costa y profundidad en las cuales son diseñados para operar, es decir, offshore, nearshore o shoreline, dadas las condiciones físicas del sitio de emplazamiento. Las ondas se desplazan a través del océano casi sin pérdidas de energía por fricción, es por esta razón que los mayores potenciales se encuentran en mar abierto con profundidades sobre los 50 [m] (offshore). En aguas menos profundas, las olas sufren un incremento en la fricción producida por el fondo marino, siendo estos lugares menos atractivos desde el punto de vista energético. Sin embargo a medida que la tecnología emplazada se sitúe más cerca de la costa, disminuyen los costos de amarre y conexión a la red. Ya en línea de costa las estructuras de los convertidores pueden ser ubicadas en tierra facilitando aún más el acceso y las diferentes soluciones estructurales.

#### 1.1.2. Según su mecanismo

Otra forma de categorización de los diferentes tipos de tecnología undimotriz es de acuerdo al concepto, principio operacional que rige el mecanismo del dispositivo y el método usado para capturar la potencia de la ola. Los más comunes en la industria a la fecha son:

##### **Atenuador**

Es un dispositivo flotante largo alineado perpendicularmente al frente de ola. Captura la energía de la ola, a partir del movimiento relativo de las partes que componen el dispositivo, a medida que esta se mueve a través de toda su longitud (Figura 1.1.A)

**Absorbedor puntual**

Estructura flotante que absorbe la energía de las olas proveniente de todas las direcciones en virtud del movimiento en o cerca de la superficie. Sus dimensiones suelen ser pequeñas en comparación con las longitudes de onda típicas, tendiendo a tener diámetros de unos pocos metros. Tiene la capacidad de absorber energía de un área mayor que las dimensiones del dispositivo (efecto Antena).(Figura 1.1.B).

**Oscillating Wave Surge Converters Convertidor de Oleaje Oscilante, (OWSC**

Es un colector cercano a la superficie, montado sobre un brazo pivotado en una base cerca del lecho marino. El brazo oscila como un péndulo invertido debido al movimiento de las partículas de agua en las olas.(Figura 1.1.C).

**Columna de Agua Oscilante, OWC.**

Estructura hueca, parcialmente sumergida, abierta por debajo de la superficie del agua por lo que contiene aire atrapado sobre una columna de agua. Las olas producen que la columna de agua suba y baje, funcionando como un pistón, comprimiendo y descomprimiendo el aire. El flujo de aire es conducido a través de una turbina para producir energía. El diseño de este dispositivo permite ajustarse al período de la ola incidente para resonar. Puede presentar características de punto absorbente. Los OWC's clásicos se ubican en línea de costa, ya sea directamente o integrados en rompeolas. (Figura 1.1.D).

**Dispositivo de desbordamiento (Overtopping device)**

Este dispositivo consiste en una pared sobre la cual se cuegan las olas, recogiendo el agua en un depósito de almacenamiento. Las olas entrantes crean una cabeza de agua, que se libera de vuelta al mar a través de turbinas convencionales de baja altura instaladas en el fondo del reservorio. Típicamente son estructuras grandes debido a los requerimientos de espacio para la reserva, que necesita un mínimo de capacidad de almacenamiento.(Figura 1.1.E).

**Diferencial de presión sumergida**

Consiste en un dispositivo sumergido, localizado comúnmente cerca de la costa y sujeto al lecho marino. El movimiento de las olas causa que el nivel del mar sobre el dispositivo aumente o disminuya. Esto induce un diferencial de presión que causa el movimiento del dispositivo junto con la ola. Este mecanismo también presenta características de punto absorbedor. (Figura 1.1.F).

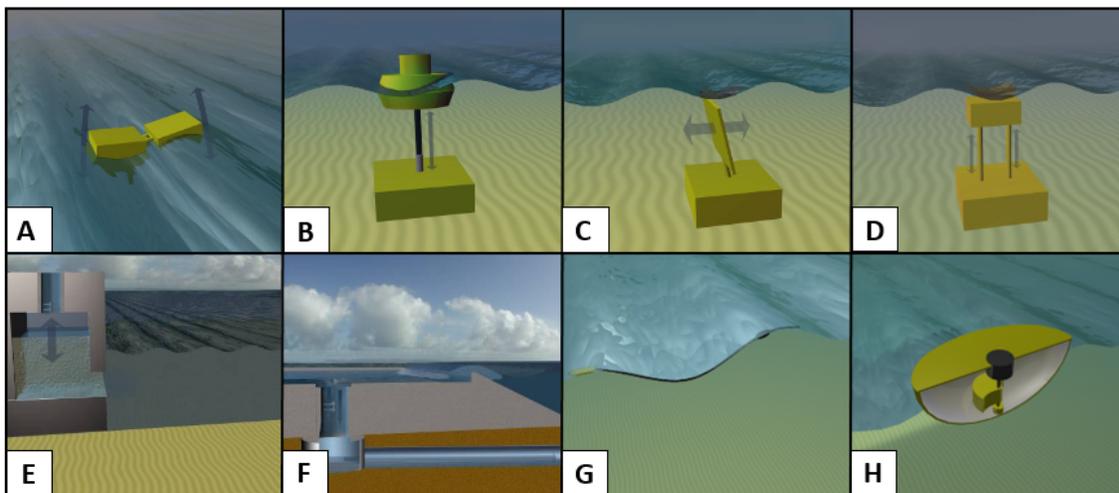
### Tecnología de ola abultada

Consiste en un tubo de goma lleno de agua, amarrado al fondo marino y orientado en dirección de las olas. El agua entra a través de la popa y la ola que pasa provoca variaciones de presión a lo largo del tubo, creando un "abultamiento". A medida que el bulto viaja a través del tubo, crece, reuniendo energía que se puede utilizar para conducir una turbina estándar de baja altura ubicada en la proa, donde el agua vuelve al mar. (Figura 1.1.G).

### Masa rotatoria

Este dispositivo captura la energía de las olas a partir del movimiento del cuerpo flotante que se agita y balancea. El movimiento conduce a un peso excéntrico o giroscopio causantes de precesión, movimiento que se acopla a un generador eléctrico al interior del dispositivo. (Figura 1.1.H).

A continuación se presentan esquemas de los distintos mecanismos de generación de energía undimotriz presentados anteriormente:



**Figura 1.1:** Esquemas de tecnología undimotriz según su mecanismo.

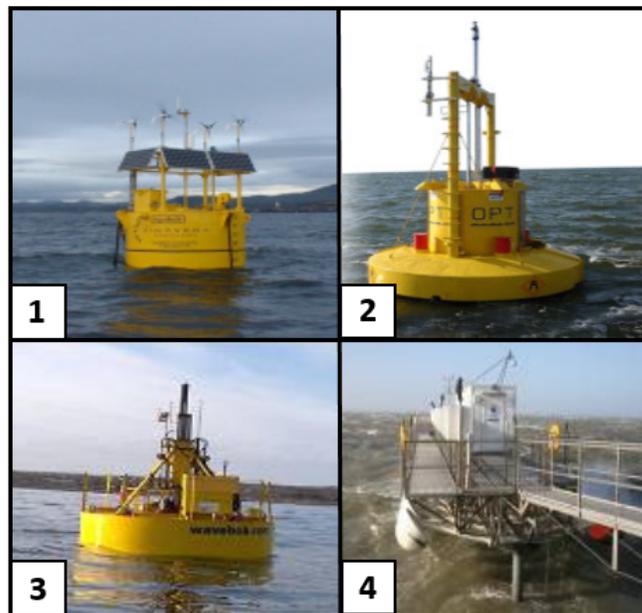
## 1.2. Proyectos de energía undimotriz desarrollados

A continuación se presentan diferentes proyectos energéticos basados en tecnología undimotriz. Se menciona su nombre, empresa que lo desarrolló, tipo de tecnología y una breve descripción.

1.
  - **Nombre, País, Empresa:** AquaBuoy, Irlanda, Finavera Renewables.
  - **Tipo de tecnología:** Offshore; Punto absorbedor.
  - **Descripción:** Integra aspectos de dos diseños de dispositivos previos ( IPS Offshore Wave Energy Converter (OWEC) y Hosepump), ambos originados en Suiza. El dispositivo consta de un flotador (boya) amarrado con holgura y un tubo vertical sumergido, que está abierto al mar en su parte superior e inferior. Las ondas incidentes hacen que el dispositivo se mueva hacia arriba y hacia abajo creando una fuerza de amortiguación que actúa sobre un pistón conectado a dos bombas de manguera, que se contraen y expanden para proporcionar un efecto de bombeo. Las bombas de manguera y las masas de agua separadas contenidas dentro de ellas reaccionan contra el movimiento de elevación y convierten el movimiento oscilatorio en un flujo de agua a alta presión para impulsar una turbina y un generador.
2.
  - **Nombre, País, Empresa:** PowerBuoy™, USA, Ocean Power Technologies Inc. (OPT)
  - **Tipo de tecnología:** Offshore; Punto absorbedor.
  - **Descripción:** Convertidor de energía undimotriz de punto absorbedor de flotación libre que está amarrado libremente al fondo marino; El flotador de la boya se mueve hacia arriba y hacia abajo en el mástil central a medida que pasan las olas. Este movimiento mecánico acciona una bomba hidráulica que fuerza el fluido hidráulico a través de un motor rotativo conectado a un generador eléctrico
3.
  - **Nombre, País, Empresa:** Wave Bob, Irlanda, Wavebob Ltd.
  - **Tipo de tecnología:** Offshore, Punto absorbedor.
  - **Descripción:** Punto absorbedor axi-simétrico que flota libremente capaz de resonar a través de cualquier rango predeterminado de frecuencias de onda y anchos de banda. Luego se puede sintonizar con el clima de las olas predominantes utilizando un sistema patentado para cambiar las frecuencias de resonancia natural del dispositivo. Esto puede establecerse estacionalmente o con mucha más frecuencia, como puede justificarse económicamente. La respuesta instantánea de Wavebob se ajusta rápidamente y en tiempo real (durante cada ola) a través de la toma de fuerza hidráulica mediante un sistema de control autónomo integrado para maximizar la potencia útil.

4. ■ **Nombre, Empresa:** Wave Star, Dinamarca, Wave star Energy.
- **Tipo de tecnología:** Nearshore; Multi- Punto Absorbedor.
- **Descripción:** La máquina de olas Wave Star Energy es un llamado absorbedor multipunto. Eso significa una máquina equipada con una serie de flotadores que son movidos por las olas para activar los cilindros, que presionan el aceite en un sistema de transmisión común, cuya presión impulsa un motor hidráulico. El motor, a su vez, acciona el generador de la máquina de olas. En caso de tormenta, los flotadores se elevan a una posición segura: en la máquina a gran escala colgarán 20 metros sobre la superficie. Un sensor en el fondo marino delante de la máquina mide las olas y garantiza que el sistema de seguridad contra tormentas se active automáticamente. La máquina se puede controlar de forma remota a través de Internet (conexión VPN).

En la figura 1.2 se presentan fotografías de los proyectos mencionados anteriormente. La imagen 1 corresponde a AquaBuoy, Irlanda, Finavera Renewables; la imagen 2 es el dispositivo PowerBuoy™, USA, Ocean Power Technologies Inc. (OPT); la imagen 3 es Wave Bob, Irlanda, Wavebob Ltd.; y la imagen 4 Wave Star, Dinamarca, Wave star Energy.



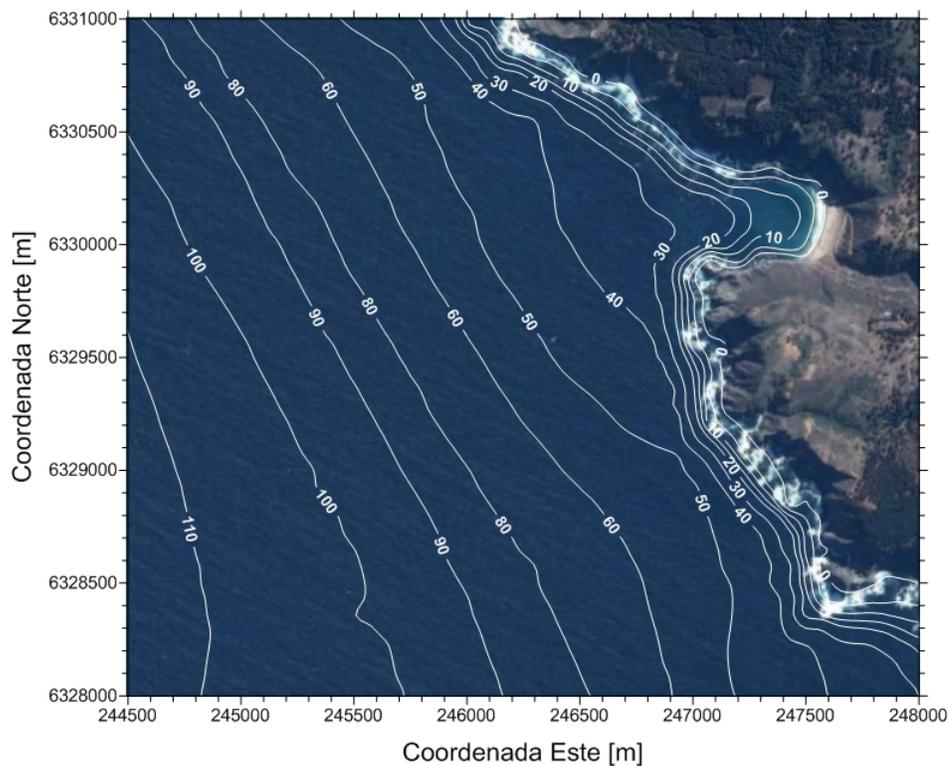
**Figura 1.2:** Proyectos de tecnología undimotriz desarrollados en el mundo.

### 1.3. Disponibilidad del recurso energético

#### 1.3.1. Ubicación y descripción del área de estudio

La información que se presenta a continuación se obtuvo a partir del proyecto “Evaluación de Energía Undimotriz en la Costa Centro- Sur de Chile”[5], construida a partir de modelos de generación y propagación de olas desde mar adentro (offshore) y mediciones específicas en el lugar a través de boyas y sensores costeros, se logró estimar el potencial de recurso undimotriz disponible en aguas someras en la zona centro sur de Chile (Lat: 32,5°S a 42,5°S). La estimación a largo plazo de potencia de ola muestra un aumento de la potencia media a medida que aumenta la latitud, que fluctúa entre 20 y 35 [kW/m].

La elección de Punta Curaumilla se hizo a fin maximizar la función de costos, dependiente de parámetros tales como: estimación del recurso de energía undimotriz, cercanía a la red eléctrica nacional y accesibilidad al sitio [5].



**Figura 1.3:** Batimetría Punta Curaumilla [10]

Punta Curaumilla, ubicado aproximadamente 50 [km] al sur de la ciudad de Valparaíso, por ser el único de los sitios evaluados donde se dispusieron boyas de medición tanto en altamar (offshore) como en aguas someras (nearshore) a fin de obtener series tiempo que capturarán la variabilidad temporal del recurso. Además, los datos recogidos permitieron la calibración del modelo de propagación de ondas para un amplio rango de condiciones.

El borde costero presenta una orientación que enfrenta aprox. los 240 N. Las mediciones y evaluación del potencial del oleaje se realizaron en la bahía en la que se encuentra la Playa y Caleta Las Docas, a 4.5km al SE de Punta Curaumilla. La bahía presenta un buen abrigo al oleaje del N, presentando mayor exposición al oleaje del W y abrigo moderado respecto del oleaje SW. La bahía presenta pendientes suaves hasta la boca de la misma, accediendo a profundidades de 50m a menos de 1km de la costa. Fuera de la bahía las pendientes costeras son abruptas. En los sectores más expuestos, es decir, los de mayor interés para la instalación de dispositivos de generación, las isobatas objetivo de -20 m y -50 m se ubican a distancias de 200 m y 500 m desde la línea de costa, respectivamente [5].

### 1.3.2. Recurso Energético

La información para aguas someras en dicha localidad (Lat: 33.14°S- Long: 71.71°O), a una profundidad aproximada de 20-25 [m], se obtuvo mediante sensores costeros ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)[10]. La información espectral obtenida fue discretizada en 256 frecuencias en un rango desde 0,0044[Hz] a 1 [Hz] y 180 direcciones en un rango de 0° a 358°, Con una resolución de 0,0078 [Hz] y 2° respectivamente. Además, se realizó un levantamiento batimétrico (BS, por sus siglas en inglés) con cobertura espacial típica de (0)10 [km<sup>2</sup>] alrededor del sitio de implementación.

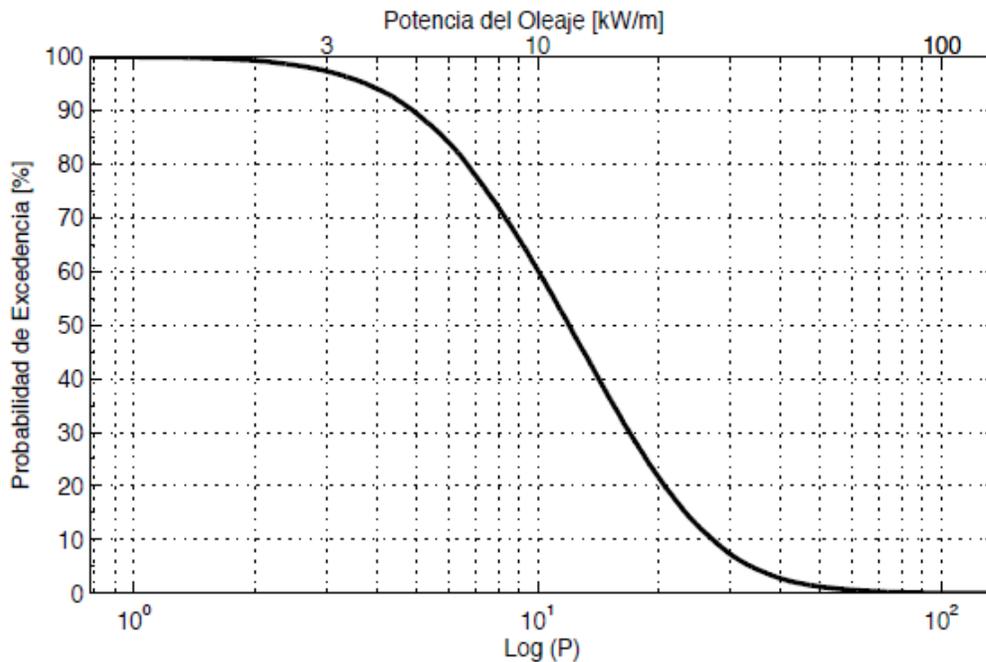
A partir del espectro de salida estimado de los sensores costeros ADCP, se obtuvieron los parámetros de altura significativa  $H_{m0}$  y período de energía  $T_e$ . La potencia de ola fue obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$P_0 = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_{m0}^2 \quad (1.1)$$

La correlación de los datos obtenidos de las mediciones del sensor A1 y el modelo SWAN indica resultados aceptables, con una sobrestimación del 3% para  $H_{m0}$ . Para el periodo de energía  $T_e$  la sobrestimación es de 2,6%. En cuanto a la potencia de ola se calcula una sobrestimación de 5,9% [6]. Considerando lo anterior, los parámetros característicos del sitio de estudio son los siguientes:

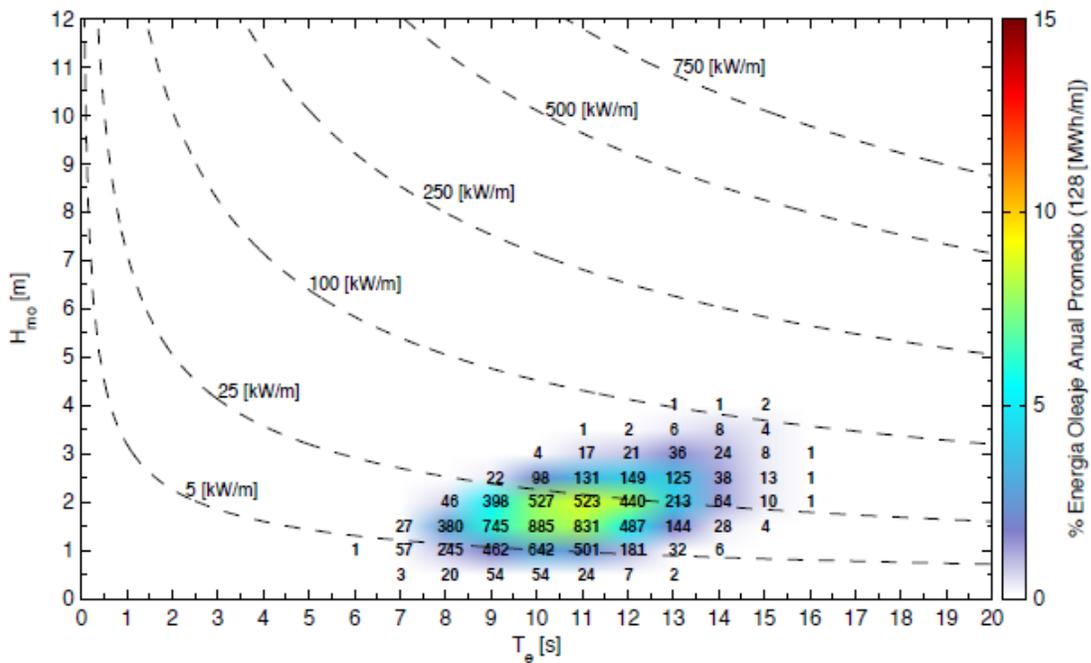
Lat.(°S)-Long.(°O)	Profundidad [m]	$H_{m0}$ [m]	$T_e$ [s]	$P_0$ [kW/m]
33.14 – 71.71	21	1,68	10,53	16,58

Además, estadísticamente se obtuvo que durante un 50% del tiempo, la potencia del oleaje supera  $P = 12$  [kW/m] (percentil 50%). Un 10% del tiempo la potencia es menor a  $P = 5$  [kW/m] y un 10% del tiempo la potencia supera  $P = 27$  [kW/m]. Probabilidad de excedencia de la potencia del oleaje en punto ADCP se presenta a continuación:



**Figura 1.4:** Curva de potencia de oleaje en función de probabilidad de excedencia [10]

También se presentan las matrices de potencia asociadas a las combinaciones de  $H_{m0}$  vs.  $T_e$ , indicando en números la cantidad de ocurrencias y en escala de colores el porcentaje de la energía anual promedio. En el panel superior se incluyen las curvas de iso potencia teórica ( $0.49 \cdot T_e \cdot H_{m0}^2$ ).



**Figura 1.5:** Curva de potencia de oleaje en función de altura de ola y periodo significativo [5].

Con la información anterior es posible definir los principales estados de mar conducente a evaluar el desempeño del dispositivo bajo las condiciones más probables de ocurrencia:

Estado de mar	$T_e[s]$	$H_{m0}[m]$
1	8	0,5
2	8	1,5
3	8	2,5
4	10	0,5
5	10	1,5
6	10	2,5
7	12	0,5
8	12	1,5
9	12	2,5

**Tabla 1.1:** Estados de mar de de mayor ocurrencia Punta Curaumilla



# Capítulo 2

---

## MARCO TEÓRICO

---

### 2.1. Teoría de Olas

La presencia de ondas en el océano pone de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfaz agua-aire que constituye la superficie del mar. Dado que las fuentes de dichas perturbaciones son de diferente naturaleza, existe una gran variabilidad en las características ondas-respuesta que componen el espectro completo de los estados del mar. Los diferentes tipos de ondas pueden clasificarse de acuerdo a sus mecanismos generadores, periodos, frecuencias y fuerzas de control. En particular, la energía de ondas de superficie de mayor interés corresponde a olas gravitatorias. Ellas son generadas principalmente por la interacción del viento con las fuerzas gravitacionales que tienden a restaurar el nivel de agua quieta. Suelen presentar periodos entre 1 y 30 segundos y longitudes de onda que van desde 1 a  $10^3$  m.

Se definen puntos significativos de la superficie libre de agua tales como: **Cresta**, punto en el que la superficie libre alcanza un máximo; **Seno**, punto en el que la superficie libre alcanza un valor mínimo; **Nivel de reposo NR**, aquel nivel del fluido en ausencia de ondas; **Nivel medio de referencia NMR**, Nivel de la superficie en presencia de ondas (generalmente no coincide con el nivel de reposo)

Las magnitudes características de una onda monocromática o de frecuencia única regular respecto de los puntos significativos antes definidos, son presentados a continuación:

- **Desplazamiento de la superficie libre  $\eta$** : Corresponde al desplazamiento vertical de la superficie del agua con respecto a un nivel medio de referencia NMR (MWL, siglas en inglés) .
- **Periodo de la onda,  $T$** : Corresponde al tiempo que transcurre hasta que se observa un punto idéntico en la superficie libre de la onda al observar su paso con respecto de un punto de referencia fijo.

- **Longitud de onda,  $L$ :** Distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos de la superficie libre en un instante determinado. .
- **Amplitud de la cresta,  $A_c$ :** Distancia vertical máxima entre el nivel de reposo y la cresta.
- **Amplitud del Seno,  $A_s$ :** Distancia vertical máxima entre el nivel de reposo y el seno de la onda.
- **Altura de onda,  $H$ :** Distancia vertical entre la cresta y el seno de la onda. Se puede obtener como la suma de la amplitud de las cresta  $A_c$  más la amplitud del seno  $A_s$ .

- **Número de onda,  $k_w$ :**

$$k_w = \frac{2\pi}{L} (1/m) \quad (2.1)$$

- **Frecuencia angular,  $\omega$ :**

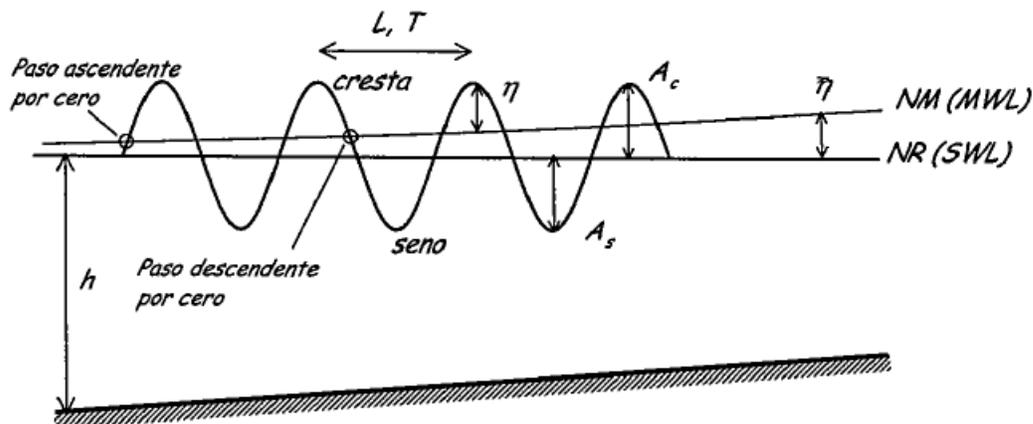
$$\omega = \frac{2\pi}{T} (1/s) \quad (2.2)$$

- **Frecuencia cíclica,  $f$ :**

$$f = \frac{1}{T} (Hz) \quad (2.3)$$

- **Celeridad o Velocidad de fase,  $C$ :** Corresponde a la velocidad de propagación de la onda, tal que:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} (m/s) \quad (2.4)$$



### 2.1.1. Definición de parámetros adimensionales

Con el objetivo de caracterizar el movimiento de las ondas, se establecen parámetros adimensionales obtenidos como cocientes de las magnitudes representativas de las mismas. Estos parámetros son:

- **Peralte,  $\varepsilon$ :** Da la variación del movimiento vertical de la onda en una longitud de onda.

$$\varepsilon = kA \text{ o } H/L \text{ o } kH$$

- **Altura relativa,  $\delta$ :** Indica la importancia de la variación vertical de la onda respecto a la profundidad.

$$\delta = A/h \text{ o } H/h$$

- **Profundidad relativa,  $\mu$ :** Muestra la penetración del movimiento de la onda con la profundidad. Sirve como medida de la dispersividad de la ondas pues, indica si la celeridad está afectada o no por el periodo de las ondas.

$$\mu = kh \text{ o } h/L$$

Se denomina onda de pequeña amplitud, amplitud infinitesimal o lineal, cuando la altura de la onda  $H$  es pequeña respecto de  $L$  o  $h$ , es decir:

$$\varepsilon = H/L \ll 1 \text{ o } \delta = H/h \ll 1$$

Además, de acuerdo al parámetro de profundidad relativa  $\mu$  las ondas se clasifican en:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad \text{profundidades indefinidas}$$

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad \text{profundidades intermedias}$$

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad \text{profundidades reducidas}$$

A partir de los parámetros anteriores se pueden clasificar las ondas en dos regímenes bien diferenciados: el régimen de Stokes y el régimen de onda larga. El régimen de Stokes ( $\mu \geq 1$ ) se corresponde con profundidades intermedias e indefinidas, es decir, problemas en los que la longitud de onda no es muy grande en comparación con la profundidad.

El régimen de onda larga ( $\mu \ll 1$ ) se corresponde con profundidades reducidas, es decir, casos en los que la longitud de onda es grande en comparación con la profundidad.

### 2.1.2. Teoría lineal de olas

La teoría lineal o de primer orden en el régimen de Stokes es una primera aproximación al problema general de las ondas planteado anteriormente. Una de las posibles soluciones del potencial  $\Phi$  correspondiente a una onda propagándose en el sentido positivo del eje  $x$ , se expresa como:

$$\Phi(x, z, t) = -\frac{Ag \cosh k_w(h+z)}{\omega \cosh k_w h} \sin(k_w x - \omega t) \quad (2.5)$$

Donde  $A$  es la amplitud de la onda,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $k_w$  es el número de onda y  $g$  es la aceleración de gravedad.

El valor de la longitud de onda  $L$  se puede obtener de una aproximación de la ecuación de dispersión de Fenton y Mckee, (1990):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \left[ \tanh \left( 2\pi \frac{\sqrt{(h/g)}}{T} \right)^{3/2} \right]^{2/3} \quad (2.6)$$

Esta aproximación es exacta en profundidades reducidas e indefinidas y en profundidades intermedias da resultados con un error menor de 1.7%.

Profundidad de agua			
Parámetro	Indefinida $h > \lambda/2$	Intermedia $\lambda/2 > h > \lambda/20$	Reducida $h < \lambda/20$
Long. de onda, $\lambda$	$\frac{gT^2}{2\pi}$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh(k_w h)$	$T\sqrt{gh}$
Celeridad, $c$	$\frac{gT}{2\pi}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh(k_w h)$	$\sqrt{gh}$
Velocidad de grupo, $c_g$	$c/2$	$\frac{c}{2} \left(1 + \frac{2k_w h}{\sinh k_w h}\right)$	$c$
Energía de ola/unidad de área $E = \frac{1}{2}\rho g a^2 (J/m^2)$	Potencia de ola/unidad de largo $P = E c_g (kW/m)$		

**Tabla 2.1:** Parámetros de oleaje de acuerdo a la profundidad [7].

## 2.2. Movimiento de un cuerpo en el mar

El movimiento de un cuerpo flotante en el mar consta de 6 grados de libertad . Estos pueden ser de traslación:

1. Heave/Tirón: Movimiento oscilatorio traslacional paralelo al eje vertical de un cuerpo flotante causado por un desplazamiento o excitación de la posición de reposo a lo largo del eje vertical.
2. Surge/Oleaje: Movimiento traslacional paralelo al eje horizontal longitudinal de un cuerpo flotante causado por la excitación o desplazamiento en la dirección del eje longitudinal desde su posición de equilibrio.
3. Sway/Balanceo: Movimiento traslacional paralelo al eje horizontal transversal de un cuerpo flotante causado por una excitación o desplazamiento en la dirección del eje transversal desde su posición de equilibrio.

De rotación:

1. Pitch/Cabeceo: Movimiento oscilatorio de rotación sobre el eje horizontal transversal de un cuerpo flotante debido a una excitación o desplazamiento desde su posición de equilibrio.
2. Roll/Alabeo: Movimiento oscilatorio de rotación sobre el eje horizontal longitudinal de un cuerpo flotante debido a la excitación o desplazamiento desde su posición de equilibrio.

3. Yaw/Guiñada: Movimiento oscilatorio de rotación sobre el eje vertical de un cuerpo flotante causado por una excitación o desplazamiento desde su punto de equilibrio..

### 2.2.1. Ecuación de movimiento de un absorbedor puntual

El comportamiento de un absorbedor puntual en presencia de oleaje puede ser comparado con el de un oscilador mecánico, compuesto por un sistema masa-resorte amortiguado, con un grado de libertad (restringido al vertical), sometido a una fuerza externa en dirección del grado de libertad. El sistema es amortiguado linealmente con un coeficiente de amortiguación  $b_d$ , una fuerza externa armónica es aplicada al sistema, con una amplitud  $F_A$  y una frecuencia angular  $\omega$ . De acuerdo a la ley de newton la ecuación del sistema se expresa como:

$$m \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right) + b_d \left( \frac{dy}{dt} \right) + ky = F_A \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

Donde  $m \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right)$ , corresponde a la fuerza inercial;  $b_d \left( \frac{dy}{dt} \right)$ , corresponde a la fuerza de amortiguación;  $ky$ , corresponde a la fuerza de restauración;  $F_A \sin(\omega t)$ , corresponde a la fuerza externa.

La oscilación es críticamente amortiguada cuando el sistema retorna a su posición de equilibrio de la manera más rápida posible, sin vibración alrededor de la posición de equilibrio. Para este caso se puede definir el coeficiente de amortiguación crítico  $b_c$ , tal que:

$$b_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (2.8)$$

Donde  $k$  es la constante asociada a la fuerza de restauración,  $m$  la masa del sistema, y  $\omega_n$  la frecuencia natural del sistema. Se define además, la relación de amortiguación  $\zeta_d$  como la relación entre el coeficiente de amortiguación del sistema  $b_d$  y el coeficiente de amortiguación crítico  $b_c$ , tal que  $\zeta_d = \frac{b_d}{b_c}$ .

Cuando  $\zeta_d < 1$  el sistema es llamado sistema sub-amortiguado, y se caracteriza porque retorna a su posición de equilibrio de manera oscilatoria. Un absorbedor puntual restringido al movimiento vertical puede ser considerado generalmente de este tipo.

Debido a la acción de la ola, la boya/absorbedor puntual tiene una posición y respecto de su posición de equilibrio. De acuerdo a la segunda ley de Newton, y considerando un sistema desacoplado, la ecuación de movimiento de la boya puede ser escrita como:

$$m \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right) = F_{ex} + F_{rad} + F_{res} \quad (2.9)$$

Donde  $m$  es la masa de la boya y  $\left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right)$  es la aceleración de la boya.

- $F_{ex}$ , es la fuerza de excitación de la ola. Está compuesta por las fuerzas de difracción y las fuerzas de Froude-Krylov.
  - La fuerza de difracción es la fuerza creada por la difracción de las olas que se produce por el choque de una ola incidente en el cuerpo flotante.
  - La fuerza de Froude-Krylov es la fuerza que se obtiene suponiendo que el cuerpo es lo suficientemente pequeño para no afectar el campo de presiones que hay debido a una ola incidente, de esta forma, se desprecian los efectos de difracción y radiación por completo. Por lo tanto se asocia al potencial inherente de la ola.
- $F_{rad}$ , es la fuerza de radiación. De acuerdo a la teoría lineal, esta puede ser descompuesta en un término de masa agregada y un término de amortiguación hidrodinámica lineal, tal que:

$$F_{rad} = -m_a(\omega) \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right) - b_{hyd}(\omega) \left( \frac{dy}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Cuando un cuerpo oscila en agua inicialmente quieta se genera una ola por radiación que es una superposición (combinación lineal) de las olas irradiadas por cada uno de los 6 modos de oscilación. La fuerza de reacción sobre el cuerpo es llamada fuerza de radiación.

Además, cuando el cuerpo se mueve en el fluido es necesario que éste desplace fluido para hacerse camino en éste, creándose una fuerza que se opone a su movimiento, de donde proviene la masa agregada. La masa agregada corresponde entonces a la masa de fluido que se mueve con la aceleración del cuerpo.

- $F_{res}$  corresponde a la fuerza de restauración hidroestática. Equivale a la Fuerza de Arquimides  $F_{arch}$  menos la fuerza de gravedad  $F_g$ . Esta fuerza corresponde a la fuerza de resorte. Con una constante de resorte lineal  $k$ , la fuerza de restauración hidroestática puede ser expresada como:

$$F_{res} = F_{arch} - F_g = \rho g V(t) - mg = -ky \quad (2.11)$$

La constante del resorte o fuerza de restauración, o coeficiente de restauración hidroestática es expresado como:  $k = \rho g A_w$ , donde  $A_w$  es el área plana de la línea de agua.

- $F_{PTO}$  corresponde a la fuerza asociada a la acción del circuito de potencia o power take off (PTO). Puede considerarse como una fuerza de amortiguación tal que:

$$F_{PTO} = b_{ext} \left( \frac{dy}{dt} \right)$$

La ecuación (2.3) puede ser escrita como:

$$m \left( \frac{d^2y}{dt^2} \right) + (b_{hyd}(\omega) + b_{ext}) \left( \frac{dy}{dt} \right) + ky(t) = F_{ext}(\omega t) \quad (2.12)$$

La solución estacionaria para la ecuación (2.6) viene dada por la expresión:

$$y = y_A \sin(\omega t + \beta_{mot}) \quad (2.13)$$

Donde  $y_A$  y  $\beta_{mot}$  vienen dado por:

$$z_A(\omega) = \frac{F_{ex,A}(\omega)}{\sqrt{[k - (m + m_a(\omega))\omega^2]^2 + [(b_{hyd}(\omega) + b_{ext})\omega]^2}} \quad (2.14)$$

$$\beta_{mot} = \beta_{Fex} - \arctan \left( \frac{(b_{hyd}(\omega) + b_{ext})\omega}{k - (m + m_a(\omega))\omega^2} \right) \quad (2.15)$$

Con la ecuación anterior se puede obtener una expresión para la velocidad:

$$v_A(\omega) = \frac{dy}{dt} = \omega z_A(\omega) \cos(\omega t + \beta_{mot}) \quad (2.16)$$

y para la aceleración

$$a_A(\omega) = \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 z_A(\omega) \sin(\omega t + \beta_{mot}) \quad (2.17)$$

### 2.2.2. Absorción de potencia

Un cuerpo oscilando armónicamente se asume con una velocidad  $v$  y sometido a una fuerza  $F(t)$  tal que:

$$F(t) = F_A \cos(\omega t - \beta_F) \quad (2.18)$$

$$v = v_A \cos(\omega t - \beta_F) \quad (2.19)$$

La potencia promedio sobre un período  $T$ , puede ser expresada como:

$$P_{prom} = \frac{1}{2} F_A v_A \cos(\beta_F - \beta_v) \quad (2.20)$$

La potencia absorbida promedio de un absorbedor puntual es igual a la potencia de excitación promedio menos la potencia de radiación promedio:

$$P_{abs,prom} = P_{ex,prom} - P_{rad,prom} \quad (2.21)$$

La potencia de excitación promedio puede ser expresada como:

$$P_{ex,prom} = \frac{1}{2} F_{ex,A} v_A \cos \gamma \quad (2.22)$$

Con  $\gamma = \beta_F - \beta_v$ , la diferencia de fase entre  $F_{ex,A}$  y  $v_A$ . A su vez, la potencia de radiación promedio puede ser expresada como:

$$P_{rad,prom} = \frac{1}{2} b_{hyd} v_A^2 \quad (2.23)$$

Por lo tanto, la absorción de potencia promedio viene dada por la expresión:

$$P_{abs,prom} = \frac{1}{2} F_{ex,A} v_A \cos \gamma - \frac{1}{2} b_{hyd} v_A^2 \quad (2.24)$$

También se puede expresar la absorción de potencia promedio en función del PTO:

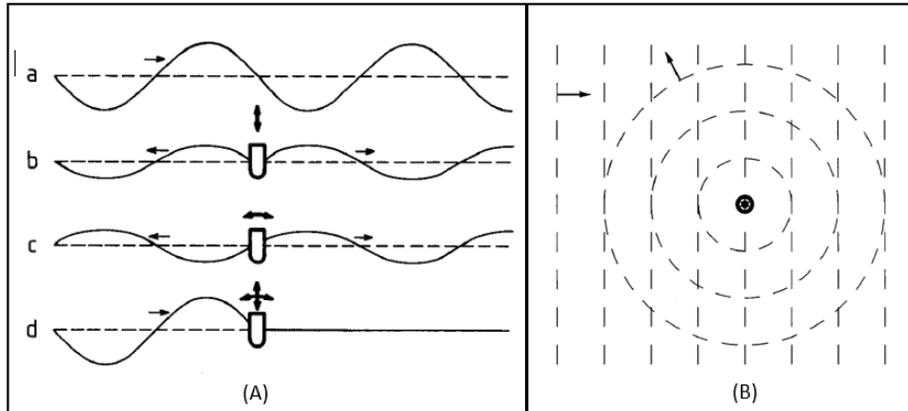
$$P_{abs,prom} = \frac{1}{2} b_{ext} v_A^2 = \frac{1}{2} b_{ext} \omega^2 z_A^2 \quad (2.25)$$

### 2.2.3. Oscilación óptima para máxima captura de energía

Un cuerpo oscilando en el agua actúa como un generador de olas. Este hecho en principio se puede utilizar para la conversión de energía a partir del oleaje, logrando incluso que el cuerpo alcance mayor amplitud de oscilación que la ola incidente.

En orden de lograr una mayor absorción de energía es necesario que exista un desplazamiento de agua en una fase tal que se produzca una cancelación o reducción de olas que pasan a través

del dispositivo o que son reflejadas por él. Dicha cancelación o reducción se logra siempre que el dispositivo genere olas con fase opuesta a la de las olas incidentes o reflejadas, es decir, que interfieran destructivamente.



**Figura 2.1:** Absorción de energía de un absorbedor puntual.

En la figura 2.1.A se ilustra un ejemplo con una absorción de energía unidimotriz del 100%. Corresponde a una línea infinita de pequeños cuerpos flotantes oscilando vertical y horizontalmente de manera óptima, igualmente espaciados unos de otros a pequeña distancia (menor a la longitud de onda) y de sección transversal perpendicular al plano de la figura. La curva *a* representa una ola incidente no perturbada. La curva *b* ilustra la generación de una ola simétrica a partir de un arreglo recto de pequeños cuerpos oscilantes en modo heave (arriba y abajo), igualmente espaciados. la curva *c* ilustra la generación de una ola antisimétrica. La curva *d* representa la superposición de las tres curvas anteriores, ilustra la absorción completa de la energía de la ola incidente[8].

En la Figura 2.1.B se muestra un absorbedor puntual oscilando en sentido vertical (heave) visto desde arriba, el cual debe radiar ondas circulares que interfieran destructivamente con el plano de la ola incidente para lograr la absorción de energía.

Se puede demostrar teóricamente [9] que sólo el 50% de absorción de energía es posible si solo se produce ondas simétricas radiadas como se muestra en la curva *b* de la figura 2.1.A por el movimiento de un cuerpo flotante en el eje vertical (heave). De igual modo, si sólo existe la onda antisimétrica radiada por el cuerpo flotante simétrico (curva *c*), una absorción mayor al 50% resulta teóricamente imposible.

Un cuerpo suficientemente no simétrico oscilando en un sólo modo puede tener la habilidad de absorber casi el total de la energía de la ola incidente [10].

Un absorbedor puntual en modo de oscilación *heave* se caracteriza por ser de una extensión muy pequeña respecto de la longitud de onda de la ola incidente[11]. Asociado a este principio de conversión energética se define el **ancho de absorción** o **largo de absorción**, denotado por  $\lambda_p$ , como la longitud de la cresta sobre la cual la potencia disponible total corresponde con la potencia absorbida, o en otras palabras, la razón entre la potencia absorbida y la potencia disponible promedio por unidad de longitud de cresta:

$$\lambda_p = \frac{P_{abs}}{P_{disp}} = \frac{2L}{\pi} \frac{(b_{hyd}(\omega) + b_{ext})\omega^2}{[k - (m + m_a(\omega)\omega^2)]^2 + (b_{hyd} + b_{ext})^2\omega^2} \quad (2.26)$$

Dividiendo el ancho de absorción por el diámetro del dispositivo se obtiene la eficiencia de absorción. Esta puede ser incluso mayor al 100%, lo que se conoce como “efecto de punto absorbedor” o “efecto antena” y se explica por el hecho de que el punto absorbedor es capaz de absorber una fracción mayor de potencia que la disponible sobre su diámetro.

En olas regulares con longitud de onda  $L$ , el ancho de absorción máximo de un punto absorbedor restringido al movimiento vertical (*heave*), es teóricamente, de acuerdo a la teoría lineal, igual a:

$$\lambda_{p,max} = \frac{L}{2\pi} \quad (2.27)$$

Para un cuerpo axisimétrico con tres grados de libertad: *heave*, *surge*, *sway*, el máximo ancho de absorción es igual a:

$$\lambda_{p,max} = \frac{3L}{2\pi} \quad (2.28)$$

El máximo de absorción de potencia ocurre cuando al derivar la ecuación 2.27 respecto de la velocidad es cero, es decir:  $dP_{abs,prom}/dv_a = 0$ . Lo anterior implica que la amplitud óptima de la velocidad sea:

$$v_a = \frac{F_{ex,A}}{2b_{hyd}} \cos \gamma \quad (2.29)$$

Consecuentemente el valor máximo de la potencia de absorción promedio es:

$$P_{abs,prom,max} = \frac{|F_{ex,A}|^2}{8b_{hyd}} \cos(\gamma) \quad (2.30)$$

Así, el desfase óptimo se obtiene para  $\gamma = 0$ , cuando la velocidad de la boya está en fase con la fuerza de excitación de la ola en modo *heave*. Esto significa que la frecuencia angular del sistema es igual a la frecuencia angular natural  $\omega_n$ , es decir, cuando el sistema logra una resonancia con la ola incidente dentro de un rango de frecuencias, lo que se conoce como ancho de banda de resonancia del sistema.

### Desempeño de captura de energía

La potencia de entrada disponible de una ola monocromática viene dada por la siguiente expresión:

$$Potencia = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{32\pi} (W/m) \quad (2.31)$$

La cantidad de flujo de energía disponible para un convertidor energético puede ser expresada de las siguientes dos formas:

1. Ancho del casco: Corresponde a la potencia por unidad de largo de frente de ola ( $W/m$ ), el cual se multiplica por una longitud apropiada tomada del dispositivo para definir la potencia total de entrada.

## 2. Ancho de captura:

Se deriva de la potencia de la máquina el flujo de energía de la ola:

$$C_w = \frac{\text{Potencia dispositivo}(W)}{\text{Potencia ola/unidad del largo}(W/m)}(m) \quad (2.32)$$

Se puede definir el ancho de captura como una relación entre el ancho del dispositivo ( $D_L$ ) perpendicular al frente de ola:

$$\text{ratio} = \frac{C_w}{D_L} \quad (2.33)$$

## 2.3. Modelación física

La modelación física del absorbedor puntual contempla el análisis de un sistema semejante reducido/simplificado, es decir un modelo, frente a la realidad, prototipo, con el fin de simular las situaciones reales que se producen en este último y cuyo comportamiento se desea conocer.

Este procedimiento tiene una base teórica en el análisis dimensional y las leyes de semejanza de las que se desprenden las relaciones básicas de las diversas cantidades físicas incluidas en el movimiento y la acción dinámica del fluido. El modelo físico a evaluar es una réplica a escala del dispositivo que representa, que respeta principios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

### Modelo de semejanza de Froude

El número de Froude representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias. Para un prototipo de un absorbedor puntual, dado que dicho fenómeno está determinado principalmente por las fuerzas gravitacionales, se acepta que la semejanza dinámica esté dada para el modelo  $Fr = 1$ , siendo Fr la relación de los números de Froude entre modelo y prototipo, lo que implica que las demás escalas estarán gobernadas por esta ecuación.

$$Fr = \sqrt{\frac{v}{gL}} \quad (2.34)$$

Donde  $v$  es la velocidad de corriente,  $g$  corresponde a la aceleración de gravedad y  $L$  una dimensión característica de la boya.



# Capítulo 3

---

## METODOLOGÍA

---

### 3.1. General

En el presente capítulo se define la metodología experimental a desarrollar entorno al estudio de modelos de conversión de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual y su interacción frente a oleaje característico de la localidad de Punta Curaumilla, simulado en el canal de olas artificial de la Universidad de Valparaíso. La metodología propuesta tomó como referencia principal el documento "Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems" [7] propuesto por el European Marine Energy Centre (EMEC) para el estudio de sistemas de conversión undimotriz en etapas iniciales. Esta metodología se fundamenta en la teoría de modelación física y el principio de similitud de Froude mediante cumplimiento de los criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, para el estudio del fenómeno del prototipo a través del análisis de las magnitudes fundamentales que intervienen en el modelo.

De acuerdo a lo anterior se trabajó con cinco modelos de boya:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ . El modelo  $A_1$  basa su diseño en el prototipo de boya cilíndrica propuesto por David Olivos en su trabajo de título: "Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación"[12], al cual se le aplicó un factor de escala  $\lambda = 1 : 50$ . Los modelos  $A_2$  y  $A_3$  surgen luego de añadir masa al interior del modelo  $A_1$ , modificando así su proporción de volumen sumergido a un 50% y 65% respectivamente.

Por otro lado, el modelo  $B_1$  se obtiene luego de invertir la relación diámetro/altura de los modelos  $A_i$  ( $i=1,2,3$ ) y de masa igual al modelo  $A_3$ , a modo de conseguir un diseño más esbelto y evaluar así su interacción bajo las mismas condiciones de oleaje impuesto para los modelos A. Luego el modelo  $B_2$ , surge de añadir masa al modelo  $B_1$ , modificando así su proporción de volumen sumergido.

Sobre cada uno de los modelos mencionados se realizan las P01-Prueba de plataforma seca y P02-prueba de plataforma húmeda, conducentes a validar las principales propiedades de

masa de cada modelo y su estabilidad en condiciones de flotabilidad estática. Posteriormente se realiza la prueba P03-Prueba de oscilación libre que tiene por objetivo caracterizar cada modelo en cuanto a su periodo natural de oscilación y sus principales parámetros hidrodinámicos, coeficiente de amortiguación hidrodinámica y masa agregada. Finalmente se realiza la prueba P04-Prueba de oscilación forzada, donde se enfrenta a cada modelo a diferentes estados de mar cuyas condiciones de oleaje regular monocromático varían en altura de ola significativa y periodo de oscilación.

Los resultados de las pruebas P03 y P04 fueron obtenidos mediante el software de rastreo Tracker, cuyos resultados fueron analizados entorno a parámetros cinemáticos y dinámicos.

Finalmente se extrapolan los resultados de la prueba P04-Prueba de oscilación forzada para cada uno de los modelos, donde se realizan tres análisis comparativos. El primero de ellos sobre el modelo  $A_1$  y su interacción con nueve estados de mar ( $E_{ij}$ ) representativos de las condiciones de oleaje más recurrentes de Punta Curaumilla. El segundo análisis es sobre los modelos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  y el estado de mar  $E_{22}$ , cuya altura significativa de ola y periodo de oscilación corresponden a las condiciones promedio de oleaje de acuerdo al estudio "Evaluación de Energía Undimoriz en la Costa Centro-Sur de Chile" [6]. Por último se comparan los resultados de los modelos  $B_1$  y  $B_2$  también para el estado de mar  $E_{22}$ .



**Figura 3.1:** Metodología de Investigación

## 3.2. Propósito de pruebas

Las pruebas diseñadas para ser aplicadas a cada modelo concuerdan con una fase inicial de desarrollo y están agrupadas en tres dimensiones. La primera dimensión se compone de las pruebas P01-Prueba de plataforma seca y P02-Prueba de plataforma húmeda. Estas tienen como finalidad validar las propiedades de masa del modelo y su estabilidad en condiciones de flotabilidad estática respectivamente. Posteriormente se realiza la prueba P03-Prueba de oscilación libre que tiene por objetivo caracterizar cada modelo en cuanto a su periodo natural de oscilación y sus principales parámetros hidrodinámicos como coeficiente de amortiguación hidrodinámica y masa agregada. Finalmente se realiza la prueba P04-Prueba de oscilación forzada, donde se enfrenta a cada modelo a diferentes estados de mar cuyas condiciones de oleaje regular monocromático varían en altura de ola significativa y periodo de oscilación, con el fin de obtener una visión detallada del comportamiento fenomenológico en cuanto a parámetros cinemáticos y dinámicos.

A continuación se presentan los parámetros a analizar agrupados en cuanto a la dimensión geométrica, cinemática y dinámica a la que pertenecen:

### Geometría:

1. Diámetro de la boya [ $m$ ]
2. Calado de la boya [ $m$ ]
3. Área plana de la boya [ $m^2$ ]
4. Volumen total, Volumen sumergido de la boya [ $m^3$ ]

### Cinemática:

1. Magnitud de desplazamiento medio vertical de la boya. [ $m$ ]
2. Desplazamiento horizontal [ $m$ ]
3. Componentes de velocidad horizontal, vertical y magnitud de velocidad de la boya [ $m/s$ ]
4. Componentes de aceleración horizontal, vertical y magnitud de aceleración de la boya [ $m/s^2$ ]

**Dinámica:**

1. Masa total de la boya [ $kg$ ].
2. Masa agregada [ $kg$ ]
3. Coeficiente de amortiguación hidrodinámico [ $kg/s$ ]
4. Fuerza neta de la boya [ $N$ ]
5. Potencia de oleaje disponible [ $W/m$ ]
6. Potencia absorbida de la boya [ $W$ ]

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 de acuerdo a lo referido en la sección 2.2.6 del marco teórico.

**3.2.1. Fase y escala usada**

La fase de prueba propuesta para el presente trabajo de investigación aborda la etapa inicial de un modelo a escala de un absorbedor puntual. Dadas las limitaciones físicas del canal de oleaje se decidió utilizar un factor de escala  $\lambda = 1 : 50$  para cumplir con los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica. Esto principalmente por que se intentó replicar las condiciones de oleaje de Punta Curaumilla, en particular a una profundidad de 21 [ $m$ ], lo que en el canal resulta una profundidad de 42 [ $cm$ ]. Este nivel de agua supone un valor adecuado para las exigencias que puede soportar la paleta generadora y las paredes del canal que contienen la masa de agua al interior de este.

Para establecer las relaciones de similitud entre modelo y prototip se escogió como número adimensional el número de Froude:

$$Fr = \sqrt{\frac{v}{gL}} \quad (3.1)$$

Dado que este número relaciona los parámetros inerciales y gravitacionales, bajo os cuales está determinada la relación entre el oleaje y un cuerpo flotante interactuando con este.

Dado lo anterior se establecen los siguientes relaciones de escalamiento, de acuerdo a lo propuesto en la bibliografía "Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems" [13]:

Parámetro	Dimensión	Froude
Geometria		
Largo	[L]	$\lambda$
Área	$[L^2]$	$\lambda^2$
Volumen	$[L^3]$	$\lambda^3$
Rotación	$[L^0]$	–
Cinemática		
Tiempo	[T]	$\sqrt{\lambda}$
Velocidad	$[LT^{-1}]$	$\sqrt{\lambda}$
Aceleración	$[LT^{-2}]$	–
Volumen de flujo	$[L^3T^{-1}]$	$\lambda^{5/2}$
Dinámica		
Masa	[M]	$\lambda^3$
Fuerza	$[MLT^{-2}]$	$\lambda^3$
Presión	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$\lambda$
Potencia	$[ML^2T^{-3}]$	$\lambda^{7/2}$

**Tabla 3.1:** Proporciones de escala de similitud [13]

### 3.2.2. Pruebas y objetivos de medición

#### 3.2.2.1. P01-Prueba de plataforma seca

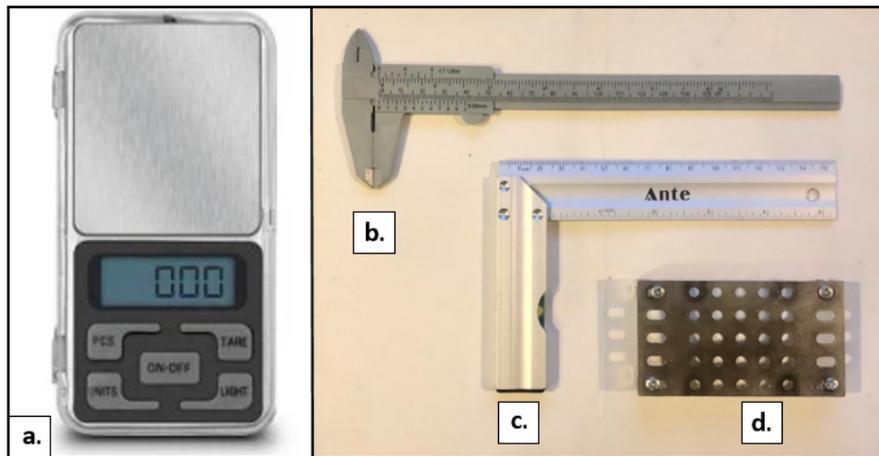
##### 1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar las principales propiedades de masa del modelo: **posición del centro de gravedad  $G$** , el cual será utilizado, junto con el segundo momento de área  $I_x, I_z$ , en el análisis para caracterizar la estabilidad de cada modelo en condiciones de flotabilidad estática.

##### 2. Insumos

- a) Pesa gramera digital marca Dblue. Características técnicas: Pantalla LCD con retroiluminación azul, calibración automática, rango de tara 0.01 a 200 [gr], temperatura de funcionamiento: 10° a 30° C.

- b) Pie de metro marca Karson. Sistema de medición análogo, rango de medición 0-150 [mm], resolución 0,05 [mm].
- c) Escuadra metálica marca Ante. Rango de medición 0-150 [mm], resolución 1,0 [mm].
- d) Plataforma metálica.



**Figura 3.2:** a. Pesa gramera digital, b. Pie de metro, c. Escuadra metálica, d. Plataforma metálica.

### 3. Procedimientos de pruebas

Para determinar la posición del centro de gravedad  $G$  de cada modelo, se realiza el método de balance suspensión el cual consiste en los siguientes pasos aplicables a cada modelo:

- Para cada modelo (salvo el modelo  $A_1$ ), se debe depositar arena en su interior de acuerdo a las especificaciones de masa de la sección 3.3.2. Este valor se verifica con la gramera digital (figura 3.2 a.).
- Una vez que se consigue el valor de masa adecuado para el modelo, se debe ubicar el dispositivo en el borde de la plataforma metálica (figura 3.2 d.) apoyando el manto del cilindro con la superficie plana de tal forma que el área transversal del cilindro es perpendicular a esta. Para asegurar una correcta posición del modelo se utiliza la escuadra metálica (figura 3.2 c.) para empujar el modelo hacia el borde de la plataforma hasta lograr el balance deseado.

- Una vez conseguido el balance del modelo en el borde de la superficie metálica se registra, utilizando el pie de metro (figura 3.2 b.), el valor de la longitud del manto del cilindro que alcanza a ser apoyada sobre la superficie. Con esto se obtiene la longitud a la que se ubica el centro de gravedad del modelo respecto de la base del cilindro.
- Se realiza el mismo procedimiento apoyando sobre la superficie tres diferentes puntos del manto del cilindro del modelo y se calcula el valor promedio correspondiente a la posición experimental del CoG sobre el eje vertical.

### 3.2.2.2. P02-Prueba de plataforma húmeda - Estabilidad estática

#### 1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar la longitud del manto del cilindro sumergida del modelo (calado) en condiciones de flotabilidad estática, a partir del cual se determinará la posición del centro de boyantez. Estos parámetros serán utilizados posteriormente en el análisis para determinar los valores de altura metacéntrica y posición del metacentro de cada modelo.

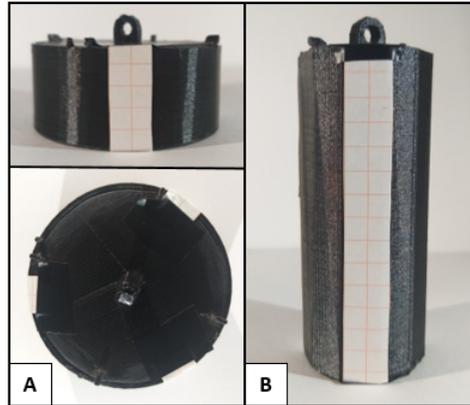
#### 2. Insumos

- Pesa gramera digital marca Dblue. Características técnicas: Pantalla LCD con retroiluminación azul, calibración automática, rango de tara 0.01 a 200 [gr], temperatura de funcionamiento: 10° a 30° C.
- Pie de metro marca Karson. Sistema de medición análogo, rango de medición 0-150 [mm], resolución 0,05 [mm].
- Recipiente de plástico.
- Papel milimetrado.
- Cinta adhesiva negra.

#### 3. Procedimiento

- Para cada modelo (salvo el modelo  $A_1$ ), se debe depositar arena en su interior de acuerdo a las especificaciones de masa de la sección 3.3.2. Este valor se verifica con la gramera digital (Figura 3.2 a.).
- Una vez conseguido el valor de masa requerido para cada modelo se pegan sobre el manto del cilindro tres franjas de papel milimetrado de tal forma que queden equidistantes unas de otras, tal como se muestra en la figura 3.3.

- Luego se deposita suavemente el modelo en el recipiente de plástico que previamente fue llenado con agua.
- Posteriormente se retira el modelo del agua y con ayuda del pie de metro se mide la porción de papel milimetrado que se sumergió. Se registran los valores medidos y se obtiene un valor promedio que corresponde al calado de cada modelo.



**Figura 3.3:** Configuración experimental prueba P02-Prueba de plataforma húmeda, modelo A y B.

### 3.2.2.3. P03-Prueba de oscilación libre-Estabilidad dinámica

#### 1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar el periodo natural de oscilación vertical (heave) de cada modelo. Además, revela la cantidad de amortiguación hidrodinámica presente, la cual reduce la cantidad de movimiento en el tiempo, mediante el coeficiente de amortiguación hidrodinámico. Junto con lo anterior, de esta prueba se obtiene el valor de masa agregada  $m_a$  asociado a cada modelo en condiciones de oscilación libre, es decir, sin perturbación de oleaje.

#### 2. Variables a medir

- Periodo natural de oscilación de la boya  $[s]$  (modo heave).
- Frecuencia natural de oscilación  $\omega_n [rad/s]$
- Frecuencia natural de oscilación amortiguada  $\omega_d [rad/s]$
- Coeficiente de amortiguación hidrodinámico  $b_{hyd} [kg/s]$ .
- Masa agregada,  $m_a [kg]$ .

### 3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.
- Pesa gramera digital marca Dblue. Características técnicas: Pantalla LCD con retroiluminación azul, calibración automática, rango de tara 0.01 a 200 [gr], temperatura de funcionamiento: 10° a 30° C.
- Cámara de video Gopro HERO 5, 4K a 30fps nativo 1080p a 120fps.
- Software de rastreo Tracker.

### 4. Procedimiento

- Para cada modelo (salvo el modelo  $A_1$ ), se debe depositar arena en su interior de acuerdo a las especificaciones de masa de la sección 3.3.2. Este valor se verifica con la gramera digital (Figura 3.2 a.).
- Se deposita el modelo en el agua y se sumerge de forma tal que la línea de agua quieta no supere la cara superior de la boya.
- Una vez sumergido el modelo se suelta y se permite que retorne naturalmente a su posición de equilibrio.
- EL movimiento del modelo es registrado con la cámara video digital para ser analizado posteriormente con el software de rastreo Tracker.
- Este procedimiento se repite para cada modelo.

De la curva de decaimiento exponencial que trazan los peaks de oscilación (figura 3.4) es posible determinar el periodo natural medio  $T_n$  de la boya promediando los intervalos de tiempo comprendidos entre los máximos locales consecutivos, y en consecuencia, la frecuencia natural de oscilación  $\omega_n$  para cada modelo. A partir del valor de frecuencia natural  $\omega_n$  y el coeficiente de restauración hidrostático  $k$  es posible obtener el valor de masa agregada  $m_a$  mediante la ecuación:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m + m_a}} \quad (3.2)$$

Donde  $m$  corresponde a la masa del modelo. Luego, mediante un ajuste exponencial de la forma:

$$y = S_a e^{-\nu t} \quad (3.3)$$

Se obtienen los valores de amplitud de decaimiento exponencial  $S_a$  y constante de decaimiento  $\nu$ . Finalmente, es posible calcular el coeficiente de amortiguación hidrodinámico ( $b_{hyd}$ ) mediante la ecuación:

$$\nu = \frac{b_{hyd}}{2(m + m_a)} \quad (3.4)$$

Adicionalmente se obtienen los valores de frecuencia de oscilación amortiguada  $\omega_d$ , que se define como:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \nu^2} \quad (3.5)$$

#### 3.2.2.4. P04-Prueba de oscilación forzada

##### 1. Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar los parámetros cinemáticos (desplazamiento, velocidad y aceleración) y dinámicos (fuerza neta y potencia) asociados al movimiento de la boya inducido por oleaje regular monocromático en el canal de olas, mientras esta se encuentra flotando libremente en el agua. Además se obtienen las magnitudes de desempeño de captura de energía de cada dispositivo.

##### 2. Variables a medir

- Amplitud de desplazamiento medio vertical [ $mm$ ].
- Velocidad vertical  $v_x$ , velocidad horizontal  $v_y$  y magnitud de velocidad\* de la boya  $v$  en [ $mm/s$ ].
- Aceleración vertical  $a_y$ , aceleración horizontal  $a_x$  y magnitud de aceleración\* de la boya  $a$  en [ $mm/s^2$ ].
- Fuerza neta de la boya en [ $N$ ].
- Potencia de oleaje disponible [ $W/m$ ].
- Potencia de la boya [ $W$ ].
- Desempeño de captura de energía  $C_w/D[-]$ .

\*Las magnitudes de cada variable se obtienen luego de considerar sus componentes en el plano XY.

### 3. Insumos

- Canal de olas de la Universidad de Valparaíso.
- Pesa gramera digital marca Dblue. Características técnicas: Pantalla LCD con retroiluminación azul, calibración automática, rango de tara 0.01 a 200 [gr], temperatura de funcionamiento: 10° a 30° C.
- Cámara de video Gopro HERO 5, 4K a 30fps nativo 1080p a 120fps.
- Software de rastreo Tracker.

### 4. Procedimiento

- Se registran las condiciones ambientales antes de comenzar cada una de las pruebas de oleaje de acuerdo a la siguiente tabla:

Código prueba	Hora	T° ambiental	% Humedad	P. atmosférica

**Tabla 3.2:** P04-Prueba de oscilación forzada: Condiciones ambientales de laboratorio

- Calibración de oleaje: Se determinan los parámetros de voltaje necesarios para inducir el oleaje deseado de acuerdo a la tabla 3.15.
- Por otro lado, para cada modelo (salvo el modelo  $A_1$ ), se debe depositar arena en su interior de acuerdo a las especificaciones de masa de la sección 3.3.2. Este valor se verifica con la gramera digital (Figura 3.2 a.).
- Una vez realizadas las pruebas de calibración de oleaje, se sitúa la boya libremente en agua inicialmente quieta de acuerdo a la configuración experimental detallada en la sección 3.5.1.
- Una vez situado el modelo en el canal se induce un tren de oleaje monocromático de acuerdo a los parámetros señalados en la tabla 3.15 para cada estado de mar durante un tiempo de 4 minutos. El movimiento de la boya se registra con una cámara de video en la parte frontal del canal, para luego ser analizado con el software de rastreo Tracker. Este procedimiento se repite para cada modelo antes de cambiar al siguiente estado de mar, para lo cual es necesario esperar un tiempo aproximado de 1 minuto para que el agua retorne a su estado de equilibrio.

El orden en el que se realizan las pruebas para cada modelo y el correspondiente estado de mar se detalla a continuación:

Orden de ejecución	Estado de mar	Modelo	Tiempo de duración
1°	$E_{11}$	Oleaje sin boya	4 [min]
2°	$E_{11}$	$A_1$	4 [min]
3°	$E_{11}$	$A_2$	4 [min]
4°	$E_{11}$	$A_3$	4 [min]
5°	$E_{12}$	Oleaje sin boya	4 [min]
6°	$E_{12}$	$A_1$	4 [min]
7°	$E_{12}$	$A_2$	4 [min]
8°	$E_{12}$	$A_3$	4 [min]
9°	$E_{13}$	Oleaje sin boya	4 [min]
10°	$E_{13}$	$A_1$	4 [min]
11°	$E_{13}$	$A_2$	4 [min]
12°	$E_{13}$	$A_3$	4 [min]
13°	$E_{21}$	Oleaje sin boya	4 [min]
14°	$E_{21}$	$A_1$	4 [min]
15°	$E_{21}$	$A_2$	4 [min]
16°	$E_{21}$	$A_3$	4 [min]
17°	$E_{22}$	Oleaje sin boya	4 [min]
18°	$E_{22}$	$A_1$	4 [min]
19°	$E_{22}$	$A_2$	4 [min]
20°	$E_{22}$	$A_3$	4 [min]
21°	$E_{23}$	Oleaje sin boya	4 [min]
22°	$E_{23}$	$A_1$	4 [min]
23°	$E_{23}$	$A_2$	4 [min]
24°	$E_{23}$	$A_3$	4 [min]
25°	$E_{31}$	Oleaje sin boya	4 [min]
26°	$E_{31}$	$A_1$	4 [min]
27°	$E_{31}$	$A_2$	4 [min]
28°	$E_{31}$	$A_3$	4 [min]
29°	$E_{32}$	Oleaje sin boya	4 [min]
30°	$E_{32}$	$A_1$	4 [min]
31°	$E_{32}$	$A_2$	4 [min]
32°	$E_{32}$	$A_3$	4 [min]
33°	$E_{33}$	oleaje sin boya	4 [min]
34°	$E_{33}$	$A_1$	4 [min]
35°	$E_{33}$	$A_2$	4 [min]
36°	$E_{33}$	$A_3$	4 [min]

Análogamente se realizan las pruebas de oleaje para los modelos  $B_1$  y  $B_2$  para las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , dado que representa el escenario de mayor ocurrencia en condiciones reales.

Orden de ejecución	Estado de mar	Modelo	Tiempo de duración
1°	$E_{22}$	Oleaje sin boya	4 [min]
2°	$E_{22}$	$B_1$	4 [min]
3°	$E_{22}$	$B_2$	4 [min]

**Tabla 3.3:** P04-Prueba de oscilación forzada: Programa de pruebas modelo  $B_1$ ,  $B_2$ .

La configuración general del experimento, las características generales del canal de olas en tanto generación de oleaje y componentes principales se especifican en la sección 3.5 Instalaciones de prueba. De igual modo se describe el registro de las pruebas conducidas mediante cámara digital de video y el software de rastreo Tracker para el análisis del fenómeno de estudio.

### 3.2.3. Plan y programación de trabajo

La programación del trabajo se dividió en dos grupos. Una primera parte contiene aquellas actividades en donde no se requiere el uso del canal de oleaje, dichas actividades son:

1. Diseño y fabricación del modelos tipo A y B.
2. P01-Prueba de plataforma seca- Validación de propiedades de masa modelos:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ .
3. P02- Prueba de plataforma húmeda- Estabilidad estática modelo:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ .

Por otro lado, se agruparon las actividades en las que se requiere el uso del canal de olas, estas son:

1. P03-Prueba de oscilación libre-Estabilidad dinámica modelos:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ .
2. P04- Prueba de oscilación forzada modelos:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ .

En cuanto al uso del canal se programó el trabajo en cuatro días en función de la optimización del tiempo destinado a realizar cada una de las pruebas descritas:

- **Fecha:** 14 de abril 2021
- **Actividad:** Preparación del canal de oleaje
- **Descripción:**

En el primer día de trabajo se pretende preparar la instalación para llevar a cabo las pruebas P03-Prueba de oscilación libre y P04-Prueba de oscilación forzada. Para esto es necesario realizar los siguientes procedimientos:

1. Situar al final de canal de oleaje, en el lado opuesto de la paleta generadora, la playa y el disipador de oleaje a fin de mitigar el efecto la interferencia de las olas reflejadas en la pared posterior del canal.
2. Realizar una mantención al pistón de la paleta generadora previo a su utilización verificando el depósito de grasa y añadiendo lubricante WD40 en el eje del pistón.
3. Llenar el tanque de agua del canal hasta conseguir la profundidad deseada de 42 [cm].
4. Instalar cámara frontal para el registro de las pruebas que serán conducidas de acuerdo a la configuración que se detalla en la sección 3.5.6. Además, realizar una limpieza de la pared frontal del canal para mejorar el registro visual.
5. Instalar los resistores de monitoreo de oleaje de acuerdo a lo especificado en la sección 3.5.1.

- **Fecha:** 21 de abril 2021
- **Actividad:** P04-Prueba de oscilación forzada.
- **Descripción:**

En esta etapa comienzan las pruebas de canal, partiendo por la prueba P04-Prueba de oscilación forzada. Comenzando con el estado de mar  $E_{11}$  sin boya. Dado el tiempo estimado de ejecución de 30 minutos para cada estado de mar en esta jornada se evalúan los estados:  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{13}$ ,  $E_{21}$ ,  $E_{22}$ ,  $E_{23}$ ,  $E_{31}$ ,  $E_{32}$ . Con un tiempo total de 4 horas de ejecución de pruebas.

- **Fecha:** 23 abril 2021
- **Actividad:** P04-Prueba de oscilación forzada.
- **Descripción:**

En esta jornada se ejecutan las pruebas restantes definidas para los modelos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ . Es decir, se evalúa el estado de mar  $E_{33}$ . Además se ejecutan las pruebas para los modelo  $B_1$  y  $B_2$  de acuerdo a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ . Se estima un tiempo total de ejecución de pruebas de 1 hora.

- **Fecha:** 27 abril 2021
- **Actividad:** P03-Prueba de oscilación libre
- **Descripción:**

En esta jornada se realizan la prueba P03-Prueba de oscilación libre para los modelos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_1$ . Se estima para el desarrollo de esta etapa un tiempo total de ejecución de 1 hora.

A continuación se presenta una tabla resumen de la programación de trabajo:

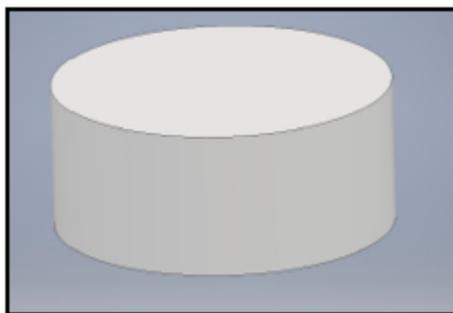
Fecha	Actividad	Estado de mar	Modelo	Tiempo de ejecución
14 de abril	Preparación de canal	No aplica	No aplica	2 horas
21 de abril	P04-Prueba de oscilación forzada	$E_{11}$ , $E_{12}$ , $E_{13}$ , $E_{21}$ , $E_{22}$ , $E_{23}$ , $E_{31}$ , $E_{32}$	$A_1$ , $A_2$ , $A_3$	4 horas
23 de abril	P04-Prueba de oscilación forzada	$E_{33}$ , $E_{22}$	$A_1$ , $A_2$ , $A_3$ , $B_1$ $B_2$	1 hora
27 de abril	P03-Prueba de oscilación libre	No aplica	$A_1$ , $A_2$ , $A_3$ , $B_1$ , $B_1$	1 hora.

**Tabla 3.4:** Programación de trabajo

### 3.3. Modelo

#### 3.3.1. Especificaciones técnicas del prototipo y propiedades de masa

El modelo de estudio está basado en el prototipo propuesto por David Olivos en su trabajo de título "Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación"[12], obtenido a partir de datos de simulación en el software Ansys Aqwa. La geometría propuesta obtuvo los mejores resultados en cuanto a amplitud de desplazamiento vertical y disipación de fuerza de difracción al ser analizada frente a oleaje regular monocromático de acuerdo a las condiciones de mayor ocurrencia en Punta Curaumilla en tanto altura ola significativa y periodo de oleaje. Esta geometría corresponde a un cilindro macizo de material plástico PC/ABS, de 2,75[m] de diámetro y 1,178[m] de altura (Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Prototipo base [12].

El prototipo mencionado presenta una masa total de 2.499 [kg], lo que equivale a un volumen total de cuerpo de 6,99[m<sup>3</sup>] y un área plana igual a 22,056 [m<sup>2</sup>]. A continuación se presentan las principales características técnicas mencionadas:

Material	Plástico PC/ABS
Densidad del material $\rho$	0,357[g/cm <sup>3</sup> ]
Masa	2.499 [kg]
Vol. total	6,99[m <sup>3</sup> ]
Área total	22,056[m <sup>2</sup> ]
Diámetro $\Phi$	2,75[m]
Altura $h$	1,178[m]

**Tabla 3.5:** Características técnicas prototipo

Además, de acuerdo a lo datos obtenidos de la simulación numérica en el software Ansys Aqwa las magnitudes de parámetros cinemáticos y dinámicos en tanto sus valores máximos, mínimos y medios son:

Parámetro	Aceleración [ $m/s$ ]	Fuerza neta [ $N$ ]	Velocidad [ $m/s$ ]	Potencia [ $W$ ]
Media	0,94	2356,55	0,30	763,12
Máx	3,87	9679,20	1,03	6429,95
Mín	0,00	2,30	0,00	0,00

**Tabla 3.6:** Parámetros cinemáticos y dinámicos simulación numérica de prototipo base [12].

### 3.3.2. Especificaciones técnicas del modelo, Cálculo de geometría de escala y Propiedades de masa

#### 3.3.2.1. Modelo $A_1$

El modelo A se diseñó en base al prototipo de boya propuesto por David Olivos en su trabajo de título "Estudio numérico experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación"[12]. Este modelo respeta las relaciones de similitud geométrica y dinámica de acuerdo al número adimensional de Froude que relaciona las fuerzas de inercia del cuerpo con las fuerza gravitacionales.

Para obtener las dimensiones del modelo se aplicó un factor de escala  $\lambda = 1 : 50$ , a las magnitudes de diámetro de  $2,75[m]$  y altura  $1,178[m]$  del prototipo, resultando un diametro de  $55,2[mm]$  y altura  $23,6[mm]$ .

Para obtener la masa del cuerpo se aplicó un factor de escala de  $\lambda^3$  a la magnitud de la masa del prototipo igual a  $2.499[kg]$ , con lo que se obtuvo un valor de  $19,99[g]$  para el modelo.

El modelo fue creado mediante impresión 3D y el material seleccionado para su fabricación fue PLA PLUS, que destaca por su alta resistencia mecánica y resolución de acabado. La densidad de este material ( $\rho_{PLAPLUS} = 1,27[g/cm^3]$ ) es mucho mayor que la densidad del plástico PC/ABS ( $\rho_{PC/ABS} = 0,357[g/cm^3]$ ) utilizado originalmente en el prototipo. Esto implicó que, con el objetivo de respetar el principio de similitud geométrica y dinámica del modelo físico, este se diseñara como un cilindro hueco de densidad total igual a  $0,357[g/cm^3]$  y masa total  $20,48[g]$ , siendo  $2,45\%$  superior a la masa teórica propuesta.

Dado que el modelo A1 es un cilindro hueco uniforme de simetría axial y simétrico respecto del plano que lo corta horizontalmente por la mitad de su altura, se estima que la posición

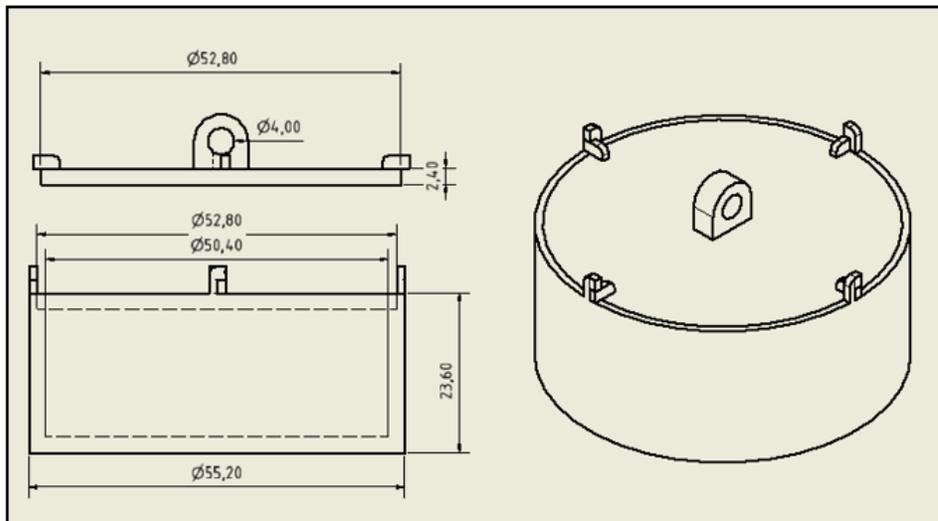
del centro de gravedad, CoG, se ubica a una distancia de  $11,8[mm]$  desde su base en el centro de la circunferencia.

En la tabla 3.7, se presentan las principales especificaciones técnicas del modelo  $A_1$ :

Material	Masa	Densidad cuerpo	Área plana	Vol. Total
PLA PLUS	$20,48[g]$	$0,357[g/cm^3]$	$23,93 [cm^2]$	$56,48[cm^3]$
Diámetro ext.	Diámetro int.	Espesor de pared	Altura	Espesor tapa
$55,2[mm]$	$49[mm]$	$3[mm]$	$23,6[mm]$	$2,4[mm]$

**Tabla 3.7:** Geometría y propiedades de masa modelo  $A_1$ .

En la figura 3.5 se muestra el plano del modelo  $A_1$ . Compuesto de dos partes: un manto cilíndrico hueco y una tapa superior. Este diseño fue pensado para dar origen a los modelos  $A_2$  y  $A_3$  al permitir añadir masa en su interior y mantener a su vez la geometría.



**Figura 3.5:** Dimensiones principales Modelo A

Es de particular importancia, al momento de analizar la estabilidad del cuerpo en condiciones de flotabilidad estática, el segundo momento de área [ $m^4$ ] ( $I_x, I_z$ ) del área plana de agua del modelo. Este corresponde a la medida del momento de restauración multiplicado por la distancia al eje de rotación al cuadrado, en cuyo caso para una sección circular se tiene:

$I_x$	$I_z$
$4,5575E - 07 [m^4]$	$4,5575E - 07 [m^4]$

**Tabla 3.8:** Segundo momento de área  $I_x, I_z$ .

Para analizar la estabilidad estática del cuerpo parcialmente sumergido se obtuvieron las principales propiedades físicas del modelo a partir de un balance de fuerzas sobre el cuerpo en equilibrio estático en agua dulce, tal que:

$$\vec{F}_{Empuje} = \vec{F}_{Peso} \quad (3.6)$$

$$\rho_{fluido} \nabla g = m_{A1} g \quad (3.7)$$

$$\rho A_{wp} L_c = m_{A1} \quad (3.8)$$

$$L_c = \frac{m_{A1}}{A_{wp} * \rho_{fluido}} \quad (3.9)$$

Donde  $\vec{F}_{Empuje}$  corresponde a la fuerza de empuje ejercida por el fluido sobre el cuerpo;  $\vec{F}_{Peso}$  es la fuerza peso del modelo A1;  $m_{A1}$  corresponde a la masa del modelo A1;  $A_{wp}$  es el área plana de agua;  $\rho_{fluido}$  la densidad del agua dulce; y  $g$  es la aceleración de gravedad.

De esta forma, considerando una densidad del agua dulce ( $\rho_{fluido}$ ) igual a  $1,002[g/cm^3]$ , masa del modelo A1 ( $m_{A1}$ ) igual a  $20,48[g]$ , y área plana de agua ( $A_{wp}$ ) igual a  $23,93[cm^2]$ , se determinó un calado teórico ( $L_{A1}$ ) de  $8,54[mm]$ , con un volumen sumergido de  $20,43[cm^3]$  equivalente a un  $36,17\%$  del volumen total del modelo.

$CoG_{teórico}$	$CoB_{teórico}$	$L_{A1}$	Vol. sumergido	$Vol_{sumergido} / Vol_{total} \%$
$y = 3,26$	$-4,27[mm]$	$8,54[mm]$	$20,43[cm^3]$	$36,17\%$

**Tabla 3.9:** Parámetros característicos de flotabilidad modelo  $A_1$ .

Esta configuración presenta la particularidad de que el centro de masa (CoG) del modelo se encuentra ubicado a una distancia de  $Y = 3,26[mm]$  sobre su eje vertical, considerando  $Y = 0$  la línea de agua quieta.

### 3.3.2.2. Modelo $A_2$

El modelo  $A_2$  se obtiene luego de añadir masa (harina) al interior del modelo  $A_1$  modificando así su proporción de volumen sumergido y la posición de su centro de gravedad (CoG) respecto de la línea de agua quieta de forma tal que su volumen sumergido fuese un  $50\%$  del volumen total del cuerpo. De esta forma, mediante un balance de fuerzas en equilibrio estático de acuerdo a la ecuación (3.4) se estableció que la masa total del cuerpo fuese de  $28,29[g]$  con

fin de obtener un calado  $L_{A2}$  (distancia desde la línea de agua quieta WL1 al fondo del cilindro) de  $11,8[mm]$ , con un volumen sumergido de  $28,24[cm^3]$  equivalente a un  $50,0\%$  del volumen total del modelo.

Masa	Densidad cuerpo	Área plana	Vol. Total
28,29[g]	$0,5[g/cm^3]$	$23,93[cm^2]$	$56,48[cm^3]$
CoB	$L_{A2}$	Vol. sumergido	$Vol_{sumergido}/ Vol_{total} \%$
5,9 [mm]	11,8[mm]	$28,24[cm^3]$	50,0 %

**Tabla 3.10:** Características generales modelo  $A_2$ .

$I_x$	$I_z$
$4,5575E - 07 [m^4]$	$4,5575E - 07 [m^4]$

**Tabla 3.11:** Segundo momento de área  $I_x, I_z$ .

### 3.3.2.3. Modelo $A_3$

La configuración A3 del modelo A se obtuvo luego de añadir masa al interior del cilindro, con el fin de modificar su masa total y en consecuencia su calado  $L_{A3}$  y volumen sumergido, de forma tal que este fuese un  $65\%$  del volumen total del cuerpo. En consecuencia, se determinó un calado ( $L_{A3}$  es de  $15,34[mm]$ ). De esta forma, mediante un balance de fuerzas en equilibrio estático de acuerdo a la ecuación 3.4 se estableció que la masa total del cuerpo fuese de  $36,78[g]$ , con un volumen sumergido de  $36,71[cm^3]$ .

Material	Masa	Densidad cuerpo	Área plana	Vol. Total
PLA PLUS	36,78[g]	$0,651[g/cm^3]$	$23,93[cm^2]$	$56,48[cm^3]$
CoG	CoB	$L_{A3}$	Vol. sumergido	$Vol_{sumergido}/ Vol_{total} \%$
	-7,67 [mm]	15,34[mm]	$36,71[cm^3]$	65,0 %

**Tabla 3.12:** Características generales modelo  $A_3$ .

De esta forma, mediante un balance de fuerzas en equilibrio estático de acuerdo a la ecuación (3.6) se estableció que la masa total del cuerpo fuese de  $36,78[g]$ , con un volumen sumergido de  $36,71[cm^3]$  equivalente a un  $65,0\%$  del volumen total del modelo.

$I_x$	$I_z$
$4,5575E - 07 [m^4]$	$4,5575E - 07 [m^4]$

**Tabla 3.13:** Segundo momento de área  $I_x, I_z$ .

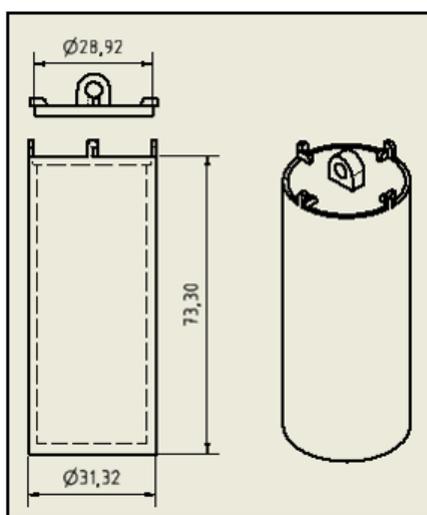
### 3.3.2.4. Modelo $B_1$

El modelo  $B_1$  corresponde a un cilindro vertical hueco, fabricado mediante impresión 3D con PLA PLUS, cuyas dimensiones se obtuvieron luego de invertir la relación diámetro/altura del modelo  $A_1$ . Con esto se obtuvo un cilindro de diámetro exterior 31,31 [mm], diámetro interior 28,92 [mm] y altura 73,30 [mm]. Su espesor de pared es de 3[mm] en el manto y la base, mientras que su espesor en la tapa es de 2,4[mm]. En consecuencia, el área plana de agua del modelo es de 8,62[cm<sup>2</sup>] y su volumen total es de 56,47[cm<sup>3</sup>].

Material	Masa	Densidad cuerpo	Área plana	Vol. Total
PLA PLUS	36,78[g]	0,65[g/cm <sup>3</sup> ]	8,62[cm <sup>2</sup> ]	56,47[cm <sup>3</sup> ]
Diámetro ext.	Diámetro int.	Espesor de pared	Altura	Espesor tapa
31,32[mm]	28,92[mm]	3[mm]	73,30[mm]	2,4[mm]

**Tabla 3.14:** Características generales modelo  $B_1$ .

Para asegurar una estabilidad en condiciones de flotabilidad estática se determinó para el modelo  $B_1$  una masa total de 36,78 [g], coincidente con la masa del modelo  $A_3$ . Se presentan las dimensiones principales del modelo  $B_1$  en la figura 3.7 a continuación:



**Figura 3.6:** Dimensiones generales Modelo B1

Utilizando la ecuación 3.6 , se determina un calado teórico  $L_{B1}$  de 42,58 [mm], lo que proporciona un volumen sumergido del modelo igual a 36,70[ $cm^3$ ], equivalente al 65,13 % del volumen total del cuerpo.

CoB	$L_c$	Vol. sumergido	$Vol_{sumergido}/ Vol_{total} \%$
21,29[mm]	42,58[mm]	36,70[ $cm^3$ ]	65,13 %

**Tabla 3.15:** Características de flotabilidad modelo  $B_1$

Además, se determinan los segundos momentos de área plana del modelo, para ser utilizado en el análisis de floabilidad estática del cuerpo.

$I_x$	$I_z$
75,57 [ $cm^4$ ]	75,57 [ $cm^4$ ]

**Tabla 3.16:** Segundo momento de área  $I_x, I_z$  modelo  $B_1$ .

### 3.3.2.5. Modelo $B_2$

El modelo  $B_2$  surge luego de agregar masa al interior del cilindro que se utilizó como base para el modelo  $B_1$  ( figura 3.7)por lo que se mantienen sus dimensiones, hasta conseguir una masa total del cuerpo igual a 45,45[g].

Utilizando la ecuación 3.6 se determinó para el modelo  $B_2$  un calado teórico ( $L_{B2}$ ) igual a 52,62 [mm]. Esto implica que en condiciones de flotabilidad estática el modelo presente un volumen sumergido igual a 45,35  $cm^3$ , lo que equivale a un 80,32 %.

Masa	Densidad cuerpo	Área plana	Vol. Total
45,45[g]	0,65[ $g/cm^3$ ]	8,62[ $cm^2$ ]	56,47[ $cm^3$ ]
CoB	$L_{c2}$	Vol. sumergido	$Vol_{sumergido}/ Vol_{total} \%$
22,68[mm]	52,62[mm]	45,35[ $cm^3$ ]	80,32 %

**Tabla 3.17:** Características generales modelo  $B_2$ .

Además, se determinan los segundos momentos de área plana del modelo, para ser utilizado en el análisis de floabilidad estática del cuerpo.

$I_x$	$I_z$
75,57 [ $cm^4$ ]	75,57 [ $cm^4$ ]

**Tabla 3.18:** Segundo momento de área  $I_x, I_z$  modelo  $B_1$ .

## 3.4. Olas y estados de mar

### 3.4.1. Altura y periodo de olas monocromáticas

Para definir las características de las olas monocromáticas que se replicaran en las pruebas del canal de olas se eligió como datos de base los parámetros característicos de Punta Curaumilla obtenidos de :”Evaluación de energía undimotriz en la zona centro sur de Chile”[11]. Se determinaron así, nueve combinaciones de altura de ola y periodo para ser evaluadas en el canal de olas con cada modelo en sus diferentes configuraciones.

	Periodo $T_i$			Altura de ola $H_j$		
	1	2	3	1	2	3
Prototipo	8 [s]	10,53 [s]	12 [s]	0,5 [m]	1,68[m]	2,5[m]
Modelo	1,13[s]	1,48[s]	1,69 [s]	1 [cm]	3,36[cm]	5[cm]

**Tabla 3.19:** Características de oleaje monocromático según prototipo y modelo.

A cada estado de mar, correspondiente a una combinación específica de periodo y altura de ola, se le asignará el código  $E_{i,j}$  de acuerdo a la información proporcionada por la tabla 3.x.x. Así por ejemplo, un estado  $E_{1,2}$  corresponde a un estado de mar con periodo 8[s] y altura de ola 1,68[m] en el prototipo. La duración de cada tren de oleaje será de tal forma que se componga de doce olas, por lo que dependerá del periodo de cada estado de mar.

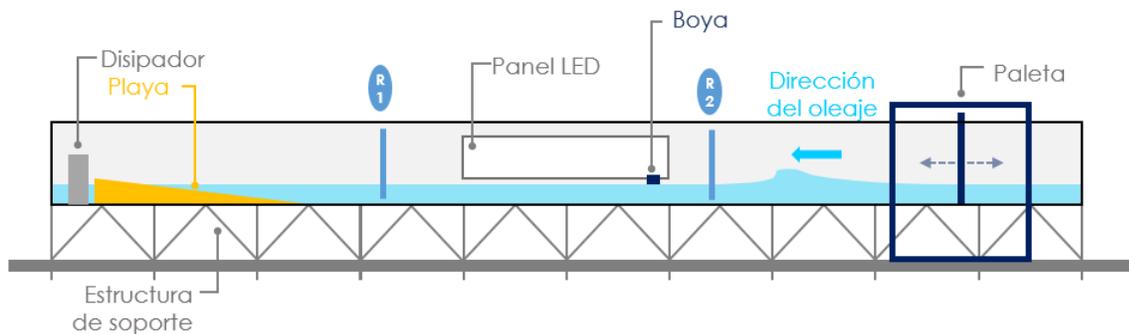
Todas las pruebas a realizar replicaran una profundidad de 21 [m] en el prototipo, lo que corresponde a 42 [cm] de profundidad en el canal de olas.

## 3.5. Instalaciones de prueba

### 3.5.1. Configuración general del experimento

Para llevar a cabo la experimentación física, en particular la prueba P04-prueba de oscilación forzada sobre cada uno de los diferentes modelos a analizar, se utilizó como recurso principal el canal de oleaje artificial de Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, de 15 metros de largo, 1,2 metros de alto y 1 metro de ancho. Este canal cuenta con una paleta generadora de olas, ubicada en uno de los extremos del canal, capaz de simular el oleaje regular especificado para este experimento. Luego de ser generado el oleaje por la paleta, este se propaga de derecha a izquierda, a través del canal hasta el extremo opuesto del mismo. Para efecto de disminuir la perturbación generada por la reflexión del oleaje en la pared del extremo en las siguientes olas generadas, es que se sitúa una playa a una distancia de 8,7 metros de la paleta, seguido de un dissipador al final del canal.

En el centro del canal, ubicado a una distancia de 4,5 metros de la paleta generadora, se ubica una pantalla de luz led sobre la pared posterior, cuyo objetivo es generar contraste con la boya para facilitar así el registro de su trayectoria. En efecto, la boya se sitúa en el extremo derecho de la pantalla led, y se registra durante un tiempo total de 4 minutos su movimiento producto de la interacción con el oleaje monocromático regular inducido.



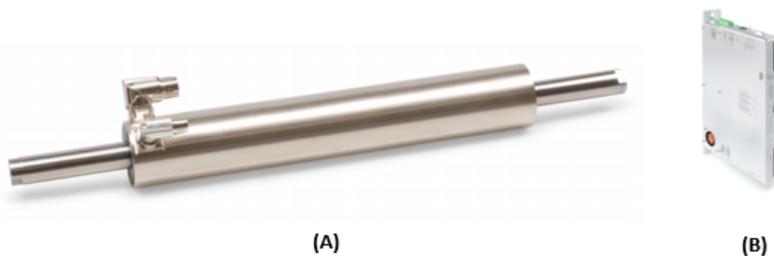
**Figura 3.7:** Configuración general prueba P04-prueba de oscilación forzada.

Para medir la señal del oleaje generado por la paleta se utilizan 4 sondas de medición tipo resistivas de la empresa HR Wallingford, dispuestas para trabajar en pares. Las dos primeras de ellas (R2 en la figura 3.10) se ubican a 2 metros de la paleta, mientras que las otras dos se ubican la parte posterior del canal (R1 en la figura 3.10) a una distancia de 8,25 metros de la paleta generadora, quedando el tramo de análisis comprendido entre los resistores dispuestos. Un esquema general de la configuración experimental se presenta en la figura 3.10.

### 3.5.2. Capacidad de generación de olas

El sistema generador de olas basa su funcionamiento en un motor lineal Linmot P10-70x320, ubicado en la parte superior del canal sobre dos rieles apoyados en las paredes laterales del canal. El motor tiene la función de empujar la paleta generadora para inducir oleaje en la masa de agua que contiene el tanque. Además, se utiliza un Servo drive E-1400-GP-QN-1S, cuyas características se detallan a continuación [13]:

- **Un Motor lineal Linmot P10-70x320:** Stroke 1530[mm], fuerza peak 2162[N], fuerza continua 673[N] (con sistema de enfriamiento de agua), máxima velocidad 5,9[m/s], máxima aceleración 939[m/s<sup>2</sup>].
- **Servo drive E-1400-GP-QN-1S:** Marca Linmot, alimentación trifásica, comunicación por protocolos CANopen y LinRS, configuración por Ethernet.



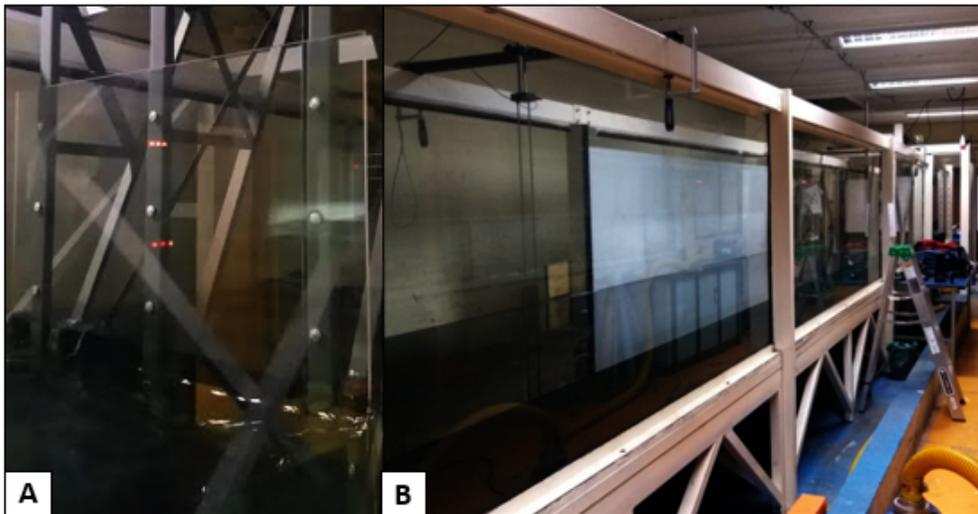
**Figura 3.8:** (A) Motor lineal Linmot P10-70x320, (B) Servo drive E-1400-GP-QN-1S.

Para operar, se utiliza una interfaz desarrollada con el software Labview que se encarga de construir y controlar una señal de voltaje análogo 0–5[V] el cual es utilizado para determinar la posición del motor [13]. Para operar se utiliza el modo con señal regular, donde se envía una señal sinusoidal de amplitud ajustable (Entre 0 – 5[V]), frecuencia ajustable (Entre 0 y 1 [hz]) y tiempo de simulación en minutos.

Dado lo anterior, es posible generar en condiciones estandar de prueba, es decir, con una profundidad de agua de 15[cm], olas con periodos que van de 1 a 3 segundos y alturas desde 1 a 15[cm]. Para efectos del experimento realizado se limitó aún más la capacidad generación de altura de ola a un máximo de 10[cm], puesto que la profundidad escogida fue de 42[cm], con el fin de respetar los principios de similitud del modelo respecto de los parámetros reales establecidos.

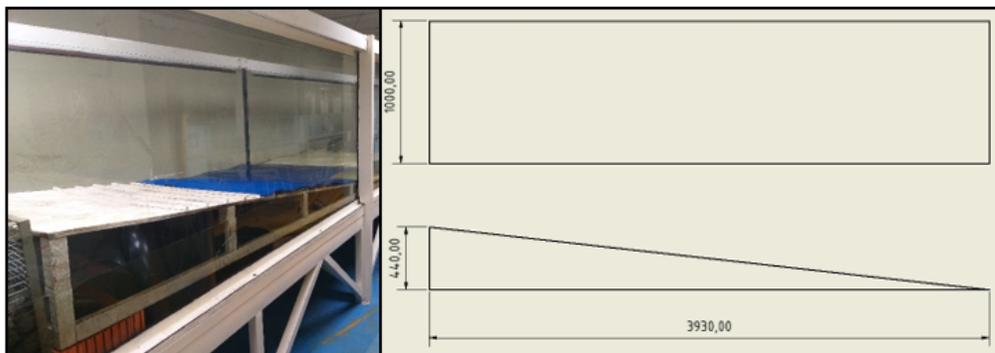
### 3.5.3. Características de playa y paleta

La paleta generadora de olas es una plancha de acrílico de  $1[cm]$  de espesor, con  $1[m]$  de ancho y  $1,2[m]$  de alto. Esta plancha está orientada perpendicularmente al plano horizontal y está montada sobre una estructura de metal apoyada sobre dos rieles de  $550[mm]$  de largo que a su vez están fijados a las paredes laterales del canal y tienen una carrera máxima permitida de  $2[m]$ . Se adjuntan los planos.



**Figura 3.9:** (A) Paleta generadora de olas, (B) Vista general del canal de olas.

La playa disipadora de olaje es una rampla de madera contrachapada de largo  $3,93[m]$ , altura  $0,44[m]$  y  $1[m]$  de ancho, con un ángulo de inclinación de  $6[^\circ]$ . Además, sobre la plancha de madera se dispuso una alfombra, con el fin de intensificar el efecto disipador en la zona de la rompiente.



**Figura 3.10:** Paleta generadora de olas.

Junto con la acción disipadora de la playa se dispone de un disipador adicional que consta de un paralelepípedo recto con pilares de metal y caras de malla de alambre relleno de piedras (figura 3.14). Sus dimensiones son: 0,4[m] ancho, 0,5[m] de alto y 0,8[m] de ancho.



**Figura 3.11:** Paleta generadora de olas.

#### 3.5.4. Resistores de monitoreo de oleaje

Para medir la altura y periodo de ola, se utilizaron 4 sondas de medición tipo resistivas de la empresa HR Wallingford, junto con un adquirente de señales NI USB-6008. Sus características técnicas son: 12 bit de resolución, 8 entradas análogas singulares equivalentes a 4 entradas análogas diferenciales (10 V), tasa de muestreo máximo de 10000 muestras/s, 5mV de ruido, 2 salidas análogas 0-5 V, tasa de actualización de 150 Hz, 36.4 mV de error.



**Figura 3.12:** Sonda de medición resistiva.

### 3.5.5. Descripción de registro digital

Para registrar el movimiento de la boya y su interacción con el oleaje programado se utilizó como principal recurso una cámara de video digital Gopro HERO 5, cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación:

Característica	Especificación
Dimensiones	62 x 44,6 x 33,7 [mm]
Peso	117 [gramos]
Batería	1220 [mAh]
Video	4K a 30fps nativo 1080p a 120fps

**Tabla 3.20:** Especificaciones técnicas Gopro Hero 5.

La cámara digital fue dispuesta de tal forma que se obtuviese un vista frontal del fenómeno de estudio. Específicamente fue ubicada al centro de la pantalla led (figura 3.8), a una distancia de 5,8 metros de la paleta generadora y a 1,5 metros de la pared de vidrio frontal del canal.

### 3.5.6. Descripción de software de análisis Tracker

Para monitorear los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del modelo se decidió utilizar el software libre Tracker 5.1.x. Corresponde a un software gratuito de análisis y modelación de videos creada en Open Source Physics (OPS) JAVA, con fines de estudio físico. Esta herramienta permite realizar un rastreo, ya sea, manual o automático de un objeto claramente identificable en un archivo de video. Para realizar un rastreo automático (AutoTracker) es necesario que la característica de interés a rastrear sea consistente con forma, tamaño, color y orientación en todos los cuadros del video. De esta forma Autotracker crea una imagen temporal(template) que luego compara con los fotogramas siguientes para encontrar aquel objeto que mejor coincida (Match) con la imagen inicial. A partir de este análisis se generan los datos requeridos.

Se decidió utilizar esta modalidad frente a la manual, dado que esta permite un proceso de análisis más expedito y una mayor consistencia en la información.

**Pasos básicos de análisis de video:**

1. Abrir un archivo de video.
2. Identificar los cuadros de interés que se desea analizar
3. Calibrar la escala del video con ayuda de una regla situada en la pared frontal del canal de olas de longitud igual a 0,4 [m].
4. Establecer Ejes de coordenadas. Visualizar ejes establecidos. Situar origen del sistema de coordenadas. Determinar ángulo del sistema de coordenadas. Asegurar ejes.
5. Identificar el objeto del video al cual se le quiere hacer seguimiento en modo Auto-tracker. En este paso se genera la máscara que será rastreada en los cuadros de videos siguientes.
6. Ejecutar la búsqueda en los cuadros de video sucesivos.

**Gráficos y análisis de trayectorias:**

Los parámetros cinemáticos y dinámicos a analizar en las pruebas P03-Prueba de oscilación libre y P04-Prueba de oscilación forzada se obtienen luego de rastrear la trayectoria de la boya en el canal de olas, sometida a la influencia del oleaje regular definido para cada uno de los estados de mar. El procedimiento de rastreo se detalla a continuación:

1. Se aplican los filtros disponibles en el programa que permiten modificar la imagen del video para resaltar la boya y facilitar así el rastreo del software. Para lo anterior se despliega la pestaña *Video* de la barra de herramientas y se selecciona la opción *Filters* para aplicar los filtros correspondientes, tal como se muestra en la figura 3.13.



**Figura 3.13:** Aplicación de filtros software tracker.

Filtros seleccionados:

- **Negative filter:**

*Este filtro produce una imagen negativa en la que cada componente RGB  $x$  de píxel se convierte en  $255-x$  [Ayuda tracker->Video Filters->9.Negative filter]. De esta forma queda la imagen de la boya en blanco y en contraste con un fondo negro. De igual forma, permite visualizar la línea de agua en color blanco, cada vez que pasa una ola.*

- **Brightness/contrast filter:**

*Para complementar el efecto del filtro negativo se activa Brightness/contrast filter. El filtro de brillo tiene ajustes tanto para el brillo (rango  $-128$  a  $+128$ ) como para el contraste (rango  $0-100$ ). Los cambios en el brillo afectan los componentes RGB de todos los píxeles por igual hasta que se alcanzan los valores mínimo ( $0$ ) o máximo ( $255$ ). [Ayuda tracker->Video Filters->3. Brightness/contrast filter].*

Las propiedades del filtro son ajustadas tal que el brillo toma un valor de  $-61$ , y el contraste de  $77$ , como se muestra en la figura 3.10:



**Figura 3.14:** Aplicación de filtros software tracker.

■ **Baseline filter:**

2. Se sitúa el sistema de coordenadas tal que el eje horizontal calza con la línea de agua quieta (SWL1), para ello es necesario ajustar su inclinación. Se comprueba la correcta ubicación del mismo luego de hacer pasar una ola y verificar que la amplitud superior es igual a la inferior. Para realizar correctamente esta medición se activa la opción *Grid* de la pestaña de eje de coordenadas, que despliega una malla cuadriculada en la totalidad del cuadro. El eje vertical se sitúa en el centro de la boya en agua quieta. Se comprueba luego en la pestaña de propiedades del sistema de coordenadas que se mantienen fijos el origen, la escala y el ángulo de inclinación de los ejes. Se registran las coordenadas del origen (píxeles) y el ángulo de inclinación del eje horizontal:

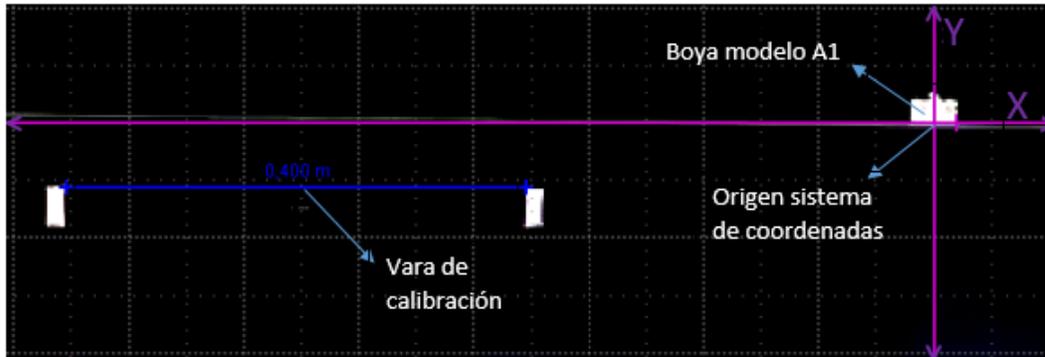
Posición original del pixel	
Ángulo desde la horizontal	

**Tabla 3.21:** Sistema de coordendas.

3. Luego de situar el origen de coordenadas se procede a activar la vara de calibración de tal forma que se ajusta la longitud a  $0,4[m]$  con ayuda de una regla puesta en la pared frontal del canal que tiene dicha longitud. Se debe asegurar que la cinta de calibración sea paralela al eje  $x$ . Para ello se ajusta en  $0^\circ$  la inclinación de la cinta en la barra de herramientas.

Cabe destacar que dado la disposición de la cámara de video frontal se incurre en un error de paralaje que se evidencia entre una diferencia de inclinación entre el plano horizontal de la imagen y el eje horizontal del sistema de coordenadas. Este error asociado se registra para cada prueba.

A continuación se muestra el ejemplo de configuración inicial de rastreo para el modelo  $A1$  y el estado de mar  $E_{22}$ .



**Figura 3.15:** Configuración inicial de rastreo modelo  $A_1, E_{22}$ .

4. Luego de realizar los ajustes mencionados, se procede a realizar el autotracker. Para ello se define un valor de masa puntual equivalente a la masa del modelo. Se sitúa el punto inicial de rastreo (template) en la argolla superior de la boya dispuesta para este fin. Se asegura una correcta ubicación al verificar que la longitud vertical de la boya fuera del agua se corresponde con el calado establecido para dicha configuración del modelo. Se selecciona un Evolucion rate 5% Automark 10 para lograr una mayor precisión de rastreo.
5. A partir del rastreo realizado se obtienen las curvas de desplazamiento vertical y, horizontal  $x$ , Con la finalidad de eliminar del análisis estadístico la distorsión producida por la paleta generadora se selecciona una ventana de tiempo que va de los 20 [s] a los 80 [s]. Es decir  $\Delta t = 60[s]$

# Capítulo 4

---

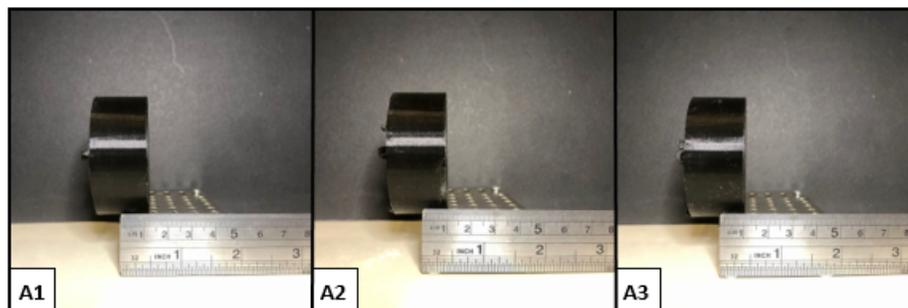
## RESULTADOS

---

### 4.1. Validación propiedades de masa

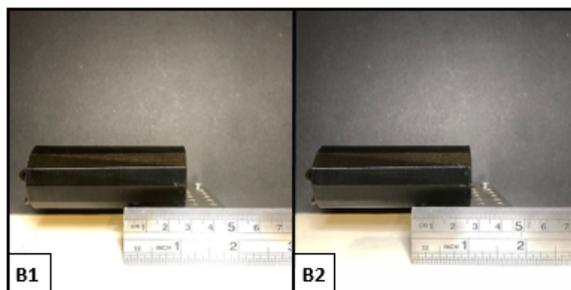
#### 4.1.1. P01-Prueba de plataforma seca

En esa sección se presentan los resultados obtenidos para la prueba P01-Prueba de plataforma seca. Se presentan los resultados de posición sobre el eje vertical del centro de gravedad para cada modelo, de acuerdo a la metodología propuesta en la sección 3.2.2. Se realizaron tres mediciones diferentes para cada modelo, y se obtuvo el valor promedio  $h_G$ , que corresponde a la distancia desde la base del cilindro hasta la posición del centro de gravedad sobre el eje del manto. En las figuras 4.1 se presenta una imagen referencial de los resultados de la prueba P03 realizada para los modelos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .



**Figura 4.1:** Determinación de centro de gravedad modelos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

De igual forma, en la figura 4.2 se presenta una imagen referencial de la posición del centro de gravedad para los modelos  $B_1$  y  $B_2$



**Figura 4.2:** Determinación de centro de gravedad modelos  $B_1$  y  $B_2$ .

En la tabla 4.1 se presentan los valores medidos de la posición del centro de gravedad para cada uno de los modelos estudiados.

Medición				
Modelo	#1 [mm]	# 2 [mm]	# 3 [mm]	$h_G$
$A_1$	12,0	11,8	11,8	11,86
$A_2$	11,0	10,5	10,25	10,58
$A_3$	9,75	9,90	9,95	9,86
$B_1$	28,00	27,90	27,4	27,77
$B_2$	26,5	27,05	26,4	26,65

**Tabla 4.1:** Resultados prueba P01-Prueba de plataforma seca.

#### 4.1.2. P02-Prueba de plataforma húmeda

En esta sección se presentan los resultados de la prueba P02-Prueba de plataforma húmeda, de acuerdo a la metodología presentada en la sección 3.2.2. Se realizaron tres mediciones de calado por cada modelo se obtuvo el calado promedio para cada uno de ellos, los valores se presentan en la tabla 4.2.

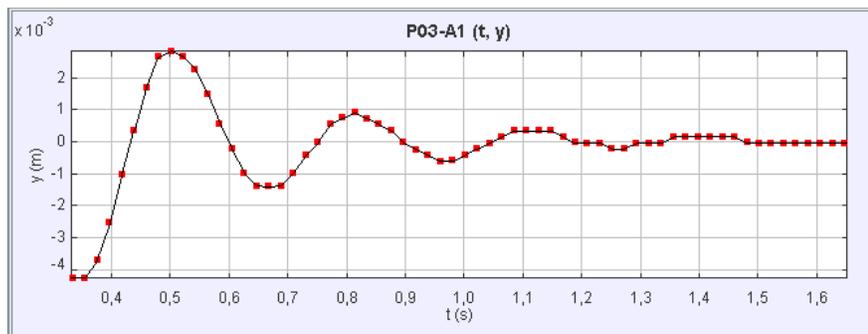
Medición				
Modelo	#1 [mm]	# 2 [mm]	# 3[mm]	$L_c$
$A_1$	9,1	9,00	9,1	9,07
$A_2$	11,3	11,7	11,2	11,4
$A_3$	15,8	15,2	15,75	15,58
$B_1$	53,2	51,4	52,4	52,3
$B_2$	61,4	60,5	61,2	61,03

**Tabla 4.2:** Resultados prueba P02-Prueba de plataforma húmeda.

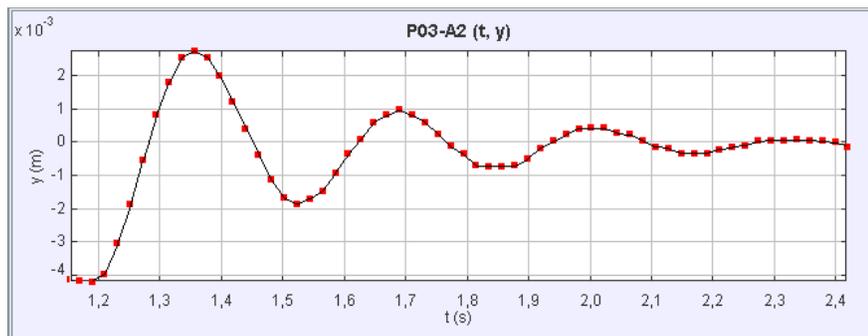
## 4.2. P03-Prueba de oscilación libre

A continuación se presentan las curvas de decaimiento obtenidas de la prueba P03-oscilación libre para los modelos A y B en cada una de sus configuraciones, luego de aplicar un desplazamiento inicial sobre la boya en agua quieta e inducir un movimiento oscilatorio amortiguado. A partir de la curva de posición vertical ( $Y$ ) en el tiempo se pueden derivar parámetros hidrodinámicos relevantes para un absorbedor puntual, tales como: periodo natural de oscilación, coeficiente de amortiguación hidrodinámico y masa agregada.

### 4.2.1. Modelo A1



### 4.2.2. Modelo A2



### 4.2.3. Modelo A3

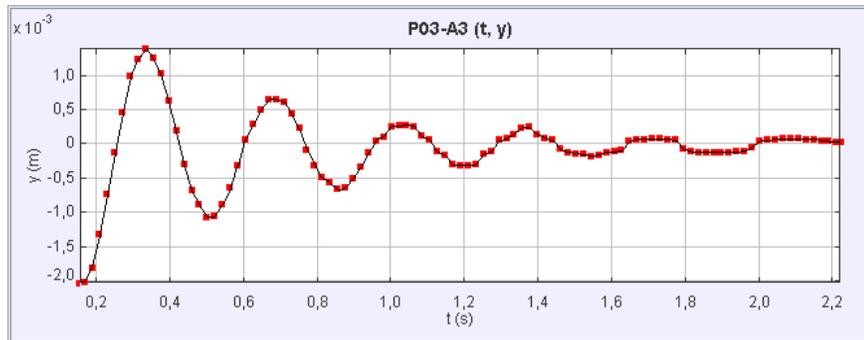


Figura 4.5: P03-A<sub>3</sub>, Curva de decaimiento amortiguado.

### 4.2.4. Modelo B1

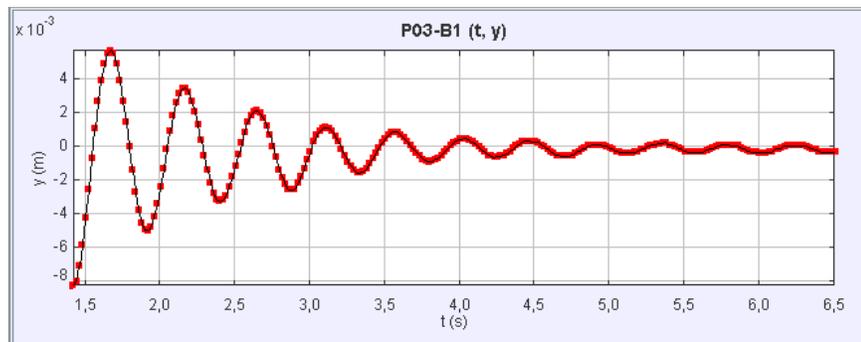


Figura 4.6: P03-B<sub>1</sub>, Curva de decaimiento amortiguado.

### 4.2.5. Modelo B2

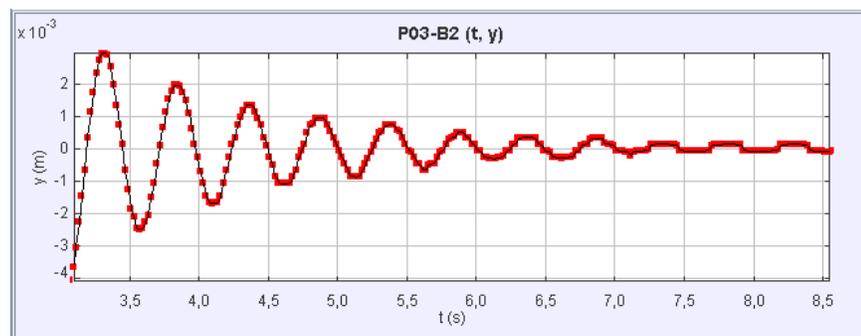


Figura 4.7: P03-B<sub>2</sub>, Curva de decaimiento amortiguado.

### 4.3. P04.Prueba de oscilación forzada

En esa sección se presentan los principales resultados obtenidos de la prueba P04 de oscilación forzada, luego de rastrear las posiciones instantáneas de la boya en los ejes horizontal y vertical durante un tiempo de 60 segundos, comprendido entre los segundos 20 y 80 de la prueba, considerando  $t = 0$  el momento en que se inicia el oleaje.

Cabe destacar que se presentan los resultados para el modelo  $A_1$  en condiciones de oleaje definidas para el estado de mar  $E_{22}$ , dado que corresponde a las características de mayor ocurrencia en la localidad de Punta Curaumilla en cuanto altura de ola significativa y periodo de ola. El grueso de los resultados obtenidos se adjuntan en la sección Anexos como se detalla a continuación:

En una primera sección se exponen para el modelo  $A_1$  las curvas de posición vertical ( $X$ ) y posición horizontal ( $Y$ ) en el tiempo, junto con las curvas de magnitud de velocidad, magnitud de aceleración, fuerza neta y potencia respecto del tiempo, referidas a los estados de mar  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{13}$ ,  $E_{21}$ ,  $E_{22}$ ,  $E_{23}$ ,  $E_{31}$ ,  $E_{32}$ ,  $E_{33}$ . En particular para el estado de mar  $E_{22}$  se agregaron las curvas de las componentes horizontal y vertical tanto de la velocidad como de la aceleración, además de la curva de trayectoria seguida por la boya.

Posteriormente se presentan las curvas de trayectoria; posición vertical ( $X$ ) y posición horizontal ( $Y$ ); velocidad horizontal ( $v_x$ ), velocidad vertical ( $v_y$ ) y magnitud de velocidad ( $V$ ); aceleración horizontal ( $a_x$ ), aceleración vertical ( $a_y$ ) y magnitud de aceleración; fuerza neta y potencia respecto del tiempo, para los modelos  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  y  $B_2$ .

Junto con lo anterior se muestran, para cada estado de mar: las condiciones de laboratorio de temperatura ambiental, temperatura del agua y porcentaje de humedad relativa al momento de realizar la prueba, y la fecha en que se llevó a cabo; los parámetros de ajuste inicial de rastreo en tanto posición inicial ( $x, y$ ) y ángulo medido entre el sistema de referencia establecido y el plano horizontal; y finalmente los parámetros de oleaje medidos por los resistores en tanto amplitud de onda [ $V$ ] y frecuencia [ $Hz$ ], además de los parámetros de altura significativa  $H_s$  y periodo significativo  $T_s$  obtenidos a partir del procesamiento de las señales captadas por los resistores mediante el método de pasos por cero.

### 4.3.1. Modelo A1

#### 4.3.1.1. Estado de mar $E_{22}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril

- **Condiciones de laboratorio:**

Al tiempo en que fue realizada la prueba se registraron las condiciones de laboratorio que se muestran en la tabla 4.3 a continuación:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

**Tabla 4.3:**  $E_{22}, A_1$ : Condiciones de laboratorio.

- **Parámetros de ajuste inicial:**

En la tabla 4.4 se presentan las coordenadas de rastreo inicial, junto con el ángulo de inclinación del sistema de coordenadas respecto del eje horizontal.

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-0,0132 ; 0,0289	-0,7

**Tabla 4.4:**  $E_{22}, A_1$ : Parámetros de ajuste inicial.

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

En la tabla 4.5 se presentan los valores de voltaje igual a 0,115[V] y frecuencia 0,68 [Hz], lo que equivalen a una altura de ola significativa igual a 3,34 [cm] y periodo de ola significativo igual a 1,49 [s].

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,115	0,67567	3,34	1,49

**Tabla 4.5:**  $E_{22}, A_1$ : Parámetros de oleaje.

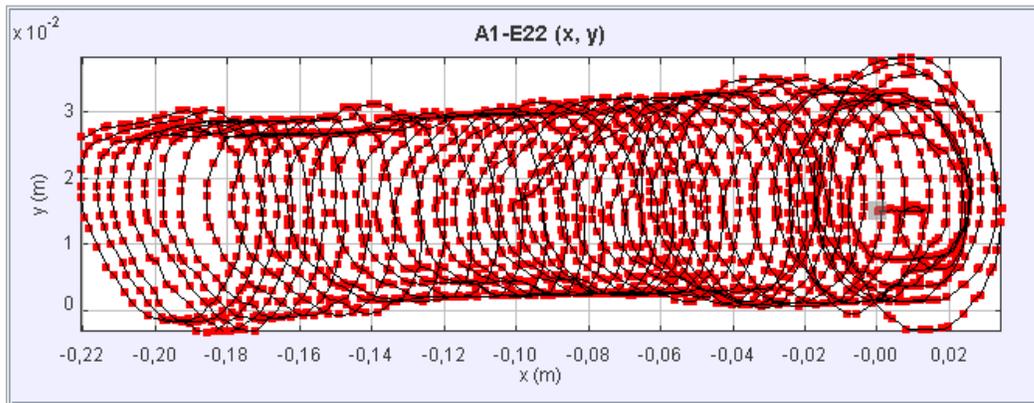


Figura 4.8: P04- $A_1, E_{22}$ ; Trayectoria  $(x, y)[m]$ .

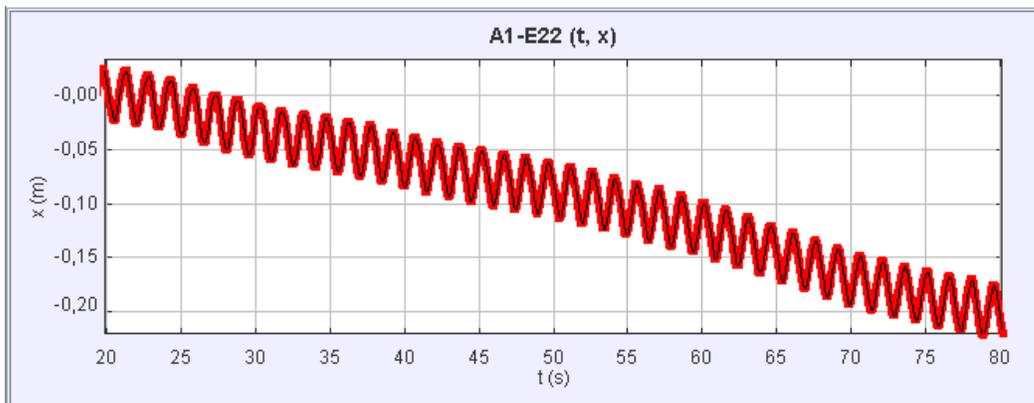


Figura 4.9: P04- $A_1, E_{22}$ : Desplazamiento horizontal  $x[m]$  en el tiempo,  $(t, x)$ .

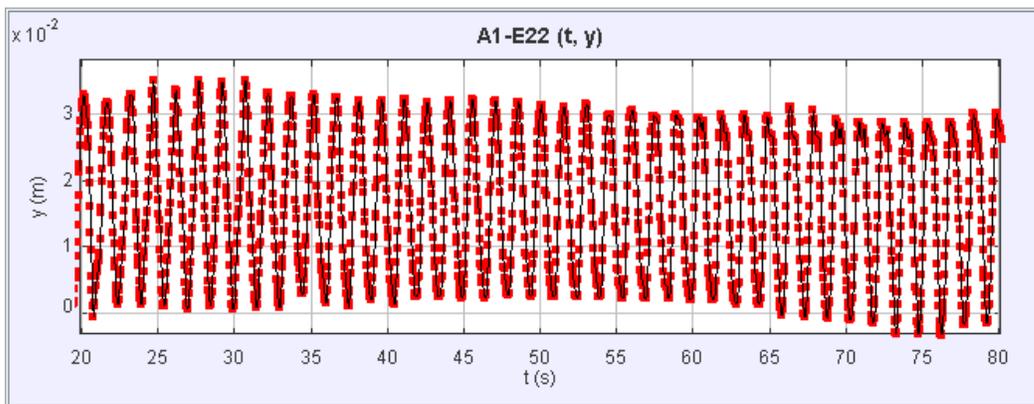


Figura 4.10: P04- $A_1, E_{22}$ : Desplazamiento vertical  $y[m]$  en el tiempo,  $(t, x)$ .

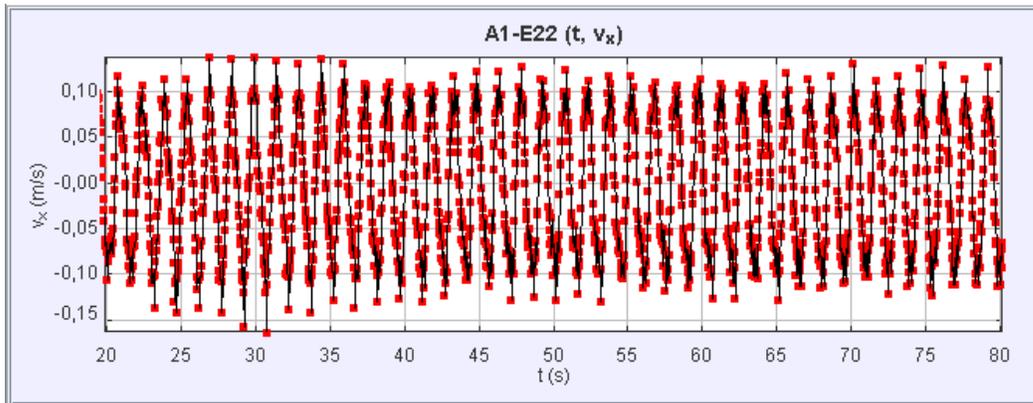


Figura 4.11: P04- $A_1$ ,  $E_{22}$ ; Velocidad horizontal  $v_x[m/s]$  con respecto al tiempo,  $(t, v_x)$ .

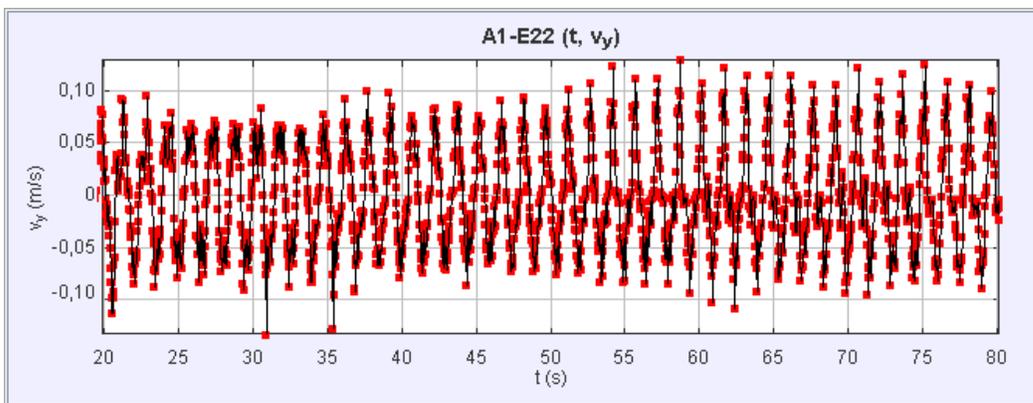


Figura 4.12: P04- $A_1$ ,  $E_{22}$ : Velocidad vertical  $v_y[m/s]$  con respecto al tiempo,  $(t, v_y)$ .

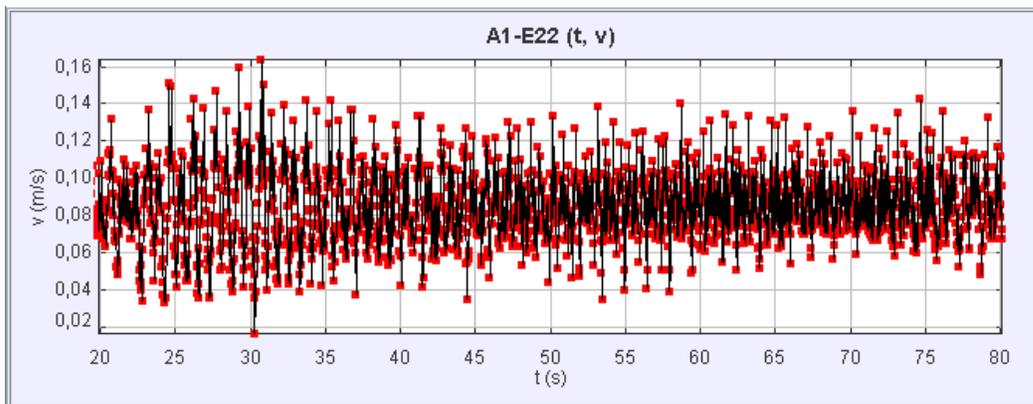
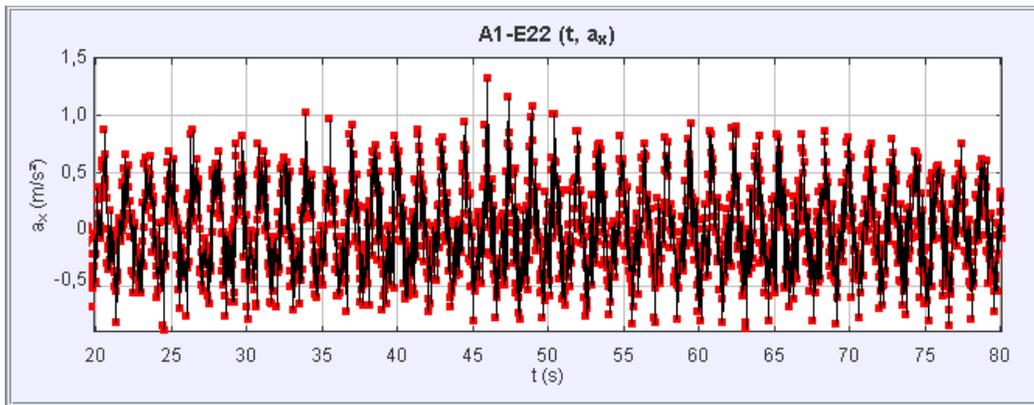
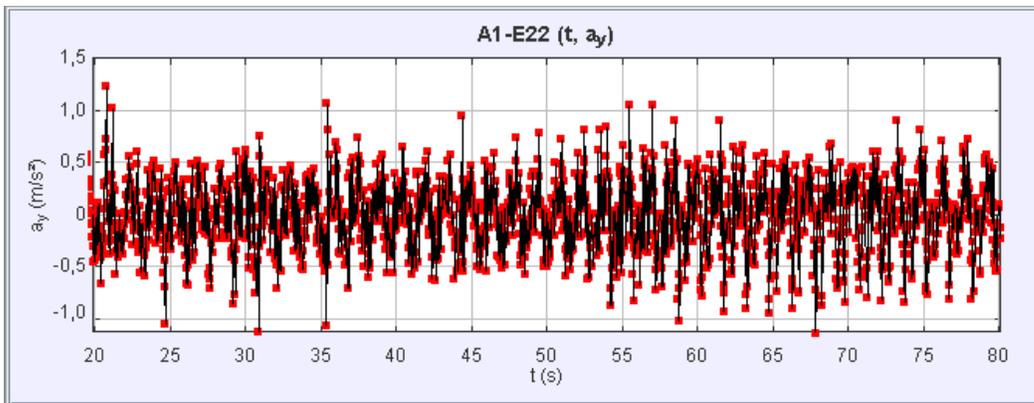


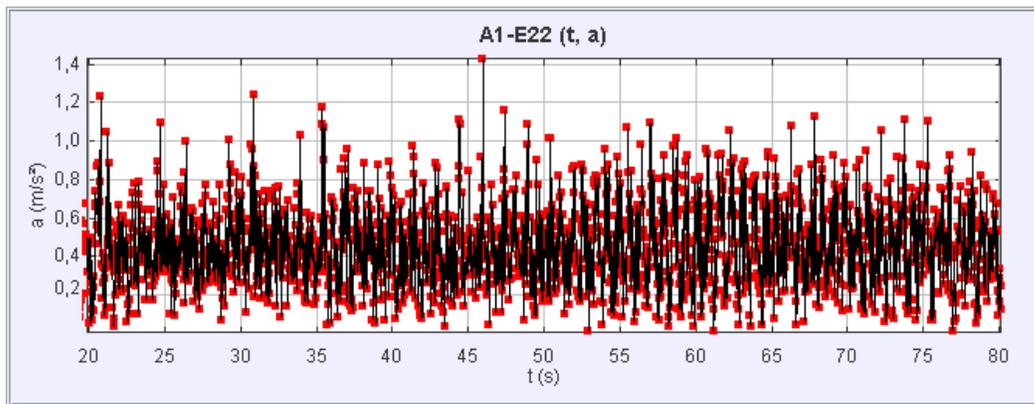
Figura 4.13: P04- $A_1$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad  $v[m/s]$  con respecto al tiempo,  $(t, v)$ .



**Figura 4.14:** P04- $A_1, E_{22}$ ; Aceleración horizontal  $a_x[m/s^2]$  con respecto al tiempo  $(t, a_x)$ .



**Figura 4.15:** P04- $A_1, E_{22}$ : Aceleración vertical  $a_y[m/s^2]$  con respecto al tiempo  $(t, a_y)$ .



**Figura 4.16:** P04- $A_1, E_{22}$ : Magnitud de la aceleración  $a[m/s^2]$  con respecto al tiempo  $(t, a)$ .

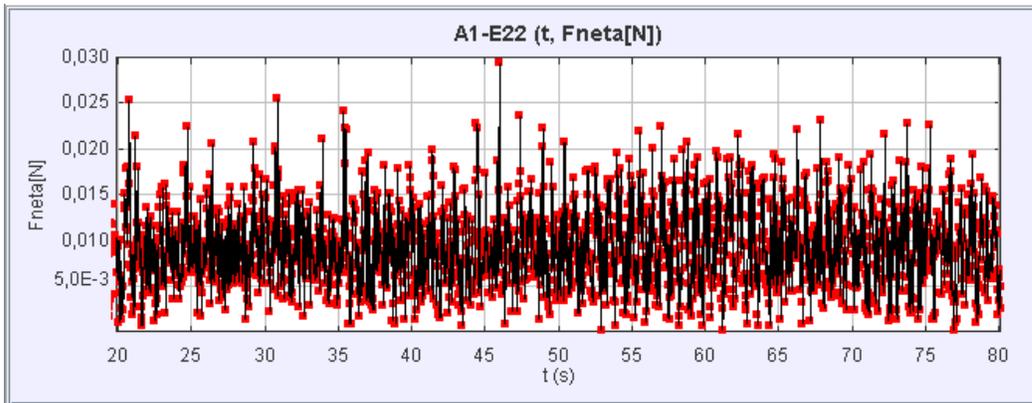


Figura 4.17: P04- $A_1, E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta  $F_{Neta}[N]$  con respecto al tiempo.

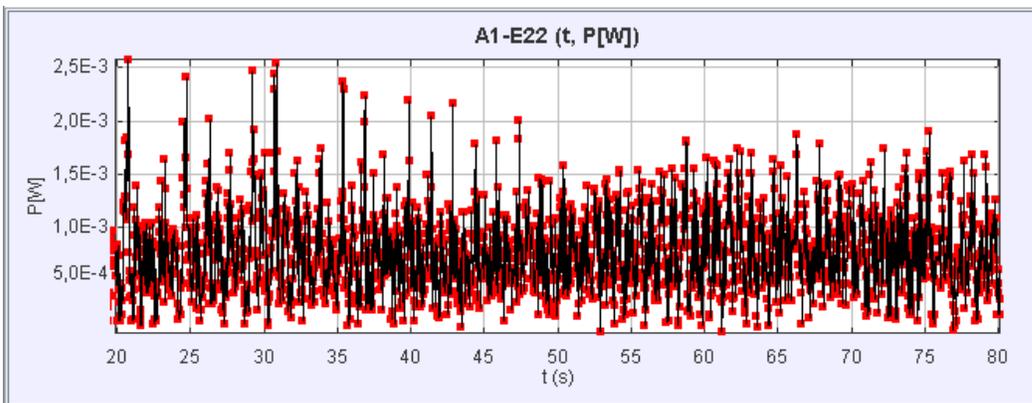


Figura 4.18: P04- $A_1, E_{22}$ : Potencia  $P[W]$  con respecto al tiempo.

# Capítulo 5

---

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### 5.1. Validación de propiedades de masa

En esta sección se presenta una caracterización de cada modelo en cuanto sus propiedades de masa y flotabilidad en condiciones estáticas, obtenida a partir de los resultados de las pruebas P01-Prueba de plataforma seca y P02-Prueba de plataforma húmeda.

#### 5.1.1. Modelo $A_1$

Se obtuvo experimentalmente para el modelo  $A_1$  que el centro de gravedad se ubica a  $h_c = 11,86[mm]$  de la base del cilindro, sobre el eje vertical. Además, se determinó un calado  $L_c = 9,07[mm]$ , por lo que el centro de boyantez del modelo se encuentra a una distancia de  $4,54[mm]$  de la base del cilindro. Esto implica que el centro de gravedad CoG se ubica a una distancia de  $2,79[mm]$  sobre la línea de agua quieta. Mientras que el centro de boyantez se ubica a  $4,54[mm]$  debajo de la línea de agua quieta. Con lo anterior se determina un volumen sumergido experimental del modelo igual a  $21,70[cm^3]$ , lo que corresponde a un  $38,42\%$ .

A partir del segundo momento de área  $I_z$  de la tabla 3.8 se determina la distancia  $BM$  entre el centro de boyantez y el metacentro, tal que:

$$BM = \frac{I_z}{Vol_{sumergido}} = \frac{45,575cm^4}{21,7cm^3} = 2,1[cm] \quad (5.1)$$

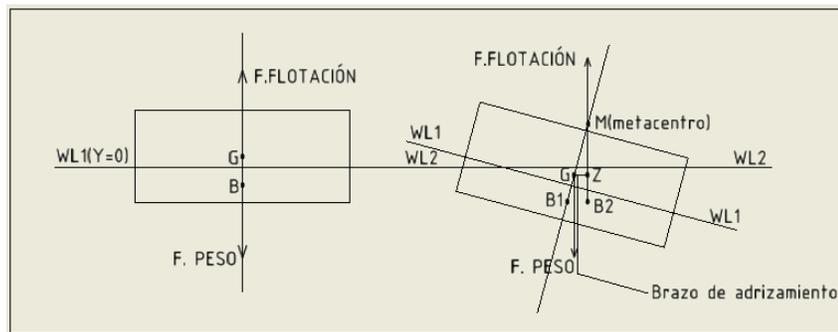
Considerando la distancia entre el centro de gravedad y el centro de boyantez  $BG = 7,33[mm]$ , es posible obtener la altura metacéntrica  $\bar{GM}$  del modelo, tal que:

$$GM = BM - BG = 13,86[mm] \quad (5.2)$$

En la tabla 5.1 se presentn los principale parámetros de la boya relacionados con la estabilidad estática del modelo:

CoG (y)	CoB(y)	BM[mm]	BG[mm]	GM [mm]
2,79	-4,54	21	7,33	13,67

**Tabla 5.1:**  $A_1$  Parámetros de estabilidad estática.



**Figura 5.1:** Diagrama de cuerpo libre modelo  $A_1$ .

### 5.1.2. Modelo $A_2$

Para el modelo  $A_2$  se determinó que el centro de gravedad se ubica a una distancia de  $10,58[mm]$  de la base, en el eje axisimétrico del cilindro. Mientras que su calado es de  $11,4[mm]$  de longitud. En consecueneci del centro de gravedad CoG se ubica a una distancia de  $0,82[mm]$  por debajo de la línea de agua. Por otro lado, el centro de boyantez CoB se ubica a  $5,7[mm]$  debajo de la línea de agua quieta. Se determinó para este modelo un volumen sumergido de  $27,28[cm^3]$ , correspondiente al 48% del volumen total del modelelo.

Considerando del segundo momento de área  $I_z$  de la tabla 3.11, correspondiente al momento de área del area plana del modelo se determina la distancia  $BM$  entre el centro de boyantez y el metacentro, tal que:

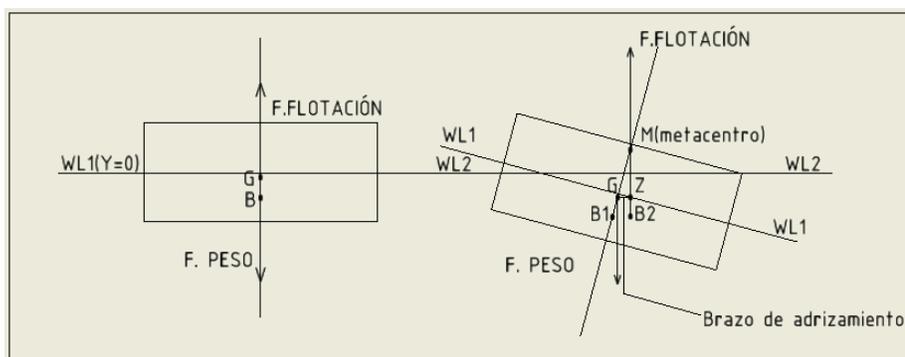
$$BM = \frac{I_z}{Vol_{sumergido}} = \frac{45,575[cm^4]}{27,28[cm^3]} = 1,67[cm] \tag{5.3}$$

Además, considerando  $BG = 4,88[mm]$  como la distancia entre el centro de gravedad del modelo  $A_2$  y el centro de boyantez del cuerpo en condiciones estáticas se obtiene la altura metacéntrica  $GM$  del modelo, tal que:

$$GM = BM - BG = 11,82[mm] \tag{5.4}$$

CoG (y)	CoB(y)	BM[mm]	BG[mm]	GM [mm]
-0,82	-5,7	16,7 [mm]	4,88 [mm]	11,82 [mm]

**Tabla 5.2:**  $A_2$  Parámetros de estabilidad estática.



**Figura 5.2:** Diagrama de cuerpo libre modelo  $A_2$

### 5.1.3. Modelo $A_3$

Se determinó para el modelo  $A_3$  que su centro de gravedad CoB se ubica a  $9,86[mm]$  de la base del cilindro, sobre el eje axisimétrico del mismo. Además, en condiciones estáticas presenta un calado  $L_{c3}$  igual  $15,58[mm]$ . Dado lo anterior, el centro de gravedad de la boya se ubica a  $5,72[mm]$  por debajo de la línea de agua quieta WL1. Mientras que el centro de boyantez CoB se ubica a  $7,79[mm]$  debajo de la línea de agua quieta WL1.

Por otro lado, la porción de volumen sumergido del modelo es igual a  $37,28[cm^3]$ , lo que representa un  $66,01\%$  del total del volumen del cuerpo.

Considerando el segundo momento de área  $I_z$  de la tabla 3.13, se obtiene la distancia BM desde el centro de boyantez al metacentro, tal que:

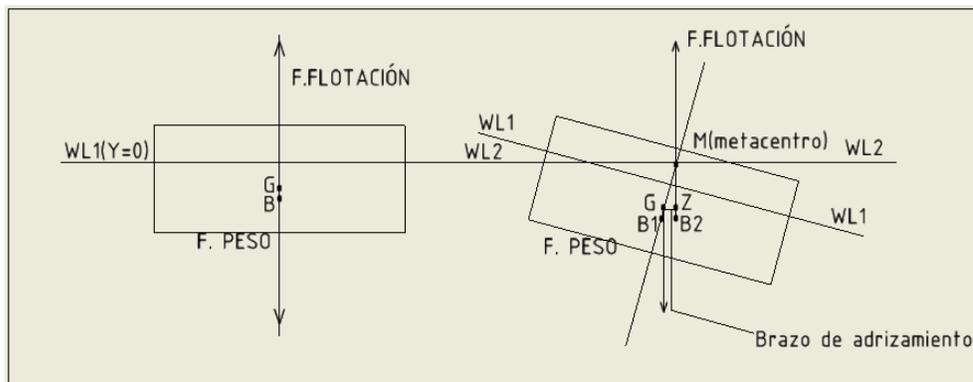
$$BM = \frac{I_z}{Vol_{sumergido}} = \frac{45,58[cm^4]}{37,28[cm^3]} = 1,22[cm] \quad (5.5)$$

Además, considerando  $BG = 2,07[mm]$  como la distancia entre el centro de gravedad del modelo  $A_3$  y el centro de boyantez del cuerpo en condiciones estáticas se obtiene la altura metacéntrica  $GM$  del modelo, tal que:

$$GM = BM - BG = 10,13[mm] \quad (5.6)$$

CoG (y)	CoB(y)	BM[mm]	BG[mm]	GM [mm]
-5,72	-7,79	12,2[mm]	2,07[mm]	10,13 [mm]

**Tabla 5.3:**  $A_3$  Parámetros de estabilidad estática.



**Figura 5.3:** Diagrama de cuerpo libre modelo  $A_3$ .

#### 5.1.4. Modelo $B_1$

Para el modelo  $B_1$  se determinó de la prueba P01-Prueba de plataforma seca, que su centro de gravedad se ubica a una distancia de  $27,77[mm]$  de la base del cilindro sobre el eje vertical axisimétrico. Mientras que su calado es igual a  $52,3[mm]$ . Dado lo anterior, el centro de gravedad del modelo se ubica a una longitud de  $24,53[mm]$  debajo de la línea de agua quieta. Mientras que el centro de boyantez se encuentra a una distancia de  $26,15[mm]$  debajo de la línea de agua quieta WL1.

Considerando un área plana del modelo igual a  $8,62[cm^2]$ , el volúmen sumergido del cuerpo flotante en condiciones estáticas es igual a  $45,08[cm^3]$ , correspondiente al  $79,83\%$  del volumen total del cuerpo.

Considerando el segundo momento de área de la tabla 3.16, se calcula la distancia desde el centro de boytez al metacentro, tal que:

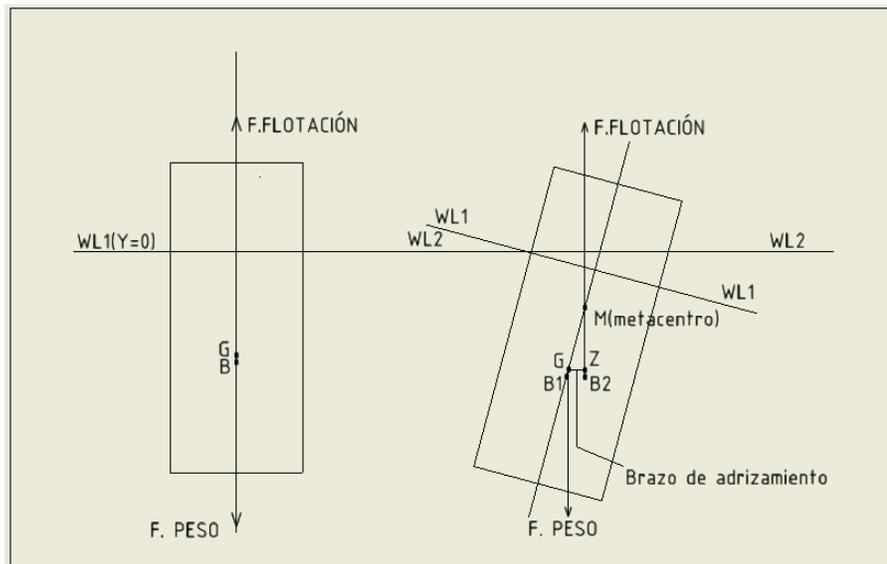
$$BM = \frac{I_z}{Vol_{sumergido}} = \frac{75,57cm^4}{45,08} = 1,68[cm] \quad (5.7)$$

Luego, considerando  $BG = 1,62[mm]$  como la distancia entre el centro de boyantez B y el centro de gravedad G del modelo  $B_1$  en condiciones de flotabilidad estática, se determina la altura metacéntrica GM, tal que:

$$GM = BM - BG = 15,18[mm] \quad (5.8)$$

CoG (y)	CoB(y)	BM[mm]	BG[mm]	GM [mm]
-24,53	-26,15	16,8[mm]	1,62 [mm]	15,18 [mm]

**Tabla 5.4:**  $B_1$  Parámetros de estabilidad estática.



**Figura 5.4:** Diagrama de cuerpo libre modelo  $B_1$

### 5.1.5. Modelo $B_2$

El modelo  $B_2$  presenta su centro de gravedad ubicado a una distancia de  $26,65[mm]$  de la base del cilindro. Por otro lado, su calado tiene una longitud de  $61,63[mm]$ . dado lo anterior, el centro de gravedad se ubica a  $34,98[mm]$  por debajo de la línea de agua quieta WL1.

Mientras que el centro de boyantez se ubica a  $30,82[mm]$  de la base del cilindro. Tanto el centro de gravedad como el de boyantez se ubican sobre el eje de simetría vertical del cilindro.

En condiciones de flotabilidad estáticas, el modelo  $B_2$  tiene un volumen sumergido de  $53,13[cm^3]$ , lo que representa un 94% del volumen total del cuerpo.

Considerando el segundo momento de área de la tabla 3.18, se calcula la distancia desde el centro de boyantez al metacentro, tal que:

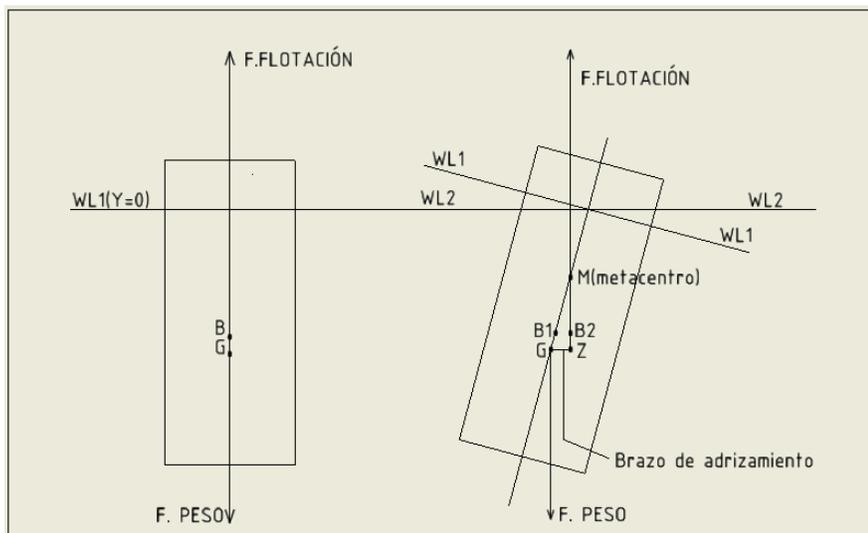
$$BM = \frac{I_z}{Vol_{sumergido}} = \frac{75,57[cm^4]}{53,13[cm^3]} = 1,42[cm] \quad (5.9)$$

Luego, considerando  $BG = 4,17[mm]$  como la distancia entre el centro de boyantez B y el centro de gravedad G del modelo  $B_2$  en condiciones de flotabilidad estática, se determina la altura metacéntrica GM, tal que:

$$GM = BM + BG = 18,37[mm] \quad (5.10)$$

CoG (y)	CoB(y)	BM[mm]	BG[mm]	GM [mm]
-34,98	-30,82	14,2[mm]	4,17 [mm]	18,37 [mm]

**Tabla 5.5:**  $B_2$  Parámetros de estabilidad estática.



**Figura 5.5:** Diagrama de cuerpo libre modelo  $B_2$ .

## 5.2. P03-Oscilación libre

### 5.2.1. Modelo A1

Para el análisis de la curva de decaimiento del modelo A1 se consideraron máximos locales, obteniéndose una amplitud máxima de 2,9 [mm], seguida de una amplitud de 0,9, 0,4 y 0,2 [mm]. Del los tiempos comprendidos entre cada máximo se obtuvo el periodo natural medio de oscilación del modelo, correspondiente a 0,3057 [s].

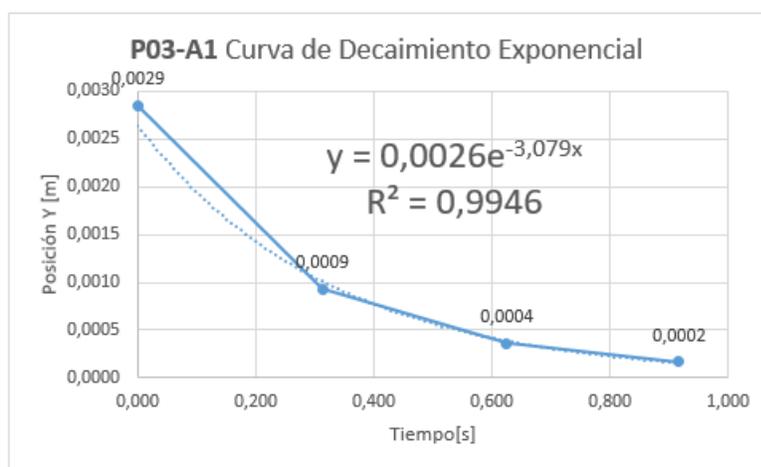
Peaks	$T[s]$	$Y[m]$	$\Delta T[s]$	$\Delta Y[m]$
1	0,0000	0,0029	-	-
2	0,3128	0,0009	0,3123	0,0019
3	0,6256	0,0004	0,3128	0,0006
4	0,9176	0,0002	0,2920	0,0002

**Tabla 5.6:** Modelo A<sub>1</sub>:Parámetros curva de decaimiento

A partir de los datos de la tabla 5.1 se trazó la curva de decaimiento (Figura 5.1) y se realizó un ajuste exponencial tal que:

$$y = 0,0026e^{-3,079x} \tag{5.11}$$

Donde la amplitud de decaimiento exponencial ( $S_a$ ) toma un valor de 0,0026[m] y la constante de decaimiento ( $\nu$ ) igual a 3,079. Para el ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) de 0,9946.



**Figura 5.6:** Ajuste de decaimiento exponencial modelo A<sub>1</sub>

A partir del periodo medio natural se obtuvo la frecuencia natural correspondiente a  $20,55$   $[rad/seg]$  y la masa agregada de la boya correspondiente a  $0,0351[kg]$ . A partir de dichos valores, y utilizando la ecuación 2.37, se determinó el coeficiente de amortiguación hidrodinámico igual  $0,3422[kg/s]$ . Además se obtuvo la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$  igual a  $20,32[rad/seg]$ .

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores mencionados:

Parámetro	Descripción	Modelo
$M [kg]$	Masa	0,02048
$D[m]$	Diámetro	0,0552
$Awp[m^2]$	Área plana de agua	0,0024
$k[kg/s^2]$	Coef. De restauración hidrostática	23,48
$\nu[1/s]$	Constante de decaimiento	3,0790
$Sa[m]$	Amplitud decaimiento exponencial	0,0026
$T_n[s]$	Periodo natural medio	0,3057
$\omega_n[rad/seg]$	Frecuencia natural	20,55
$ma[kg]$	Masa agregada	0,0351
$\omega_d[rad/s]$	Frecuencia natural amortiguada	20,32
$bhyd[kg/s]$	Coef. De amortiguación hidrodinámico	0,3422

**Tabla 5.7:** Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo  $A_1$

### 5.2.2. Modelo A2

Para el análisis de la curva de decaimiento del modelo A2 se consideraron máximos locales, obteniéndose una amplitud máxima de  $2,8$   $[mm]$ , seguida de una amplitud de  $1, 0,4$  y  $0,1$   $[mm]$ . Del los tiempos comprendidos entre cada máximo se obtuvo el periodo natural medio de oscilación del modelo, correspondiente a  $0,3267$   $[s]$ .

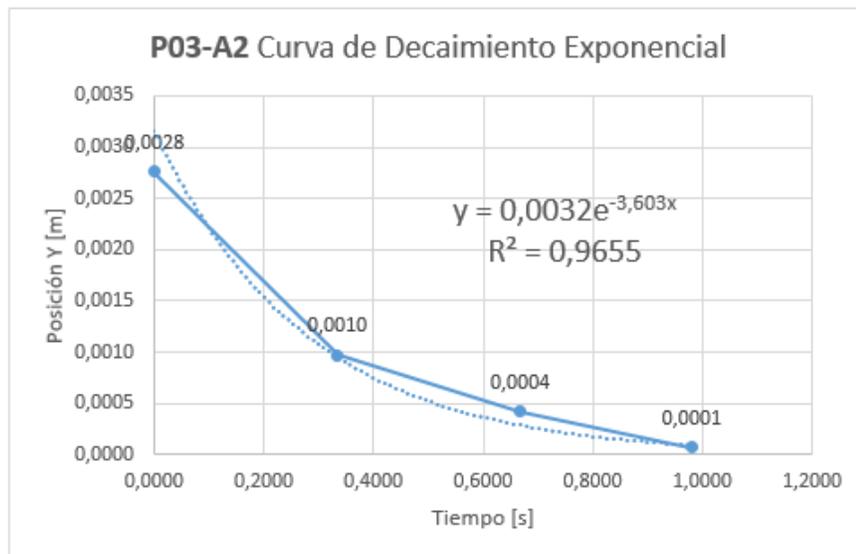
Peaks	$T[s]$	$Y[m]$	$\Delta T[s]$	$\Delta Y[m]$
1	1,3555	0,0028		
2	1,6892	0,0010	0,3337	0,0018
3	2,0229	0,0004	0,3337	0,0005
4	2,3357	0,0001	0,3128	0,0004

**Tabla 5.8:** Modelo  $A_2$ :Parámetros curva de decaimiento

A partir de los datos de la tabla 5.3 se trazó la curva de decaimiento (Figura 5.2) y se realizó un ajuste exponencial tal que:

$$y = 0,0032e^{-3,603x} \tag{5.12}$$

Donde la amplitud de decaimiento exponencial ( $S_a$ ) toma un valor de 0,0032[m] y la constante de decaimiento ( $\nu$ ) igual a 3,6030. Para el ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) de 0,9655.



**Figura 5.7:** Ajuste de decaimiento exponencial modelo  $A_2$

A partir del periodo medio natural se obtuvo la frecuencia natural correspondiente a 19,23 [rad/seg] y la masa agregada de la boya correspondiente a 0,0352[kg]. A partir de dichos valores, y utilizando la ecuación 2.37, se determinó el coeficiente de amortiguación hidrodinámico igual 0,4574[kg/s]. Además se obtuvo la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$  igual a 18,89[rad/seg].

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores mencionados:

Parámetro	Descripción	Modelo
$M [kg]$	Masa	0,0283
$D[m]$	Diámetro	0,0552
$Awp[m^2]$	Área plana de agua	0,0024
$k[kg/s^2]$	Coef. De restauración hidrostática	23,48
$\nu[1/s]$	Constante de decaimiento	3,6030
$Sa[-]$	Amplitud decaimiento exponencial	0,4183
$T_n[s]$	Periodo natural medio	0,3267
$\omega_n[rad/seg]$	Frecuencia natural	19,23
$ma[kg]$	Masa agregada	0,0352
$\omega_d[rad/s]$	Frecuencia natural amortiguada	18,89
$bhyd[kg/s]$	Coef. De amortiguación hidrodinámico	0,4574

**Tabla 5.9:** Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo  $A_2$

### 5.2.3. Modelo A3

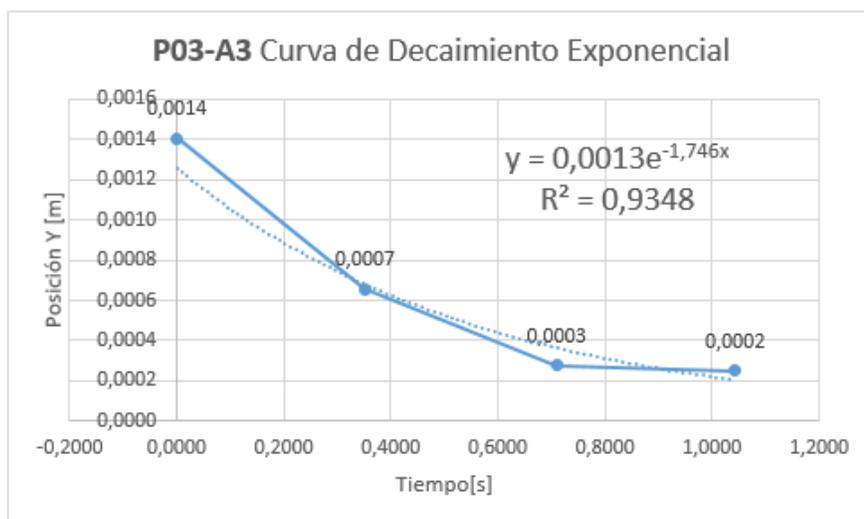
Para el análisis de la curva de decaimiento del modelo A3 se consideraron máximos locales, obteniéndose una amplitud máxima de 1,4 [mm], seguida de una amplitud de 0,7, 0,3 y 0,2 [mm]. Del los tiempos comprendidos entre cada máximo se obtuvo el periodo natural medio de oscilación del modelo, correspondiente a 0,3476 [s].

Peaks	$T[s]$	$Y[m]$	$\Delta T[s]$	$\Delta Y[m]$
1	0,0000	0,0014	-	-
2	0,3512	0,0007	0,3512	0,0007
3	0,7090	0,0003	0,3578	0,0004
4	1,0427	0,0002	0,3337	0,0000

**Tabla 5.10:** Modelo  $A_3$ :Parámetros curva de decaimiento

A partir de los datos de la tabla 5.5 se trazó la curva de decaimiento (Figura 5.3) y se realizó un ajuste exponencial tal que:

$$y = 0,0032e^{-3,603x} \quad (5.13)$$



**Figura 5.8:** Ajuste de decaimiento exponencial modelo  $A_3$

Donde la amplitud de decaimiento exponencial ( $S_a$ ) toma un valor de 0,0013[m] y la constante de decaimiento ( $\nu$ ) igual a 1,746. Para el ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) de 0,9348.

A partir del periodo medio natural se obtuvo la frecuencia natural correspondiente a 18,08 [rad/seg] y la masa agregada de la boya correspondiente a 0,0351[kg]. A partir de dichos valores, y utilizando la ecuación 2.37, se determinó el coeficiente de amortiguación hidrodinámico igual 0,2508[kg/s]. Además se obtuvo la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$  igual a 17,99[rad/seg].

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores mencionados:

Parámetro	Descripción	Modelo
$M [kg]$	Masa	0,0367
$D[m]$	Diámetro	0,0552
$Awp[m^2]$	Área plana de agua	0,0024
$k[kg/s^2]$	Coef. De restauración hidrostática	23,48
$\nu[1/s]$	Constante de decaimiento	1,7460
$Sa[-]$	Amplitud decaimiento exponencial	0,0072
$T_n[s]$	Periodo natural medio	0,3476
$\omega_n[rad/seg]$	Frecuencia natural	18,08
$ma[kg]$	Masa agregada	0,0351
$\omega_d[rad/s]$	Frecuencia natural amortiguada	17,99
$bhyd[kg/s]$	Coef. De amortiguación hidrodinámico	0,2508

**Tabla 5.11:** Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo  $A_3$

#### 5.2.4. Modelo B1

Para el análisis de la curva de decaimiento del modelo B1 se consideraron seis máximos locales, obteniéndose una amplitud máxima de 5,7 [mm], seguida de una amplitud de 3,5, 2,1, 1,2, 0,9 y 0,5 [mm]. Del los tiempos comprendidos entre cada máximo se obtuvo el periodo natural medio de oscilación del modelo, correspondiente a 0,4755 [s].

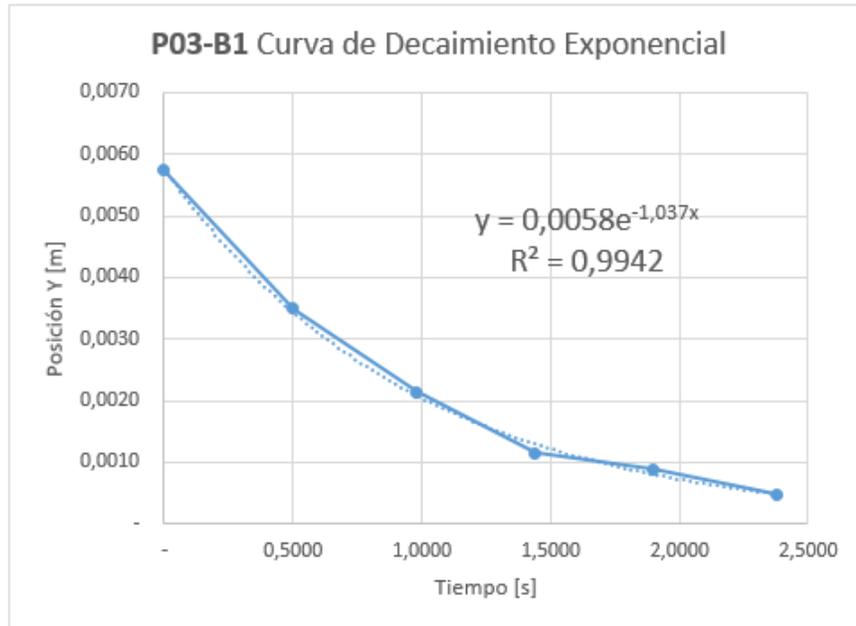
Peaks	$T[s]$	$Y[m]$	$\Delta T[s]$	$\Delta Y[m]$
1	0,0	0,0057	-	-
2	0,5005	0,0035	0,5005	0,0023
3	0,9802	0,0021	0,4796	0,0014
4	1,4390	0,0012	0,4588	0,0010
5	1,8978	0,0009	0,4588	0,0003
6	2,3774	0,0005	0,4796	0,0004

**Tabla 5.12:** Modelo  $B_1$ :Parámetros curva de decaimiento

A partir de los datos de la tabla 5.5 se trazó la curva de decaimiento (Figura 5.3) y se realizó un ajuste exponencial tal que:

$$y = 0,0058e^{-1,037x} \quad (5.14)$$

Donde la amplitud de decaimiento exponencial ( $S_a$ ) toma un valor de 0,0058[m] y la constante de decaimiento ( $\nu$ ) igual a 1,037. Para el ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) de 0,9942.



**Figura 5.9:** Ajuste de decaimiento exponencial modelo  $B_1$

A partir del periodo medio natural se obtuvo la frecuencia natural correspondiente a 13,21 [rad/seg] y la masa agregada de la boya correspondiente a 0,0065[kg]. A partir de dichos valores, y utilizando la ecuación 2.37, se determinó el coeficiente de amortiguación hidrodinámico igual 0,0898[kg/s]. Además se obtuvo la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$  igual a 13,17[rad/seg].

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores mencionados:

Parámetro	Descripción	Modelo
M [kg]	Masa	0,0368
D[m]	Diámetro	0,0313
$Awp[m^2]$	Área plana de agua	0,0008
$k[kg/s^2]$	Coef. De restauración hidrostática	7,56
$\nu[1/s]$	Constante de decaimiento	1,037
$Sa[-]$	Amplitud decaimiento exponencial	0,0058
$T_n[s]$	Periodo natural medio	0,4755
$\omega_n[rad/seg]$	Frecuencia natural	13,21
$ma[kg]$	Masa agregada	0,0065
$\omega_d[rad/s]$	Frecuencia natural amortiguada	13,17
$b_{hyd}[kg/s]$	Coef. De amortiguación hidrodinámico	0,0898

**Tabla 5.13:** Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo  $B_1$

### 5.2.5. Modelo B2

Para el análisis de la curva de decaimiento del modelo B1 se consideraron seis máximos locales, obteniéndose una amplitud máxima de 3,0 [mm], seguida de una amplitud de 2,0, 1,4, 1,0, 0,8 y 0,5 [mm]. Del los tiempos comprendidos entre cada máximo se obtuvo el periodo natural medio de oscilación del modelo, correspondiente a 0,5144 [s].

Peaks	$T[s]$	$Y[m]$	$\Delta T[s]$	$\Delta Y[m]$
1	0,0	0,0030	-	-
2	0,5422	0,0020	0,5422	0,0010
3	1,0635	0,0014	0,5214	0,0006
4	1,5849	0,0010	0,5214	0,0004
5	2,0854	0,0008	0,5005	0,0002
6	2,5859	0,0005	0,5005	0,0002

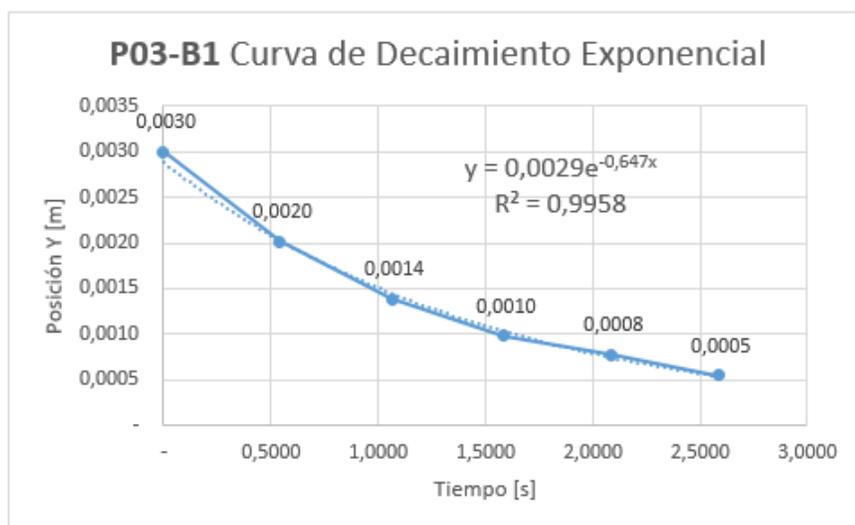
**Tabla 5.14:** Modelo  $B_2$ :Parámetros curva de decaimiento

A partir de los datos de la tabla 5.9 se trazó la curva de decaimiento (Figura 5.5) y se realizó un ajuste exponencial tal que:

$$y = 0,0029e^{-0,647x} \quad (5.15)$$

Donde la amplitud de decaimiento exponencial ( $S_a$ ) toma un valor de 0,0029[m] y la constante de decaimiento ( $\nu$ ) igual a 0,6470. Para el ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de

determinación ajustado ( $R^2$ ) de 0,9958.



**Figura 5.10:** Ajuste de decaimiento exponencial modelo  $B_2$

A partir del periodo medio natural se obtuvo la frecuencia natural correspondiente a 12,21 [rad/seg] y la masa agregada de la boya correspondiente a 0,0053[kg]. A partir de dichos valores, y utilizando la ecuación 2.37, se determinó el coeficiente de amortiguación hidrodinámico igual 0,0656[kg/s]. Además se obtuvo la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$  igual a 12,20[rad/seg].

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores mencionados:

Parámetro	Descripción	Modelo
M [kg]	Masa	0,0455
D[m]	Diámetro	0,0313
$A_{wp}$ [m <sup>2</sup> ]	Área plana de agua	0,0008
$k$ [kg/s <sup>2</sup> ]	Coef. De restauración hidrostática	7,56
$\nu$ [1/s]	Constante de decaimiento	0,6470
Sa[-]	Amplitud decaimiento exponencial	0,0029
$T_n$ [s]	Periodo natural medio	0,5144
$\omega_n$ [rad/seg]	Frecuencia natural	12,21
ma[kg]	Masa agregada	0,0052
$\omega_d$ [rad/s]	Frecuencia natural amortiguada	12,20
b <sub>hyd</sub> [kg/s]	Coef. De amortiguación hidrodinámico	0,0656

**Tabla 5.15:** Resumen valores obtenidos Prueba P03-Prueba de oscilación libre Modelo  $B_2$

### 5.3. P04-Oscilación forzada

A continuación será presentado el análisis estadístico de los parámetros cinemáticos y dinámicos, así como los índices de desempeño de captura de energía obtenidos de la prueba P04-Oscilación forzada, realizadas para el modelo A1 en los nueve estados de mar propuestos ( $E_{ij}, i, j = 1, 2, 3.$ ). El mismo análisis es presentado para los modelos A2, A3, B1, B2 y su desempeño en el estado de mar  $E_{22}$ .

En primera instancia se presenta para el modelo A1 los valores máximo, mínimo y medio de la posición rastreada en la coordenada vertical  $Y$  y la coordenada horizontal  $X$ , junto con la desviación estándar asociada. Se presenta también el valor promedio de la amplitud de oscilación vertical del modelo obtenido de la diferencia entre los máximos y mínimos locales de posición consecutivos. Se muestran los valores máximos, mínimos y medios entregados por el software de rastreo Tracker tanto para las velocidades horizontal y vertical, como para la magnitud de la velocidad. De igual modo se presentan los valores máximos, mínimos y medios de las aceleraciones horizontal y vertical, así como la magnitud de la aceleración.

A partir de las variables anteriormente mencionadas se obtuvieron los valores de fuerza neta, energía cinética y potencia del modelo. Se presentan los valores máximos, mínimos y medios.

Para representar el desempeño de captura de energía del modelo se calcularon los parámetros de **ancho de casco** y **ancho de captura**.

### 5.3.1. Modelo A1

#### 5.3.1.1. Estado de mar $E_{11}$

##### ■ Parámetros de Oleaje

En la tabla 5.16 se presentan los valores teóricos y experimentales de los parámetros característicos de oleaje monocromático del estado de mar  $E_{11}$ : Altura de ola  $H_s$ , Periodo de ola  $T_s$ , longitud de onda  $L$ , Celeridad  $C$  y Potencia de oleaje  $P$ . Se consiguió una altura significativa experimental 31 % superior a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 2,65 % menor al periodo teórico significativo propuesto. Con lo parámetro experimentales mencionados se obtuvo una oleaje de longitud de onda igual a 1,5643 [m] y celeridad 1,6036 [m/s] cuya potencia alcanzó los 0,1807 [W/m].

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	1	1, 13	1, 6306	1, 6308	0, 10817
Experimental	1, 31	1, 1	1, 5643	1, 6036	0, 1807

**Tabla 5.16:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{11}$  para el modelo  $A_1$ .

##### ■ Desplazamientos

Durante el tiempo de análisis seleccionado el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,2[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento es constante durante los 60 segundos analizados.

Mientras que se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 10,9[mm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue inferior en 2,2 [mm] respecto de la altura de ola significativa experimental conseguida para el estado de mar  $E_{11}$ . Además es posible evidenciar un desplazamiento hacia arriba de la grafica de trayectoria vertical a partir del segundo 34, sin embargo, la amplitud de oscilación se mantuvo constante durante todo el análisis

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento horizontal	Amplitud media de oscilación vertical
60 [s]	0, 2[m]	$1, 09 * 10^{-2}[m]$

**Tabla 5.17:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{11}$

### ■ Parámetros cinemáticos

Se evidencia que los valores de la curva de magnitud de velocidad oscilan entre un valor máximo de 0,06244 [m/s] y un valor mínimo de 0,03069 [m/s], encontrándose los máximos y mínimos locales cercanos a estos valores. En tanto, se alcanzó en una velocidad máxima horizontal de 0,0378 [m/s] y 0,039[m/s] vertical.

La aceleración horizontal alcanzó un valor máximo de 0,5012 [m/s<sup>2</sup>] y 0,4906 [m/s<sup>2</sup>] en el sentido vertical. La magnitud de aceleración máxima considerando las componentes horizontales y verticales alcanzó un valor máximo de 0,7051 [m/s<sup>2</sup>].

Los valores máximos, mínimos y medios de los parámetros cinemáticos se muestran a continuación en la tabla 5.18:

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,0378	0,039	0,06244	0,5012	0,4906	0,7051
Mín	-0,0545	-0,0624	0,003816	0,4151	-0,6529	0,0044
Media	-0,0033	-0,0000059	0,03069	0,000291	0,0004796	0,2428
D.Estándar	0,0219	0,0232	0,009342	0,1727	0,2118	0,1258

**Tabla 5.18:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{11}$ .

### ■ Parametros dinámicos

En cuanto a los parámetros dinámicos obtenidos del análisis del modelo  $A_1$  para el estado de mar  $E_{11}$  se alcanzó un valor máximo de fuerza neta igual a 0,0144[N] y medio de 0,004967 [N]. En tanto la potencia máxima alcanzó un valor de 0,00060354 [W], mientras que se obtuvo un valor medio de 0,0001579 [W]. En términos generales, tanto la curva de fuerza neta, como de potencia se mantuvieron dentro del rango de valores máximos y mínimos mencionados en la tabla 5.19.

	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,01444	0,00060354
Mín	0,000090265	0,000001513
Media	0,004967	0,0001579
D.Estándar	0,002575	0,0001047

**Tabla 5.19:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{11}$

### 5.3.1.2. Estado de mar $E_{12}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

Los valores teóricos y experimentales de los parámetros característicos de oleaje monocromático del estado de mar  $E_{11}$  difieren en un 0,6% para la altura de ola  $H_s$ , siendo el valor experimental menor al valor teórico propuesto. Mientras que para el periodo significativo el valor experimental fue un 0,8% mayor al valor teórico propuesto. Con lo anterior se consiguió una longitud de onda de 1,65[m] y una celeridad de 1,64 [m/s]. En consecuencia la potencia del oleaje monocromático presentado alcanzó un valor de 1,22 [W/m].

	$H_s[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	3,36	1,13	1,63	1,63	1,22
Experimental	3,34	1,14	1,65	1,64	1,22

**Tabla 5.20:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{12}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

Se obtuvo para el Estado de mar  $E_{12}$  un desplazamiento horizontal de 0,6769 [m] en la dirección de propagación del oleaje ( $-X$ ), manteniendo una pendiente constante durante el tiempo de análisis. En cuanto a la posición del modelo en el sentido vertical, se aprecia un desplazamiento hacia arriba de la curva a partir del segundo 35, que logra estabilizarse a partir del segundo 58. Sin embargo, se mantiene relativamente constante la amplitud de oscilación durante el periodo de análisis lográndose un valor promedio de 3,64 [cm]. El valor antes mencionado supera en 3 [mm] a la altura de ola significativa lograda.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Amplitud media de oscilación vertical
60 [s]	0,679 [m]	0,0364[m]

**Tabla 5.21:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{12}$

### ■ Parámetros cinemáticos

La magnitud de la velocidad del modelo oscila entre un valor máximo 0,1914 [m/s] y un mínimo 0,0417 [m/s]. Tanto los valores máximos como mínimos locales se mantienen similares unos con otros. La media se sitúa en 0,1005 [m/s] con una desviación estándar baja de 0,0240. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1335 [m/s] y -0,1681 [m/s], mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1613 [m/s] y 0,1727 [m/s].

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 1,5659 [m/s<sup>2</sup>] y un mínimo de 0,0376 [m/s<sup>2</sup>], con una media de 0,62 [m/s<sup>2</sup>] con una desviación estándar de 0,0240. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,5257 [m/s<sup>2</sup>] y -1,4342 [m/s<sup>2</sup>]. Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,0680 [m/s<sup>2</sup>] y -1,1632 [m/s<sup>2</sup>]. Se aprecia que los valores máximos de la magnitud de aceleración vertical coinciden con el momento en que la boya se encuentra en el punto más bajo de la ola.

	$v_x$ [m/s]	$v_y$ [m/s]	$v$ [m/s]	$a_x$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_y$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a$ [m/s <sup>2</sup> ]
Máx	0,1335	0,1613	0,1914	1,0680	1,5257	1,5669
Mín	-0,1681	0,1727	0,0417	-1,1632	-1,4342	0,0376
Media	-0,0109	4,74E-04	0,1005	-0,0025	0,0010	0,6200
D.Estándar	0,0732	0,0720	0,0240	0,4575	0,4948	0,2637

**Tabla 5.22:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{12}$ .

### ■ Parametros dinámicos

La fuerza neta oscila entre un valor máximo de 0,0320 [N] y un mínimo de 0,000771 [N]. Se aprecia de acuerdo a la figura 4.16 que los valores máximos locales obtenidos coinciden con el momento en que el modelo se encuentra en el punto más bajo de la ola. Este punto coincide a su vez con los valor máximo de la componente vertical de la aceleración, en tanto no se puede concluir respecto de su componente horizontal dado que su valor varía para cada máximo local. En dicho instante la velocidad vertical es cercana a 0, mientras que su componente horizontal alcanza valores máximos. Las relaciones mencionadas se invierten en los instantes en que la boya se encuentra en su punto más alto.

La potencia del modelo fluctúa entre los 0,0045 y 0,0000763 [W/m], presentando un comportamiento similar al de la fuerza neta, coincidiendo en el instante en que se alcanzan los valores máximos y mínimos.

A continuación se presentan los valores máximos, mínimos y medios obtenidos para la fuerza neta y potencia del modelo:

	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,0320	0,0045
Mín	7,71E-04	7,63E-05
Media	0,01269	0,0012
D.Estándar	0,0054	6,41E-04

**Tabla 5.23:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1, E_{12}$

### 5.3.1.3. Estado de mar $E_{13}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

Para el estado de mar  $E_{13}$  coincidieron los valores teóricos propuestos con los valores experimentales alcanzados en cuanto a altura de ola significativa y periodo significativo, siendo estos 5 [cm] y 1,14 [s] respectivamente. Esto dió origen a un oleaje de longitud de onda igual a 1,67 [m] y celeridad 1,74 [m/s].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	5	1,14	1,6527	1,6395	2,7282
Experimental	5,0	1,14	1,665	1,64	2,73

**Tabla 5.24:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{13}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

El modelo logró desplazarse una longitud de 1,46 [m] durante el tiempo analizado en la dirección de propagación del oleaje. Además, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical de 5,60 [cm], superior en un 12% a la altura de ola significativa.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Amplitud media de oscilación vertical
60 [s]	1,46 [m]	0,0560 [m]

**Tabla 5.25:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{13}$

- **Parámetros cinemáticos**

La magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,3484 y 0  $[m/s]$ . La media se sitúa en 0,1541  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0541. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,2593  $[m/s]$  y -0,3248  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,3176  $[m/s]$  y -0,3017  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 3,9644  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0  $[m/s^2]$ , con una media de 1,2856  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,6644. En tanto la aceleración vertical oscila entre 3,9408  $[m/s^2]$  y -3,7527  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 3,2238  $[m/s^2]$  y -3,4979  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,2593	0,3176	0,3484	3,2238	3,9408	3,9644
Mín	-0,3248	-0,3017	0	-3,4979	-3,7527	0
Media	-0,0246	-0,0018	0,1541	0,0145	-0,0111	1,2856
D.Estándar	0,1168	0,1115	0,0541	1,0058	1,0407	0,6644

**Tabla 5.26:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{13}$ .

- **Parametros dinámicos**

La fuerza neta máxima alcanzada alcanzó un valor de 0,0812  $[N]$  y un mínimo de 0  $[N]$ , con una media de 0,0263  $[N]$ , cuya desviación estandar es de 0,0136. Es posible apreciar que los valores máximos de fuerza neta coinciden con los valores máximos de magnitud de aceleración. De igual modo ocurre con los valores de potencia obtenidos, que oscilan entre 0,0191 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0041  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0028.

	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,0812	0,0191
Mín	0	0
Media	0,0263	0,0041
D.Estándar	0,0136	0,00283

**Tabla 5.27:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{13}$

### 5.3.1.4. Estado de mar $E_{21}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

En la tabla 5.23 se presentan los valores teóricos y experimentales de los parámetros característicos de oleaje monocromático del estado de mar  $E_{21}$ : Altura de ola  $H_s$ , Periodo de ola  $T_s$ , longitud de onda  $L$ , Celeridad  $C$  y Potencia de oleaje  $P$ . Se consiguió una altura significativa experimental 14% superior a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 0,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo un oleaje de longitud de onda igual a 2,43 [m] y celeridad 1,84 [m/s] cuya potencia alcanzó los 0,1854 [W/m].

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W]$
Teórico	1,0	1,48	2,41	1,84	0,1417
Experimental	1,14	1,49	2,44	1,88	0,1854

**Tabla 5.28:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{21}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

Se obtuvo para el Estado de mar  $E_{21}$  un desplazamiento horizontal de 0,0845 [m] en la dirección de propagación del oleaje ( $-X$ ), manteniendo una pendiente constante durante el tiempo de análisis.

En cuanto a la posición del modelo en el sentido vertical, se aprecia un desplazamiento hacia arriba de la curva a partir del segundo 60. Sin embargo, se mantiene relativamente constante la amplitud de oscilación durante el periodo de análisis lográndose un valor promedio de 1,07 [cm]. El valor antes mencionado es menor en un 6,1% a la altura de ola significativa lograda.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,0845 [m]	0,0107 [m]

**Tabla 5.29:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{21}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.25, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,0421 y 0,0048  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0232  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0077. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,03  $[m/s]$  y -0,035  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,0343  $[m/s]$  y -0,0341  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 0,5518  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0054  $[m/s^2]$ , con una media de 0,1984  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,0972. En tanto la aceleración vertical oscila entre 0,4084  $[m/s^2]$  y -0,5491  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 0,3807  $[m/s^2]$  y -0,3558  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,030054	0,034276	0,042149	0,380651	0,408457	0,551786
Mín	-0,035037	-0,034101	0,004851	-0,355801	-0,549109	0,005413
Media	-0,001421	0,000036	0,023195	-0,000095	-0,000366	0,198429
D.Estándar	0,017457	0,017097	0,007796	0,135341	0,174700	0,097166

**Tabla 5.30:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{21}$ .

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.26 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0113  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0001  $[N]$ , con una media igual a 0,0041  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,002.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0004 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0001  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0001.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,011301	0,0004
Mín	0,000111	0
Media	0,004064	0,0001
D.Estándar	0,001990	0,0001

**Tabla 5.31:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{21}$

### 5.3.1.5. Estado de mar $E_{22}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

Para el estado de mar  $E_{22}$  se consiguió un oleaje monocromático con altura de ola significativa de 3.34 [cm], inferior en un 0,6% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 1,49 [s], 0,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo un oleaje de longitud de onda igual a 2,4 [m] y celeridad 1,84 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,5912 [W/m]. En la tabla 5.31 se muestran los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	3,36	1,48	2,4132	1,8444	1,5995
Experimental	3,34	1,49	2,4356	1,8483	1,5912

**Tabla 5.32:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{22}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Trayectoria, desplazamiento horizontal y amplitud media de oscilación vertical

El modelo  $A_1$ , frente a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , describió una trayectoria elíptica con un radio horizontal levemente mayor al vertical. Con esto, consiguió desplazarse una longitud total de 0,2[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento es constante durante los 60 segundos analizados.

Mientras que se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,06[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue inferior en 0,28[cm] respecto de la altura de ola significativa experimental conseguida para el estado de mar  $E_{22}$ . Además es posible evidenciar un desplazamiento hacia abajo de la gráfica de trayectoria vertical a partir del segundo 65, sin embargo, la amplitud de oscilación sin variaciones considerables durante el análisis.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,203 [m]	0,0306 [m]

**Tabla 5.33:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{22}$

### ■ Parámetros cinemáticos

De acuerdo a la tabla 5.29, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,1642 y 0,0163  $[m/s]$ . La media se situó en 0,846  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0197. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1298  $[m/s]$  y -0,1326  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1384  $[m/s]$  y -0,1637  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 14350  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0125  $[m/s^2]$ , con una media de 0,4619  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,2186. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,2368  $[m/s^2]$  y -1,1203  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,3278  $[m/s^2]$  y -0,8812  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,13843	0,12984	0,16419	1,32776	1,23682	1,43497
Mín	-0,16365	-0,13262	0,01632	-0,88120	-1,13032	0,01248
Media	-0,00342	-0,00003	0,08458	-0,00012	0,00041	0,46193
D.Estándar	0,07168	0,04895	0,01969	0,38542	0,33575	0,21858

**Tabla 5.34:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{22}$

### ■ Parametros dinámicos

Tal como se muestra en la tabla 5.30 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0294  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,00026  $[N]$ , con una media igual a 0,0095  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,002.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0026 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0008  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0004.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0294	0,0026
Mín	0,0002	0
Media	0,0095	0,0008
D.Estándar	0,0045	0,0004

**Tabla 5.35:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{22}$

### 5.3.1.6. Estado de mar $E_{23}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

Para el estado de mar  $E_{23}$  se consiguió un oleaje monocromático con altura de ola significativa de 5,16 [cm], superior en un 3,2% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 1,52 [s], 2,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo un oleaje de longitud de onda igual a 2,5 [m] y celeridad 1,86 [m/s] cuya potencia alcanzó los 3,87 [W/m]. En la tabla 5.31 se muestran los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	5,0	1,48	2,4132	1,8444	3,5419
Experimental	5,16	1,52	2,5028	1,8594	3,8742

**Tabla 5.36:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{23}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

El modelo  $A_1$ , bajo las condiciones de oleaje monocromático del estado de mar  $E_{23}$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,74[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento es constante durante los 60 segundos analizados. Mientras que se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 5,47[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,31 [cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

Tanto la curva de posición horizontal como vertical no presentan variaciones considerables durante el tiempo analizado.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,741[m]	0,0547 [m]

**Tabla 5.37:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{23}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.33, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,2913 y 0,0181  $[m/s]$ . La media se situó en 0,1256  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0383. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,2049  $[m/s]$  y -0,2868  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,2036  $[m/s]$  y -0,2329  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 2,5866  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0  $[m/s^2]$ , con una media de 0,7984  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,4143. En tanto la aceleración vertical oscila entre 2,4453  $[m/s^2]$  y -1,9302  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 2,2072  $[m/s^2]$  y -0,0187  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,2049	0,2036	0,2913	2,2072	2,4453	2,5866
Mín	-0,2868	-0,2329	0,0181	-0,0187	-1,9302	0,0000
Media	-0,0134	-0,0007	0,1256	0,0043	-0,0049	0,7984
D.Estándar	0,1015	0,0822	0,0383	0,6256	0,6465	0,4143

**Tabla 5.38:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{23}$

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.34 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0530  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0  $[N]$ , con una media igual a 0,0164  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0085.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0112 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0021  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0015.

	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,0530	0,0112
Mín	0,0	0,0
Media	0,0164	0,0021
D.Estándar	0,0085	0,0015

**Tabla 5.39:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{23}$

### 5.3.1.7. Estado de mar $E_{31}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

La altura de ola significativa conseguida experimentalmente para el estado de mar  $E_{31}$  fue de 1,25 [cm], superior en un 25% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 1,71 [s], 1,2% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo un oleaje de longitud de onda igual a 2,93 [m] y celeridad 1,91 [m/s] cuya potencia alcanzó los 0,26 [W/m]. En la tabla 5.35 se muestran los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[cm]$	$C[cm/s]$	$P[W]$
Teórico	1,0	1,69	2,8830	1,9096	0,1618
Experimental	1,25	1,71	2,93	1,91	0,26

**Tabla 5.40:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{31}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{31}$  el modelo consiguió desplazarse una longitud total de 0,07[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento no presenta variaciones considerables durante los 60 segundos analizados.

En la curva de posición horizontal se logra apreciar una amplitud mayor durante los primeros 5 [s] de análisis, que luego decrece y se estabiliza. Considerando lo anterior, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,0[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue inferior en 0,25 [cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,0694[m]	0,01[m]

**Tabla 5.41:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{31}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.37, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,05603 y 0,0039  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0271  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0088. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,0373  $[m/s]$  y -0,0431  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,0559  $[m/s]$  y -0,0359  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 0,6080  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0047  $[m/s^2]$ , con una media de 0,1955  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,1142. En tanto la aceleración vertical oscila entre 0,4616  $[m/s^2]$  y -0,5334  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 0,5275  $[m/s^2]$  y -0,4712  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,0373	0,0559	0,0560	0,5275	0,4616	0,6081
Mín	-0,0431	-0,0359	0,0039	-0,4712	-0,5334	0,0047
Media	-0,0010	-0	0,0271	0,0001	0,0004	0,1955
D.Estándar	0,0222	0,0177	0,0088	0,1575	0,1628	0,1142

**Tabla 5.42:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{31}$

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.38 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0125  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0001  $[N]$ , con una media igual a 0,0040  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0023.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0005 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0001  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0001.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0125	0,0005
Mín	0,0001	0
Media	0,0040	0,0001
D.Estándar	0,0023	0,0001

**Tabla 5.43:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{31}$

5.3.1.8. Estado de mar  $E_{32}$

■ **Parámetros de Oleaje**

Para el estado de mar  $E_{32}$  se consiguió un oleaje monocromático con altura de ola significativa de 3,35 [cm], inferior en un 0,3% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 1,78 [s], 5,3% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con lo parámetro experimentales mencionados se obtuvo una oleaje de longitud de onda igual a 3,08 [m] y celeridad 1,93 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,91 [W/m]. En la tabla 5.39 se recogen los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[cm]$	$C[cm/s]$	$P[W]$
Teórico	3,36	1,69	2,8830	1,9096	1,8264
Experimental	3,35	1,78	3,0834	1,9290	1,9123

**Tabla 5.44:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{32}$  para el modelo  $A_1$ .

■ **Desplazamientos**

Para el estado de mar  $E_{32}$  el modelo consiguió desplazarse una longitud total de 0,22[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento no presenta variaciones considerables durante los 60 segundos analizados.

En la curva de posición horizontal se logra apreciar una leve desplazamiento hacia arriba a partir del segundo 55. Sin embargo, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,38[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,03 [cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,22 [m]	0,0338[m]

**Tabla 5.45:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{32}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.41, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,1996 y 0,004  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0853  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0266. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1873  $[m/s]$  y -0,1719  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1045  $[m/s]$  y -0,1676  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 2,0818  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0186  $[m/s^2]$ , con una media de 0,4692  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,2662. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,8357  $[m/s^2]$  y -1,8281  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,5613  $[m/s^2]$  y -1,3878  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,1873	0,1045	0,1995	1,5613	1,8357	2,0818
Mín	-0,1719	-0,1676	0,0040	-1,3878	-1,8281	0,0186
Media	-0,0044	0,0005	0,0853	-0,0019	-0,0008	0,4692
D.Estándar	0,0761	0,0464	0,0266	0,3810	0,3821	0,2662

**Tabla 5.46:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{32}$ .

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.41 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0426  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0004  $[N]$ , con una media igual a 0,0096  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0055.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0043 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0008  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0005.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0426	0,0043
Mín	0,0004	0
Media	0,0096	0,0008
D.Estándar	0,0055	0,0005

**Tabla 5.47:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{32}$ .

### 5.3.1.9. Estado de mar $E_{33}$

#### ■ Parámetros de Oleaje

Se consiguió, para el estado de mar  $E_{33}$ , un oleaje monocromático con altura de ola significativa de 4,97 [cm], inferior en un 0,6% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo experimental conseguido fue 1,77 [s], 4,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo un oleaje de longitud de onda igual a 3,06 [m] y celeridad 1,93 [m/s] cuya potencia alcanzó los 4,19 [W/m]. En la tabla 5.43 se recogen los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	5,0	1,69	2,8830	1,9096	4,0445
Experimental	4,97	1,77	3,0611	1,9271	4,1853

**Tabla 5.48:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{33}$  para el modelo  $A_1$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{33}$  el modelo consiguió desplazarse una longitud total de 0,32[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento no presenta variaciones considerables durante los 60 segundos analizados.

En la curva de posición horizontal se logra apreciar un leve aumento de la amplitud de oscilación a partir del segundo 40, que luego se mantiene relativamente constante. Considerando lo anterior, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 5,05[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,08 [cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,32[m]	0,05 [m]

**Tabla 5.49:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_1, E_{33}$ .

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.45, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,2537 y 0,0090  $[m/s]$ . La media se situó en 0,1149  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0327. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,2301  $[m/s]$  y -0,2282  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1416  $[m/s]$  y -0,2098  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 2,4646  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0277  $[m/s^2]$ , con una media de 0,6012  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,3756. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,9136  $[m/s^2]$  y -2,1282  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 2,1328  $[m/s^2]$  y -1,6724  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,2301	0,1416	0,2537	2,1328	1,9136	2,4646
Mín	-0,2282	-0,2098	0,0090	-1,6724	-2,1282	0,0277
Media	-0,0071	0,0003	0,1149	-0,0007	-0,0011	0,6012
D.Estándar	0,0994	0,0660	0,0327	0,4898	0,5126	0,3756

**Tabla 5.50:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_1$ ,  $E_{33}$

- **Parámetros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.46 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0505  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0006  $[N]$ , con una media igual a 0,0123  $[N]$ , cuya desviación estándar es 0,0077.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0081 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0014  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0011.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0505	0,0081
Mín	0,0006	0
Media	0,0123	0,0014
D.Estándar	0,0077	0,0011

**Tabla 5.51:** Parámetros dinámicos modelos  $A_1$ ,  $E_{33}$

### 5.3.2. Modelo A2

#### ■ Parámetros de Oleaje

El el modelo  $A_2$  fue sometido a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , cuya altura de ola significativa fue de 3,37 [cm], superior en un 0,3% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo significativo experimental conseguido fue 1,49 [s], 0,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetro experimentales mencionados se obtuvo una oleaje de longitud de onda igual a 2,44 [m] y celeridad 1,85 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,62 [W/m]. En la tabla 5.47 se recogen los parámetros mencionados:

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[cm]$	$C[cm/s]$	$P[W]$
Teórico	3,36	1,48	2,4132	1,8444	1,5995
Experimental	3,37	1,49	2,4356	1,8483	1,6199

**Tabla 5.52:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{22}$  para el modelo  $A_2$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_2$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,37[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento no presenta variaciones considerables durante los 60 segundos analizados.

En la curva de posición horizontal se logra apreciar una que la amplitud de oscilación decrece a partir del segundo 50 de análisis, manteniéndose en adelante relativamente constante. Considerando lo anterior, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,93[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,56 [cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,37 [m]	0,0393 [m]

**Tabla 5.53:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_2, E_{22}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.49, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,1608 y 0,0348  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0849  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,02. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,123  $[m/s]$  y -0,1436  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1507  $[m/s]$  y -0,1273  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 1,2772  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0141  $[m/s^2]$ , con una media de 0,4612  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,2102. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,2724  $[m/s^2]$  y -1,1688  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,2267  $[m/s^2]$  y -1,0734  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,1230	0,1507	0,1608	1,2267	1,2724	1,2772
Mín	-0,1436	-0,1273	0,0346	-1,0734	-1,1688	0,0141
Media	-0,0063	-0,0006	0,0849	0,0025	-0,0008	0,4612
D.Estándar	0,0630	0,0560	0,020	0,3420	0,3742	0,2102

**Tabla 5.54:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_2$ ,  $E_{22}$

- **Parámetros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.50 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0361  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0004  $[N]$ , con una media igual a 0,0130  $[N]$ , cuya desviación estándar es 0,0060.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0036 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0011  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0006.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0361	0,0036
Mín	0,0004	0
Media	0,0130	0,0011
D.Estándar	0,0060	0,0006

**Tabla 5.55:** Parámetros dinámicos modelos  $A_2$ ,  $E_{22}$

### 5.3.3. Modelo A3

#### ■ Parámetros de Oleaje

El el modelo  $A_3$  fue sometido a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , cuya altura de ola significativa fue de 3,39 [cm], superior en un 0,9% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo significativo experimental conseguido fue 1,5 [s], 1,4% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetro experimentales mencionados se obtuvo una oleaje de longitud de onda igual a 2,46 [m] y celeridad 1,85 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,65 [W/m]. En la tabla 5.47 se recogen los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	3,36	1,48	2,4132	1,8444	1,5995
Experimental	3,39	1,5	2,4580	1,8521	1,6502

**Tabla 5.56:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{22}$  para el modelo  $A_3$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_3$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,18[m] en el sentido de propagación del oleaje. Se evidencia que este desplazamiento no presenta variaciones considerables durante los 60 segundos analizados.

En la curva de posición horizontal se logra apreciar desplazamiento sostenido hacia arriba a partir del segundo 30 de análisis. Sin embargo, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,46[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,07[cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,18 [m]	0,0346 [m]

**Tabla 5.57:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $A_3, E_{22}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.53, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,2375 y 0,0071  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0830  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0286. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1338  $[m/s]$  y -0,1429  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1279  $[m/s]$  y -0,2359  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 2,4933  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0  $[m/s^2]$ , con una media de 0,5613  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,3560. En tanto la aceleración vertical oscila entre 2,4920  $[m/s^2]$  y -2,0134  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,49  $[m/s^2]$  y -1,0584  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,1337	0,1279	0,2375	1,4900	2,4920	2,4932
Mín	-0,1429	-0,2359	0,0071	-1,0583	-2,0133	0,0
Media	-0,0029	0,0001	0,0830	0,0008	0,0002	0,5613
D.Estándar	0,0670	0,0566	0,0282	0,4135	0,5205	0,3560

**Tabla 5.58:** Parámetros cinemáticos modelos  $A_3$ ,  $E_{22}$ .

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.54 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0917  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0  $[N]$ , con una media igual a 0,0206  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0113.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0130 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0018  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0014.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0917	0,0130
Mín	0,0	0,0
Media	0,0206	0,0018
D.Estándar	0,0131	0,0014

**Tabla 5.59:** Parámetros dinámicos modelos  $A_3$ ,  $E_{22}$

### 5.3.4. Modelo B1

#### ■ Parámetros de Oleaje

El el modelo  $B_1$  fue sometido a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , cuya altura de ola significativa fue de 3,26 [cm], inferior en un 3,0% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo significativo experimental conseguido fue 1,49 [s], 0,7% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo una oleaje monocromático de longitud de onda igual a 2,44 [m] y celeridad 1,85 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,52 [W/m]. En la tabla 5.55 se recogen los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Teórico	3,36	1,48	2,4132	1,8444	1,5995
Experimental	3,26	1,49	2,4356	1,8483	1,5159

**Tabla 5.60:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{22}$  para el modelo  $B_1$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $B_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,0638[m] en el sentido de propagación del oleaje. La curva de posición horizontal se mantiene estable durante el tiempo de análisis. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,61[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,35[cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,0638 [m]	0,0361[m]

**Tabla 5.61:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $B_1, E_{22}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.57, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,1713 y 0,0164  $[m/s]$ . La media se situó en 0,0903  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0255. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1272  $[m/s]$  y -0,1492  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1307  $[m/s]$  y -0,1187  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 1,6272  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0255  $[m/s^2]$ , con una media de 0,5120  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,2355. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,3068  $[m/s^2]$  y -1,5809  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,0417  $[m/s^2]$  y -0,8502  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,1272	0,1370	0,1713	1,0417	1,3067	1,6272
Mín	-0,1492	-0,1187	0,0164	-0,8502	-1,5809	0,0255
Media	-0,0005	0,0002	0,0903	-0,0009	0,00242	0,5120
D.Estándar	0,0763	0,0547	0,02551	0,3575	0,4358	0,2355

**Tabla 5.62:** Parámetros cinemáticos modelos  $B_1$ ,  $E_{22}$

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.58 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0599  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0010  $[N]$ , con una media igual a 0,0188  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0086.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0060 y 0,0001  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0017  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0009.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0599	0,0060
Mín	0,0010	0,0001
Media	0,0188	0,0017
D.Estándar	0,0086	0,0009

**Tabla 5.63:** Parámetros dinámicos modelos  $B_1$ ,  $E_{22}$

### 5.3.5. Modelo B2

#### ■ Parámetros de Oleaje

El el modelo  $B_2$  fue sometido a las condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , cuya altura de ola significativa fue de 3,11 [cm], inferior en un 7,4% a la altura de ola teórica propuesta, mientras que el periodo significativo experimental conseguido fue 1,51 [s], 2,0% mayor al periodo teórico significativo propuesto. Con los parámetros experimentales mencionados se obtuvo una oleaje monocromático de longitud de onda igual a 2,48 [m] y celeridad 1,86 [m/s] cuya potencia alcanzó los 1,40 [W/m]. En la tabla 5.59 se recogen los parámetros mencionados:

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[cm]$	$C[cm/s]$	$P[W]$
Teórico	3,36	1,48	2,4132	1,8444	1,5995
Experimental	3,11	1,51	2,4804	1,8558	1,3981

**Tabla 5.64:** Parámetros de oleaje estado de mar  $E_{22}$  para el modelo  $B_2$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $B_2$  consiguió desplazarse una longitud total de 0,322[m] en el sentido de propagación del oleaje. La curva de posición horizontal se mantiene estable durante el tiempo de análisis. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 3,56[cm] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical. En consecuencia, la amplitud media vertical fue superior en 0,45[cm] respecto de la altura de ola significativa experimental.

$\Delta$ Tiempo	Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento vertical promedio
60 [s]	0,322 [m]	0,0356 [m]

**Tabla 5.65:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación  $B_2, E_{22}$

- **Parámetros cinemáticos**

De acuerdo a la tabla 5.61, la magnitud de la velocidad alcanzada por el modelo bajo las condiciones de oleaje impuesto fluctuó entre 0,1601 y 0,0015  $[m/s]$ . La media se situó en 0,081  $[m/s]$  con una desviación estándar baja de 0,0290. Por otro lado, la velocidad horizontal oscila entre 0,1349  $[m/s]$  y -0,1564  $[m/s]$ , mientras que la velocidad vertical oscila entre un valor máximo de 0,1199  $[m/s]$  y mínimo de -0,1372  $[m/s]$ .

La magnitud de la aceleración oscila entre un valor máximo de 1,4940  $[m/s^2]$  y un mínimo de 0,0292  $[m/s^2]$ , con una media de 0,5323  $[m/s^2]$  y una desviación estándar de 0,2596. En tanto la aceleración vertical oscila entre 1,3315  $[m/s^2]$  y -1,3800  $[m/s^2]$ . Por otro lado, la aceleración horizontal fluctúa entre 1,0149  $[m/s^2]$  y -1,0311  $[m/s^2]$ .

	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$	$a_x[m/s^2]$	$a_y[m/s^2]$	$a[m/s^2]$
Máx	0,1349	0,1199	0,1601	1,0149	1,3315	1,4940
Mín	-0,1564	-0,1372	0,0015	-1,0311	-1,3800	0,0292
Media	-0,0052	0	0,0810	-0,0014	-0,0015	0,5322
D.Estándar	0,0665	0,0543	0,0290	0,3834	0,4508	0,2585

**Tabla 5.66:** Parámetros cinemáticos modelos  $B_2$ ,  $E_{22}$

- **Parametros dinámicos**

Tal como se muestra en la tabla 5.62 la fuerza neta máxima alcanzada fue de 0,0679  $[N]$ , mientras que la mínima fue de 0,0013  $[N]$ , con una media igual a 0,0242  $[N]$ , cuya desviación estandar es 0,0118.

Los valores de potencia obtenidos oscilan entre 0,0090 y 0  $W$ . La potencia media obtenida alcanzó un valor de 0,0019  $[W]$ , con una desviación estándar de 0,0011.

	$F_{Neta}[N]$	Potencia $[W]$
Máx	0,0679	0,0090
Mín	0,0013	0
Media	0,0242	0,0019
D.Estándar	0,0118	0,0011

**Tabla 5.67:** Parámetros dinámicos modelos  $B_2$ ,  $E_{22}$

### 5.3.6. Principales fuentes de error

Se reconoce en la metodología desarrollada los siguientes factores que pueden ser causantes de error y que debiesen ser considerados en el análisis:

- En la generación del oleaje la paleta generadora presenta un movimiento que en ocasiones perturba la señal y agrega ondas diferentes a la onda principal que se superponen y contaminan la señal original. Además existen filtraciones de masa de agua entre los costados de la paleta y las paredes del canal que producen el mismo efecto.
- Las paredes del canal generan reflexión de ondas que perturban la ola que originalmente crea la paleta. Estas suelen superponerse y añadir ruido a la señal.
- Los mecanismos disipadores de oleaje dispuestos al final del canal no logran absorber la totalidad de la onda que se refleja al final de este, por lo que constantemente una parte de cada ola que pasa se superpone con el resto de olas que se siguen generando.
- En cuanto a la captura de información, el principal recurso utilizado es una cámara de video frontal que suele perturbar la imagen real del experimento por no estar perfectamente alineada con el plano frontal en el que se desarrolla el fenómeno. Estos errores de paralaje influyen en el postprocesamiento de datos. Además, al solo analizar el plano frontal no se observa directamente el movimiento de la boya entre las paredes anterior y posterior del canal, por lo que dicho movimiento se expresa indirectamente en los cambios de posición vertical de la boya, lo que se refleja en un desplazamiento sostenido en la curva de trayectoria.
- En la etapa de rastreo mediante el uso del software tracker se reconoce una fuente de error en que el punto que se rastrea sufre ligeros cambios durante todo el análisis al utilizar la función de rastreo automático. Esto se produce porque el mecanismo que usa el programa se basa en comparar píxeles dentro de un área determinada y establecer criterios de coincidencia entre un cuadro del video y el cuadro siguiente.



## Capítulo 6

---

# EXTRAPOLACIÓN DE RESULTADOS

---

En este capítulo se presenta la extrapolación a escala de prototipo de los resultados obtenidos para la prueba P03 de Oscilación forzada de acuerdo a la tabla 3.1 presentada en el capítulo 3. Los valores de la altura significativa de ola, desplazamiento horizontal, y amplitud media de oscilación vertical se obtuvieron de multiplicar por  $\lambda = 1/50$  aquellos obtenidos para el modelo. En tanto el periodo significativo se multiplicó por un factor de escala igual a  $\sqrt{\lambda}$ , al igual que la velocidad. De igual forma se obtuvo la fuerza neta del prototipo aplicando un factor de escala de  $\lambda^3$ , mientras que la potencia se multiplicó por  $\lambda^{7/2}$ .

### 6.1. Modelo A1

#### 6.1.1. Estado de Mar $E_{11}$

- **Parámetros de oleaje**

El estado de mar  $E_{11}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 65,5 [cm], periodo significativo 7,78 [s] y longitud de onda 85,28 [m] que se propaga con una celeridad de 11,09 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 3,19 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	1,31	1,1	1,56	1,60	0,18
Prototipo	65,5	7,78	85,28	11,09	3194,47

**Tabla 6.1:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{11}$ .

- **Desplazamientos**

Para el estado de mar  $E_{11}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de  $10[m]$  en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo de  $9,4 [min]$ . Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a  $0,54 [m]$  luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ .

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	$0,2[m]$	$1,09[cm]$
Prototipo	$10[m]$	$0,54[m]$

**Tabla 6.2:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{11}$ .

- **Parámetros cinemáticos y dinámicos**

En la tabla 6.3 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{11}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los  $0,44 [m/s]$ , mientras que la mínima y media fueron de  $0,03$  y  $0,22 [m/s]$  respectivamente.

En cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de  $1805 [N]$ , mientras que la mínima y media fueron de  $11,28$  y  $620,88 [N]$  respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los  $533,46 [W]$ , con un valor mínimo de  $1,31 [W]$  una media de  $139,57 [W]$ .

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,0624	0,0144	0,0006	0,44	1805,00	533,46
Mín	0,0038	0,0001	0,0000	0,03	11,28	1,34
Media	0,0307	0,0050	0,0002	0,22	620,88	139,57

**Tabla 6.3:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1, E_{11}$ .

### 6.1.2. Estado de Mar $E_{12}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{12}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,67 [m], periodo significativo 8,06 [s] y longitud de onda 90,25 [m] que se propaga con una celeridad de 11,3 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 21,52 [kW/m].

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,34	1,14	1,65	1,64	1,22
Prototipo	167	8,06	90,25	11,3	21520,93

**Tabla 6.4:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{12}$ .

- **Desplazamientos** Para el estado de mar  $E_{12}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 33,96 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,82 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor superó en 15 [cm] la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,68[m]	0,04[m]
Prototipo	33,96[m]	1,82[m]

**Tabla 6.5:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{12}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.6 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{12}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,35 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,29 y 0,71 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 4011,32 [N], mientras que la mínima y media fueron de 86,37 y 1587,35 [N] respectivamente.

fcB

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 4015,52 [W], con un valor mínimo de 67,44 [W] una media de 1129,03 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,1914	0,0321	0,0045	1,35	4011,32	4015,52
Mín	0,0417	0,0008	0,0001	0,29	96,37	67,44
Media	0,1005	0,0127	0,0013	0,71	1587,35	1129,03

**Tabla 6.6:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1$ ,  $E_{12}$ .

### 6.1.3. Estado de Mar $E_{13}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{13}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 2,5 [m], periodo significativo 8,06 [s] y longitud de onda 82,64 [m] que se propaga con una celeridad de 11,59 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 48,22 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	5,00	1,13	1,63	1,63	2,70
Prototipo	250	8,06	82,64	11,59	48228,98

**Tabla 6.7:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{13}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{13}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 72,49 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 2,8[m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor superó en 30 [cm] la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	1,46[m]	0,06[m]
Prototipo	72,49[m]	2,80[m]

**Tabla 6.8:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{13}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.9 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{13}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 2,46 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0 y 1,09 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 10148,81 [N], mientras que la mínima y media fueron de 0 y 3291,04 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 16895,02 [W], con un valor mínimo de 0 [W] una media de 3670,99 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]
Máx	0,3484	0,812	0,0191	2,46	10148,81	16895,02
Mín	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
Media	0,1541	0,0263	0,0042	1,09	3291,04	3670,99

**Tabla 6.9:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1, E_{13}$ .

#### 6.1.4. Estado de Mar $E_{21}$

##### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{21}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 0,57 [m], periodo significativo 10,54 [s] y longitud de onda 121,78 [m] que se propaga con una celeridad de 13,07 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 3,28 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	1,14	1,49	2,44	1,85	0,19
Prototipo	57,00	10,54	121,78	13,07	3276,87

**Tabla 6.10:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{21}$ .

- Desplazamientos** Para el estado de mar  $E_{21}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 4,22 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 0,54 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 30 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,08[m]	0,01[m]
Prototipo	4,22[m]	0,54[m]

**Tabla 6.11:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{21}$ .

- Parámetros cinemáticos y dinámicos**

En la tabla 6.12 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{21}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 0,3 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,03 y 0,16 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 1412,57 [N], mientras que la mínima y media fueron de 13,86 y 507,98 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 309,81 [W], con un valor mínimo de 2,68 [W] una media de 82,97 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]
Máx	0,0421	0,0113	0,0004	0,30	1412,57	309,81
Mín	0,0049	0,0001	0,0000	0,03	13,86	2,68
Media	0,0232	0,0041	0,0001	0,16	507,98	82,97

**Tabla 6.12:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1, E_{21}$ .

### 6.1.5. Estado de Mar $E_{22}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{22}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,67 [m], periodo significativo 10,54 [s] y longitud de onda 121,78 [m] que se propaga con una celeridad de 13,07 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 28,13 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,34	1,49	2,44	1,85	1,59
Prototipo	167,00	10,54	121,78	13,07	28128,23

**Tabla 6.13:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{22}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 10,14 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,53 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 14 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,20[m]	0,03[m]
Prototipo	10,14[m]	1,53[m]

**Tabla 6.14:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{22}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.15 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{22}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,16 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,12 y 0,6 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 3673,53 [N], mientras que la mínima y media fueron de 31,96 y 1182,54 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 2285,28 [W], con un valor mínimo de 14,66 [W] una media de 693,69 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,1642	0,0294	0,0026	1,16	3673,53	2285,28
Mín	0,163	0,0003	0,0000	0,12	31,96	14,66
Media	0,0846	0,0095	0,0008	0,60	1182,54	693,69

**Tabla 6.15:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1$ ,  $E_{22}$ .

### 6.1.6. Estado de Mar $E_{23}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{23}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 2,58 [m], periodo significativo 10,54 [s] y longitud de onda 125,14 [m] que se propaga con una celeridad de 13,15 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 68,48 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	5,16	1,52	2,50	1,86	3,87
Prototipo	258,00	10,75	125,14	13,15	68486,69

**Tabla 6.16:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{23}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{23}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 37,05 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 2,73 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor superó por 15 [cm] la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,74[m]	0,05[m]
Prototipo	37,05[m]	2,73[m]

**Tabla 6.17:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{23}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.18 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{23}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 2,06 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,13 y 0,89 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 6621,67 [N], mientras que la mínima y media fueron de 0 y 2043,82 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 9936,1 [W], con un valor mínimo de 0 [W] una media de 1871,51 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,2913	0,0530	0,0112	2,06	6621,67	9936,10
Mín	0,0181	0,0000	0,0000	0,13	0,00	0,00
Media	0,1256	0,0164	0,0021	0,89	2043,82	1871,51

**Tabla 6.18:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1, E_{23}$ .

#### 6.1.7. Estado de Mar $E_{31}$

##### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{31}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 0,625 [m], periodo significativo 12,09 [s] y longitud de onda 146,38 [m] que se propaga con una celeridad de 13,54 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 4,52 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	1,25	1,10	1,56	1,60	0,16
Prototipo	62,50	12,09	146,38	13,54	4521,47

**Tabla 6.19:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{31}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{31}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 3,47 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 0,5 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 12 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,07[m]	0,01[m]
Prototipo	3,47[m]	0,50[m]

**Tabla 6.20:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{31}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.21 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{31}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 0,4 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,03 y 0,19 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 1556,62 [N], mientras que la mínima y media fueron de 12,04 y 500,54 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 450,71 [W], con un valor mínimo de 1,59 [W] una media de 100,36 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,0560	0,0125	0,0005	0,40	1556,62	450,71
Mín	0,0039	0,0001	0,0000	0,03	12,04	1,59
Media	0,0271	0,0040	0,0001	0,19	500,54	100,36

**Tabla 6.21:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1$ ,  $E_{31}$ .

### 6.1.8. Estado de Mar $E_{32}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{32}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,675 [m], periodo significativo 12,59 [s] y longitud de onda 154,17 [m] que se propaga con una celeridad de 13,64 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 33,8 [kW/m].

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,35	1,78	3,08	1,93	1,91
Prototipo	167,50	12,59	154,17	13,64	33804,37

**Tabla 6.22:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{32}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{32}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 10,94 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,69 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 1,5 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,22[m]	0,03[m]
Prototipo	10,94[m]	1,69[m]

**Tabla 6.23:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{32}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.24 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{32}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,41 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,03 y 0,60 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 5329,44 [N], mientras que la mínima y media fueron de 47,68 y 1201,17 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 3826,18 [W], con un valor mínimo de 1,85 [W] una media de 714,09 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,1996	0,0426	0,0043	1,41	5329,44	3826,18
Mín	0,0040	0,0004	0,0000	0,03	47,68	19,85
Media	0,0853	0,0096	0,008	0,60	1201,17	714,09

**Tabla 6.24:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1$ ,  $E_{32}$ .

### 6.1.9. Estado de Mar $E_{33}$

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{33}$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 2,48 [m], periodo significativo 12,52 [s] y longitud de onda 153,06 [m] que se propaga con una celeridad de 13,63 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 73,99 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	4,97	1,77	3,06	1,93	4,19
Prototipo	248,50	12,52	153,06	13,63	73985,94

**Tabla 6.25:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_1$ , estado de mar  $E_{33}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{33}$  el modelo  $A_1$  consiguió desplazarse una longitud total de 10,02 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 2,53 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de

posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 4 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,32[m]	0,05[m]
Prototipo	10,02[m]	2,53[m]

**Tabla 6.26:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_1, E_{33}$ .

#### ▪ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.27 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para el estado de mar  $E_{33}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,79 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,06 y 0,81 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 6309,49 [N], mientras que la mínima y media fueron de 70,93 y 1539,08 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 7123,4 [W], con un valor mínimo de 39,13 [W] una media de 1268,02 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]
Máx	0,2537	0,0505	0,0081	1,79	6309,49	7123,40
Mín	0,0090	0,0006	0,0000	0,06	70,93	39,13
Media	0,1149	0,123	0,0014	0,81	1539,08	1268,02

**Tabla 6.27:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_1, E_{33}$ .

## 6.2. Modelo A2

#### ▪ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{22}$ , para la prueba realizada con el modelo  $A_2$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,68 [m], periodo significativo 10,54 [s] y longitud de onda 121,78,06 [m] que se propaga con una celeridad de 13,07 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 28,64 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,37	1,49	2,44	1,85	1,62
Prototipo	168,50	10,54	121,78	13,07	28635,80

**Tabla 6.28:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_2$ , estado de mar  $E_{22}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_2$  consiguió desplazarse una longitud total de 18,36 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,96 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 27 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,37[m]	0,04[m]
Prototipo	18,36[m]	1,96[m]

**Tabla 6.29:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_2, E_{22}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.30 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para la boya  $A_2$  y el estado de mar  $E_{22}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,14 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,24 y 0,6 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 4518,02 [N], mientras que la mínima y media fueron de 49,78 y 1631,41 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 3201,86 [W], con un valor mínimo de 30,54 [W] una media de 991,64 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,1608	0,0361	0,0036	1,14	4518,02	3201,86
Mín	0,0346	0,0004	0,0000	0,24	49,78	30,54
Media	0,0849	0,0131	0,0011	0,60	1631,41	991,64

**Tabla 6.30:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_2$ ,  $E_{22}$ .

### 6.3. Modelo A3

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{22}$ , para la prueba realizada con el modelo  $A_3$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,7 [m], periodo significativo 10,61 [s] y longitud de onda 122,90 [m] que se propaga con una celeridad de 13,10 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 29,17 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,39	1,50	2,46	1,85	1,65
Prototipo	169,50	10,61	122,90	13,10	29171,17

**Tabla 6.31:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $A_3$ , estado de mar  $E_{22}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_3$  consiguió desplazarse una longitud total de 9,02 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,73 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor estuvo 3,5 [cm] por debajo de la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,18[m]	0,03[m]
Prototipo	9,02[m]	1,73[m]

**Tabla 6.32:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $A_3, E_{22}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.33 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para la boya  $A_3$  y el estado de mar  $E_{22}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,68 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,25 y 0,59 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 11462,74 [N], mientras que la mínima y media fueron de 0 y 2580,34 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 11502,9 [W], con un valor mínimo de 0 [W] una media de 1150,2 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,2375	0,0917	0,0130	1,68	11462,74	11502,90
Mín	0,0071	0,0000	0,0000	0,05	0,00	0,00
Media	0,0830	0,0206	0,0018	0,59	2580,34	1150,20

**Tabla 6.33:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $A_3$ ,  $E_{22}$ .

## 6.4. Modelo B1

### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{22}$ , para la prueba realizada con el modelo  $B_1$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,63 [m], periodo significativo 10,54 [s] y longitud de onda 121,78,06 [m] que se propaga con una celeridad de 13,07 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 26,8 [kW/m].

	$H_s[cm]$	$T_s[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,26	1,49	2,44	1,85	1,52
Prototipo	163,00	10,54	121,78	13,07	26796,91

**Tabla 6.34:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $B_1$ , estado de mar  $E_{22}$ .

### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $A_3$  consiguió desplazarse una longitud total de 3,19 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,81 [m] luego

de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor superó por 18 [cm] la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,06[m]	0,04[m]
Prototipo	3,19[m]	1,81[m]

**Tabla 6.35:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $B_1, E_{22}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.36 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para la boya  $B_1$  y el estado de mar  $E_{22}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,21 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,12 y 0,64 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 7481,08 [N], mientras que la mínima y media fueron de 117,23 y 2353,89 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 5264,25 [W], con un valor mínimo de 77,5 [W] una media de 1482,61 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	Potencia[W]
Máx	0,1713	0,0598	0,0060	1,21	7481,08	5264,25
Mín	0,0164	0,0009	0,0001	0,12	117,23	77,50
Media	0,0903	0,0188	0,0017	0,64	2353,89	1482,61

**Tabla 6.36:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $B_1, E_{22}$ .

## 6.5. Modelo B2

#### ■ Parámetros de oleaje

El estado de mar  $E_{22}$ , para la prueba realizada con el modelo  $B_2$  representa a escala de prototipo un oleaje monocromático de altura significativa 1,56 [m], periodo significativo 10,68 [s] y longitud de onda 124,02 [m] que se propaga con una celeridad de 13,12 [m/s]. Dadas estas características se estima una potencia disponible de 24,72 [kW/m].

	$Hs[cm]$	$Ts[s]$	$L[m]$	$C[m/s]$	$P[W/m]$
Modelo	3,11	1,51	2,48	1,86	1,40
Prototipo	155,50	10,68	124,02	13,12	24715,02

**Tabla 6.37:** Parámetros de oleaje modelo/prototipo  $B_2$ , estado de mar  $E_{22}$ .

#### ■ Desplazamientos

Para el estado de mar  $E_{22}$  el modelo  $B_2$  consiguió desplazarse una longitud total de 16,12 [m] en el sentido de propagación del oleaje en un tiempo aproximado de 9,4 [min]. Por otro lado, se obtuvo una amplitud media de oscilación vertical igual a 1,78 [m] luego de promediar la diferencia entre los valores máximos y mínimos locales consecutivos de posición vertical y aplicar el factor de escala  $\lambda = 1/50$ . Este valor superó por 23,5 [cm] la altura de ola significativo.

	Desplazamiento horizontal	Amplitud media vertical
Modelo	0,32[m]	0,04[m]
Prototipo	16,12[m]	1,78[m]

**Tabla 6.38:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical de oscilación modelo/prototipo  $B_2, E_{22}$ .

#### ■ Parámetros cinemáticos y dinámicos

En la tabla 6.39 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios, de las variables de magnitud de velocidad, fuerza neta y aceleración, del modelo y su respectiva equivalencia a escala de prototipo para la boya  $B_2$  y el estado de mar  $E_{22}$ . La magnitud de velocidad máxima alcanzó los 1,13 [m/s], mientras que la mínima y media fueron de 0,01 y 0,57 [m/s] respectivamente.

La cuanto a la magnitud de fuerza neta el valor máximo alcanzado fue de 8488,0 [N], mientras que la mínima y media fueron de 165,64 y 3023,47 [N] respectivamente.

Por otro lado, la potencia máxima alcanzada llegó a los 7964,85 [W], con un valor mínimo de 20,47 [W] una media de 1665,36 [W].

	Modelo			Prototipo		
	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$	$v[m/s]$	$F_{Neta}[N]$	$Potencia[W]$
Máx	0,1601	0,0679	0,0090	1,13	8488,00	7964,85
Mín	0,0015	0,0013	0,0000	0,01	165,64	20,47
Media	0,0810	0,0242	0,0019	0,57	3023,47	1665,36

**Tabla 6.39:** Parámetros cinemáticos y dinámicos modelo/prototipo  $B_2$ ,  $E_{22}$ .

## 6.6. Comparación de resultados a escala de prototipo

En esta sección se presentan comparaciones de resultados de los desplazamiento horizontal, amplitud media de oscilación vertical, parámetros cinemáticos, dinámicos y de desempeño de captura de energía a escala de prototipo de los diferentes modelos analizados.

En una primera parte se muestran una comparación a escala de prototipo de los resultados obtenidos de la simulación numérica [2] y el modelo  $A_1$  para el estado de mar  $E_{22}$ .

Posteriormente se muestran los resultados del modelo  $A_1$  y su desempeño en cada uno de los estados de mar  $E_{ij}$ . Luego se comparan los resultados del los prototipos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  bajo las condiciones de oleaje  $E_{22}$ . Finalmente se somparan los resultados de los protitpos  $B_1$  y  $B_2$  también para el estado de mar  $E_{22}$ .

### 6.6.1. Prototipo experimental y simulación numérica

De acuerdo a los datos de simulación numérica obtenidos para el prototipo [12], se realizó una comparación con el ensayo experimental para los principales parámetros cinemáticos y dinámicos. Cabe señalar que los datos de simulación numérica son equivalentes a los obtenidos para el modelo  $A_1$  en condiciones de oleaje del estado de mar  $E_{22}$ , luego de aplicar un factor de escala  $\lambda = 1/50$ .

En cuanto a magnitud de velocidad, se obtuvo que en el ensayo experimental la velocidad media fue mayor en un 97 %, mientras que las velocidad máxima fue mayor en un 12 % respecto a la obtenida en la somulación numérica.

Para la fuerza neta se obtuvo que el valor medio en el ensayo experimental fue alrededor de 50 % inferior al obtenido en la simulación numérica, mientras que el valor máximo fue aproximadamente un 63 % inferior.

En tanto la potencia media obtenida en el ensayo experimental fue un 9 % menor que en la simulación numérica, mientras la potencia máxima fue 62 % inferior.

Valor Estadístico	Simulación numérica	Ensayo experimental	$\Delta$ %
<b>Velocidad [m/s]</b>			
Media	0,30	0,60	-97,02
Máx	1,03	1,16	-12,80
<b>Fuerza neta [N]</b>			
Media	2356,55	1182,54	49,82
Máx	9679,20	3673,53	62,05
<b>Potencia [W]</b>			
Media	763,12	693,69	9,10
Máx	6429,95	2285,28	64,46

**Tabla 6.40:** Comparación datos de simulación numérica y ensayo experimental.

### 6.6.2. Prototipo/Modelo $A_1$ , estados de Mar $E_{ij}$

#### Desplazamientos y amplitud de oscilación vertical

En la tabla 6.40 se presentan los valores de desplazamientos horizontales y amplitud media de oscilación vertical, obtenida para el **prototipo** en cada estado de mar.

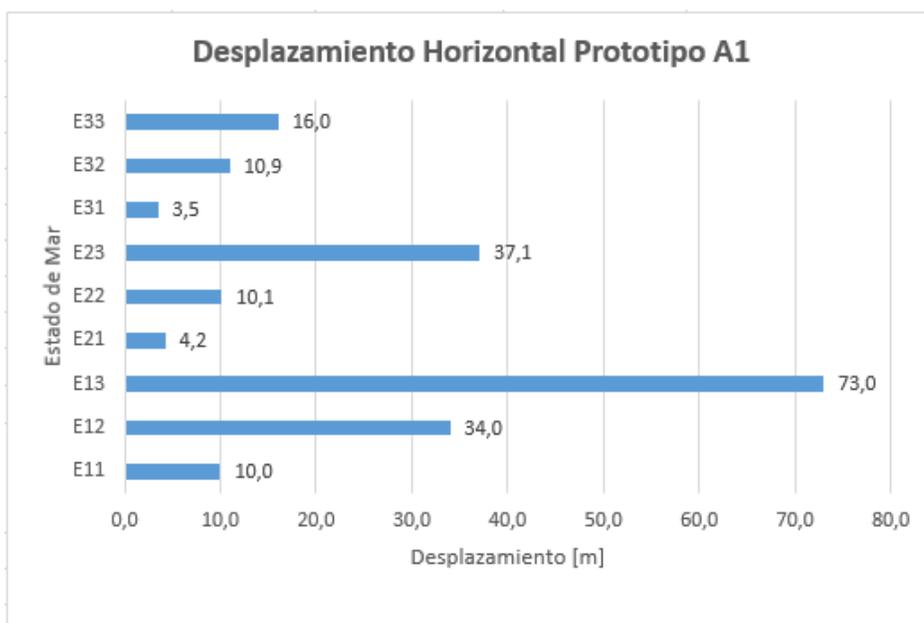
Estado de mar	Desplazamiento horizontal [m]	Amplitud media vertical [m]
E11	10,0	0,54
E12	34,0	1,82
E13	73,0	2,80
E21	4,2	0,54
E22	10,1	1,53
E23	37,1	2,73
E31	3,5	0,50
E32	10,9	1,69
E33	16,0	2,53

**Tabla 6.41:** Desplazamiento horizontal y amplitud media vertical prototipo  $A_1$  para cada estado de mar.

En el gráfico de la figura 6.1 es posible apreciar que el mayor desplazamiento horizontal en el sentido de propagación del oleaje, durante un lapso de tiempo de 60 [s] ocurrió en el estado de mar de mayor altura y menor periodo (mayor frecuencia), es decir, las condiciones de

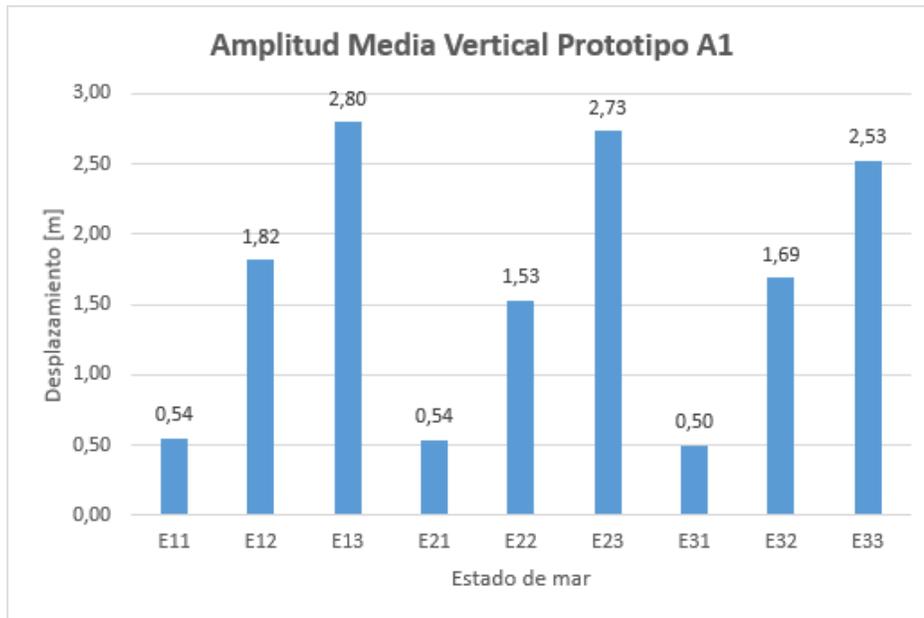
oleaje  $E_{13}$  con un valor de 73 [m]. Por el contrario, el menor desplazamiento fue para las condiciones de menor altura de oleaje y mayor periodo de oscilación (menor frecuencia), es decir, el estado de mar  $E_{31}$  con un valor de 3,5 [m].

Se cumple que para los estados de mar de igual periodo, los desplazamientos horizontales son proporcionales a la altura del oleaje, es decir, aumentan o disminuyen junto con esta. Análogamente, para una misma altura de oleaje, el desplazamiento horizontal es mayor en aquellas condiciones en las que el periodo de oleaje es menor, es decir, hay una mayor frecuencia de oscilación. Lo anterior ocurre a excepción de los os estados  $E_{22}$  y  $E_{32}$ , donde el desplazamiento de la boya en este último es mayor aún cuando su frecuencia de oscilación es menor.



**Figura 6.1:** P04-Desplazamiento horizontal en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En cuanto a la amplitud media de oscilación vertical, es posible apreciar de acuerdo a la figura 6.2, que esta aumenta en proporción a la altura de oleaje, obteniéndose los valores más altos en los estados de mar  $E_{i3}$ , es decir, de altura de ola igual a 2,5 [m]. Se reconoce que la variación del periodo de oscilación no influye mayormente en los valores de amplitud vertical, siendo estos cercanos unos con otros para una misma altura.



**Figura 6.2:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

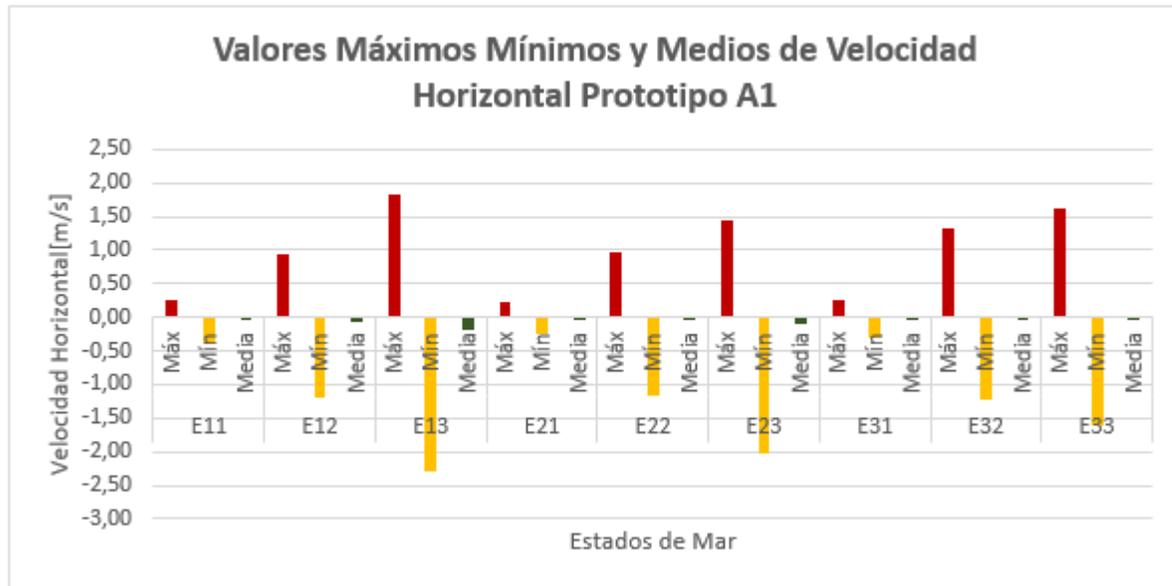
En la tabla 6.41 se presentan los valores estadísticos máximos, mínimos y medios de la magnitud de velocidad y sus componentes horizontal y vertical, para cada estado de mar.

Estado de mar	Valor Estadístico	$v_x[m/s]$	$v_y[m/s]$	$v[m/s]$
E11	Máx	0,27	0,28	0,44
	Mín	-0,39	-0,44	0,03
	Media	-0,02	0,00	0,22
E12	Máx	0,94	1,14	1,35
	Mín	-1,19	-1,22	0,29
	Media	-0,08	0,00	0,71
E13	Máx	1,83	2,25	2,46
	Mín	-2,30	-2,13	0,00
	Media	-0,17	-0,01	1,09
E21	Máx	0,21	0,24	0,30
	Mín	-0,25	-0,24	0,03
	Media	-0,01	0,00	0,16
E22	Máx	0,98	0,92	1,16
	Mín	-1,16	-0,94	0,12
	Media	-0,02	0,00	0,60
E23	Máx	1,45	1,44	2,06
	Mín	-2,03	-1,65	0,13
	Media	-0,09	-0,01	0,89
E31	Máx	0,26	0,40	0,40
	Mín	-0,31	-0,25	0,03
	Media	-0,01	0,00	0,19
E32	Máx	1,32	0,74	1,41
	Mín	-1,22	-1,19	0,03
	Media	-0,03	0,00	0,60
E33	Máx	1,63	1,00	1,79
	Mín	-1,61	-1,48	0,06
	Media	-0,05	0,00	0,81

**Tabla 6.42:** Parámetros cinemáticos prototipo  $A_1$  para cada estado de mar.

Para la velocidad horizontal, en cuanto a los valores máximos obtenidos para cada estado, el mayor valor se consiguió en las condiciones de mayor altura de ola significativa y menor periodo de oscilación (mayor frecuencia), es decir, para las estado de mar  $E_{13}$ . Mientras que los máximos menores se obtuvieron en las condiciones de menor altura, para los distintos periodos analizados. Análogamente ocurre para las velocidades mínimas registradas, que superan en magnitud a los máximos. Esto indica que las mayores velocidades ocurren en el mismo sentido de propagación del oleaje ( $-X$ ), lo que en consecuencia genera un desplazamiento en dicho sentido.

Es posible apreciar que para un mismo periodo, los valores máximos de velocidad horizontal son mayores mientras mayor sea la altura de oleaje. Esta relación también se cumple para los valores mínimos. Por otro lado, para una misma altura, los valores de velocidad no varían mayormente al variar el periodo significativo del oleaje.



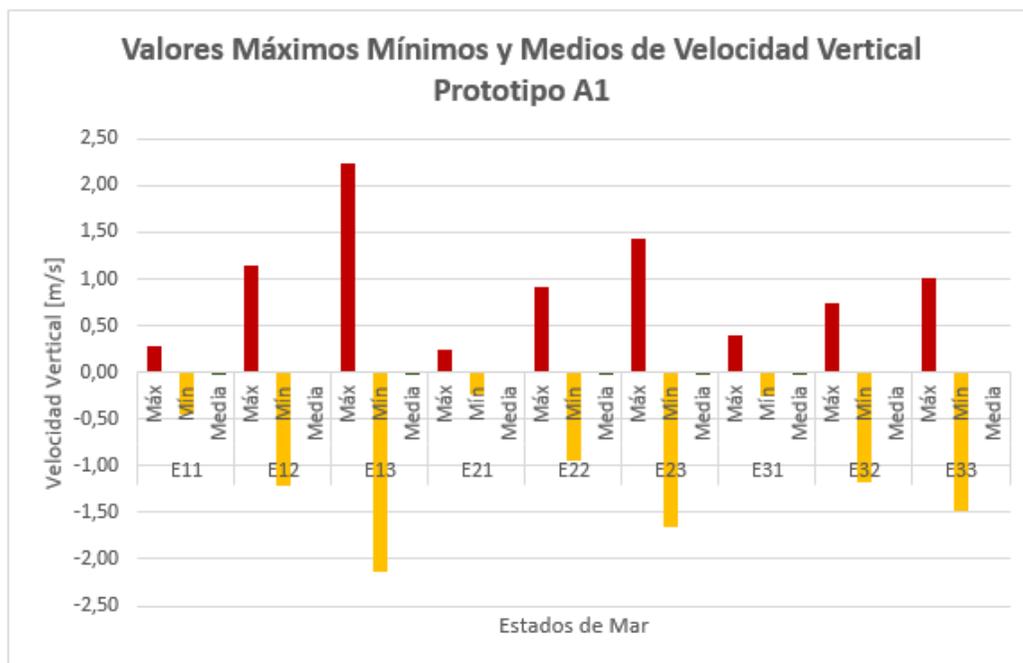
**Figura 6.3:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

Al igual que la velocidad horizontal, el valor máximo de velocidad vertical se obtuvo para las condiciones de oleaje  $E_{13}$  con una magnitud de  $2,25 [m/s]$ , es decir, para la mayor altura de ola significativa y menor periodo de oscilación. Mientras que los valores máximos menores se obtuvieron de las condiciones de oleaje de menor altura en los distintos periodos evaluados.

Es posible apreciar, a partir de la figura 6.4, que para una misma altura de oleaje los valores máximos mayores se obtienen para las condiciones de menor periodo. Análogamente ocurre para los valores mínimos, cuya magnitud es mayor en aquellos estados con menor periodo de

oscilación.

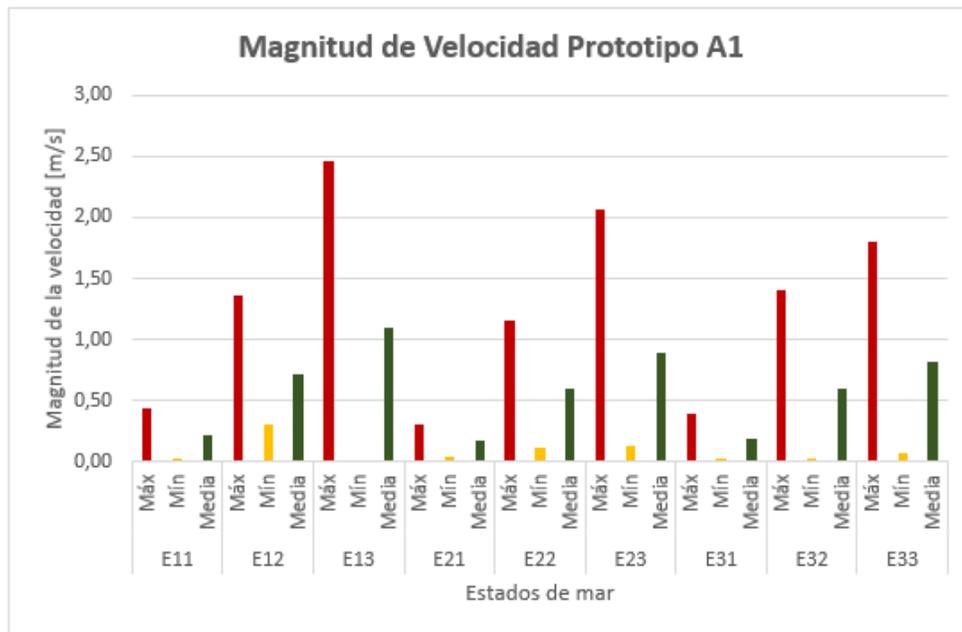
Para todos los estados de mar los valores medios se sitúan alrededor del cero, indicando igual proporción en las velocidades de ascenso y descenso.



**Figura 6.4:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En la figura 6.5 se muestran los valores máximos, mínimos y medios de la magnitud de la velocidad del prototipo  $A_1$  para cada estado de mar analizado. Para aquellas condiciones de oleaje de igual periodo los valores de velocidad máxima y media crecen conforme aumenta la altura de oleaje. Obteniéndose el valor más alto con altura de oleaje 2,5 [m] y periodo significativo de 8 [s], llegando a los 2,46 [m/s]. Los máximos menores se obtuvieron para condiciones de oleaje con altura de ola significativa 0,5 [m], siendo las condiciones de menor periodo ( $T_s = 8[s]$ ) ligeramente superior a los estados de mayor periodo ( $T_s = 10, 12[s]$ ).

Considerando condiciones de oleaje con una misma altura de ola significativa los valores máximos y medios no difieren mayormente al variar el periodo significativo. Sin embargo, las condiciones de menor periodo presentan valores ligeramente superiores a los estados de mar con periodos más altos. Las velocidades mínimas registradas para cada uno de los estados de mar presentados son cercanas a 0, siendo la más alta de 0,29 [m/s]. Esta magnitud se alcanzó para un oleaje de altura significativa 1,68 [m] periodo significativo 8[s].



**Figura 6.5:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

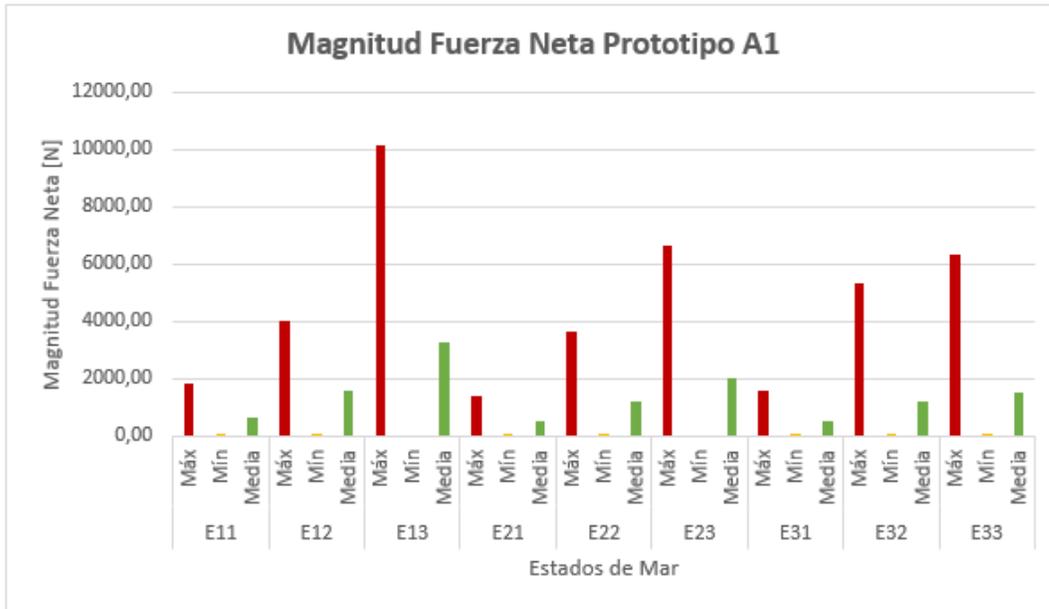
En la tabla 6.42 se presentan los valores máximos, mínimos y medios de fuerza neta y potencia de la boya, cuyos valores para cada estado de mar se presentan en las gráficas de las figuras 6.6 y 6.7 respectivamente.

Estado de mar	Valor Estadístico	Fneta[N]	P[W]
E11	Máx	1805,00	533,46
	Mín	11,28	1,34
	Media	620,88	139,57
E12	Máx	4011,32	4015,52
	Mín	96,37	67,44
	Media	1587,35	1129,03
E13	Máx	10148,81	16895,02
	Mín	0,00	0,00
	Media	3291,04	3670,99
E21	Máx	1412,57	309,81
	Mín	13,86	2,68
	Media	507,98	82,97
E22	Máx	3673,53	2285,28
	Mín	31,96	14,66
	Media	1182,54	693,69
E23	Máx	6621,67	9936,10
	Mín	0,00	0,00
	Media	2043,82	1871,51
E31	Máx	1556,62	450,71
	Mín	12,04	1,59
	Media	500,54	100,36
E32	Máx	5329,44	3826,18
	Mín	47,68	19,85
	Media	1201,17	714,09
E33	Máx	6309,49	7123,40
	Mín	70,93	39,13
	Media	1539,08	1268,02

**Tabla 6.43:** Parámetros dinámicos prototipo  $A_1$  para cada estado de mar.

Tal como se aprecia en la figura 6.6, la magnitud máxima registrada de fuerza neta fue  $10,14[kN]$  y ocurrió para el estado de mar de altura de ola significativa  $2,5 [m]$  y periodo  $8 [s]$ , es decir, el de mayor altura de oleaje significativo y menor periodo. De igual modo, el valor medio más alto registrado fue  $3,29 [kN]$  y se logró en las mismas condiciones de oleaje. Por otro lado, los valores máximos menores se percibieron en aquellas condiciones de oleaje de altura significativa  $0,5 [m]$ .

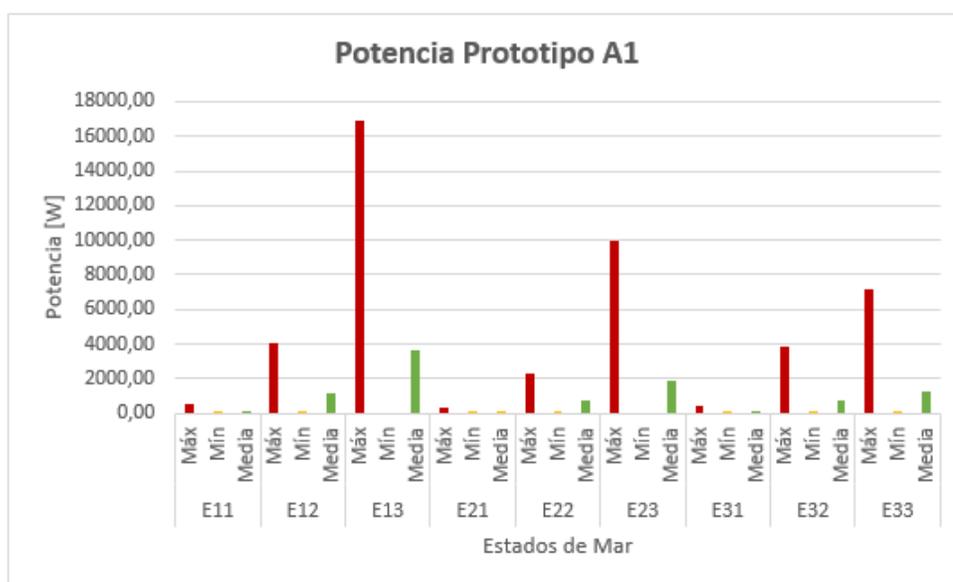
En general se cumple que para un mismo periodo significativo tanto los valores medios como máximos aumentan conforme aumenta la altura de ola significativa. Además, para aquellas condiciones de oleaje de igual altura significativa, se obtienen valores ligeramente mayores para aquellos estados de menor periodo, es decir, mayor frecuencia de oscilación.



**Figura 6.6:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En la figura 6.7, la magnitud máxima registrada de potencia fue  $16,9[kW]$  y ocurrió para el estado de mar de altura de ola significativa  $2,5[m]$  y periodo  $8[s]$ , es decir, el de mayor altura de oleaje significativo y menor periodo. De igual modo, el valor medio más alto registrado fue  $3,6[kW]$  y se logró en las mismas condiciones de oleaje. Por otro lado, los valores máximos menores se percibieron en aquellas condiciones de oleaje de altura significativa  $0,5[m]$ .

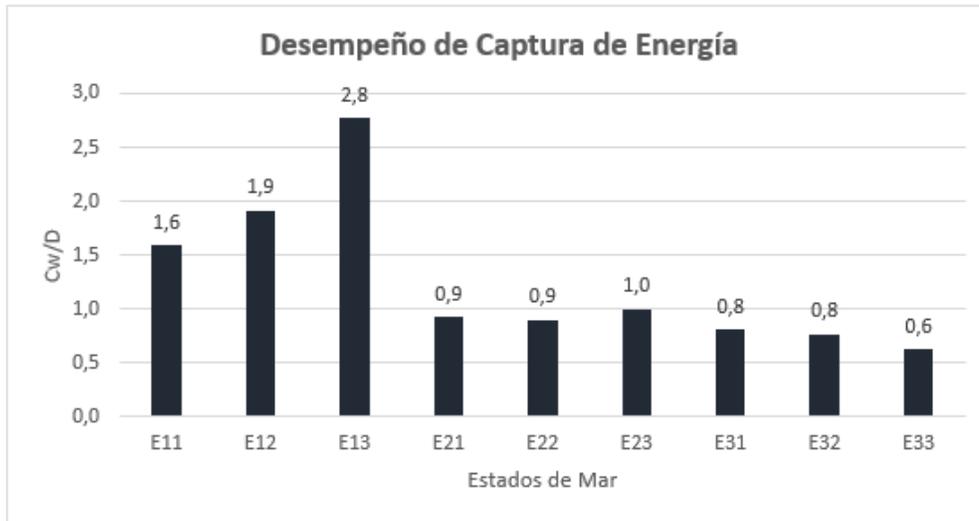
En general se cumple que para un mismo periodo significativo tanto los valores medios como máximos de potencia aumentan conforme aumenta la altura de ola significativa. Además, para aquellas condiciones de oleaje de igual altura significativa, se obtienen valores ligeramente mayores para aquellos estados de menor periodo, es decir, mayor frecuencia de oscilación. En cuanto a los valores mínimos registrados, en todos los estados de mar estos fueron cercanos a cero.



**Figura 6.7:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En la figura 6.8 se muestra el desempeño de captura de energía del modelo  $A_1$ , relativo a cada estado de mar. Este coeficiente es la relación entre el ancho de captura  $C_w$  y una dimensión perpendicular al frente de ola, correspondiente en este caso al diámetro de la boya igual a 2,75 [m]. Dado que el ancho de captura  $C_w$  es el cociente entre la potencia del dispositivo (tabla 6.42) y la potencia disponible por metro de frente de oleaje, este parámetro representa qué tanto de la energía disponible logró absorber la boya en los dos grados de libertad de movimiento analizados (horizontal y vertical). Considerando lo anterior, el estado de mar en el que se consiguió una mayor absorción energética fue aquel con altura de oleaje 2,5 [m] periodo 8 [s], donde se obtuvo un valor de 2,8. Le siguen las condiciones con oleaje de altura significativa 1,68 y 0,5 [m], ambos con periodo 8 [s], donde se alcanzan valores de 1,9 y 1,6 respectivamente.

En términos generales, las condiciones de oleaje en las que se alcanzaron los mejores desempeños de captura de energía fueron las de menor periodo significativo, es decir, de 8 [s]. Las condiciones de oleaje de periodo significativo 10,56 y 12 [s] registraron coeficientes de desempeño de captura de energía en un rango de entre 0,6 y 1,0. Siendo aquel de desempeño más bajo el estado de mar  $E_{33}$ , es decir el de mayor altura y periodo.



**Figura 6.8:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

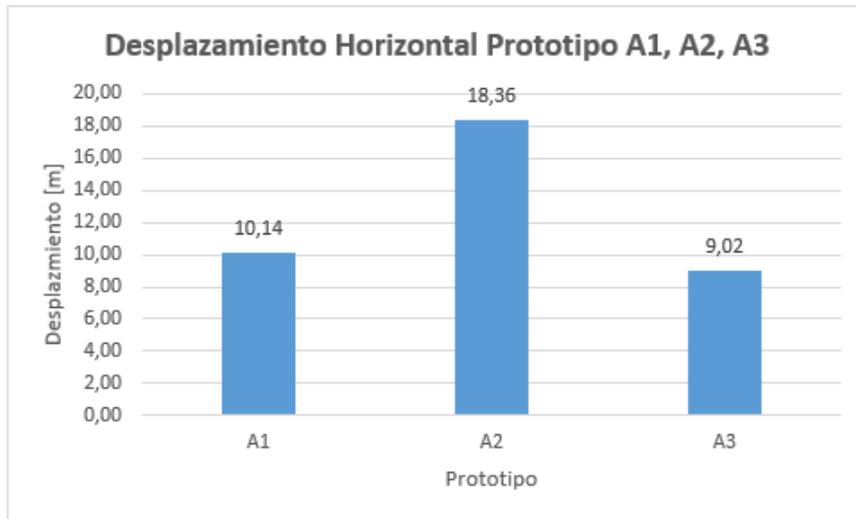
### 6.6.3. Modelos A1,A2, A3

En la tabla 6.43 se presentan los valores de desplazamiento horizontal, amplitud media de oscilación vertical y los valores máximos, mínimos y medios de velocidad horizontal, velocidad vertical, magnitud de velocidad, fuerza neta, potencia y desempeño de captura de energía, a escala de prototipo de los modelos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , obtenidos de la prueba P04 de oscilación forzada, en particular para el estado de mar  $E_{22}$  con altura de ola significativa de 1,68 [m] periodo 10,53 [s]. A partir de dichos valores se muestran gráficos comparativos de cada boya para cada parámetro.

		A1	A2	A3
$x[m]$		10,14	18,36	9,02
$y[m]$		1,53	1,96	1,73
$vx[m]$	Máx	0,98	0,87	0,95
	Mín	-1,16	-1,02	-1,01
	Media	-0,09	-0,04	-0,02
$vy[m/s]$	Máx	0,92	1,07	0,90
	Mín	-0,94	-0,90	-1,67
	Media	0,00	0,00	0,00
$v[m/s]$	Máx	1,16	1,14	1,68
	Mín	0,12	0,24	0,05
	Media	0,60	0,60	0,59
$F_{net}[N]$	Máx	3673,53	4518,02	11462,74
	Mín	31,96	49,78	0,00
	Media	1182,54	1631,41	2580,34
$P[W]$	Máx	2285,28	3205,86	11502,90
	Mín	14,66	30,54	0,00
	Media	693,69	991,64	1550,20
Cw/D		0,89	3,46	5,31

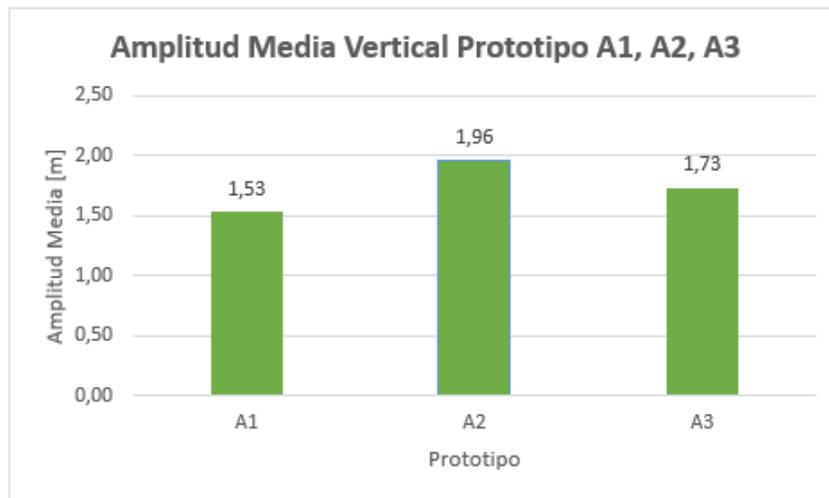
**Tabla 6.44:** Parámetros cinemáticos y dinámicos prototipo  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  para estado de mar  $E_{22}$ .

En la figura 6.9 se muestran los desplazamientos horizontales de los prototipos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , producto del oleaje monocroático ensayado de acuerdo a las condiciones del estado de mar  $E_{22}$ . Durante el periodo de análisis transcurrido (60 [s]), la boya  $A_2$  es la que presenta el mayor desplazamiento en el sentido de propagación de la ola, con un valor de 18,36 [m]. Le sigue la boya  $A_1$  con 10,14 [m] y finalmente la boya  $A_3$ , que se desplazó 9,02 [m].



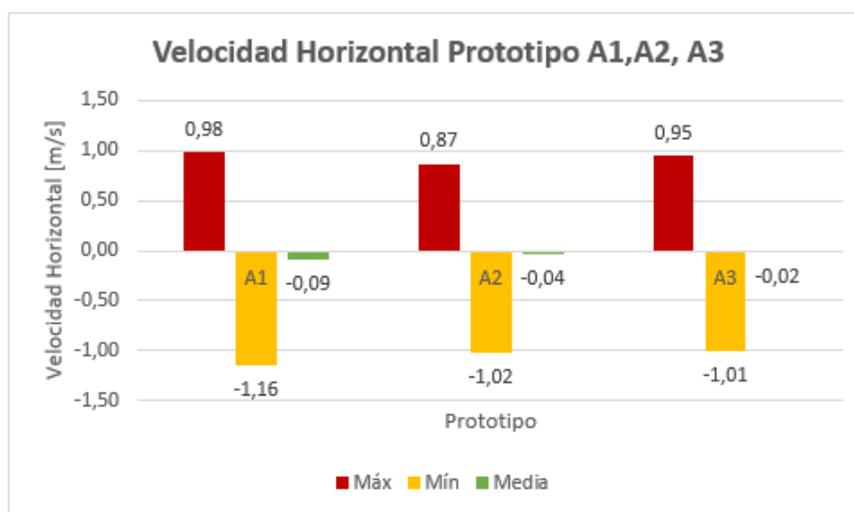
**Figura 6.9:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.10 se presentan las amplitudes medias de oscilación vertical para el estado de mar  $E_{22}$  obtenidas para cada boya. El prototipo  $A_2$  fue el que alcanzó el valor más alto con 1,96 [m], superando en 28 [cm] a la altura de oleaje significativo. De igual forma ocurre para la boya  $A_3$  que alcanza una amplitud media de oscilación vertical de 1,73 [m], superando en 3,5 [cm] a la altura de oleaje significativo. La boya  $A_1$ , alcanzó 1,53 [m] de amplitud media vertical, estando 14 [cm] por debajo de la altura de oleaje significativo.



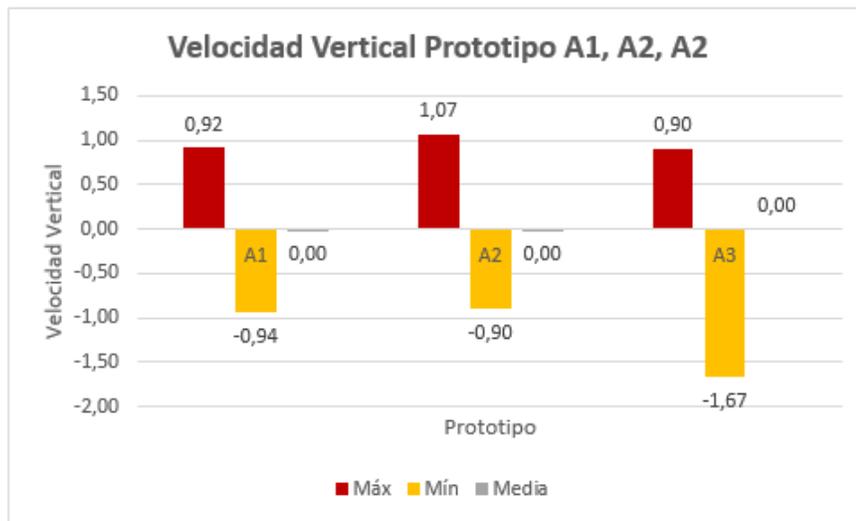
**Figura 6.10:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.11 se presentan las velocidades horizontales para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $A_1$  registró el mayor valor con  $0,98 [m/s]$ , seguido de la boya  $A_3$  con  $0,95 [m/s]$  y finalmente la boya  $A_2$ , con  $0,87 [m/s]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $A_1$  registró el menor valor con  $-1,16 [m/s]$ , seguido de la boya  $A_2$  con  $-1,02 [m/s]$  y finalmente la boya  $A_3$ , con  $-1,01 [m/s]$ . En tanto las velocidades medias, la boya  $A_1$  registró el un valor  $-0,09 [m/s]$ , seguido de la boya  $A_2$  con  $-0,04 [m/s]$  y finalmente la boya  $A_3$ , con  $0,02 [m/s]$ .



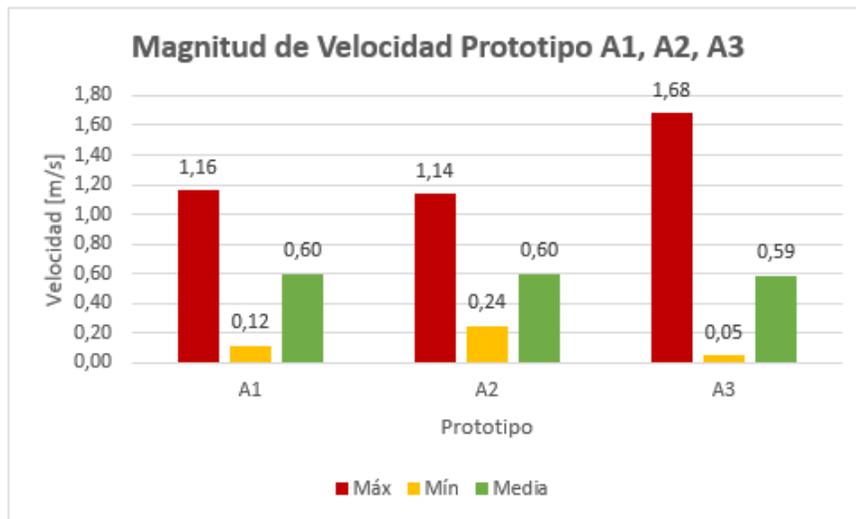
**Figura 6.11:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.12 se presentan las velocidades verticales para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $A_2$  registró el mayor valor con  $1,07 [m/s]$ , seguido de la boya  $A_1$  con  $0,92 [m/s]$  y finalmente la boya  $A_3$ , con  $0,9 [m/s]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $A_3$  registró el menor valor con  $-1,67 [m/s]$ , seguido de la boya  $A_1$  con  $-0,94 [m/s]$  y finalmente la boya  $A_2$ , con  $-0,9 [m/s]$ . Es posible apreciar que tanto para la boya  $A_1$  como  $A_3$  las velocidades descendentes fueron mayores a las ascendentes, lo que no ocurrió para la boya  $A_2$ . En tanto las velocidades medias, se registraron valores nulos para todas las boyas.



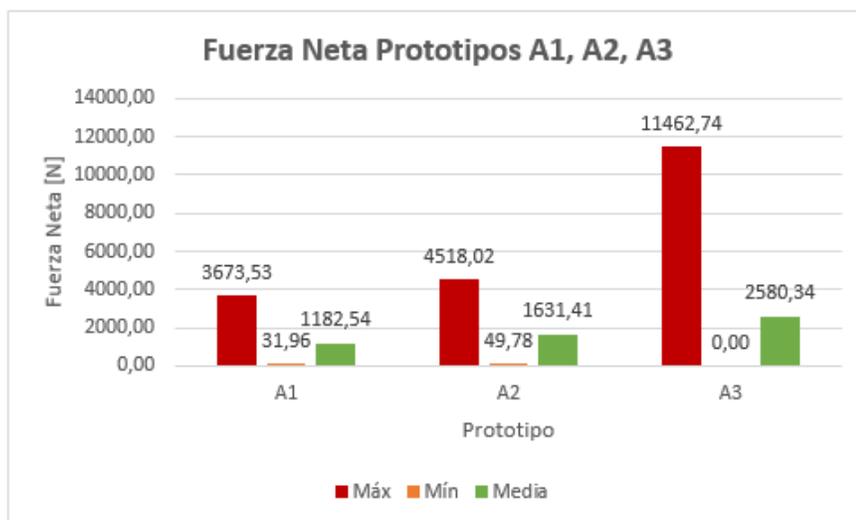
**Figura 6.12:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.13 se presentan las magnitudes de velocidad para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $A_3$  registró el mayor valor con 1,68 [m/s], seguido de la boya  $A_1$  con 1,16 [m/s] y finalmente la boya  $A_2$ , con 1,14 [m/s]. En cuanto a los valores mínimos, la boya  $A_2$  registró el mayor valor con 0,24 [m/s], seguido de la boya  $A_1$  con 0,12 [m/s] y finalmente la boya  $A_3$ , con 0,05 [m/s]. En tanto las velocidades medias, la boya  $A_1$  y  $A_2$  registraron un valor de 0,6 [m/s], mientras que la boya  $A_3$  alcanzó los 0,59 [m/s].



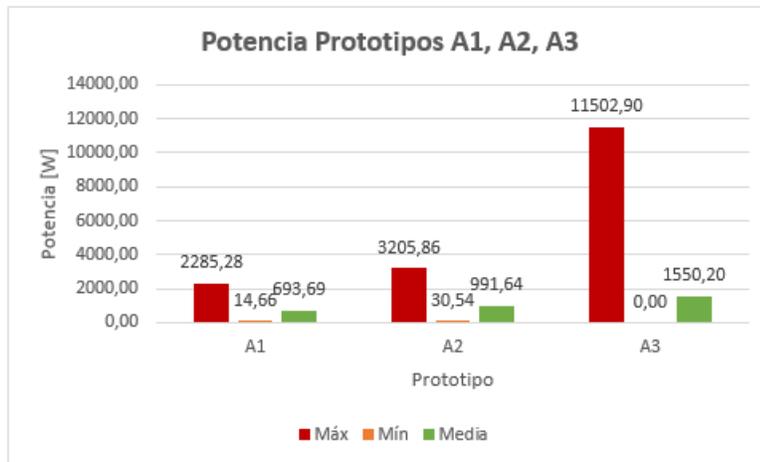
**Figura 6.13:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.14 se presentan las magnitudes fuerza neta para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $A_3$  registró el mayor valor con 11,46  $[kN]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 4,5  $[kN]$  y finalmente la boya  $A_1$ , con 3,67  $[kN]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $A_1$  registró el mayor valor con 31,96  $[N]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 49,78  $[N]$  y finalmente la boya  $A_3$ , cuyo valor mínimo registrado fue nulo. En tanto las velocidades medias, la boya  $A_3$  registró el mayor valor con 2,58  $[kN]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 1,63  $[kN]$  y finalmente la boya  $A_1$ , con 1,18  $[kN]$



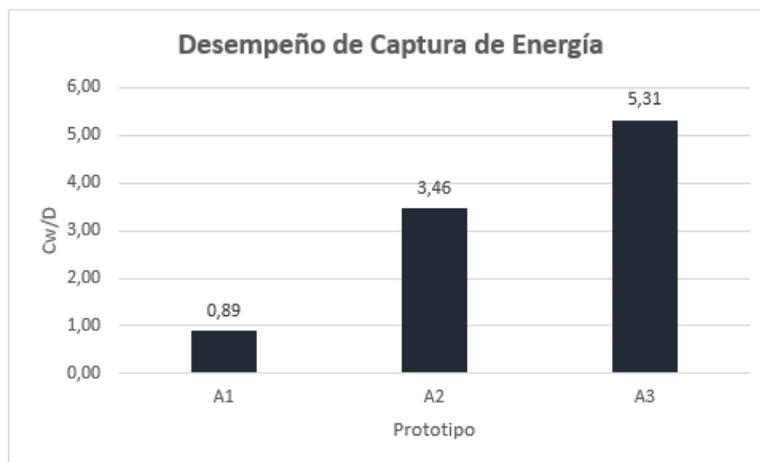
**Figura 6.14:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.15 se presentan las magnitudes potencia para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $A_3$  registró el mayor valor con 11,50  $[kW]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 3,2  $[kW]$  y finalmente la boya  $A_1$ , con 2,29  $[kW]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $A_1$  registró el mayor valor con 14,66  $[W]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 30,54  $[W]$  y finalmente la boya  $A_3$ , cuyo valor mínimo registrado fue nulo. En tanto las potencias medias, la boya  $A_3$  registró el mayor valor con 1,55  $[kW]$ , seguido de la boya  $A_2$  con 30,54  $[W]$  y finalmente la boya  $A_1$ , con 693  $[W]$



**Figura 6.15:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En la figura 6.16 se presentan los coeficientes de desempeño de captura de energía para los modelos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . La boya  $A_3$  exhibe el mejor desempeño con un coeficiente de 5,31, seguido de la boya  $A_2$  con 3,46 y finalmente la boya  $A_1$  con 0,89. Dado que la relación de desempeño de captura de energía ( $C_w/D$ ) representa el equivalente de energía disponible que la boya es capaz de absorber en proporción a la dimensión perpendicular a la dirección de propagación del frente de oleaje, se observa que los modelos  $A_2$  y  $A_3$  capturan 3,46 y 5,31 veces más que la energía equivalente a su propio diámetro. Esto no sucede con el modelo  $A_1$ , cuyo coeficiente de desempeño es menor a 1.



**Figura 6.16:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

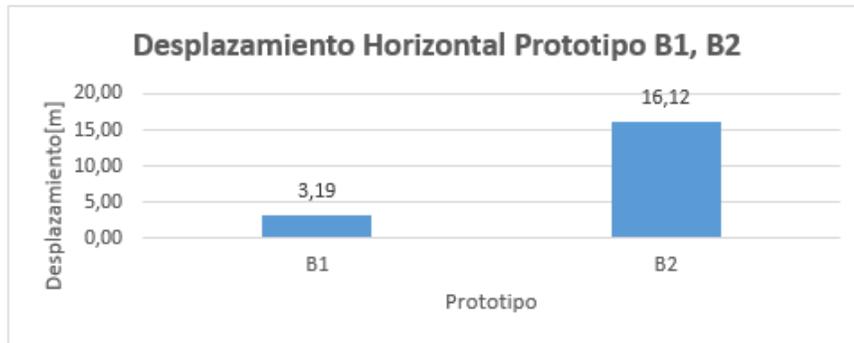
#### 6.6.4. Modelos B1, B2

En la tabla 6.44 se presentan los valores de desplazamiento horizontal, amplitud media de oscilación vertical y los valores máximos, mínimos y medios de velocidad horizontal, velocidad vertical, magnitud de velocidad, fuerza neta, potencia y desempeño de captura de energía, a escala de prototipo de los modelos  $B_1$ , y  $B_2$ , obtenidos de la prueba P04 de oscilación forzada, en particular para el estado de mar  $E_{22}$  con altura de ola significativa de 1,68 [m] periodo 10,53 [s]. A partir de dichos valores se muestran gráficos comparativos de cada boya para cada parámetro.

		B1	B2
$x[m]$		3,19	16,12
$y[m]$		1,81	1,78
$vx[m/s]$	Máx	0,90	0,95
	Mín	-1,05	-1,11
	Media	0,00	-0,04
$vy[m/s]$	Máx	0,97	0,85
	Mín	-0,84	-0,97
	Media	0,00	0,00
$v[m/s]$	Máx	1,21	1,13
	Mín	0,12	0,01
	Media	0,64	0,57
$F_{neta}[N]$	Máx	7481,08	8488,00
	Mín	117,23	165,64
	Media	2353,89	3023,47
$P[W]$	Máx	5264,25	7964,85
	Mín	77,50	20,47
	Media	1482,61	1665,36
Cw/D		5,21	5,85

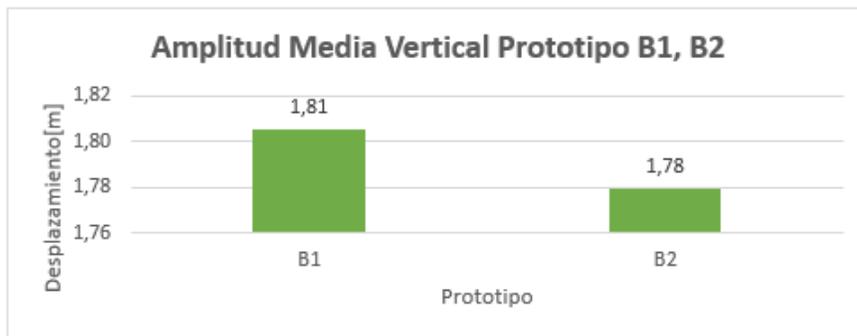
**Tabla 6.45:** Parámetros cinemáticos y dinámicos prototipo  $B_1$  y  $B_2$  para estado de mar  $E_{22}$ .

En la figura 6.17 se muestran los desplazamientos horizontales de los prototipos  $B_1$  y  $B_2$ , producto del oleaje monocromático ensayado de acuerdo a las condiciones del estado de mar  $E_{22}$ . Durante el periodo de análisis transcurrido ( $\delta t = 80[s]$ ), la boya  $B_2$  es la que presenta el mayor desplazamiento en el sentido de propagación de la ola, con un valor de 16,12 [m]. mientras que la boya  $B_1$ , se desplazó 3,19 [m].



**Figura 6.17:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

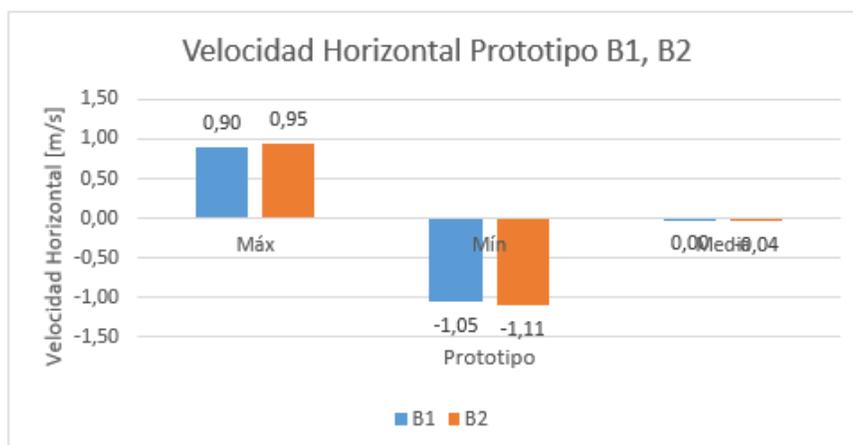
En el gráfico de la figura 6.18 se presentan las amplitudes medias de oscilación vertical para el estado de mar  $E_{22}$  obtenidas para cada boya. El prototipo  $B_1$  fue el que alcanzó el valor más alto con 1,81 [m], superando en 18 [cm] a la altura de oleaje significativo. De igual forma ocurre para la boya  $B_2$  que alcanza una amplitud media de oscilación vertical de 1,78 [m], superando en 23 [cm] a la altura de oleaje significativo.



**Figura 6.18:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

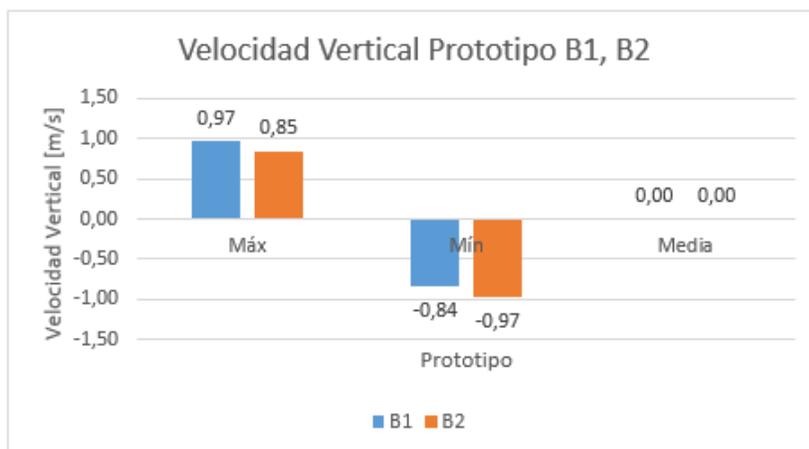
En el gráfico de la figura 6.19 se presentan las velocidades horizontales para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $B_2$  registró el mayor valor con 0,95 [m/s], mientras que la boya  $B_1$  alcanzó los 0,90 [m/s]. En cuanto a los valores mínimos, la boya  $B_2$  registró el menor valor con -1,11 [m/s], y la boya  $B_1$ , con -1,05 [m/s].

En tanto las velocidades medias, la boya  $B_2$  registró un valor -0,04 y la boya  $B_1$ , registro una media de 0.



**Figura 6.19:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

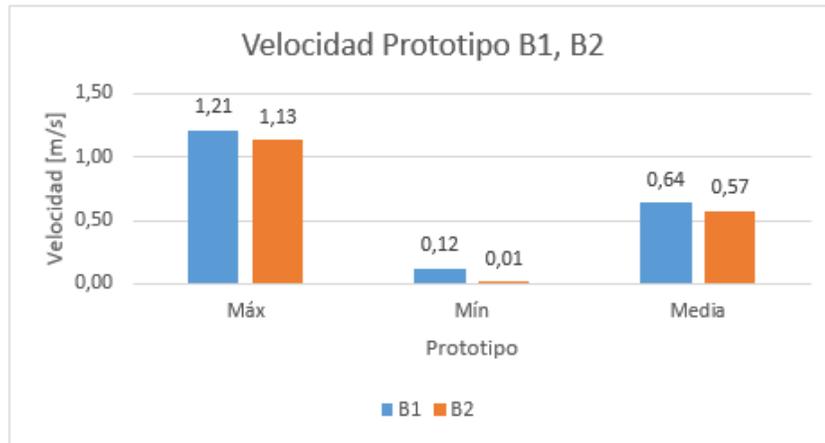
En el gráfico de la figura 6.20 se presentan las velocidades verticales para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $B_1$  registró el mayor valor con  $0,97 [m/s]$ , mientras que la boya  $B_2$  alcanzó los  $0,85 [m/s]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $B_2$  registró el menor valor con  $-0,97 [m/s]$ , y la boya  $B_1$ , con  $-0,84 [m/s]$ . En tanto las velocidades medias, ambas boyas registraron una media de 0.



**Figura 6.20:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

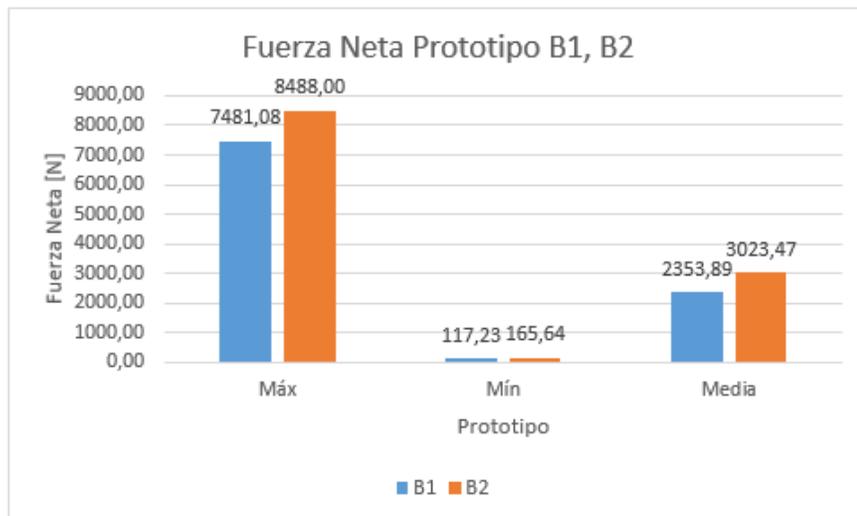
En el gráfico de la figura 6.21 se presentan las magnitudes de velocidad para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $B_1$  registró el mayor valor con  $1,21 [m/s]$ , mientras que la boya  $B_2$  alcanzó los  $1,13 [m/s]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $B_2$  registró el menor valor con  $0,01 [m/s]$ , y la boya  $B_1$ , con  $0,12 [m/s]$ . En

tanto las velocidades medias, a boya  $B_1$  registró el un valor de  $0,64 [m/s]$ , y la boya  $B_2$   $0,57 [m/s]$ .



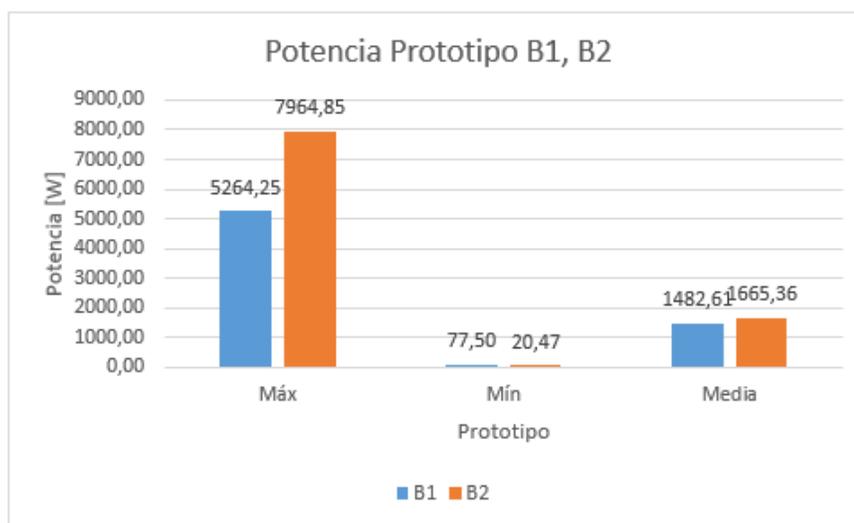
**Figura 6.21:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.22 se presentan las magnitudes de fuerza neta para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $B_2$  registró el mayor valor con  $8,49 [kN]$ , mientras que la boya  $B_1$  alcanzó los  $7,48 [kN]$ . En cuanto a los valores mínimos, la boya  $B_2$  registró el menor valor con  $165,64 [N]$ , y la boya  $B_1$ , con  $117,23 [N]$ . En tanto las velocidades medias, la boya  $B_1$  registró el un valor de  $2,35 [kN]$ , y la boya  $B_2$   $30,23 [kN]$ .



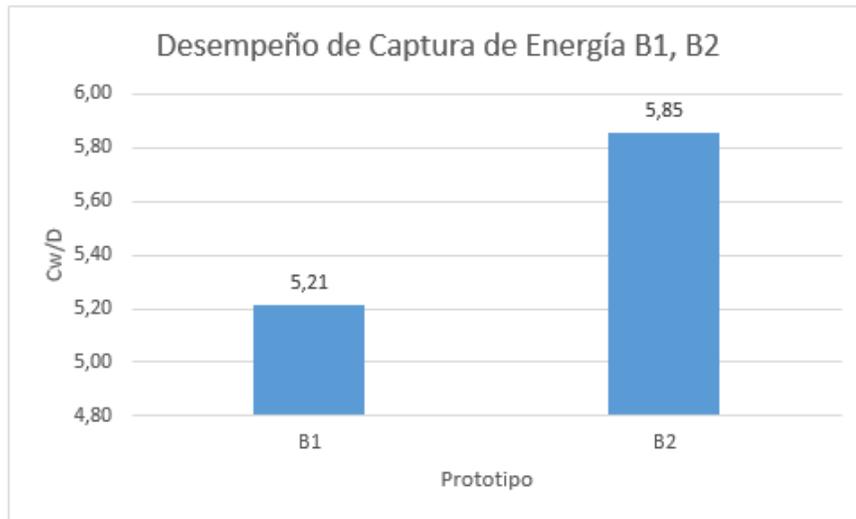
**Figura 6.22:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En el gráfico de la figura 6.23 se presentan las magnitudes potencia para cada boya, bajo condiciones de oleaje  $E_{22}$ . En cuanto a los valores máximos, la boya  $B_2$  registró el mayor valor con 7,96 [kW], mientras que la boya  $B_1$  alcanzó los 5,26 [kW]. En cuanto a los valores mínimos, la boya  $B_2$  registró el menor valor con 20,47 [W], y la boya  $B_1$ , con 77,5 [W]. En tanto las velocidades medias, a boya  $B_1$  registró el un valor de 1,48 [W], y la boya  $B_2$  1,67[kW].



**Figura 6.23:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

En la figura 6.24 se presentan los coeficientes de desempeño de captura de energía para los modelos  $B_1$  y  $B_2$ . La boya  $B_2$  exhibe el mejor desempeño con un coeficiente de 5,85, mientras que la boya  $B_1$  con 5,21. Dado que la relación de desempeño de captura de energía ( $C_w/D$ ) representa el equivalente de energía disponible que la boya es capaz de absorber en proporción a la dimensión perpendicular a la dirección de propagación del frente de oleaje, se observa que ambos modelos,  $B_1$  y  $B_2$  capturan 5,21 y 5,85 veces más que la energía equivalente a su propio diámetro.



**Figura 6.24:** P04-Desplazamiento vertical en el prototipo del modelo A1 para cada Estado de Mar

---

# CONCLUSIÓN

---

En el presente trabajo de título se desarrolló una metodología experimental conducente a estudiar modelos de generación undimotriz que aprovecharan energéticamente su interacción con el oleaje característico de Punta Curaumilla en relación a los estados de mar de mayor ocurrencia en tanto altura de ola significativa y periodo de oleaje. El estudio realizado implicó el análisis de los principales parámetros cinemáticos y dinámicos característicos de un cuerpo flotando libremente en el agua e interactuando con oleaje regular monocromático.

Las pruebas P01-Prueba de plataforma seca y P02-Prueba de plataforma húmeda fueron fundamentales para realizar una caracterización de los distintos modelos diseñados en cuanto a sus principales propiedades de masa y estabilidad de flotación en condiciones estáticas previo a la ejecución de las pruebas de oleaje.

La prueba P03-Prueba de oscilación libre permitió describir el comportamiento de cada modelo asociado al fenómeno de amortiguación presente durante la oscilación de un cuerpo flotante y los periodos naturales de oscilación fuertemente ligados a su geometría, propiedades de masa y a la capacidad de cada modelo de retornar a su posición de equilibrio. De esta forma, se concluye que los modelos de una misma geometría presentan periodos naturales de oscilación de mayor duración mientras mayor sea su masa. En consecuencia el modelo  $A_3$  tiene un periodo natural de oscilación mayor que  $A_2$  y este a su vez mayor que  $A_1$ . Análogamente ocurrió para los modelos  $B_1$  y  $B_2$ , siendo este último el que presentó un periodo natural más largo. Cabe destacar que los modelos tipo B requirieron de un mayor número de oscilaciones para retornar a su posición de equilibrio luego de ser perturbados.

Por otro lado, los coeficientes de amortiguación de los modelos tipo B fueron significativamente menores a los modelos tipo A, esto debido principalmente a su mayor área plana. En consecuencia se puede deducir que la disipación energética por radiación de estos últimos es mayor, lo que sugiere un menor aprovechamiento de la energía de oleaje disponible.

En base a lo anterior y en concordancia con los resultados obtenidos de la prueba P04-Prueba de oscilación forzada aplicada sobre los distintos modelos estudiados se recoge un análisis del fenómeno de interacción boya-oleaje que presenta las principales características que se detallan a continuación:

### **Trayectoria, desplazamiento horizontal y amplitud media de oscilación vertical**

Los modelos se desplazan horizontalmente en el sentido de propagación del oleaje monocromático inducido, mientras oscilan verticalmente a la misma frecuencia que este. En tanto las trayectorias descritas por cada modelo, se observó que aquellos cuya geometría de disco tipo A ( $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ ) fueron elipses relativamente regulares, mientras que los modelos de geometría cilíndrica vertical tipo B describen trayectorias más irregulares, debido a que en estos tienen un mayor impacto los movimientos pitch y roll inducidos por el oleaje.

Aquellos estados de mar con mayor altura significativa de oleaje y mayor frecuencia producen un mayor desplazamiento en el sentido de propagación de la ola.

Mientras más cerca esté el centro de masa de la boya de la línea de agua, mayor será el desplazamiento horizontal en la dirección de propagación del oleaje. Esto se comprobó luego que, para las mismas condiciones de oleaje y durante el mismo periodo de tiempo (60 segundos), el modelo  $A_2$  registrara un desplazamiento aproximadamente el doble que los modelos  $A_1$  y  $A_3$ , cuyos centros de gravedad se ubicaban sobre el nivel del agua (36,17% de volumen sumergido) y por debajo de la línea de agua (65% de volumen sumergido) respectivamente.

En el caso de los modelos  $B_1$  y  $B_2$ , fue este último que experimentó un mayor desplazamiento en el sentido de propagación del oleaje, debido principalmente a que su centro de gravedad estaba más alejado de la línea de agua que el del modelo  $B_1$ . Esto implicó que el primero tuviese un calado mayor y por consecuencia mayor contacto con las fuerzas de arrastre producidas por el oleaje.

En relación con la altura de oleaje inducido, para el modelo  $A_1$ , se obtuvo que en cinco de los nueve estados de mar analizados la amplitud media de oscilación vertical superó la altura significativa de oleaje inducido, es decir, en un 55,56% de los casos. De igual forma ocurrió para los modelos  $A_2$ ,  $B_1$  y  $B_2$  en condiciones de oleaje  $E_{22}$ . Mientras que para el modelo  $A_3$  la amplitud media de oscilación vertical fue menor a la altura significativa de oleaje para el mismo estado de mar.

### **Parámetros cinemáticos**

En tanto las magnitudes de velocidad horizontal de la boya se puede concluir que estas alcanzaron valores mayores en estados de mar con mayor altura significativa de oleaje y mayor periodo de oscilación. Por otro lado, para un mismo periodo de oleaje estas mantuvieron valores cercanos. Estas relaciones de magnitud se observan también para las velocidades verticales.

La velocidad horizontal para modelos de una misma geometría, diferentes masas y porción de volumen suergido, como fue el caso de los modelos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  no advirtieron mayores diferencias. Análogamente ocurrió para las velocidades verticales. Esto se puede asociar a que los modelos suelen moverse junto con el oleaje, por lo que su velocidad está estrechamente asociada a la celeridad de este.

### **Parámetros dinámicos**

Tal como se apreció para las velocidades horizontales y verticales, la magnitud de la fuerza neta fue mayor en aquellos estados de mar con mayor altura de ola significativa y mayor frecuencia de oscilación. Mientras que para una misma frecuencia de oscilación y diferentes alturas significativas estos valores se mantuvieron cercanos entre ellos. Esto se explica por la contribución de la aceleración en el cálculo de fuerza neta, dado que es mayor en aquellos estados de mar en el que la boya alcanza a recorrer trayectorias de mayor longitud en cada oscilación. Esta misma relación se puede observar en la potencia de la boya, puesto que es directamente proporcional a la fuerza neta.

Por otro lado, para una misma geometría, se obtuvo magnitudes mayores de fuerza neta en aquellos modelos de mayor masa. Este fue el caso de los modelos  $A_3$  y  $B_2$ , y se explica por la contribución de este parámetro en el cálculo de fuerza que es directamente proporcional a este. Este comportamiento se repite para los valores de potencia, por las razones mencionadas anteriormente.

### **Desempeño de captura de energía**

Se obtuvo que el mejor desempeño de captura de energía en tanto potencia de oleaje disponible y potencia absorbida por la boya ocurrió para los estados de mar más energéticos. Estos son aquellos con menor periodo de oleaje y mayor altura de ola significativa. Cabe destacar que la contribución de altura significativa a la potencia disponible de oleaje es considerablemente mayor que lo aportado por el periodo de este, dado que en el cálculo la potencia de oleaje aumenta en un factor de potencia cuadrada.

Por otro lado, para una misma geometría, enseñan un mejor aprovechamiento energético los modelos de mayor masa. Este fue el caso de los modelos  $A_3$  y  $B_2$ , que fueron capaces de absorber una potencia equivalente a cinco veces su diámetro respecto de la potencia disponible por metros de frente de ola.

Los resultados experimentales mencionados discrepan en gran medida con los principales parámetros cinemáticos y dinámicos obtenidos de la simulación numérica desarrollada en el

software de simulación Ansys Aqwa. Las diferencias tienen su fundamento en la preponderancia de las fuerzas viscosas presentes en la interacción entre la boya y el agua y cómo esta afecta la restauración de la posición de equilibrio de un cuerpo flotante. Este punto se evidenció al observar en los ensayos experimentales una mayor resistencia a la oscilación vertical, a diferencia de la simulación numérica donde la línea de agua recorría una longitud del manto del cilindro mucho mayor luego de cada perturbación producto del oleaje.

El trabajo realizado logró captar un panorama cinemático y dinámico que sirve como una primera aproximación al estudio fenomenológico experimental de un convertidor de energía undimotriz y su interacción con oleaje regular monocromático. Se prevee que trabajos futuros apunten a describir con mayor detalle los factores implicados. En cuanto a modelación experimental un siguiente paso sería medir las fuerzas de excitación de oleaje y su descomposición en tanto fuerza de Froude-Krylov y fuerza de difracción, así como fuerza de radiación generada por el cuerpo flotante y su dependencia con la frecuencia de oleaje incidente. En cuanto a modelación numérica el trabajo que sigue está asociado a la influencia de fuerzas externas asociadas al anclaje del dispositivo en una zona específica y cómo este afecta su movimiento en cada uno de sus grados de libertad. Otro estudio futuro puede estar asociado al funcionamiento de un conjunto de convertidores de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual y su distribución espacial para generar mayores niveles de aprovechamiento energético.

---

# REFERENCIAS

---

1. World Population Prospects, 2015. Departamento de Naciones Unidas de la División de Asuntos Económicos y Sociales para el Desarrollo Sostenible.
2. IEA (2021), World Energy Balances: Overview, IEA, Paris.  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>
3. Falnes, J. and Budal, K. (1978). Wave power conversion by point absorbers. Norwegian Maritime Research, Vol.6, No.4, pp. 2-11.
4. Principles for capture of energy from ocean waves. Phase control and optimum oscillation. J. Falnes Department of Physics, NTNU, N-7034 Trondheim, Norway.
5. Estudio catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz, cod.: 09CN-145718. Anexo 10: Potencia local larga data.
6. Wave energy assessment in the central-south coast of Chile Felipe Lucero a, b, Patricio A. Catalan a, f, g, \*, Alvaro Ossandón a, José Beyac, Andres Puelma d, Luis Zamorano.
7. Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems, Marine Renewable Energy Guides. European Marine Energy Centre 2009.
8. Falnes, J. and Budal, K. (1978). Wave power conversion by point absorbers. Norwegian Maritime Research, Vol.6, No.4, pp. 2-11.
9. Evans, D.V. (1976). A theory for wave-power absorption by oscillating bodies. Journal of Fluid Mechanics, 77, pp. 1-25.
10. Salter, S.H. (1974). Wave Power. Nature, Vol. 249, pp. 720-724].
11. Budal, K. and Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. Nature, 256, 478-479. (With corrigendum in Vol.257, p.626).
12. "Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación", David Olivos, 2020.



---

# ANEXOS

---

## 6.7. Modelo $A_1$

### 6.7.1. Estado de mar $E_{11}$

- **Fecha:** Miércoles 27 de abril 2021
- **Condiciones de laboratorio:**

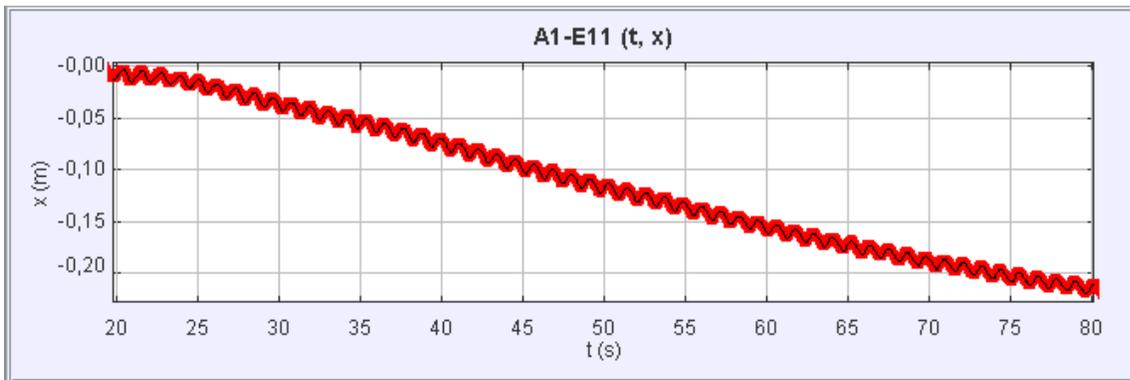
Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
18,3	19,0	19

- **Parámetros de ajuste inicial:**

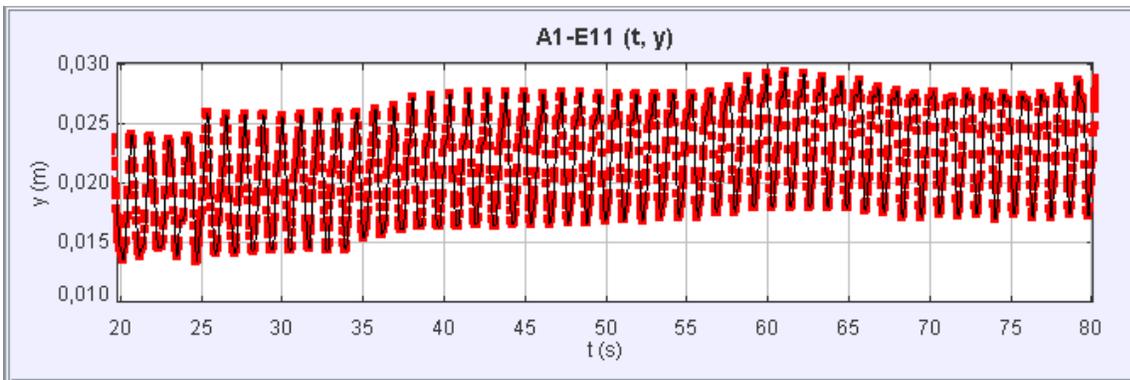
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal [°]
$(1, 565; 1, 482) * 10^{-2}$	0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

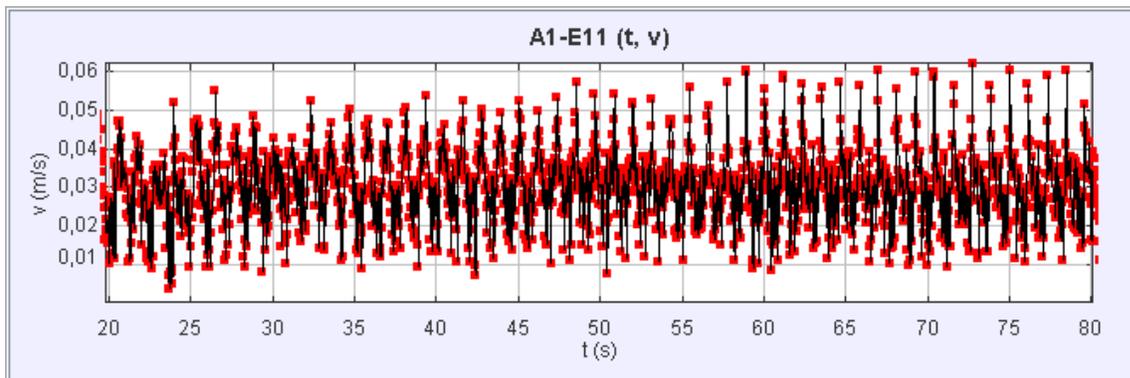
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,025	0,88	1,3	1,11



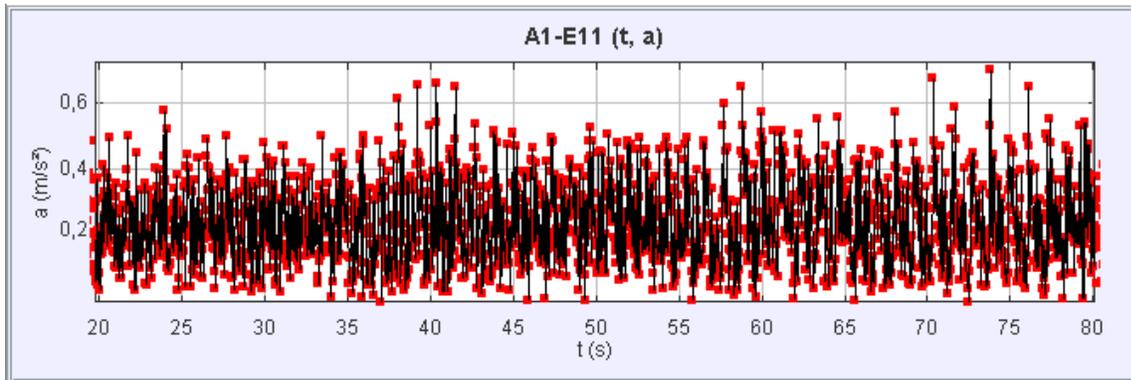
**Figura 6.25:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



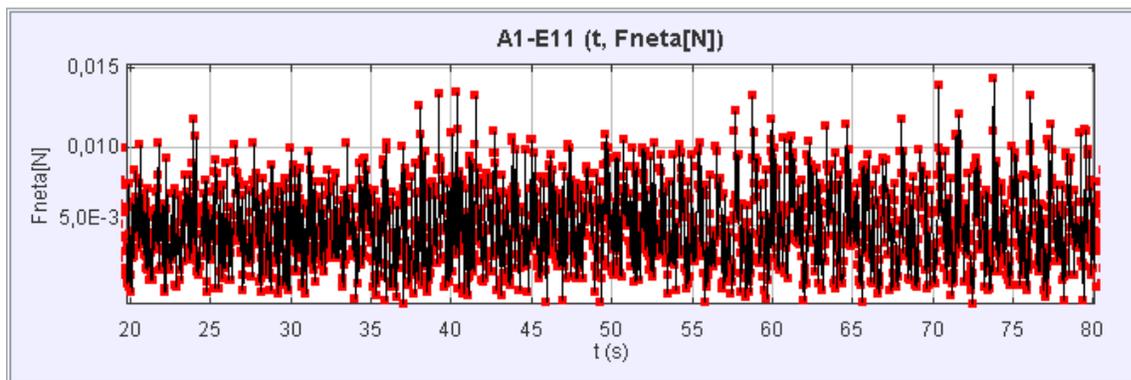
**Figura 6.26:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



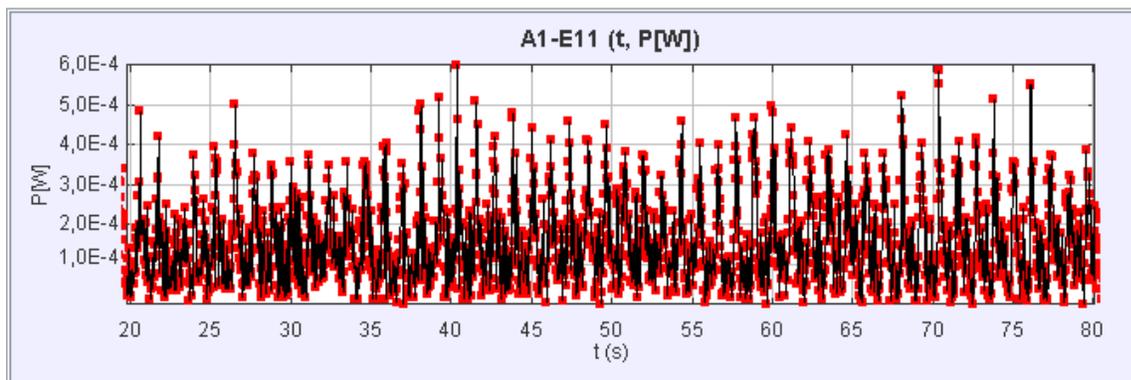
**Figura 6.27:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.28:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.29:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.30:** P04- $A_1$ ,  $E_{11}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.2. Estado de mar $E_{12}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

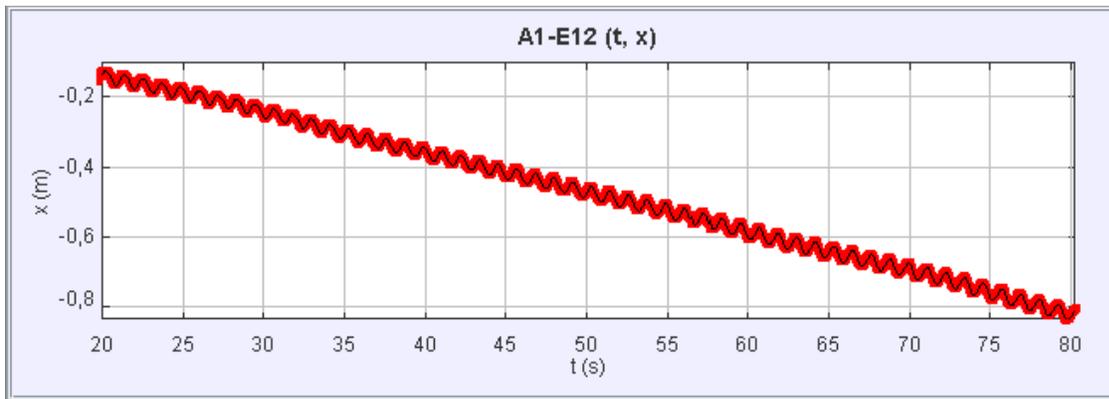
Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18,0 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

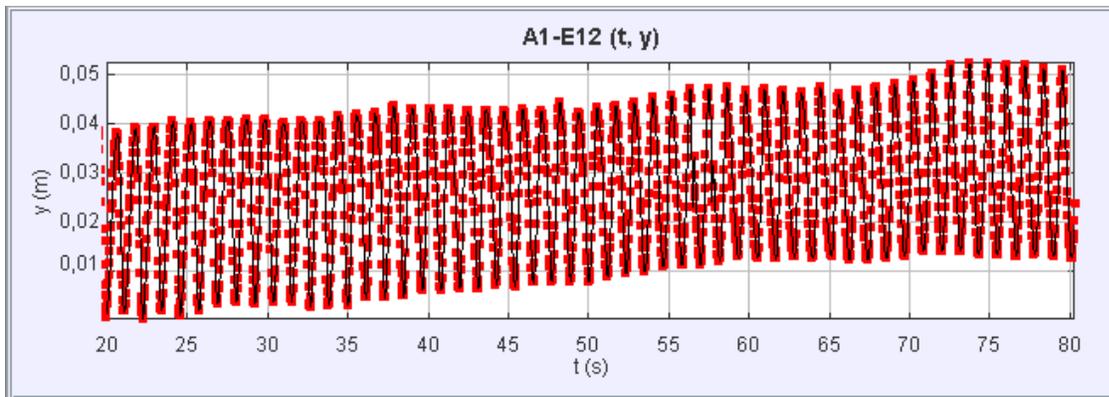
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
$(1,565; 1,482) * 10^{-2}$	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

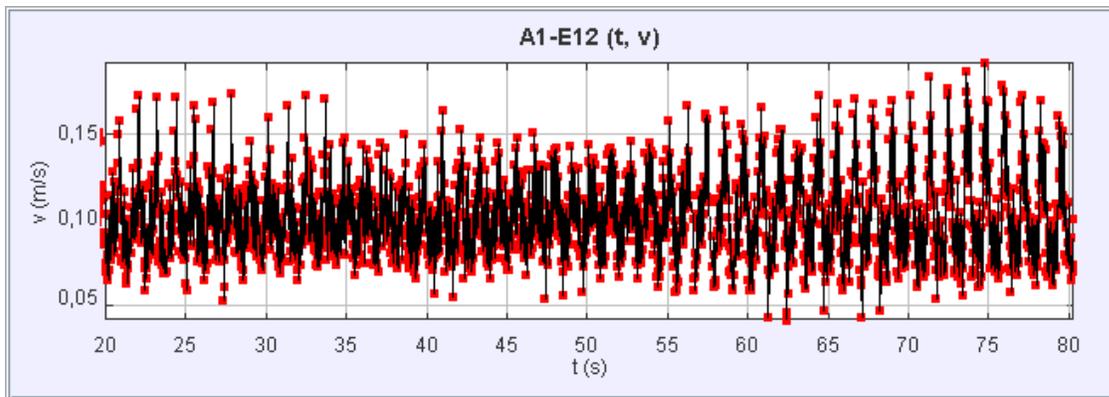
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,095	0,88	3,34	1,14



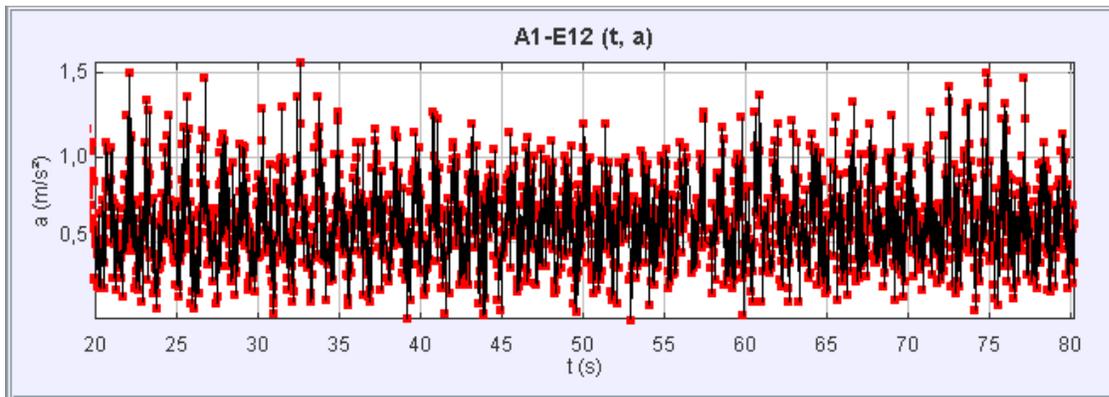
**Figura 6.31:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



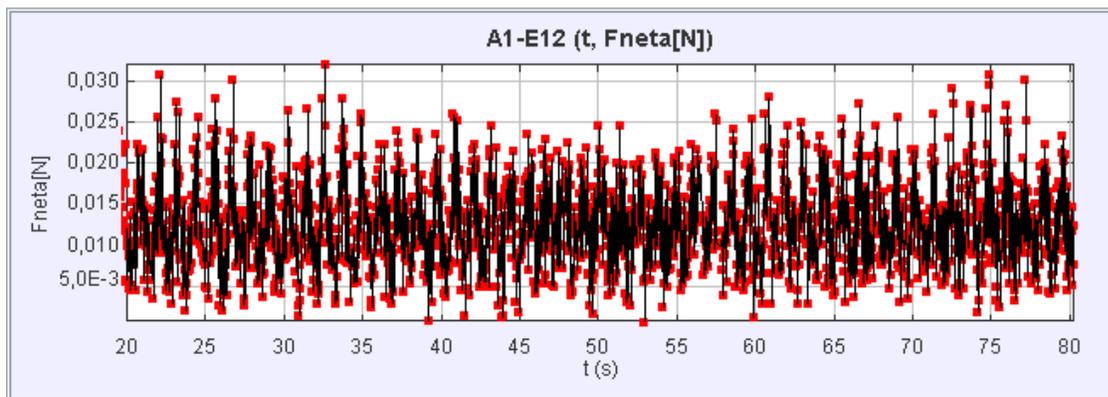
**Figura 6.32:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



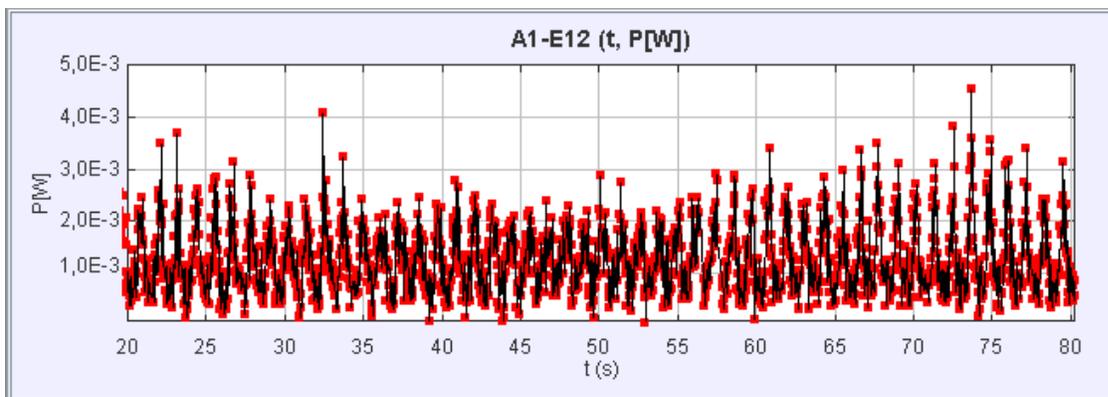
**Figura 6.33:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.34:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.35:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.36:** P04- $A_1$ ,  $E_{12}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.3. Estado de mar $E_{13}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

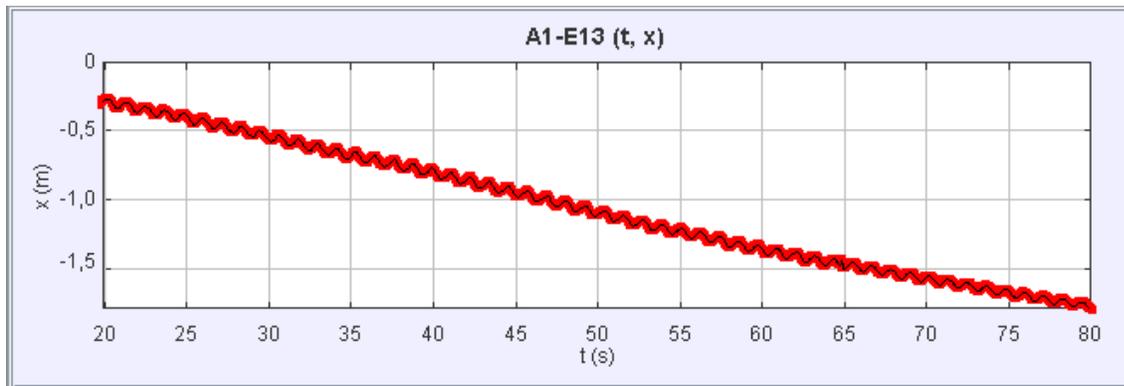
Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

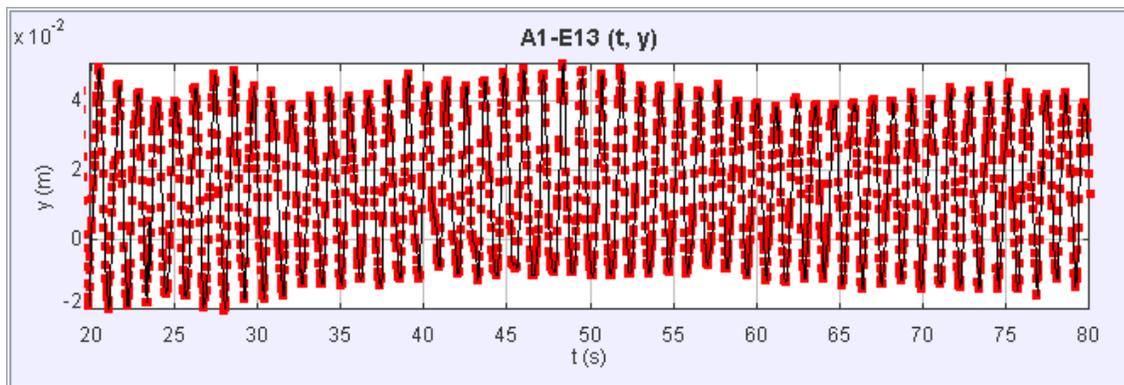
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
A1-E13 -3,32E-1 -7,17E-3	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

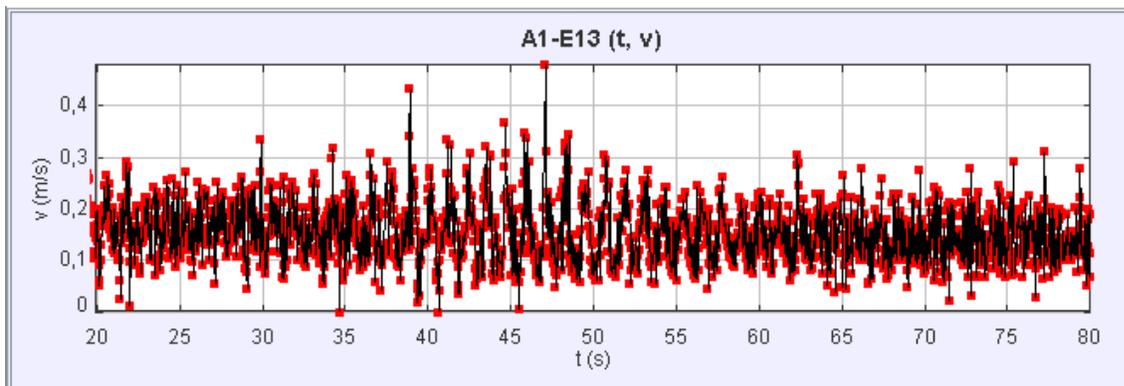
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,14	0,88495	5,0	1,14



**Figura 6.37:** P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



**Figura 6.38:** P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



**Figura 6.39:** P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.

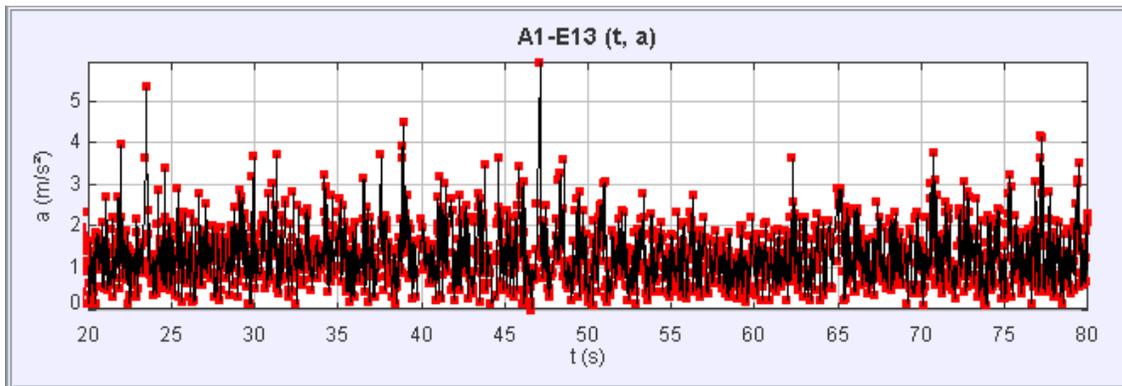


Figura 6.40: P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.

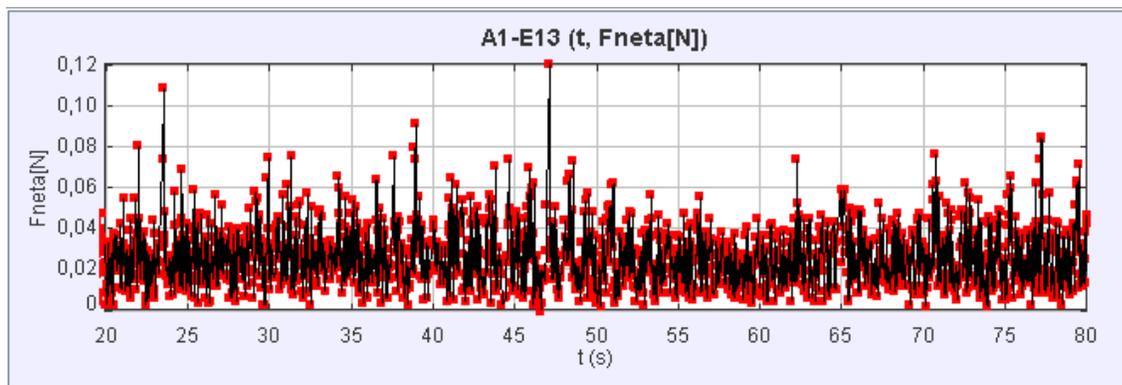


Figura 6.41: P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.

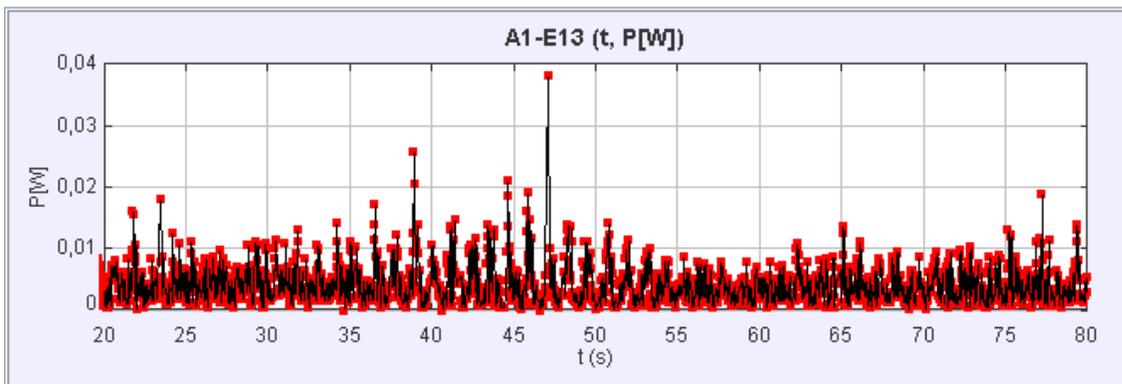


Figura 6.42: P04- $A_1$ ,  $E_{13}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

6.7.4. Estado de mar  $E_{21}$ 

- **Fecha:** Miércoles 27 de abril
- **Hora de prueba:**
- **Condiciones de laboratorio:**

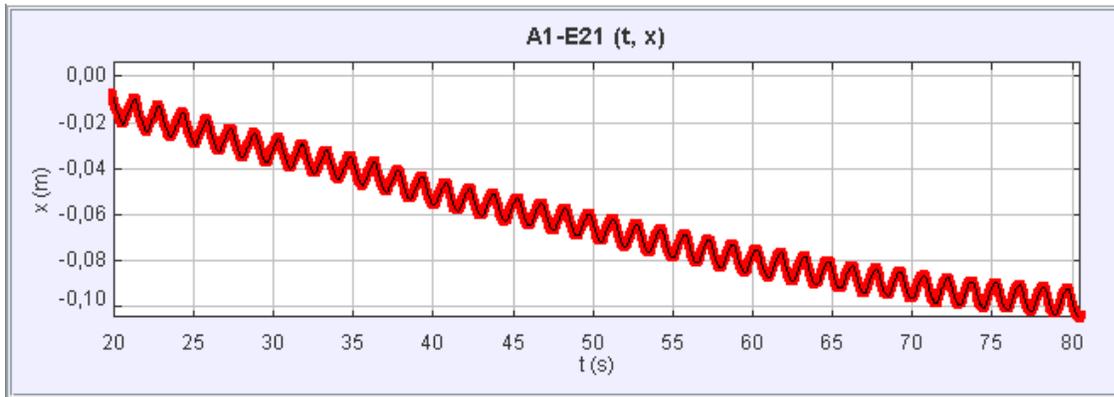
Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,0	19,2	18,8 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

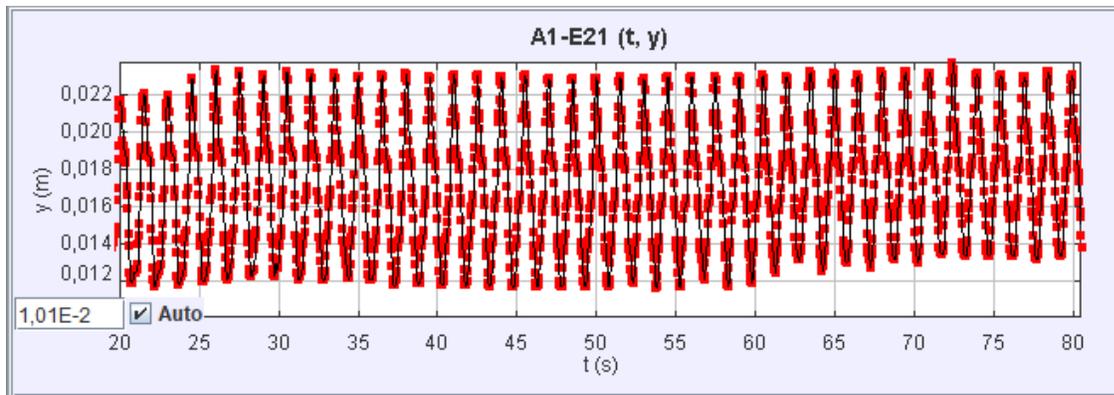
Posición inicial ( $x; y$ ) [m]	Ángulo desde horizontal
-1,87E-2 1,20E-2	1,2°

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

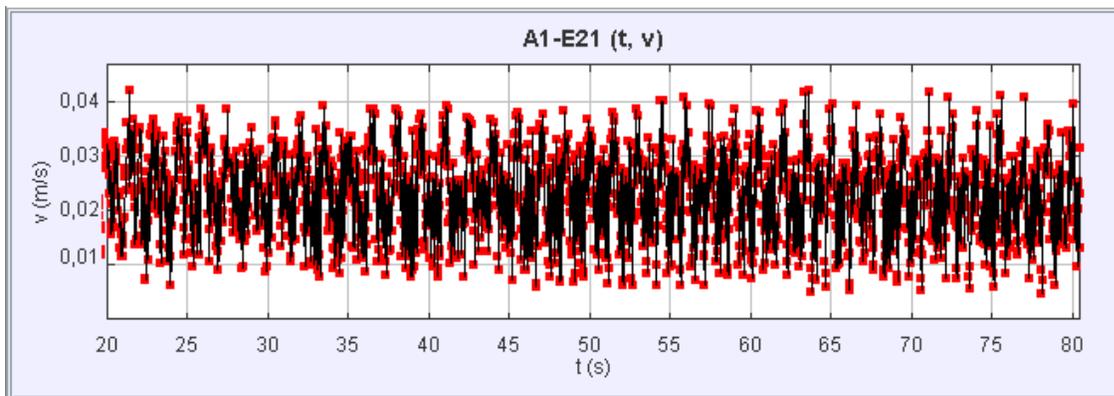
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,03	0,67567	1,14	1,49



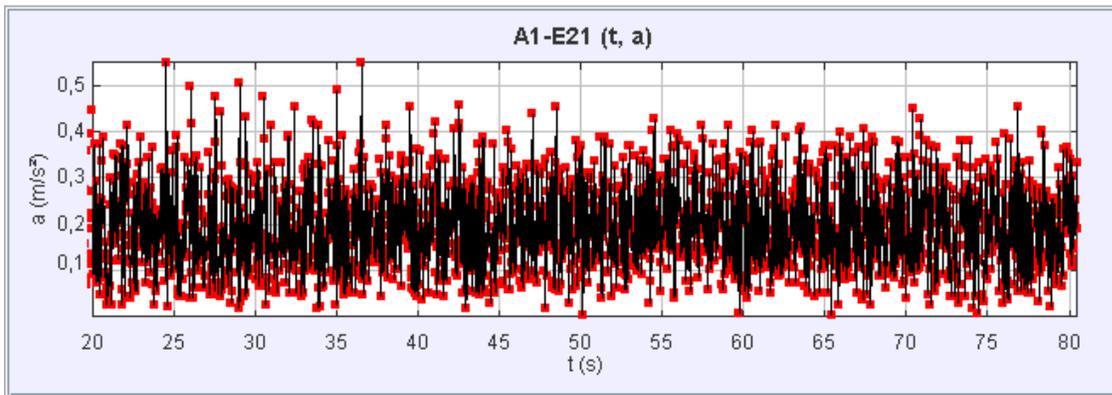
**Figura 6.43:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



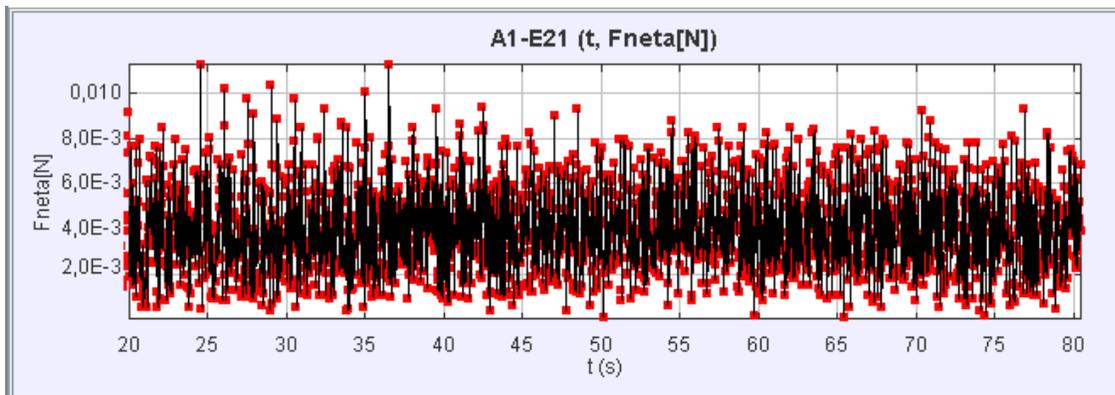
**Figura 6.44:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



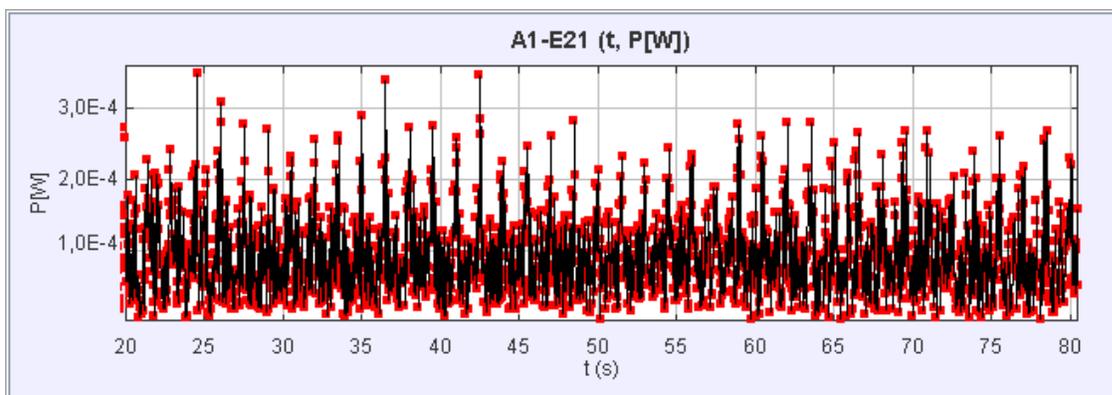
**Figura 6.45:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.46:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.47:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.48:** P04- $A_1$ ,  $E_{21}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.5. Estado de mar $E_{23}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-4,77E-2,3,30E-2	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,175	0,67567	5,16	1,52

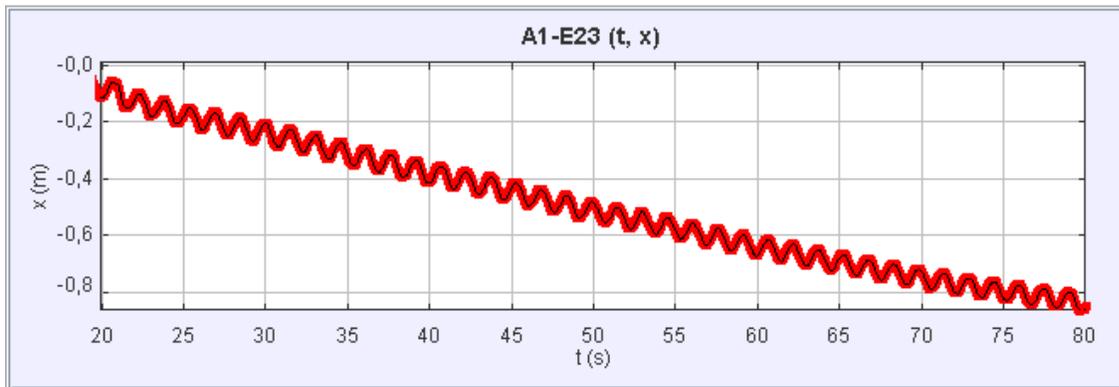


Figura 6.49: P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.

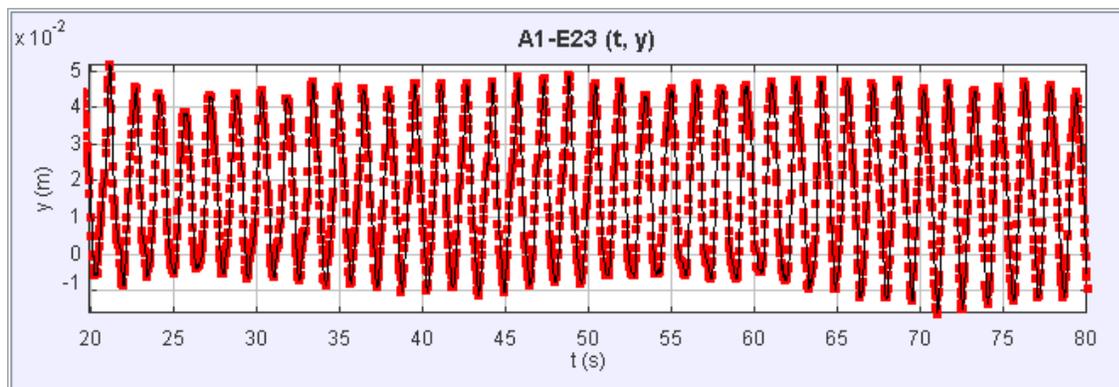


Figura 6.50: P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.

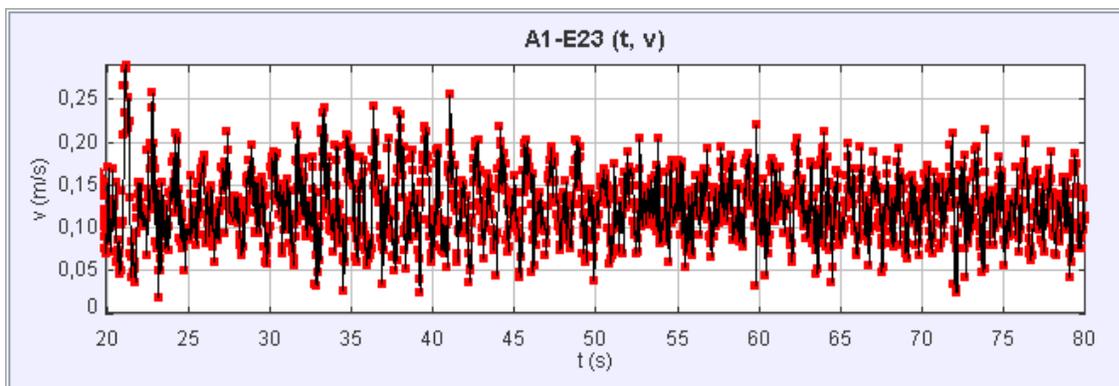
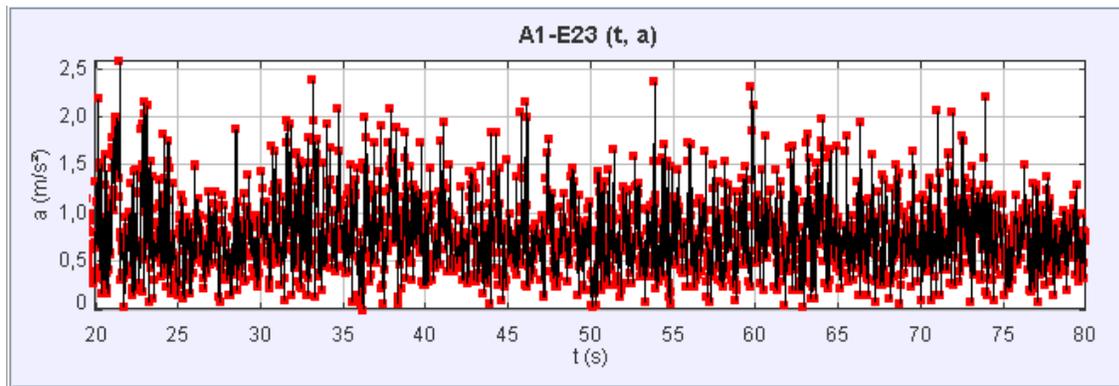
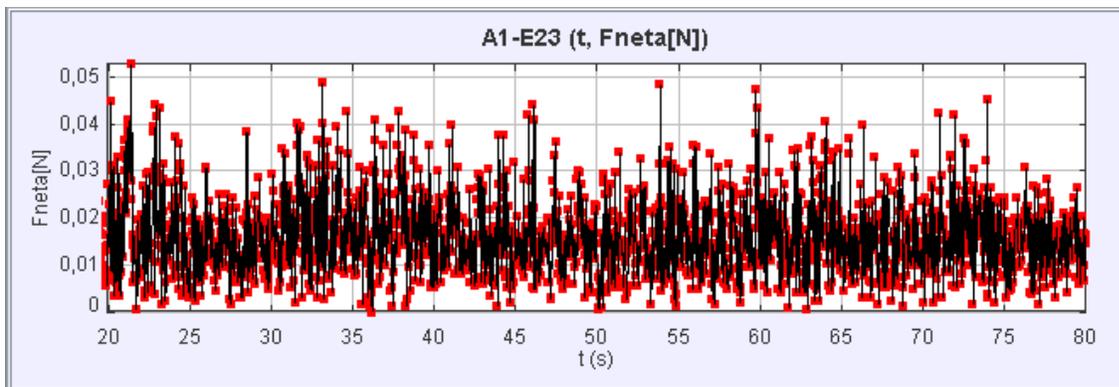


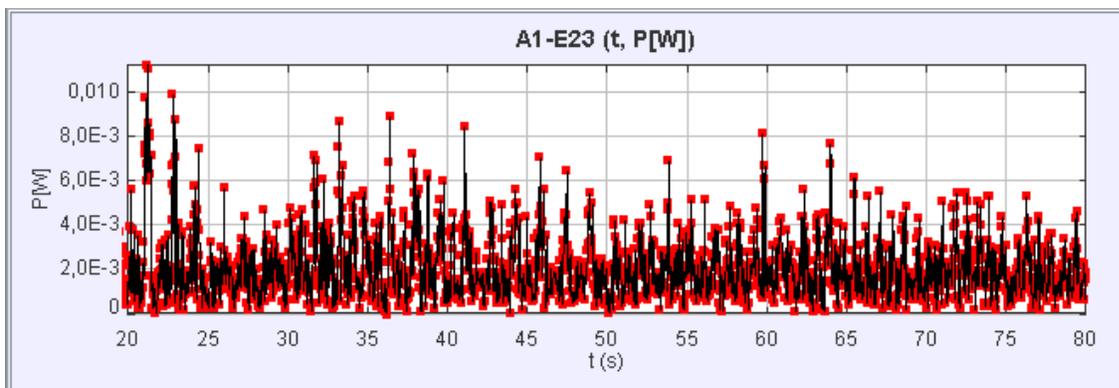
Figura 6.51: P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.52:** P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.53:** P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.54:** P04- $A_1$ ,  $E_{23}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.6. Estado de mar $E_{31}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-4,15E-3, 1,71E-2	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,045	0,59171	1,25	1,71

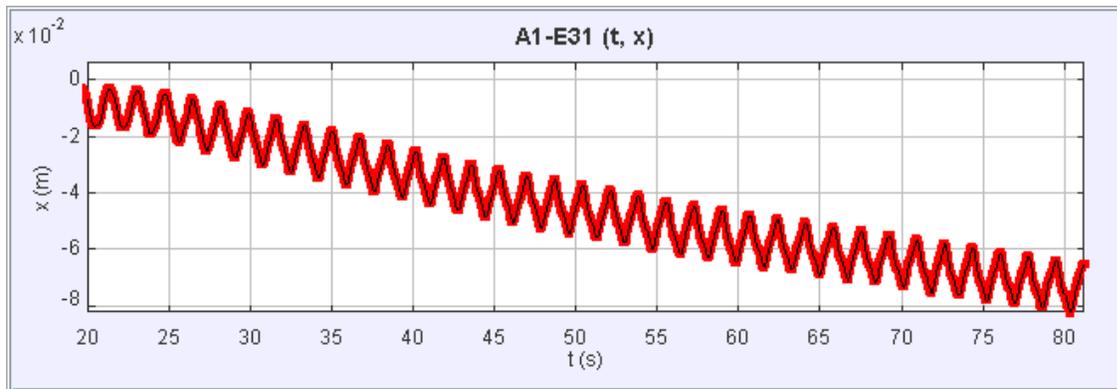


Figura 6.55: P04-A<sub>1</sub>, E<sub>31</sub>: Posición horizontal de la boya en el tiempo.

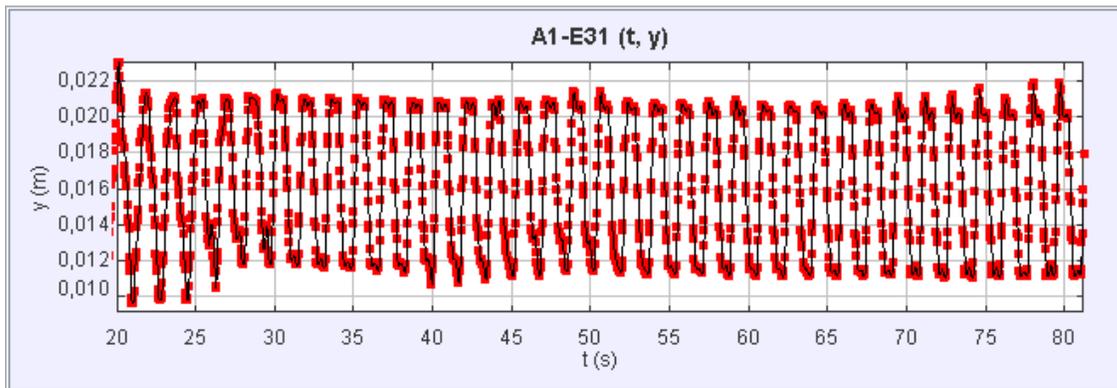


Figura 6.56: P04-A<sub>1</sub>, E<sub>31</sub>: Posición vertical de la boya en el tiempo.

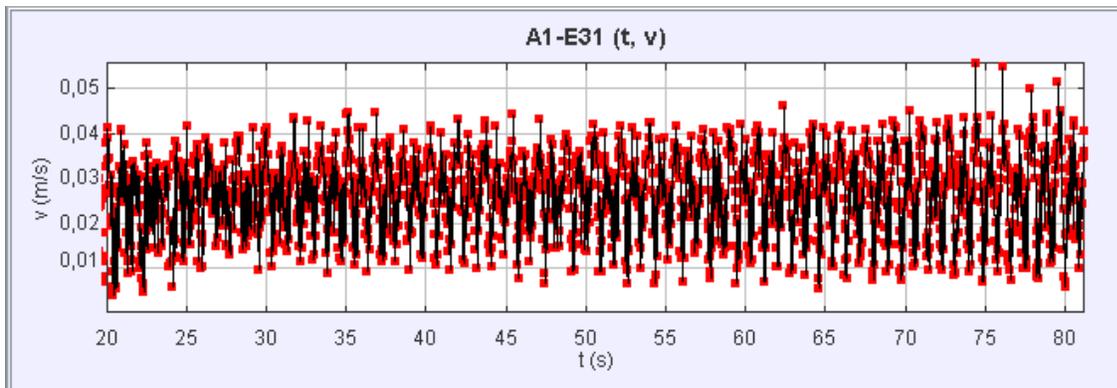
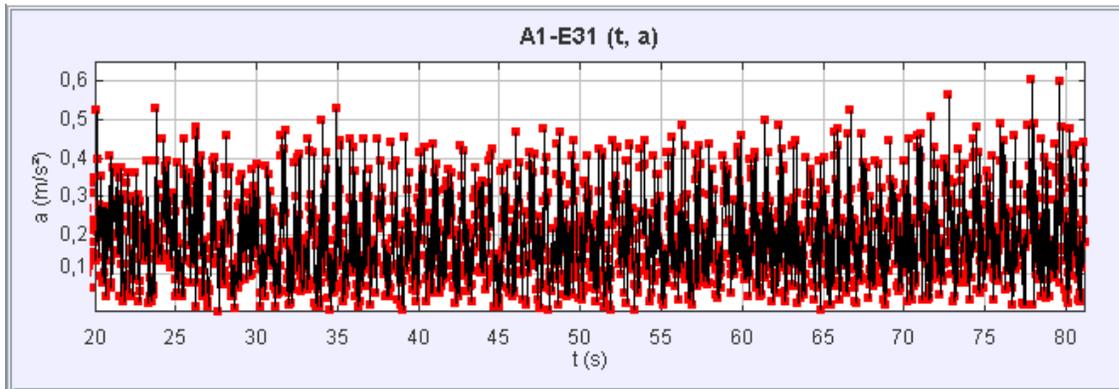
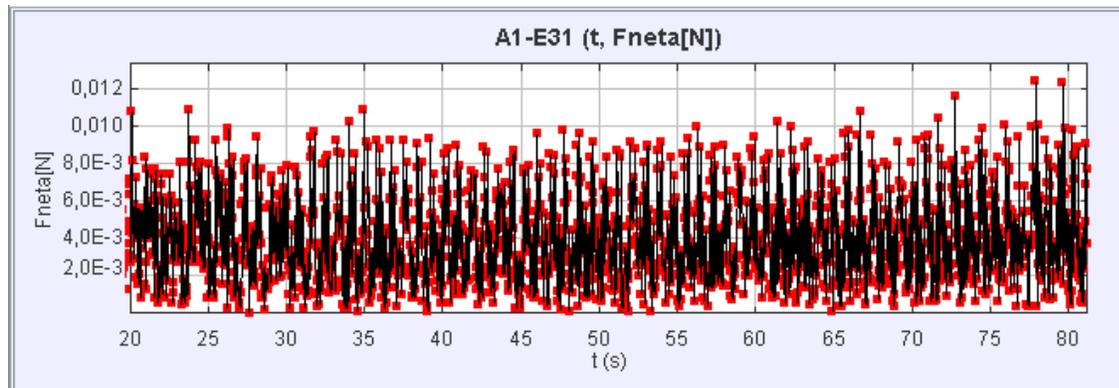


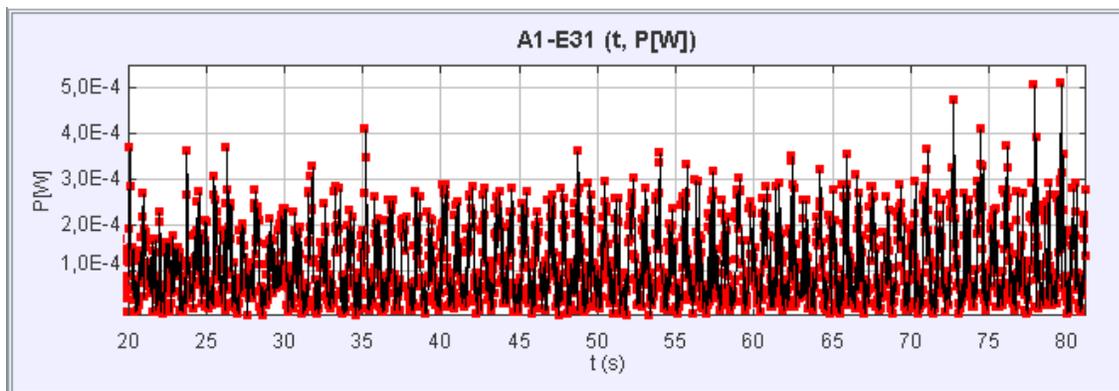
Figura 6.57: P04-A<sub>1</sub>, E<sub>31</sub>: Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.58:** P04- $A_1$ ,  $E_{31}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.59:** P04- $A_1$ ,  $E_{31}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.60:** P04- $A_1$ ,  $E_{31}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.7. Estado de mar $E_{32}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

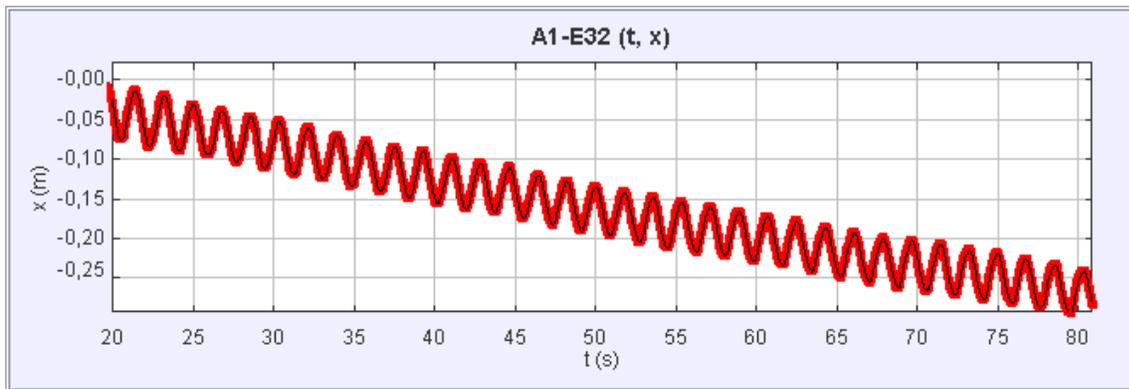
Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

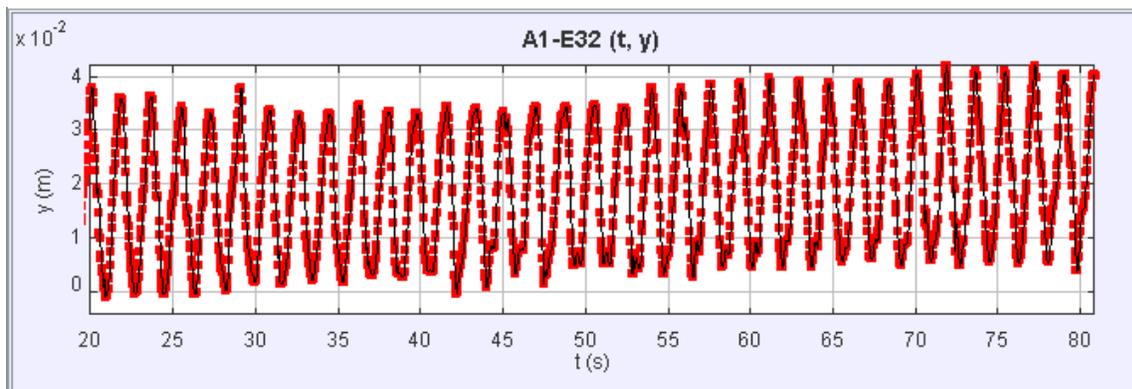
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-1,16E-2, 9,29E-3	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

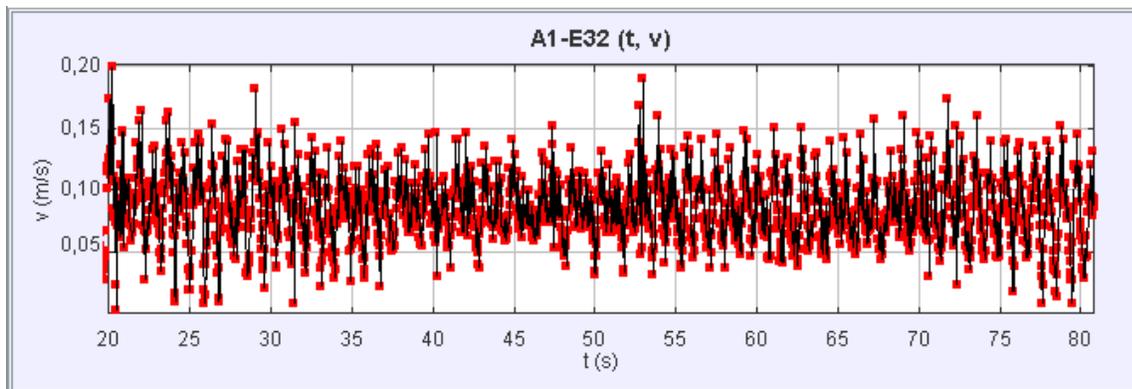
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,045	0,59171	3,35	1,78



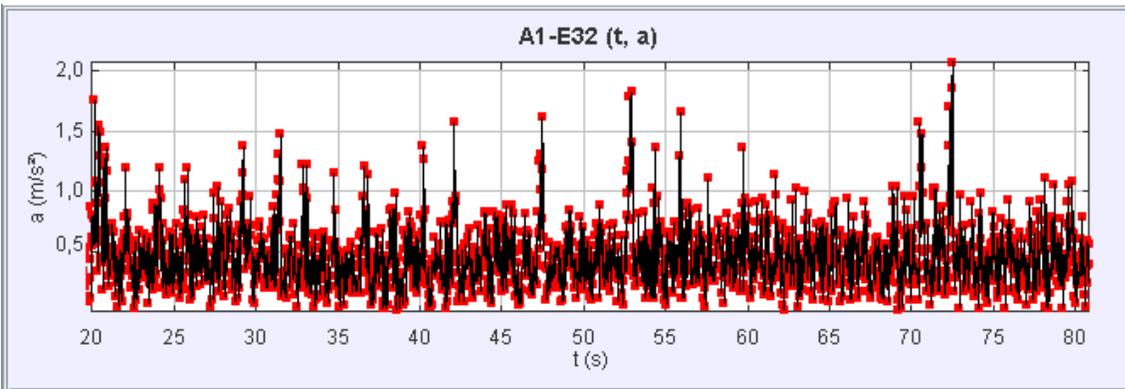
**Figura 6.61:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



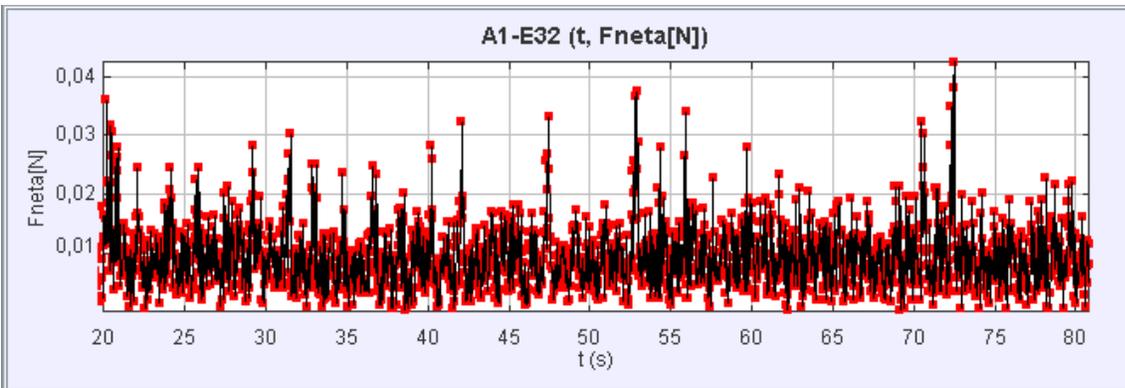
**Figura 6.62:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



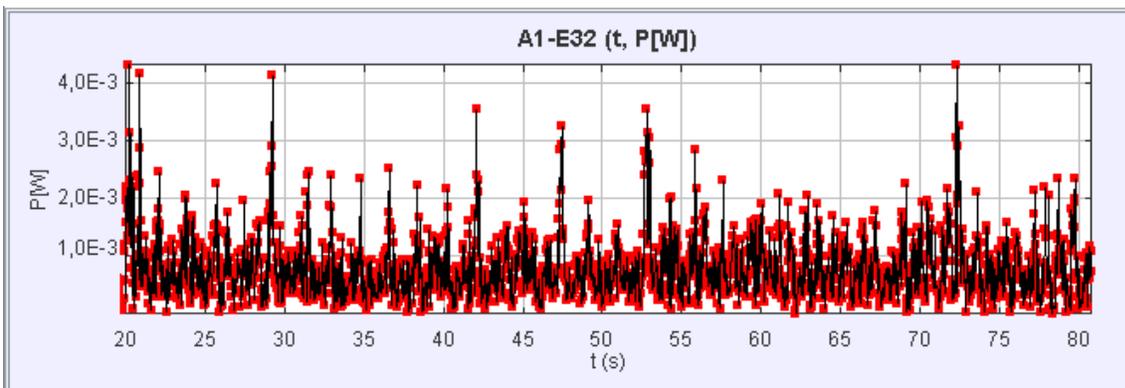
**Figura 6.63:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.64:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.65:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.66:** P04- $A_1$ ,  $E_{32}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

### 6.7.8. Estado de mar $E_{33}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-8,3E-2 2,74E-2	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,236	0,59171	4,97	1,77

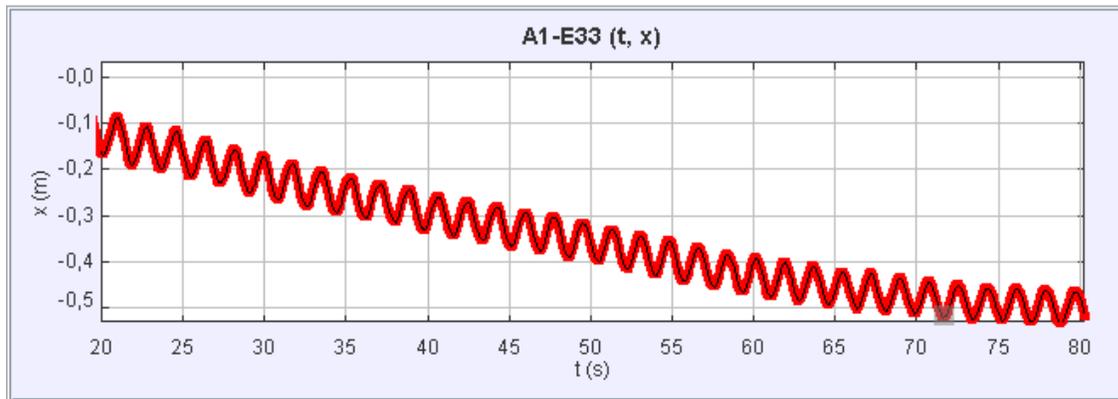


Figura 6.67: P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.

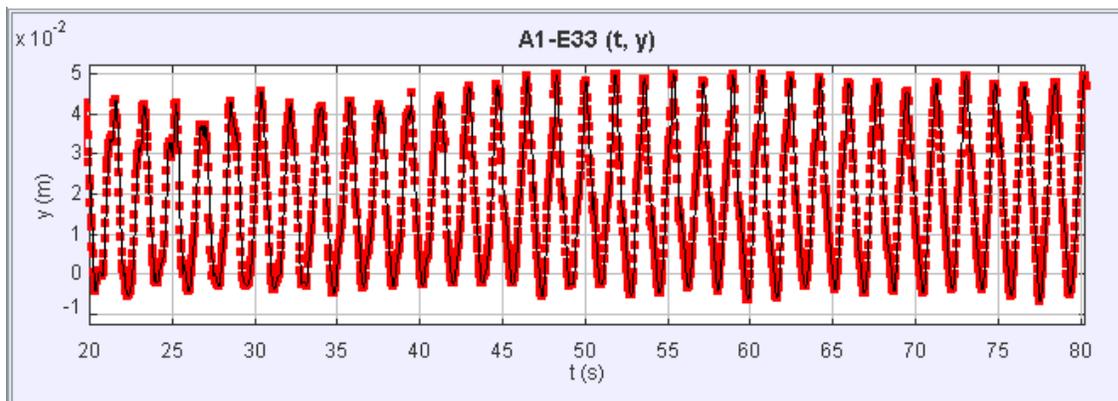


Figura 6.68: P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.

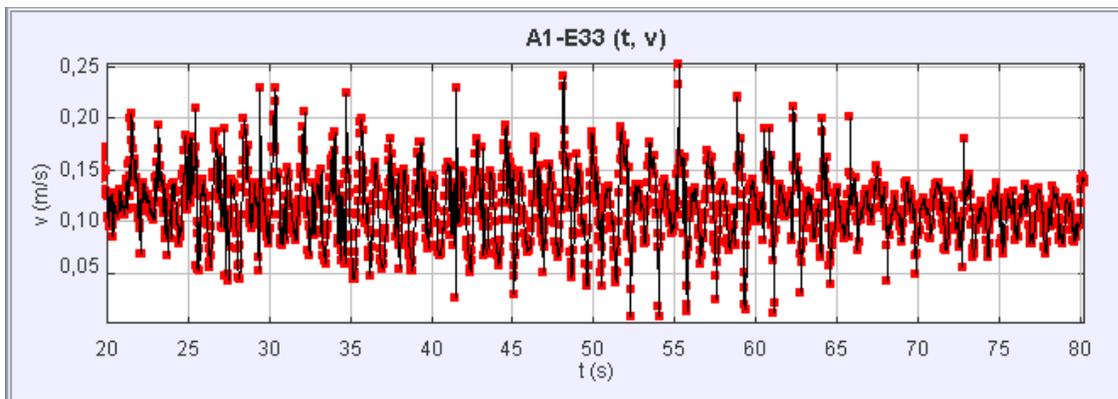
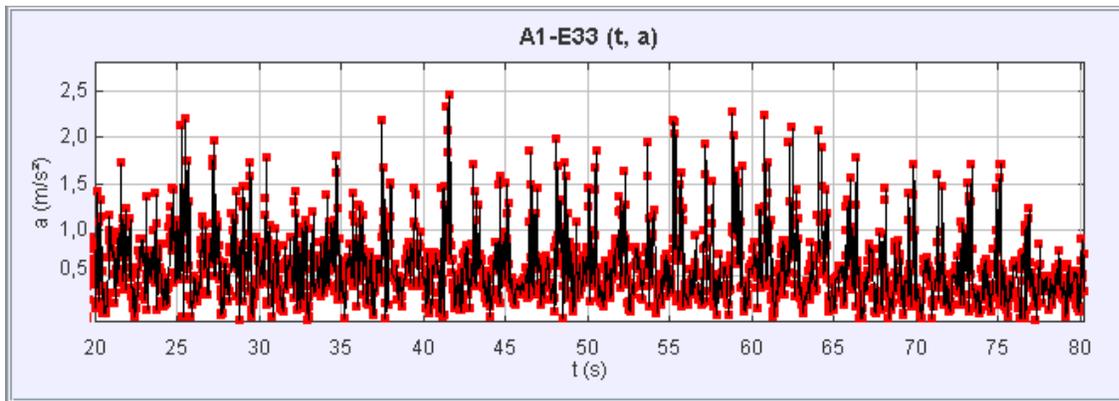
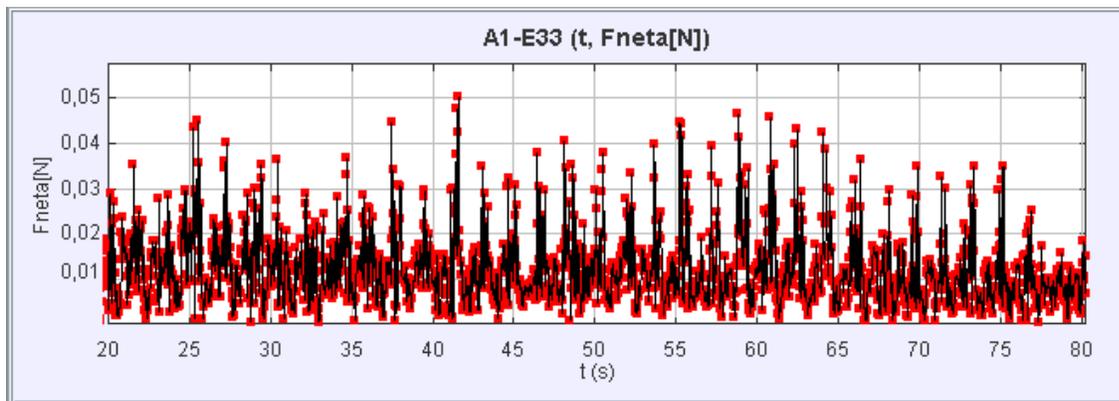


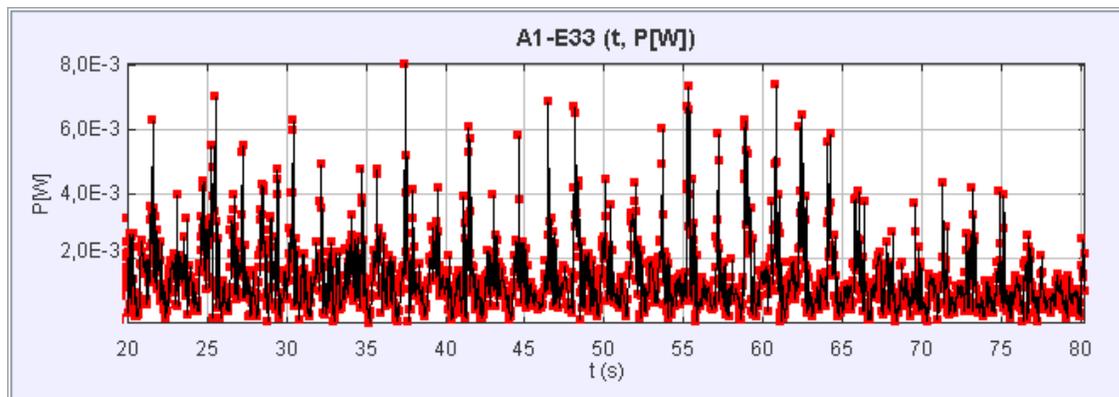
Figura 6.69: P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.70:** P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.



**Figura 6.71:** P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.72:** P04- $A_1$ ,  $E_{33}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

## 6.8. Modelo A2, Estado de Mar $E_{22}$

- **Fecha de prueba:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
1,66E-2, 3,85E-2	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,115	0,67567	3,37	1,49

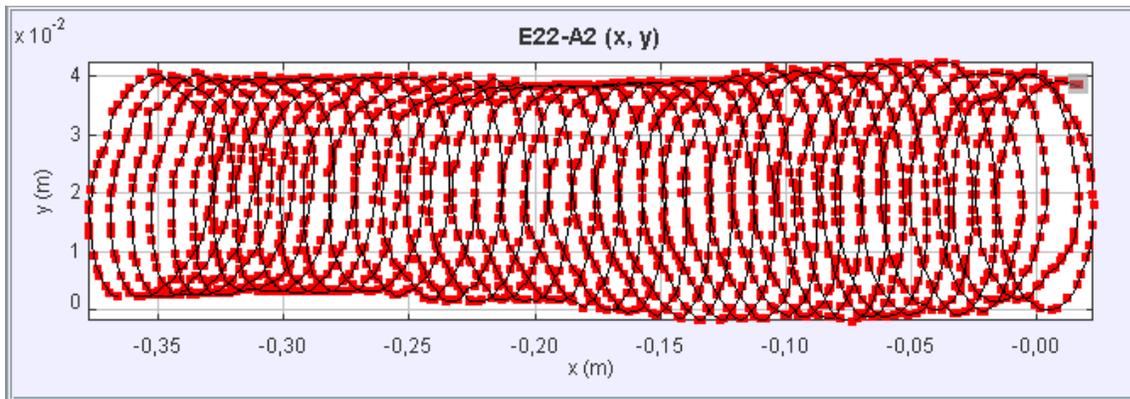


Figura 6.73: P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo.

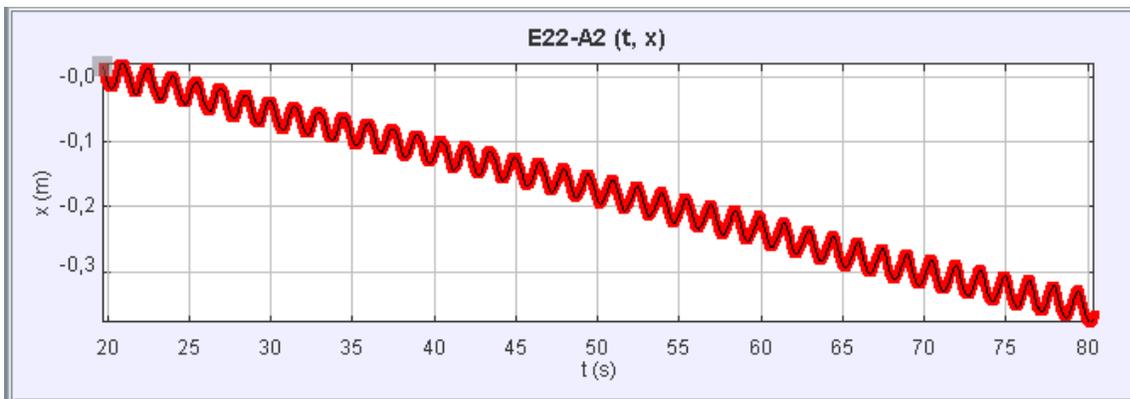


Figura 6.74: P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.

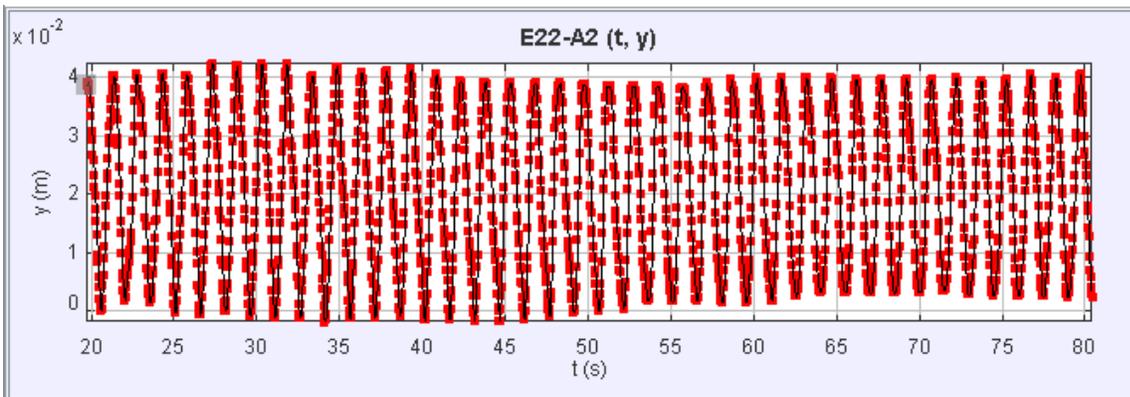
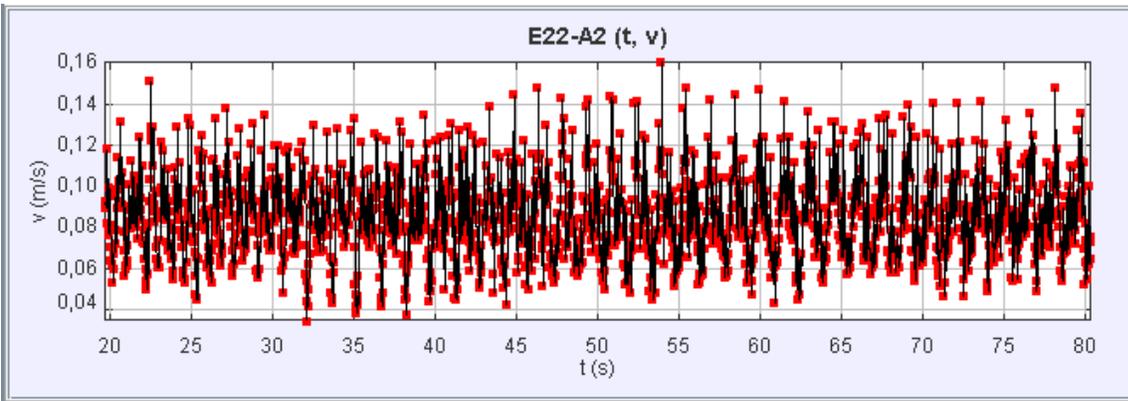
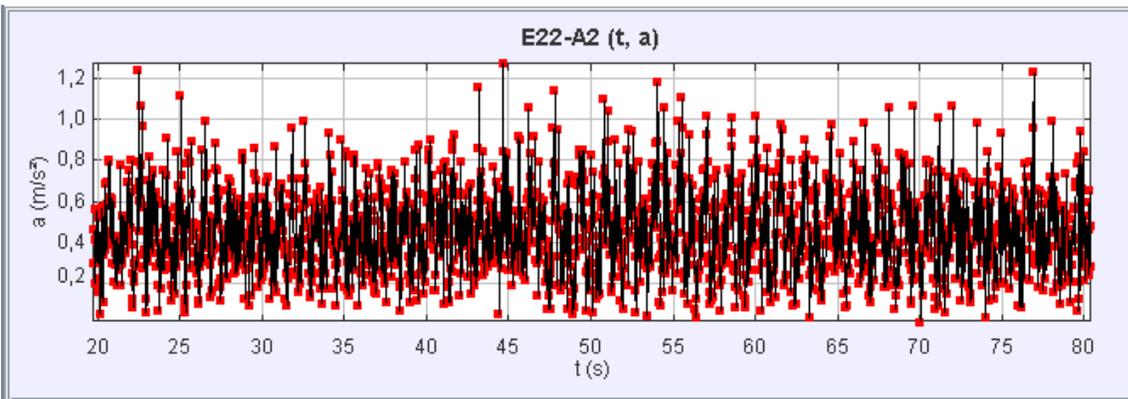


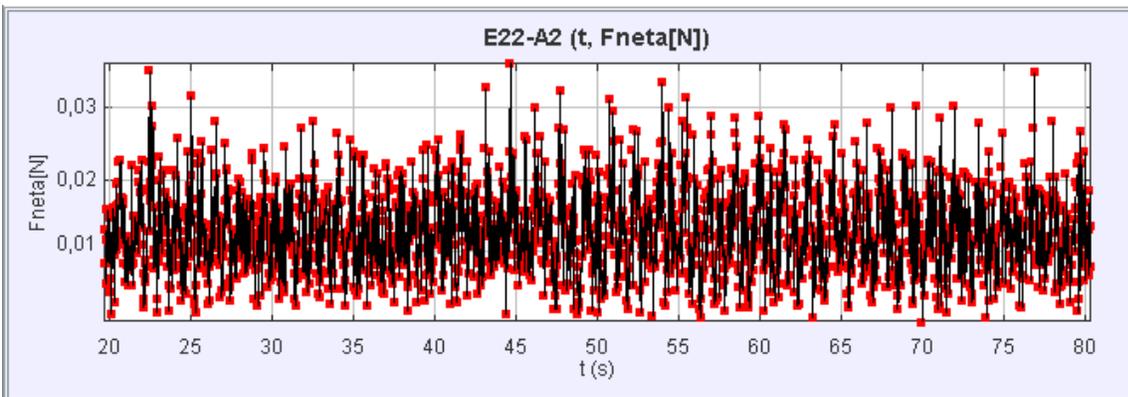
Figura 6.75: P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.



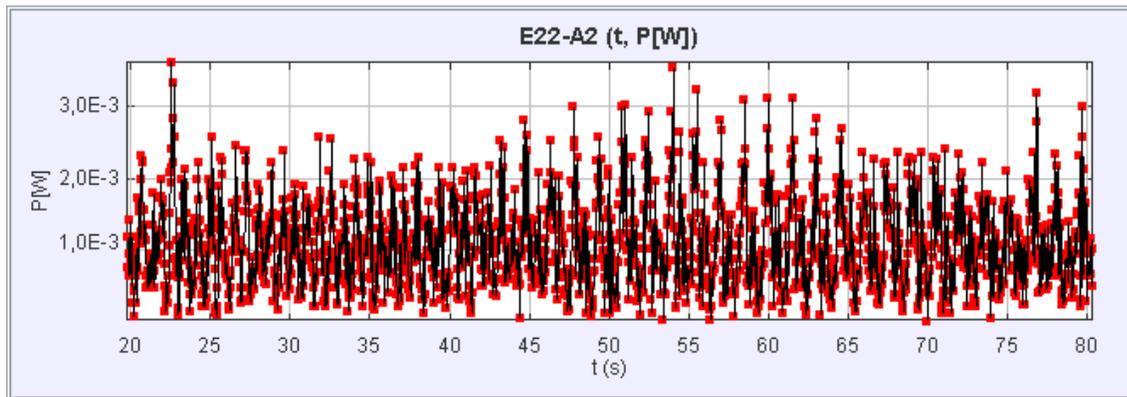
**Figura 6.76:** P04-A<sub>2</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.



**Figura 6.77:** P04-A<sub>1</sub>, E<sub>33</sub>: Magnitud de la aceleración de la boya [m/s<sup>2</sup>] en el tiempo.



**Figura 6.78:** P04-A<sub>2</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la fuerza neta de la boya [N] en el tiempo.



**Figura 6.79:** P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [ $W$ ] en el tiempo.

## 6.9. Modelo A3, Estado de Mar $E_{22}$

- **Fecha:** Miércoles 21 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

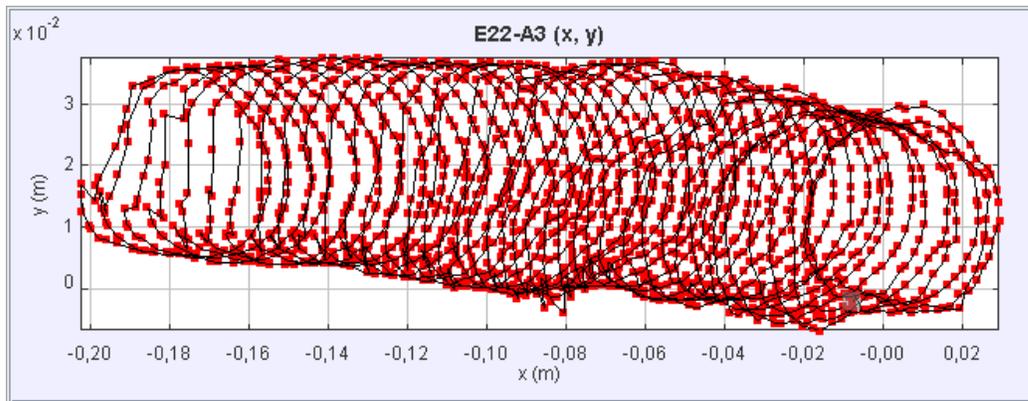
Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

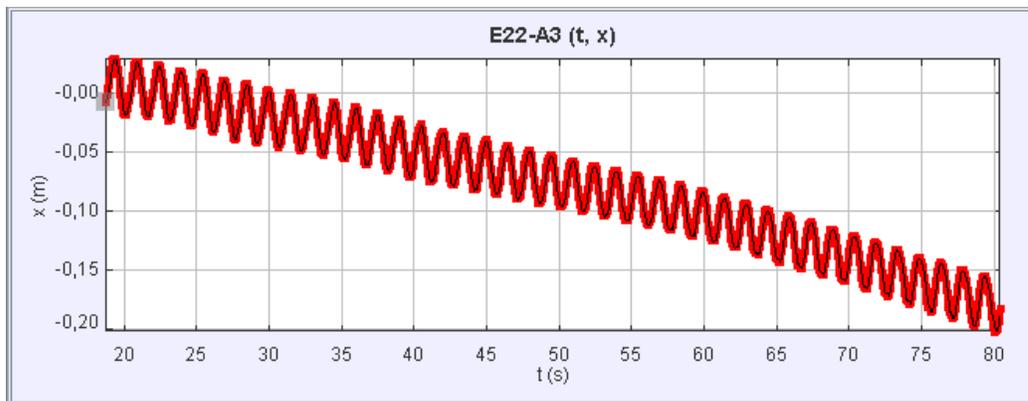
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-7,70E-3, -2,16E-3	-0,7

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

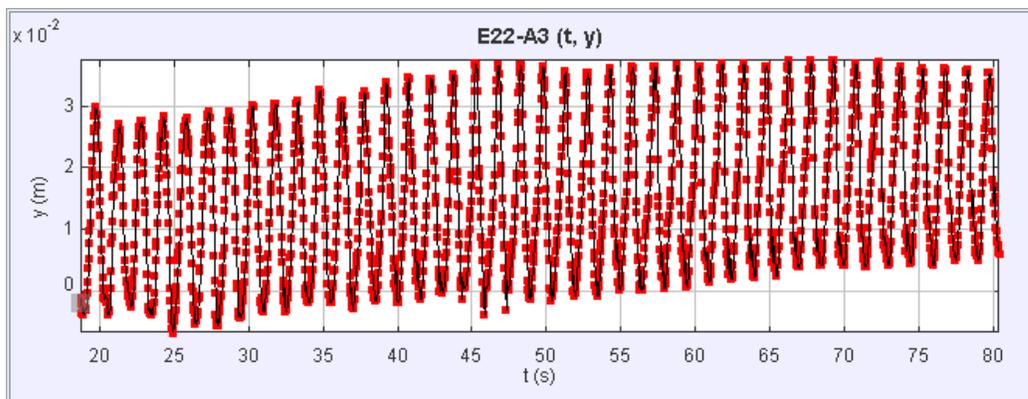
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,115	0,67567	3,39	1,5



**Figura 6.80:** P04- $A_3$ ,  $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo.



**Figura 6.81:** P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



**Figura 6.82:** P04- $A_2$ ,  $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.

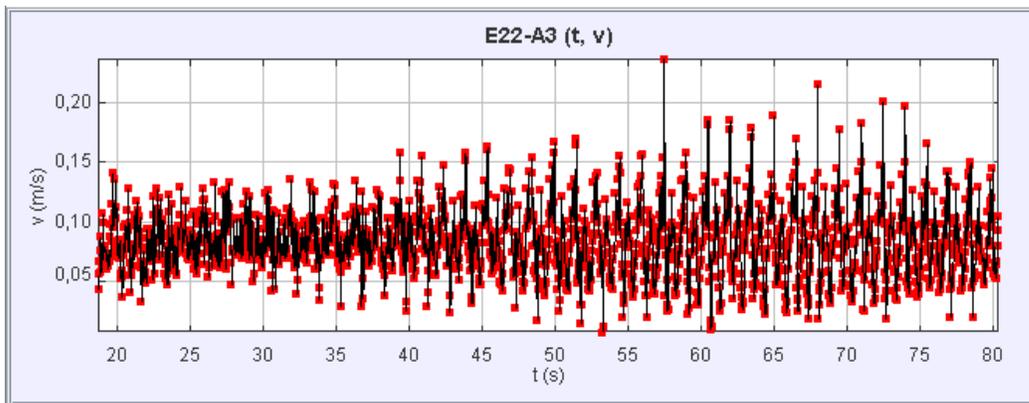


Figura 6.83: P04-A<sub>2</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.

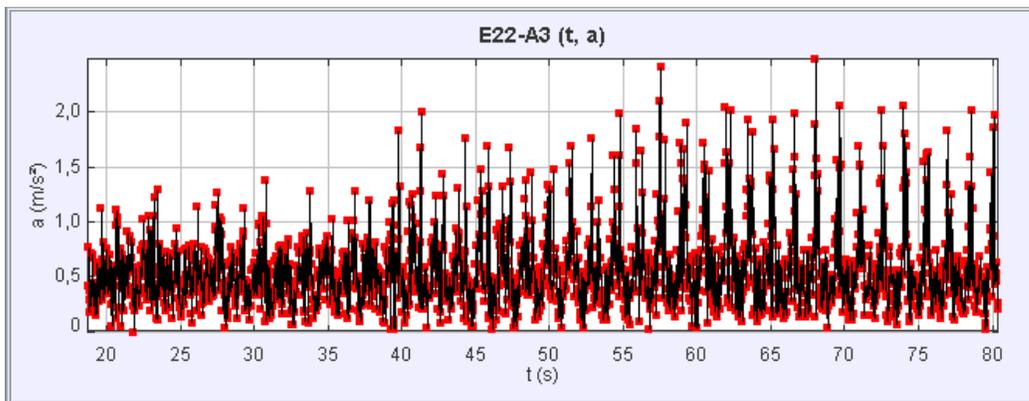


Figura 6.84: P04-A<sub>3</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la aceleración de la boya [m/s<sup>2</sup>] en el tiempo.

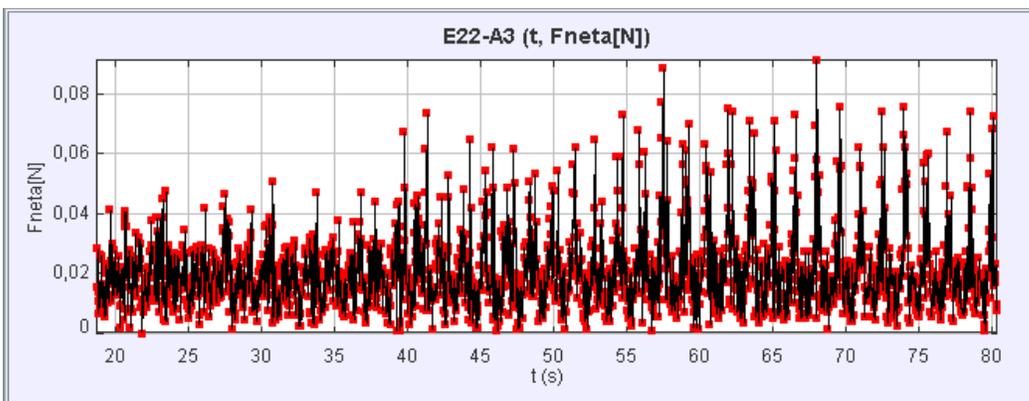
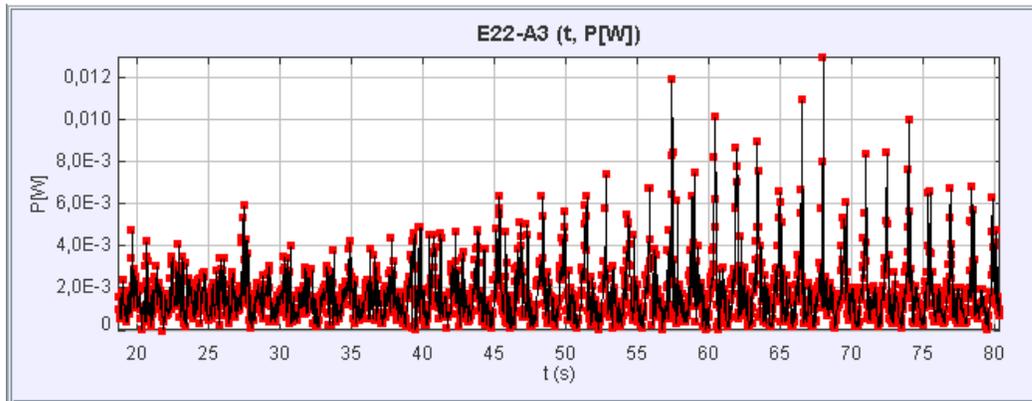


Figura 6.85: P04-A<sub>3</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la fuerza neta de la boya [N] en el tiempo.



**Figura 6.86:** P04- $A_3$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la potencia de la boya [W] en el tiempo.

## 6.10. Modelo B1, Estado de Mar $E_{22}$

- **Fecha:** Miércoles 27 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
18,3	19,0	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-5,97E-2 2,08E-2	1,2

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,115	0,67567	3,26	1,49

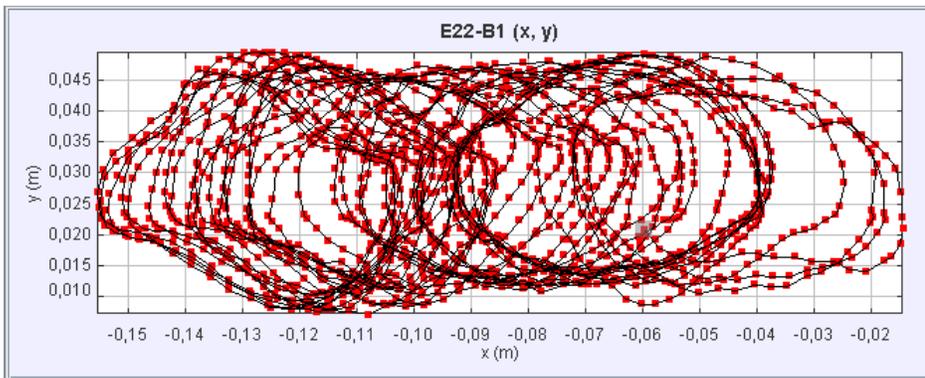


Figura 6.87: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo.

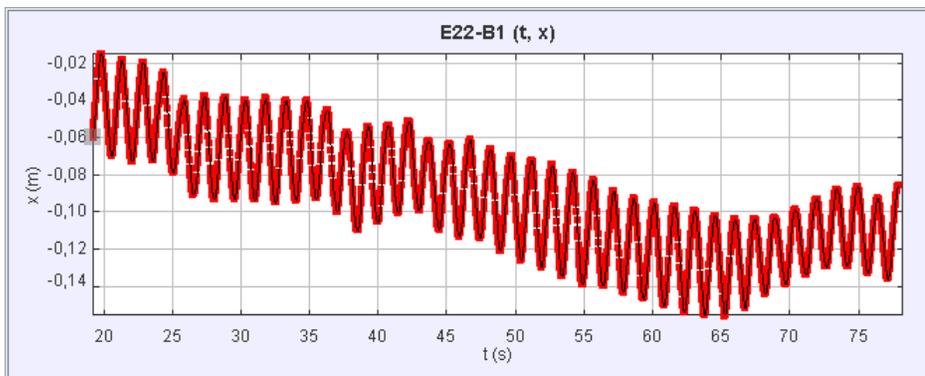


Figura 6.88: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.

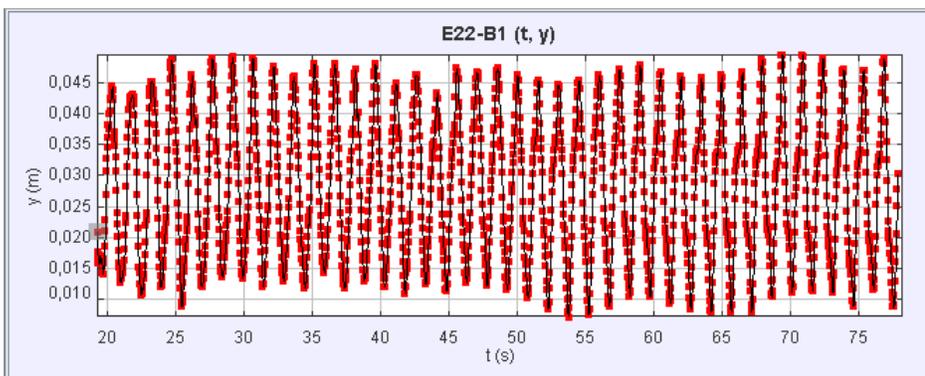


Figura 6.89: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.

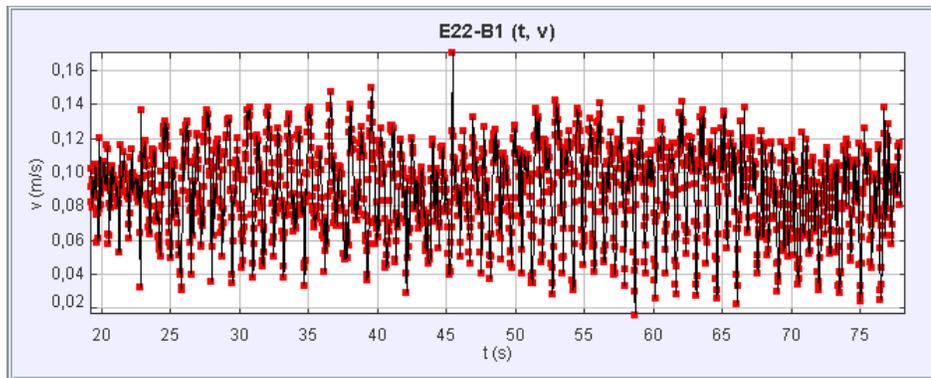


Figura 6.90: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [m/s] en el tiempo.

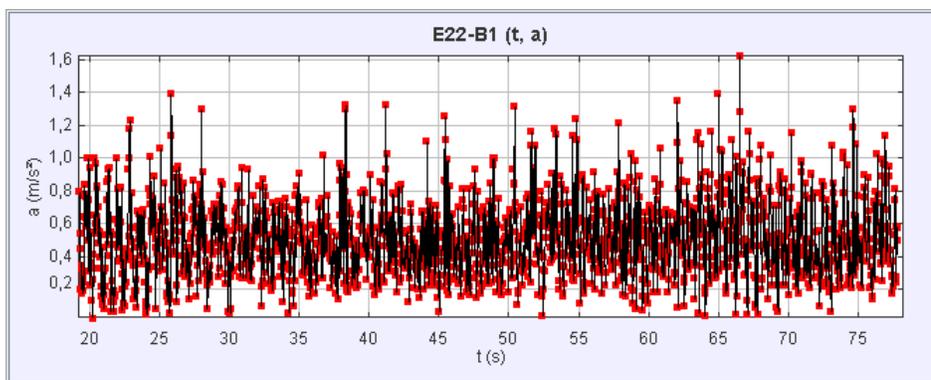


Figura 6.91: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [m/s<sup>2</sup>] en el tiempo.

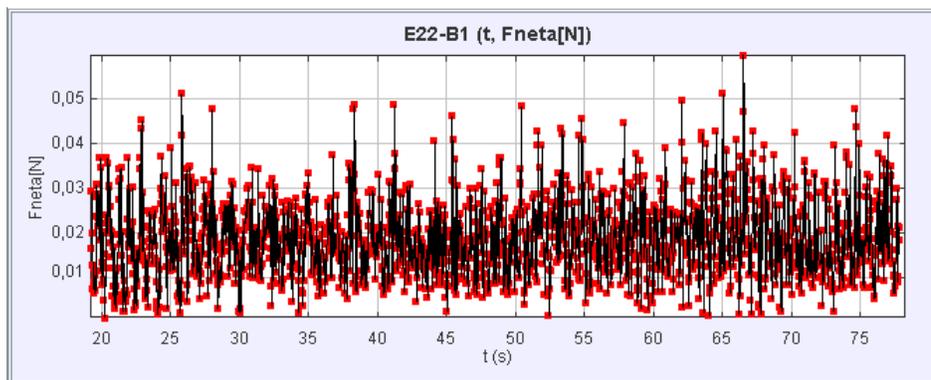
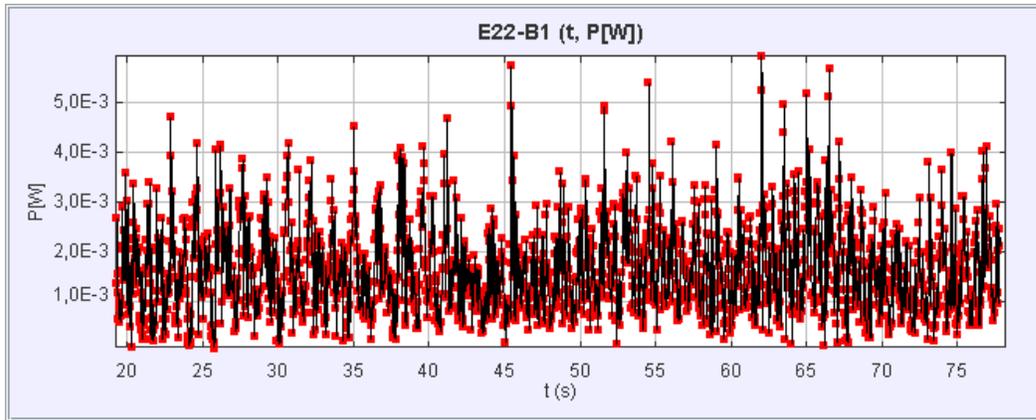


Figura 6.92: P04- $B_1$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [N] en el tiempo.



**Figura 6.93:** P04-B<sub>1</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la potencia de la boya [W] en el tiempo.

### 6.11. Modelo B2, Estado de Mar $E_{22}$

- **Fecha:** Miércoles 27 de abril
- **Condiciones de laboratorio:**

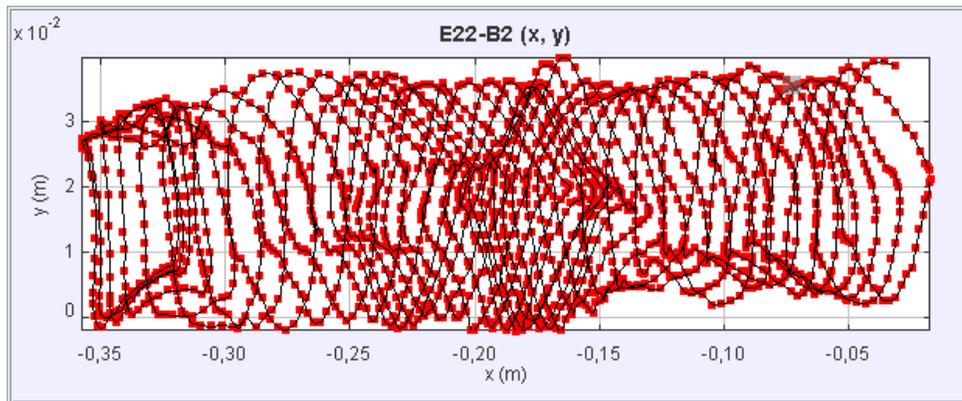
Tempreatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,2	19,4	18 %

- **Parámetros de ajuste inicial:**

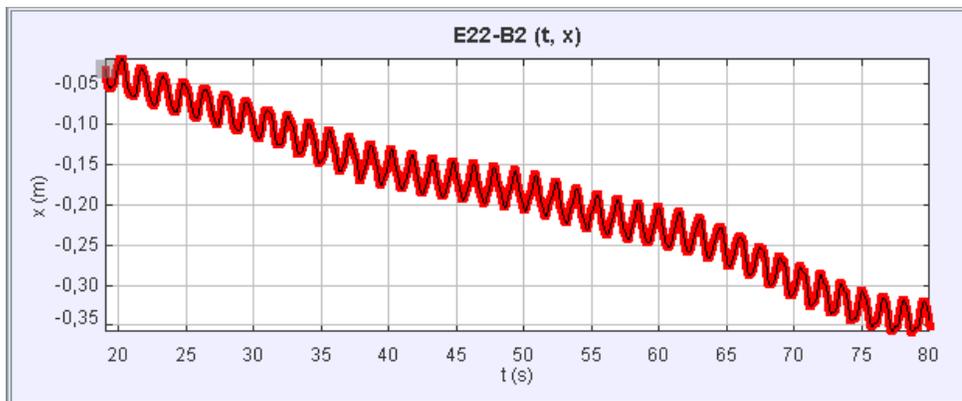
Posición inicial $(x; y)$ [m]	Ángulo desde horizontal
-3,15E-2, 3,86E-2	1,2°

- **Parámetros de oleaje obtenido:**

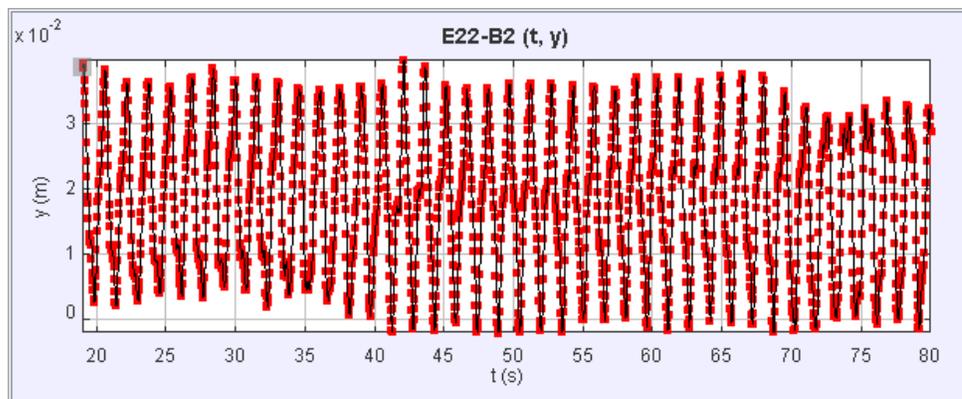
Paleta		Pasos por cero	
Amplitud[V]	Frecuencia [Hz]	Hs[cm]	Ts[s]
0,115	0,67567	3,11	1,51



**Figura 6.94:** P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Trayectoria de la boya en el tiempo.



**Figura 6.95:** P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Posición horizontal de la boya en el tiempo.



**Figura 6.96:** P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Posición vertical de la boya en el tiempo.

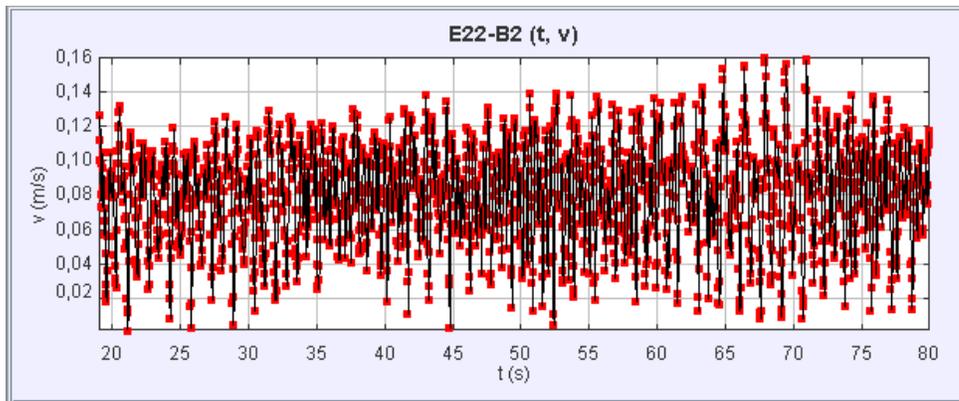


Figura 6.97: P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la velocidad de la boya [ $m/s$ ] en el tiempo.

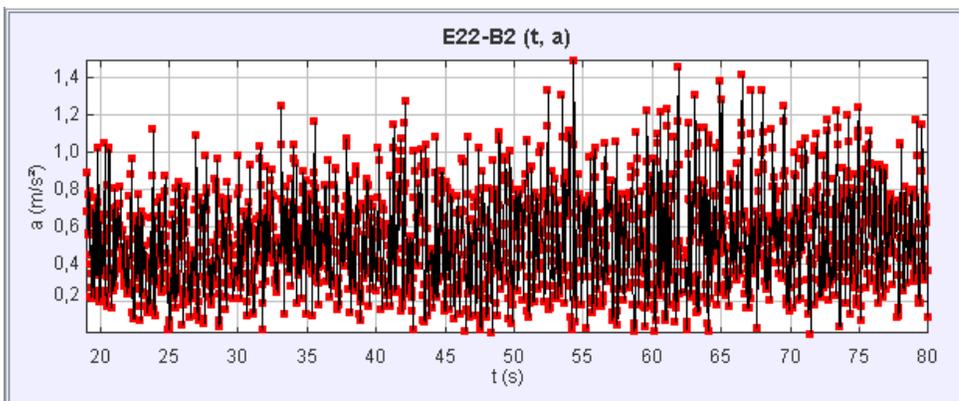


Figura 6.98: P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la aceleración de la boya [ $m/s^2$ ] en el tiempo.

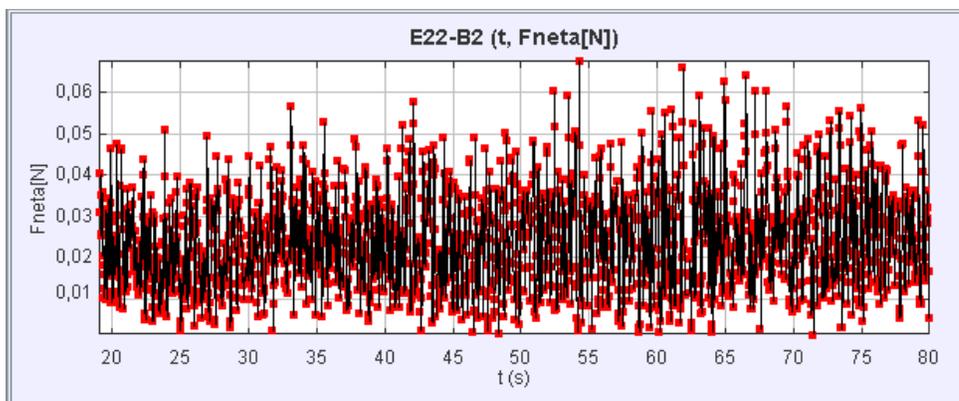
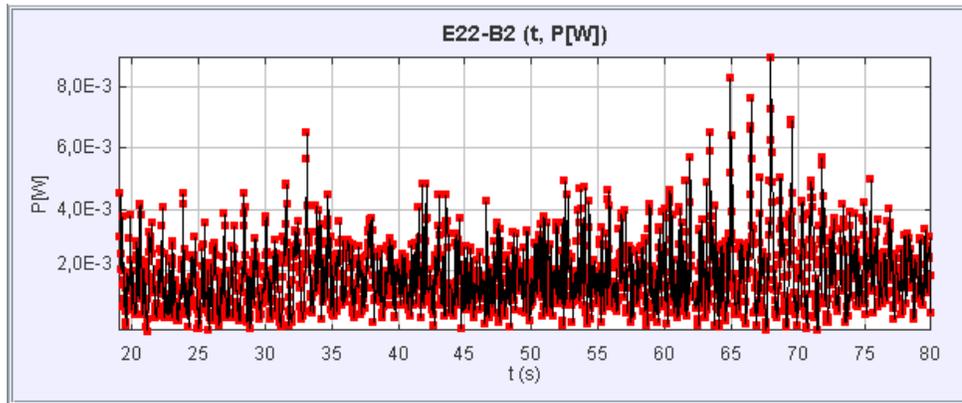


Figura 6.99: P04- $B_2$ ,  $E_{22}$ : Magnitud de la fuerza neta de la boya [ $N$ ] en el tiempo.



**Figura 6.100:** P04-B<sub>2</sub>, E<sub>22</sub>: Magnitud de la potencia de la boya [W] en el tiempo.