



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**“Desarrollo de un sistema de medición del movimiento en
naves menores en un modelo a escala mediante el uso de
cámaras”**

Francisca Quijada Mateluna

Enero 2021

APROBACIÓN

“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO EN NAVES MENORES EN UN MODELO A ESCALA MEDIANTE EL USO DE CÁMARAS”

Francisca Quijada Mateluna

COMISIÓN REVISORA

Nota

Firma

Patricio Winckler Grez

Profesor guía:

Francisco Molteni Pérez

Docente:

Jaime Leyton Espoz

Docente:

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Francisca Quijada Mateluna

Alumno Memorista

Patricio Winckler Grez

Profesor guía

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y en especial a mi hermana quien me apoyo en los momentos más difíciles, con su amor y cariño incondicional.

A mis amigos, quienes me dieron grandes momentos que estarán conmigo durante toda mi vida.

Al equipo de Fablab UV quienes me prestaron sus instalaciones y enseñaron a usar nuevas herramientas que me sirvieron para el desarrollo de las experiencias en esta memoria.

Al señor Leonardo Rodríguez, por todos sus consejos y su ayuda en mi formación como futuro ingeniero.

Finalmente deseo dar gracias a cada uno de los docentes que me ayudaron en este proceso; Francisco Molteni, Rodrigo Sazo, Rene Daza y en especial a mi profesor guía quien sin su ayuda no podría estar finalizando esta etapa de mi vida.

Gracias a todos.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
1 INTRODUCCIÓN.....	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 MARCO TEÓRICO	15
3.1 OLEAJE.....	15
3.2 CLASIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES	18
3.2.1 CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO Y GIRO DE LA NAVE	19
3.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA.....	22
3.3.1 SEMEJANZA GEOMÉTRICA	22
3.3.2 SEMEJANZA CINEMÁTICA	22
3.3.3 SEMEJANZA DINÁMICA.....	23
3.4 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA NAVE	23
3.4.1 CÁLCULO DEL ÁREA MEDIANTE LA REGLA DE TRAPECIO.....	23
3.4.2 CÁLCULO DE VOLUMEN DE LA NAVE	24
3.4.3 DISEÑO DE LA NAVE MEDIANTE EL SOFTWARE FUSION 360	25
3.4.4 PROCESAMIENTO DE VIDEOS MEDIANTE SOFTWARE TRACKER	25
4 METODOLOGÍA.....	26
4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA NAVE	26
4.1.1 DISEÑO DE LA NAVE EN SOFTWARE FUSION 360.....	26
4.1.2 IMPRESIÓN Y ENSAMBLAJE.....	27
4.2 INSTRUMENTOS DEL LABORATORIO.....	30
4.2.1 PALETA GENERADORA DE OLEAJE	31
4.2.2 SONDAS RESISTIVAS	31
4.2.3 DISIPADOR.....	32
4.3 DISTRIBUCIÓN Y VISTAS DE LAS CÁMARAS	33
4.3.1 SEGUIMIENTO DE LOS PUNTOS.....	37

4.4	CASOS A ANALIZAR	40
5	RESULTADOS	41
5.1	MODELACIÓN DE LA NAVE A ESCALA	41
5.1.1	MOVIMIENTOS DE LA NAVE	43
5.1.2	CORRELACIÓN LINEAL	52
6	CONCLUSIONES	56
7	REFERENCIAS	58
8	ANEXOS.....	60
8.1	PLANOS DE LA NAVE	60
8.2	TABLAS DE LAS LÍNEAS DE AGUA DE LA NAVE	63
8.3	DATOS DEL LABORATORIO.....	66
8.4	DIMENSIONES DEL CANAL DE OLAS.....	106
8.5	OTROS ELEMENTOS UTILIZADOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1:Periodo-energía de las ondas	15
Figura 3-2: Elementos de una ola progresiva.....	16
Figura 3-3: Validez de las teorías de oleaje.	17
Figura 3-4: Sistemas del buque	19
Figura 3-5: Sistema de referencia.....	20
Figura 3-6: Sistema de referencia en un tiempo t(s).....	20
Figura 3-7: Distancia mínima para el punto P.	21
Figura 3-8: Regla del trapecio.....	23
Figura 3-9: Procesamiento con el Software Tracker.....	25
Figura 4-1: Unificación de los planos (izquierda) e inclusión de la superficie (derecha)...	26
Figura 4-2: Nave menor.....	27
Figura 4-3: Filamento Esun Pla + y cloroformo técnico.	27
Figura 4-4: Piezas de la nave menor.	28
Figura 4-5: Ensamblaje de la nave menor.....	29
Figura 4-6: Primera prueba en laboratorio	29
Figura 4-7: Laboratorio de modelación física de la Universidad de Valparaíso..	30
Figura 4-8: Paleta del oleaje.	31
Figura 4-9: Sondas resistivas.....	32
Figura 4-10: Playa disipadora (izquierda) y malla disipadora (derecha).	32
Figura 4-11: Distribución de las cámaras respecto del eje de coordenadas.....	33
Figura 4-12: Vista frontal de la posición de las cámaras en el canal de olas.....	34
Figura 4-13: Vista en planta de la disposición de las cámaras en el canal de olas.....	34
Figura 4-14: Vista lateral (Cámara XZ).	35
Figura 4-15: Vista frontal (cámara YZ).	35
Figura 4-16: Vista planta (Cámara XY).	35
Figura 4-17: Elementos sobre cubierta.	36
Figura 4-18: Longitud de la cadena.....	36
Figura 4-19: Sistema de amarre de la embarcación.....	37
Figura 4-20: Desplazamiento y rotación de la vista en planta XY, donde se obtiene los movimientos en el eje Y (Sway) y en el eje X (Surge) y el movimiento de rotación en el eje Z (Yaw).....	38
Figura 4-21: Desplazamiento y rotación en la vista frontal YZ, donde se obtiene los movimientos en el eje Z (Heave) y en el eje Y (Sway) y el movimiento de rotación en el eje X (Roll).....	39
Figura 4-22: Desplazamiento y rotación en la vista lateral XZ, donde se obtiene los movimientos en el eje Z (Heave) y en el eje X (Surge) y el movimiento de rotación en el eje Y (Pitch).....	39
Figura 5-1: Plano de las semi-mangas.....	42
Figura 5-2: Vista de la cámara en planta (YX) en el ensayo OH2T2R2.....	44
Figura 5-3: Vista de la cámara frontal (ZY) en el ensayo OH2T2R2.....	44
Figura 5-4: Vista de la cámara Lateral (ZX) en el ensayo OH2T2R2.....	45

Figura 5-5: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R2.....	45
Figura 5-6: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R2).	46
Figura 5-7: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R2.	47
Figura 5-8: Desplazamiento lateral del punto P captado por la vista planta XY (Ensayo OH2T2R2).	47
Figura 5-9: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH2T2R2.	48
Figura 5-10: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH2T2R2).	48
Figura 5-11: Desnivelación obtenida del ensayo OH2T2R2.	49
Figura 5-12: Desplazamiento y ángulos de giro de la nave (Ensayo OH2T2R2).	50
Figura 5-13: Segmento del desplazamiento y ángulos de giro de la nave (Ensayo OH2T2R2).	51
Figura 5-14: Matriz de correlación vista lateral (Ensayo OH2T2R2).	52
Figura 5-15: Gráficos de correlación para la vista lateral (Ensayo OH2T2R2).	53
Figura 5-16: Matriz de correlación vista frontal (Ensayo OH2T2R2).	53
Figura 5-17: Gráficos de correlación vista frontal (Ensayo OH2T2R2)	54
Figura 8-1: Planos generales de la nave menor.....	60
Figura 8-2: Planos longitudinales, horizontales y transversales de la nave menor	61
Figura 8-3: Planos cuadernas de la nave menor.....	62
Figura 8-4: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T1R1.	66
Figura 8-5: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R1).	66
Figura 8-6: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R1).	67
Figura 8-7: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R1).	67
Figura 8-8: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R1).	68
Figura 8-9: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R1)	68
Figura 8-10: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T1R2.	69
Figura 8-11: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R2).	69
Figura 8-12: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R2).	70
Figura 8-13: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R2).	70
Figura 8-14: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R2)	71
Figura 8-15: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R2)	71
Figura 8-16: Vista de la cámara lateral ZX para el Ensayo OH1T1R3.	72
Figura 8-17: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R3).	72
Figura 8-18: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R3).	73
Figura 8-19: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R3)	73
Figura 8-20: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R3)	74
Figura 8-21: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R3)	74
Figura 8-22: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH1T2R1	75

Figura 8-23: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R1)	75
Figura 8-24: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R1).....	76
Figura 8-25: Gráficos de correlación de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R1).....	76
Figura 8-26: Vista de la cámara frontal ZY para el Ensayo OH1T2R1	77
Figura 8-27: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH1T2R1)	77
Figura 8-28: Correlación la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R1).....	78
Figura 8-29: Gráficos de correlación la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R1)	78
Figura 8-30: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH1T2R1	79
Figura 8-31: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta XY (Ensayo OH1T2R1)	79
Figura 8-32: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R1)	80
Figura 8-33: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R1)	80
Figura 8-34: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T2R2	81
Figura 8-35: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R2)	81
Figura 8-36: Correlación Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R2)	82
Figura 8-37: Gráficos de correlación Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R2)..	82
Figura 8-38: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH1T2R2.....	83
Figura 8-39: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH1T2R2)	83
Figura 8-40: Correlación Vista de la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R2)	84
Figura 8-41: Gráficos de correlación Vista de la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R2)..	84
Figura 8-42: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH1T2R2	85
Figura 8-43: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta YX (Ensayo OH1TR2)	85
Figura 8-44: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R2)	86
Figura 8-45: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R2)	86
Figura 8-46: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T2R3	87
Figura 8-47: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R3)	87
Figura 8-48: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R3).....	88
Figura 8-49: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R3)	88
Figura 8-50: Vista de la cámara en planta XY para el Ensayo OH1T2R3.....	89
Figura 8-51: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta YX (Ensayo OH1T2R3)	89
Figura 8-52: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R3)	90
Figura 8-53: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R3)	90
Figura 8-54: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T1R1	91
Figura 8-55: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T1R1)	91

Figura 8-56: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T1R1)	92
Figura 8-57: Datos de los resistores (Ensayo OH2T1R1)	92
Figura 8-58: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T1R2	93
Figura 8-59: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T1R2)	93
Figura 8-60: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T1R2)	94
Figura 8-61: Datos de los resistores (Ensayo OH2T1R2)	94
Figura 8-62: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R1	95
Figura 8-63: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R1)	95
Figura 8-64: Correlación cámara frontal ZY (Ensayo OH2T2R1)	96
Figura 8-65: Gráfico de correlación cámara frontal ZY (Ensayo OH2T2R1)	96
Figura 8-66: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R1	97
Figura 8-67: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T2R1)	97
Figura 8-68: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T2R1)	98
Figura 8-69: Datos de los resistores (Ensayo OH2T2R1)	98
Figura 8-70: Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R1)	99
Figura 8-71: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista ZX (Ensayo OH2T2R1)	99
Figura 8-72: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH2T2R3	100
Figura 8-73: Desplazamiento promedio vista de la cámara en lateral ZX para el Ensayo OH2T2R3.	100
Figura 8-74: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R3)	101
Figura 8-75: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R3)	101
Figura 8-76: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R3	102
Figura 8-77: Desplazamiento promedio vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R3.	102
Figura 8-78: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R3	103
Figura 8-79: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R3)	103
Figura 8-80: Coeficientes de correlación cámara frontal YZ (Ensayo OH2T2R3)	104
Figura 8-81: Gráficos de correlación cámara frontal YZ (Ensayo OH2T2R3)	104
Figura 8-82: Desplazamientos y ángulos (Ensayo OH2T2R3)	105
Figura 8-83: Datos de los resistores (Ensayo OH2T2R3)	105
Figura 8-84: Dimensiones de la vista frontal y en planta del canal de olas	106
Figura 8-85: Letrero	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Códigos y valores en los ensayos de oleaje.....	40
Tabla 4-2: Características del oleaje.....	40
Tabla 5-1: Dimensiones de las secciones de la nave menor.....	41
Tabla 5-2: Semi manga de la línea de la crujía (cm)	42
Tabla 5-3: Cálculo del volumen.....	43
Tabla 8-1: Cálculo línea de agua N°1	63
Tabla 8-2: Cálculo línea de agua N°2	63
Tabla 8-3: Cálculo línea de agua N°3	64
Tabla 8-4: Cálculo línea de agua N°4	64
Tabla 8-5: Cálculo línea de agua N°5	65
Tabla 8-6: Cálculo línea de agua	65

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo captar el movimiento de una nave menor frente al oleaje generado en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso. Para lograr este cometido, se propuso el desarrollo de un modelo a escala de una nave menor.

El modelo a escala se diseñó basándose en los planos de una nave menor obtenidos de Bibliocad. Posteriormente, se empleó el software Fusión 360 para realizar la confección del plano en 3D, con el cual se imprimió en las impresoras disponibles en FabLab de la Universidad de Valparaíso. Para efectuar los ensayos, se utilizaron las herramientas que dispone el laboratorio de modelación física o LabOcéano (cámaras, trípodes, paleta de oleaje, entre otros).

El registro filmográfico se realizó mediante la implementación de cámaras Gopro, las que realizaron una medición simultánea del movimiento a una distancia que asegurara una medición clara y completa de toda la nave. Además, se tuvieron otras consideraciones en el momento de registrar los datos en video, como una iluminación constante.

Las mediciones tuvieron una duración de al menos 5 minutos. Los datos obtenidos fueron procesados y analizados empleando el Software Tracker que permite a los usuarios analizar vídeos de experimentos físicos, extrayendo los datos de la imagen de manera sencilla. Además se realizó una correlación lineal en los movimientos de la nave obtenidos del procesamiento de los videos y la desnivelación instantánea del agua obtenida de los resistores instalados en el canal. Como conclusión general se observó una alta correlación en los casos entre ambas variables de menor altura y mayor periodo pero, no así en la correlación en casos con una altura mayor.

Por otra parte, las herramientas empleadas en el diseño y modelación en 3D (Fusion 360 y AutoCAD), demostraron ser útiles para el desarrollo de modelos físicos de diferentes fenómenos. Se recomienda su uso por su bajo costo y accesibilidad. A pesar de ser propensas a tener fallas menores en la producción y un alto tiempo de impresión de cada pieza.

1 INTRODUCCIÓN

Los modelos físicos, permiten observar y analizar de manera directa el comportamiento de un sistema y generar una gran variedad de soluciones, además de constituir el medio generalizado para el análisis de movimientos un embarcaciones en un entorno portuario, aportando una fiabilidad mucho mayor a la que anteriormente se tenía empleando reglas empíricas de diseño. (Serret, 2003). También es importante saber que los modelos físicos no corresponden a una maqueta, pues el primero considera leyes de semejanza geométrica y dinámica, en tanto que la segunda solo considera la escala geométrica.

Los modelos físicos implican plazos y costes mayores que los estudios numéricos, pero que son irrelevantes en comparación al desarrollo de la futura obra. Su desarrollo es importante ya que estos pueden dar respuestas a múltiples problemas de la ingeniería portuaria que con reglas empíricas o modelos numéricos no se podría responder. Es por esto, que en el presente proyecto se desarrolló el estudio en modelo físico del movimiento de una nave menor.

En este caso se estudió el comportamiento de una nave menor, ante la acción del oleaje con diferentes periodos y alturas. Para lograr este objetivo se realizaron casos en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso que cuenta con 15 metros de largo, 1 metro de ancho y 1.2 metros de altura (Figura 8-84) Este instrumento se encuentra en el laboratorio de modelación física, denominado LabOcéano (Facultad de Ingeniería, 2018).

Los estudios realizados en el LabOcéano se realizaron con el propósito de generar un acercamiento a nuevas herramientas que permitan analizar y comprender los movimientos de traslación y rotación para los seis grados de libertad de la nave en un entorno controlado. Los movimientos de la nave se encuentran referidos a un sistema de coordenadas cartesianas (Clark, 2005). Para realizar el seguimiento de los movimientos, el presente proyecto se basó en algunos aspectos del sistema de medición SPOV emplea el software gratuito Tracker.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un sistema de seguimiento de la dinámica para naves menores, mediante el uso de cámaras en el canal de olas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Corroborar que el sistema es aplicable en un ambiente controlado, a través de una comparación de los resultados obtenidos de las cámaras y los sensores empleados en el laboratorio.
- Caracterizar y medir de forma remota la respuesta de las embarcaciones al oleaje en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 OLAJE

Lo expuesto en esta sección, se basa en los textos Análisis y descripción estadístico del oleaje y en Introduction to Coastal Engineering and Management (Silva, 2005. Y Kamphuis, 2000).

El oleaje es un fenómeno hidrodinámico que se encuentra determinado por la acción de las fuerzas naturales en cualquier superficie libre de agua, siendo la más obvia la acción del viento sobre la superficie del océano. El tipo de onda que será inducida dependerá de las fuerzas generadoras, periodo y cantidad de energía que normalmente portan. (Silva, 2005).

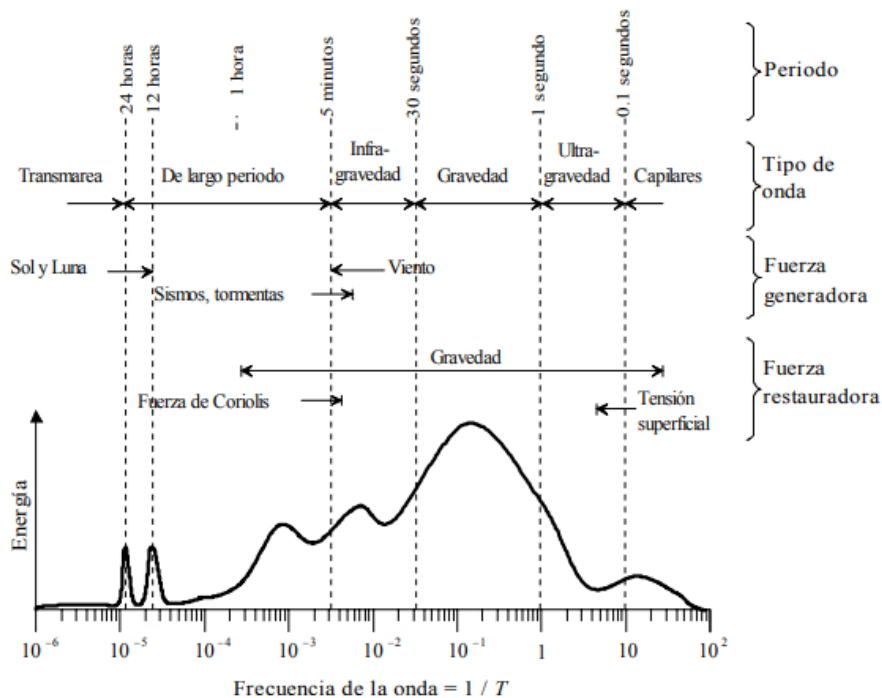


Figura 3-1:Periodo-energía de las ondas. (Fuente: Silva, 2005)

El oleaje concentra un porcentaje importante de la energía de un estado de mar (Figura 3-1) y constituye una de las principales solicitaciones estructurales, de operación y de morfología costera. Dentro de las metodologías de análisis de oleaje se destaca las que asumen el oleaje como regular e irregular, siendo la segunda de estas la más adecuada para casos reales.

El oleaje regular permite comprender la mecánica del oleaje mediante el examen de ondas de altura y periodo constante, el cual es una aproximación a la realidad e intenta describir este fenómeno bajo ciertas condiciones. Para describir el oleaje regular se debe describir antes las variables más comunes que componen un tren de ondas regulares (Figura 3-2).

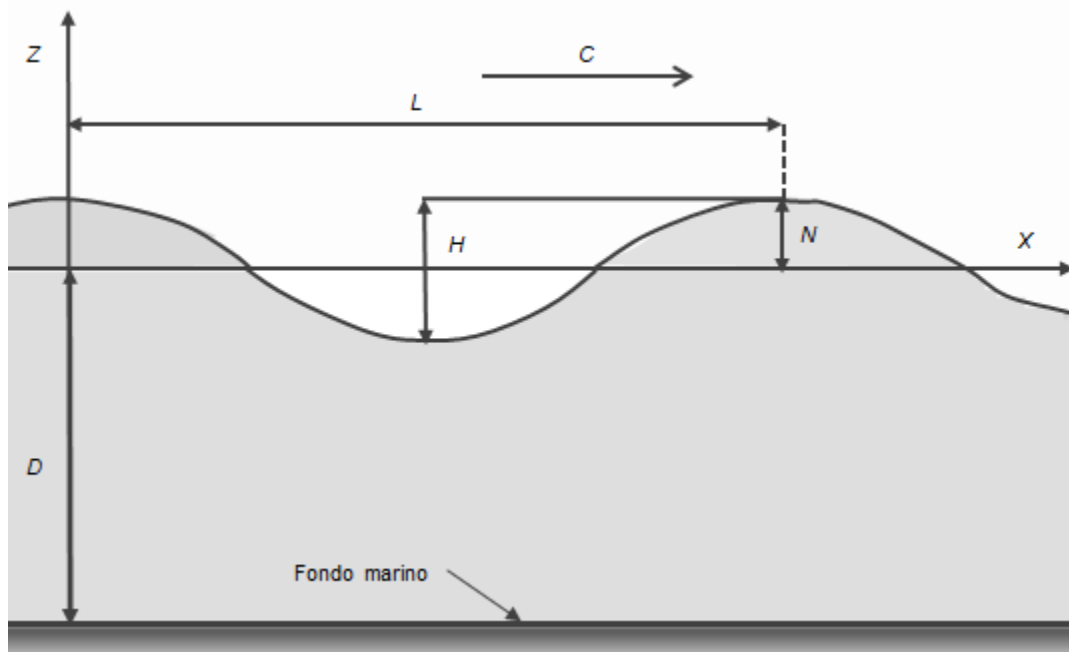


Figura 3-2: Elementos de una ola progresiva. (Fuente: Elaboración propia.)

Dónde:

Altura de la ola (H): es la distancia entre la cresta y el valle de la oscilación.

Período temporal (T): es el tiempo que transcurre para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto.

Longitud de onda (L): es la distancia horizontal entre dos crestas adyacentes.

Profundidad (D): es la profundidad del agua sin considerar perturbaciones.

Desnivelación (N): es el desplazamiento de la superficie libre respecto del nivel de referencia.

Celeridad (C): es la velocidad con la cual una cresta se mueve horizontalmente a través de la superficie libre del mar ($C=L/T$).

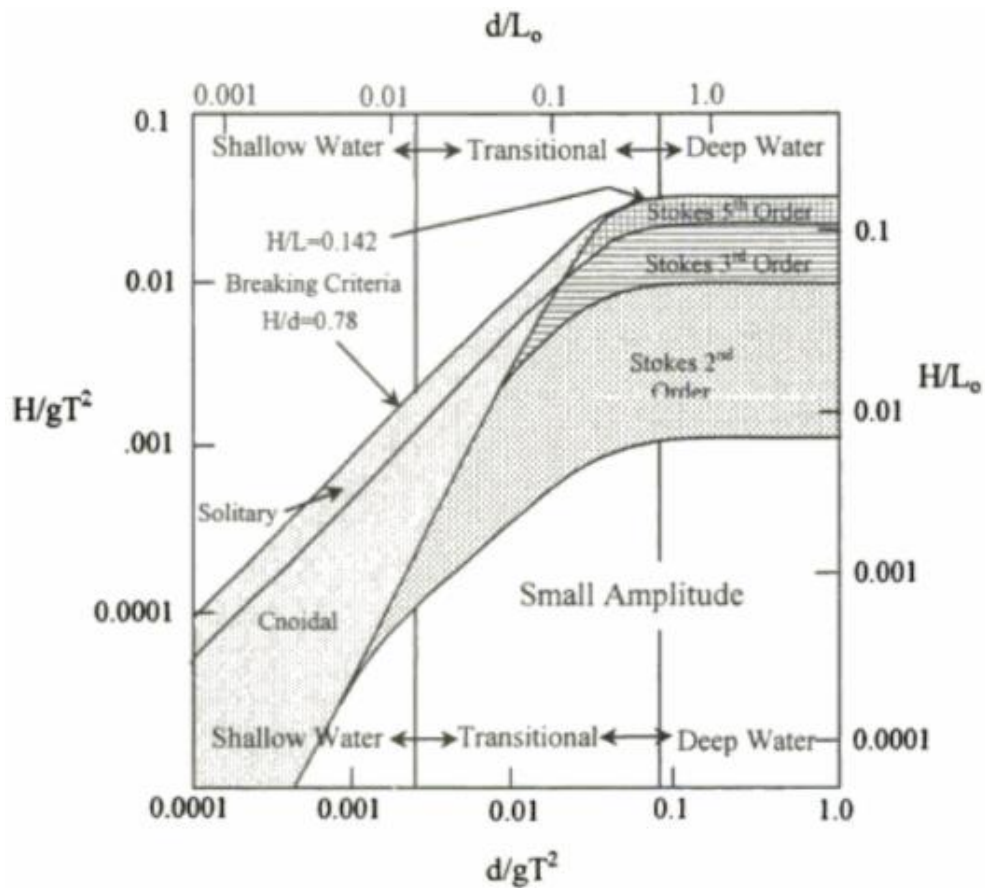


Figura 3-3: Validez de las teorías de oleaje. (Fuente: Kamphuis, 2000)

Se puede analizar y relacionar las variables anteriormente mencionadas empleando la teoría de oleaje, la cual resuelve la mecánica de las partículas. Siguiendo lo expuesto en la Figura 3-3 (Kamphuis, 2000), dependerá de los valores de estas variables la aplicación de una teoría en particular. De todas las teorías presentadas en la Figura 3-3, la más utilizada para la modelación del oleaje es la teoría lineal, que se basa en el principio de conservación de la masa y los supuestos del agua como un fluido irrotacional e incompresible, según lo expuesto por George Biddell Airy (1845). El resultado de estos supuestos indica que el fenómeno queda gobernado por la ecuación de Laplace, solucionada asumiendo un fondo horizontal, presión constante en una superficie libre del cuerpo de agua y la inexistencia del viento, que es el principal generador de olas.

3.2 CLASIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES

Según lo expuesto por Clark, (2005) el movimiento de una embarcación se puede caracterizar mediante seis grados de libertad como en un sólido rígido, los cuales son: tres de traslación y tres de rotación (Figura 3-4). Estos están referidos a un sistema de ejes de coordenadas cartesianas cuyo origen se tiende a situar en aguas tranquilas, haciendo coincidir el eje "x" con el plano horizontal, el eje "y" con el plano transversal y el eje "z" con el plano vertical. Los movimientos asociados a una embarcación atracada son:

- Largada (Surge): Traslación según el eje "x".
- Abatimiento (Sway): Traslación sobre el eje "y".
- Arfada (Heave): Traslación según el eje vertical "z".

- Balance (Roll): Rotación en el eje longitudinal "x".
- Cabeceo (Pitch): Rotación del eje horizontal en el eje "y".
- Guiñada (Yaw): Rotación del eje vertical "z".

El movimiento de largada está relacionado con los efectos del sistema propulsor. En este se estudia los problemas de resistencia y propulsión de la embarcación. Mientras los movimientos de abatimiento la guiñada depende del sistema de propulsión de la embarcación y del mecanismo de gobierno de la nave.

Los movimientos de arfada, cabeceo y balance son puramente oscilatorios, ya que en estos existen momentos y fuerzas restauradoras, los que provocan que la nave tienda a regresar a su posición de equilibrio, además estos son independientes del sistema de amarre que posea la embarcación. En cambio, con los movimientos de largada, abatimiento y guiñada, la embarcación no regresa a su posición de equilibrio a menos que actúe alternativamente en direcciones opuestas. Además estos dependen de diferentes condiciones como la carga, la geometría y el sistema de amarre de la nave.

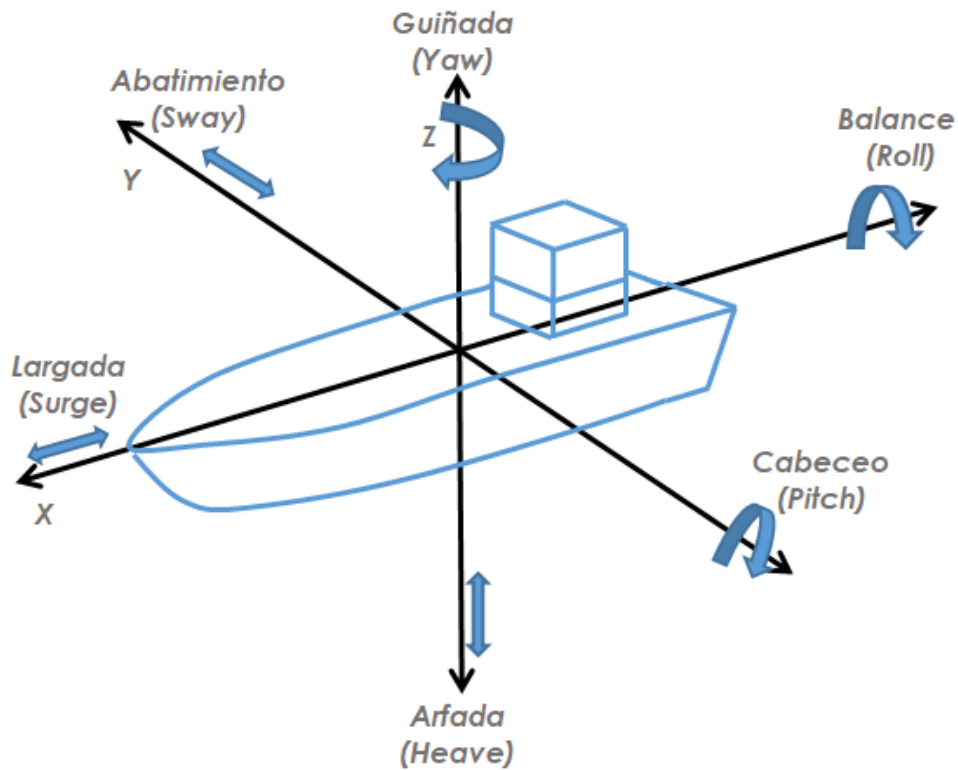


Figura 3-4: Sistemas del buque. (Fuente: Elaboración Propia.)

3.2.1 CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO Y GIRO DE LA NAVE

Los puntos observados en la Figura 3-5 se emplearon para el cálculo de los desplazamientos y giros de la nave. Para esto se consideró un sistema de coordenadas fijo y en reposo, el cual generó un movimiento absoluto. El desplazamiento absoluto se define respecto de un sistema de referencia fijo mientras el relativo lo es respecto de un sistema de referencia móvil.

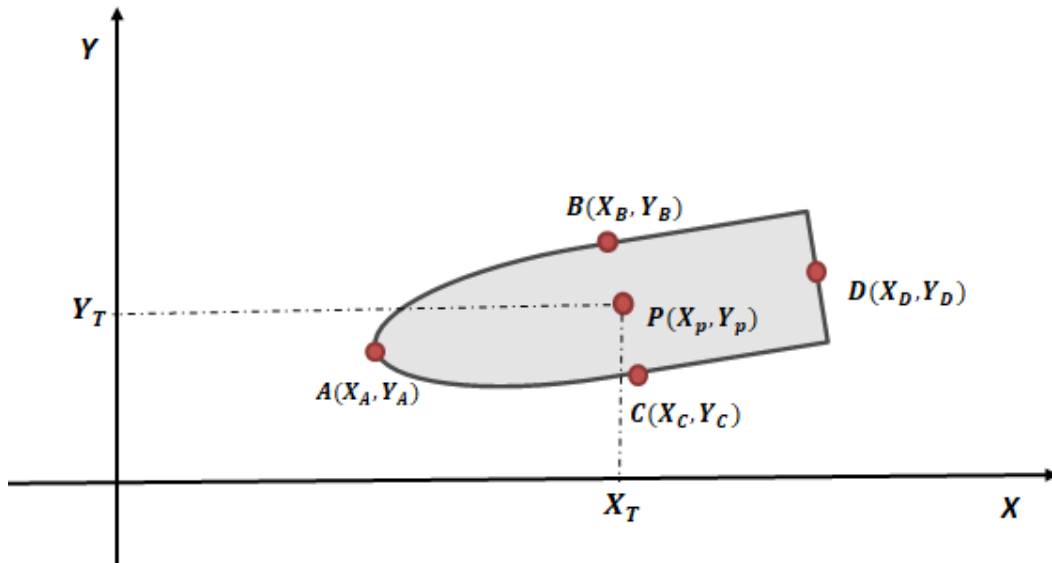


Figura 3-5: Sistema de referencia. (Fuente: Elaboración Propia.)

Para determinar el movimiento absoluto de la nave se calculó el centro de esta, mediante la media de los movimientos en los puntos A, B, C y D (ecuación 3-1). Esto se usó como centro de la nave (\bar{x}_p).

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; n = 4 \quad (3-1)$$

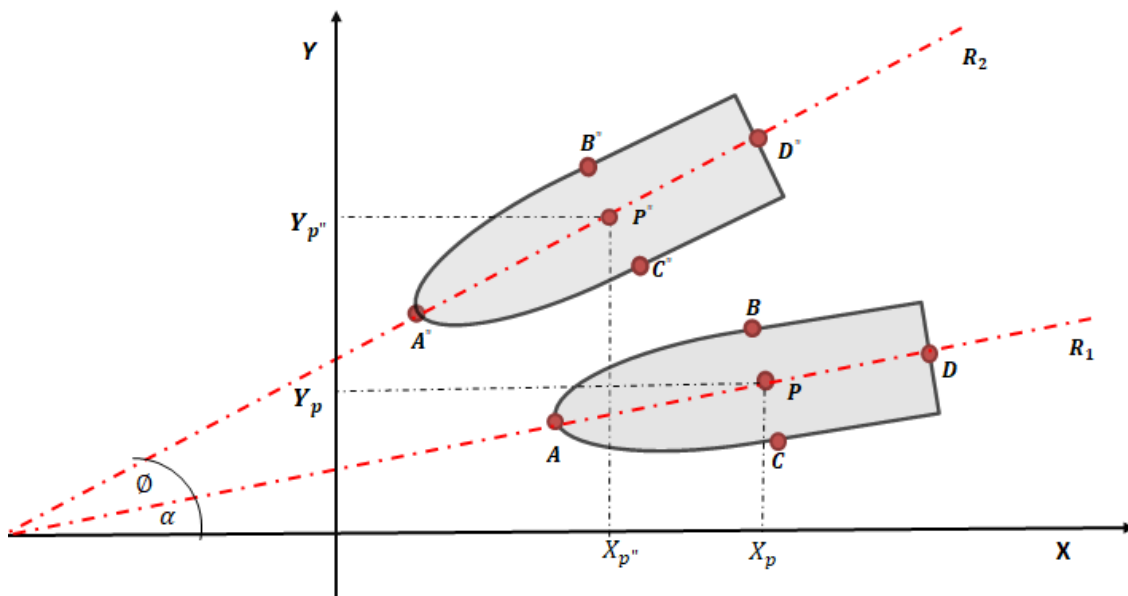


Figura 3-6: Sistema de referencia en un tiempo t(s). (Fuente: Elaboración Propia.)

El ángulo de rotación de la nave se obtiene trazando dos rectas que pasan entre los puntos A y D de la nave (ecuación 3-2). Estas se observan en la

$$y - y_p'' = m_p(x - x_p'') \quad (3-2)$$

El ángulo en radianes se obtuvo a través del cálculo de la pendiente formada por las dos rectas R_1 y R_2 (ecuación 3-3 y ecuación 3-4). Una vez obtenido el ángulo α se transformó de radianes a grados para simplificar.

$$m_1 = \frac{Y_D - Y_A}{X_D - X_A} \quad (3-3)$$

$$\tan^{-1}(m_2) = \alpha \quad (3-4)$$

Empleando las R_1 , R_2 y R_3 se determinó el desplazamiento absoluto de punto P (Figura 3-6), para el movimiento en los ejes en el tiempo analizado. Para esto se utilizó la ecuación de distancia mínima (ecuación 3-5).

$$d = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3-5)$$

Donde a, b y c son los coeficientes que acompañan a la ecuación general de la recta R_1 . (Figura 3-7). De manera similar se calculó el desplazamiento y giro de la nave menor para la vista frontal y lateral.

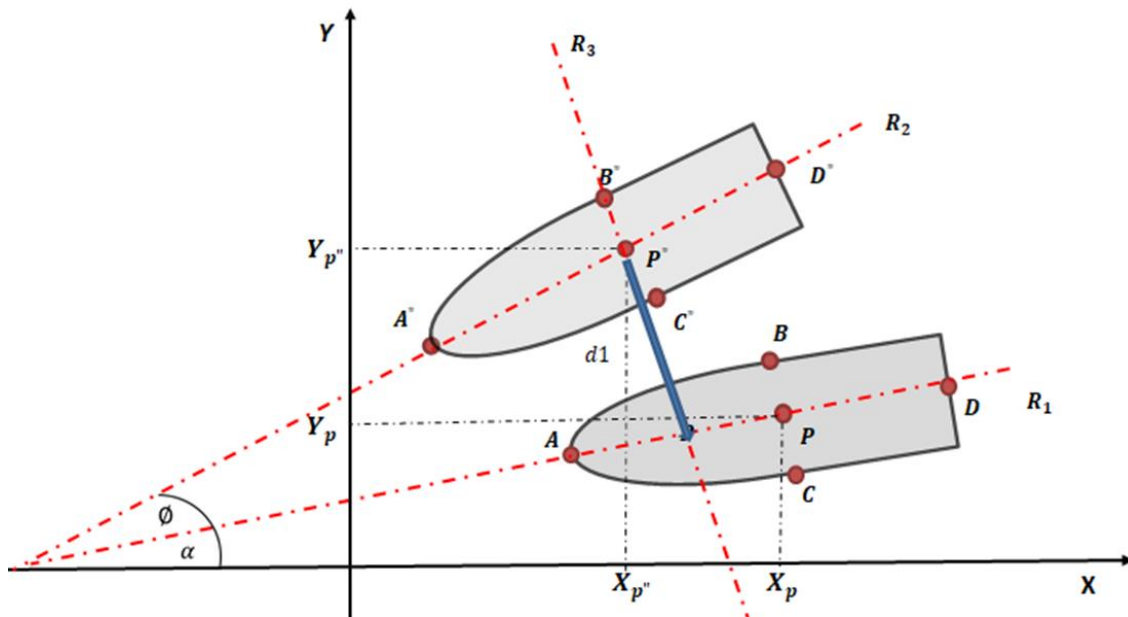


Figura 3-7: Distancia mínima para el punto P. (Fuente: Elaboración Propia).

3.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA

Los modelos hidráulicos se definen usando la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, según se introduce a continuación.

3.3.1 SEMEJANZA GEOMÉTRICA

La escala geométrica (λ) plantea que las relaciones entre las dimensiones espaciales de un sistema modelo (L_M) y prototipo (L_p) son iguales, siendo independientes del movimiento del sistema y de las acciones que actúen sobre él, no influyendo de igual manera más que aspectos de forma, entre los que figuran los detalles geométricos y rugosidad superficial (Serret, 2004) (Ecuación 3-6).

$$\lambda = \frac{L_p}{L_M} \quad (3-6)$$

3.3.2 SEMEJANZA CINEMÁTICA

La semejanza cinemática exige que todas las relaciones entre longitudes del modelo y prototipo tengan el mismo valor (semejanza geométrica), y también que todas las relaciones entre los tiempos tengan un valor común que se nombran como relación de escalas de tiempos. Por lo tanto, habrá una única relación de escala de velocidades. Los flujos sin fricción con superficie libre, son cinemáticamente semejantes si sus números de Froude son iguales. El número de Froude es un parámetro puramente cinemático que solo relaciona dimensiones de longitudes y tiempo. (Ecuación 3-7).

$$Fr_m = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_p = Fr_p \quad (3-7)$$

Donde V y L son una velocidad y una longitud características del proceso. De la ecuación 3-1 y con un λ como escala geométrica, se obtiene que la escala de velocidades es igual a:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = \frac{V_m}{V_p} \quad (3-8)$$

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda} = \frac{L_m/V_m}{L_p/V_p} = \frac{T_m}{T_p} \quad (3-9)$$

Como se observa en la ecuación 3-8, las velocidades deben escalarse con la raíz cuadrada de la escala geométrica. La misma relación existe entre los tiempos medidos a escala del prototipo y del modelo (ecuación 3-9). (Fernández-Alarcón, 2004)

3.3.3 SEMEJANZA DINÁMICA

Existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen las mismas relaciones de la escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masas). En esta memoria no se efectuara ensayos dinámicos y por ende no se profundiza en esta memoria.

3.4 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA NAVE

Para determinar el área y volumen de cuerpos irregulares se pueden emplear las reglas de Simpson y del Trapecio. Ambas reglas asumen que las figuras son curvas que siguen una función definida. Cuando son aplicadas en buques, entregan una aproximación de las áreas y los volúmenes de estos, las cuales serán más precisas a medida que la distancia entre las ordenadas sea menor.

3.4.1 CÁLCULO DEL ÁREA MEDIANTE LA REGLA DE TRAPEZIO

Para determinar el área de un tramo, la regla del trapecio divide el tramo AB en partes iguales. En esos puntos se trazan perpendiculares como se observa en la Figura 3-8. (Johnson, 1982).

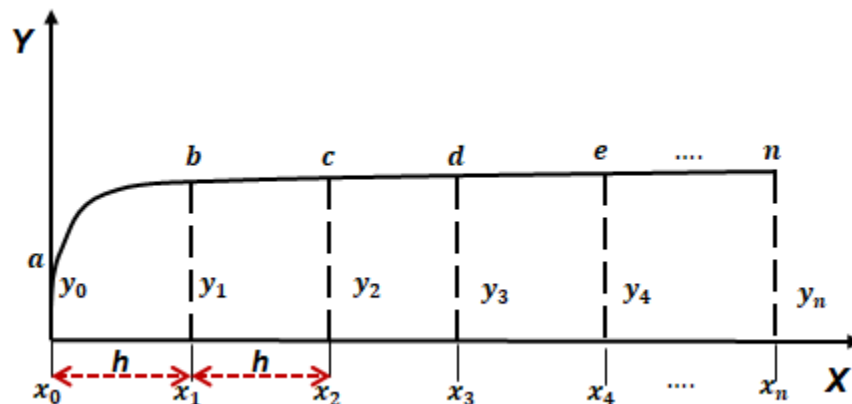


Figura 3-8: Regla del trapecio. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 3-8, se observan los elementos usados en el cálculo del área del plano de flotación. Donde el eje X representa las estaciones en que es dividido el plano de flotación, x_n es el número de cada estación y h la distancia entre cada una de estas. Por otra parte, el eje Y representa la distancia perpendicular de las semi-mangas que inician en la línea de la crujía a la borda del casco.

Entonces, el área del primer trapezoide que se forma a partir de los puntos A, X_0, X_1 y B (Figura 3-8) es igual a la ecuación 3-10.

$$\text{Área}_1 = h\left(\frac{1}{2}y_0 + \frac{1}{2}y_1\right) \quad (3-10)$$

Por otra parte el área del segundo trapezoide, formado por los puntos B, X_1, X_2 y C es igual a la ecuación 3-11 y así sucesivamente.

$$\text{Área}_2 = h\left(\frac{1}{2}y_1 + \frac{1}{2}y_2\right) \quad (3-11)$$

Para determinar el área total, se debe tener en cuenta que cada ordenada aparece dos veces, salvo las ordenadas de los extremos. Por lo tanto, tendremos que el área total será igual a la ecuación 3-12. Esta también se puede escribir como la ecuación 3-13.

$$\text{Área}_{total} = h\left(\frac{1}{2}y_0 + y_1 + \dots + y_{n-1} + \frac{1}{2}y_n\right). \quad (3-12)$$

$$\text{Área}_{total} = h * \sum(y_n) \quad (3-13)$$

3.4.2 CÁLCULO DE VOLUMEN DE LA NAVE

El volumen de desplazamiento de una embarcación puede ser obtenido mediante las áreas de los planos de agua o áreas transversales a intervalos iguales, para posteriormente, utilizando estas áreas como ordenadas, determinar el volumen a través de las Reglas de Simpson o del trapecio.

En este caso, los multiplicadores son 1, salvo en los extremos que es $\frac{1}{2}$. La sumatoria del producto de las ordenadas (áreas) por el multiplicador nos entrega el valor de la función volumen o $f(v)$, que al multiplicarla por el intervalo entre cada una de las estaciones, h , nos da como resultado el volumen del espacio analizado o V (ecuación 3-14). (Johnson, 1982).

$$V = h * \sum f(v) \quad (3-15)$$

3.4.3 DISEÑO DE LA NAVE MEDIANTE EL SOFTWARE FUSION 360

Para el diseño y construcción de la nave se empleó el software Fusion 360. Este es una herramienta de modelación directa que permite exportar los diseños y crear formas orgánicas con comandos intuitivos, además de generar archivos en formato OBJ o STL como modelos de malla.

Se utilizó este software para unificar los planos horizontales, transversales y longitudinales de la nave y generar una superficie a partir de estos. Una vez generada la superficie base fusion 360 puede generar un volumen a partir de esta. Formando un objeto sólido que fue escalado y seccionado para ser posteriormente impreso.

3.4.4 PROCESAMIENTO DE VIDEOS MEDIANTE SOFTWARE TRACKER

Para llevar a cabo el procesamiento de los registros filmográficos obtenidos en la etapa anterior, se utilizó el software gratuito Tracker, donde se crea una imagen temporal de una partícula o zona en un archivo de video, para posteriormente buscar dentro de la región determinada con la mayor coincidencia de imagen posible en cada fotograma del vídeo.

El sistema de medición SPOV emplea el software gratuito Tracker, el cual utiliza las características mencionadas anteriormente. En estas zonas es posible predecir las próximas posiciones de la partícula de estudio, empleando valores anteriores de posición, dirección, velocidad y aceleración, (Daza, 2017).

En la Figura 3-9, se observó el procesamiento de imagen mediante el software Tracker. Finalmente se realizó un análisis del registro en video donde se analizó el desplazamiento y la respuesta de la nave a la exposición del oleaje.

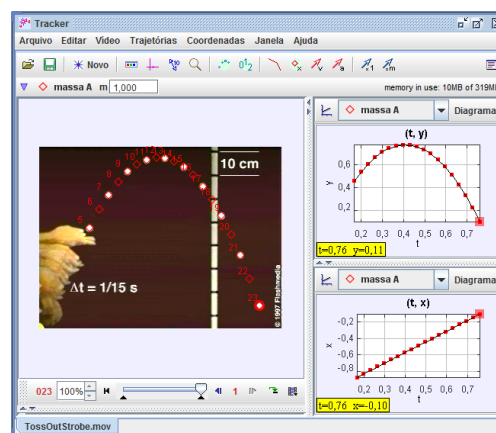


Figura 3-9: Procesamiento con el Software Tracker. (Fuente: Hanson & Brown, 2019)

4 METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA NAVE

4.1.1 DISEÑO DE LA NAVE EN SOFTWARE FUSION 360

La nave se diseñó basándose en los planos de un buque pesquero obtenidos de BILOCAD. Este es un sitio que contiene una gran cantidad de archivos en 2D y 3D, descargables en diferentes formatos (DWG, MAX, 3DS y PDF). De la información obtenida de la nave se emplearon en su mayoría los datos adquiridos de los planos longitudinales, transversales y horizontales, para realizar el diseño en 3D. Los planos se encuentran en el anexo 8.1.

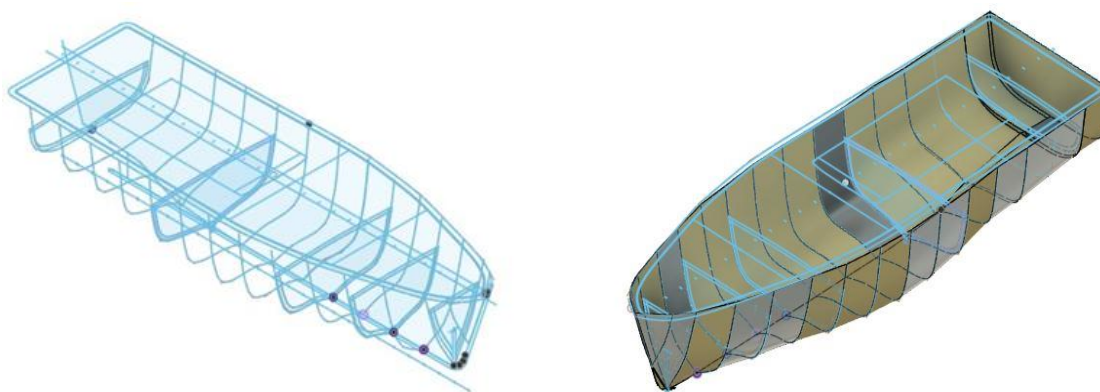


Figura 4-1: Unificación de los planos (izquierda) e inclusión de la superficie (derecha). (Fuente: Elaboración propia).

Una vez filtrada la información de los archivos, se pasó a exportar al programa. Inicialmente se exportaron como elementos individuales los planos horizontales, siguieron los planos transversales y finalmente los longitudinales. Posteriormente, se localizó cada una de las partes en su respectivo sitio haciéndolas coincidir y unificándolas (Figura 4-1, izquierda). Más tarde, se unificaron los tres planos de la nave menor donde se pasó a generar una superficie en cada uno de ellos (Figura 4-1, derecha). Las superficies creadas se generaron con la menor distancia posible, ya que se deseó evitar las deformaciones que se podrían generar por la interpolación de las superficies en el programa Fusion 360.

Posteriormente, se generó un espesor a la superficie creada. Además se diseñó a partir de los planos el castillo de la nave, según lo especificado en estos. Finalmente se escaló la nave a las proporciones deseadas para el modelo (1:25) (Figura 4-2, izquierda). La embarcación fue seccionada en cinco partes. Para optimizar el tiempo de impresión de cada una de las piezas (Figura 4-2, derecha).

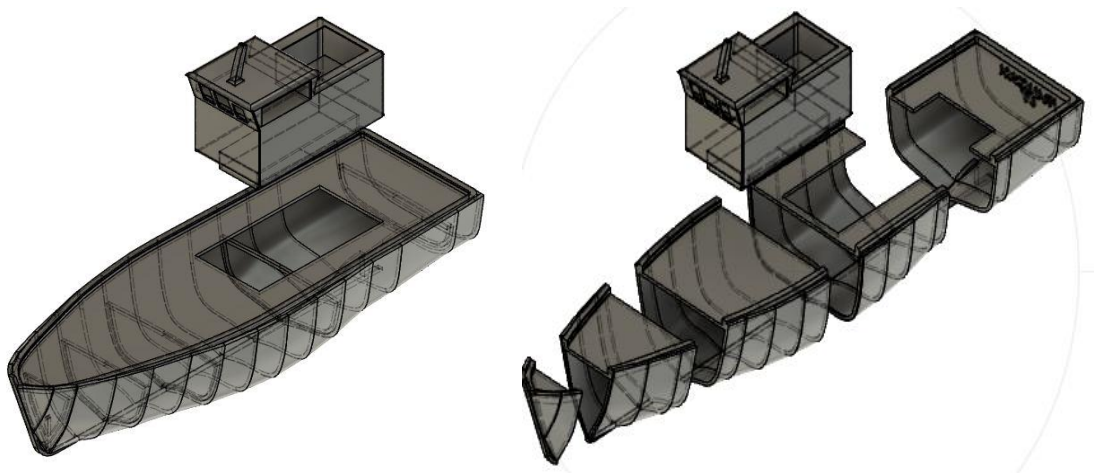


Figura 4-2: Nave menor. (Fuente: Elaboración propia.)

4.1.2 IMPRESIÓN Y ENSAMBLAJE

Se contó para la construcción de la nave menor el filamento Ensu Pla+ de 1.75 mm de color café (Figura 4-3). Además se empleó cloroformo técnico, el cual es un reactivo muy útil en la disolución de este tipo de materiales (Figura 4-3). Como se observó en la sección anterior, el casco de la embarcación fue seccionado e impreso en cinco partes (Figura 4-4). Los elementos impresos en Fablab UV contaron con un tiempo estimado de construcción de 12 horas por pieza. Estos fueron impresos en horario laboral en las instalaciones de la facultad.

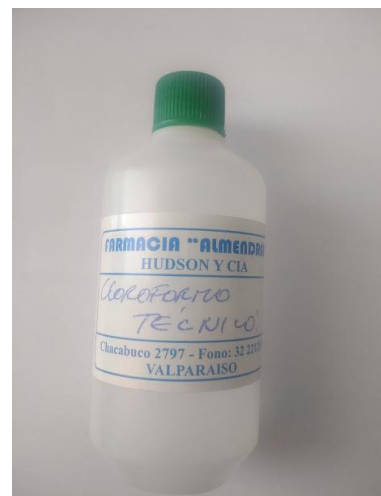


Figura 4-3: Filamento Esun Pla + y cloroformo técnico. (Fuente: Elaboración propia.)

Cada una de las secciones varía en tamaño y peso. Para facilitar el anclaje de las partes se procedió a realizar un proceso de limado y eliminación de los soportes y residuos de la impresión. Una vez realizado la limpieza de las secciones se procedió a unificar cada uno de los elementos (Figura 4-5) con el cloroformo técnico. En este caso se utilizó este elemento para derretir de manera parcial el material, unificando las piezas de la embarcación de forma tal que se asegure homogeneidad y resistencia de las partes sin producir rugosidades entre estas.



Figura 4-4: Piezas de la nave menor. (Fuente: *Elaboración propia.*)

Al finalizar la unión de todas las partes se procedió a recubrir internamente la nave, para evitar las posibles filtraciones en el interior, sellando por completo cualquier abertura en el casco. Para esto se recurrió a la utilización de macilla mágica, la cual es una mezcla a base de resinas de poliéster y solvente, la nave termina conto con un peso total de 730 gramos.



Figura 4-5: Ensamblaje de la nave menor. (Fuente: Elaboración propia.)



Figura 4-6: Primera prueba en laboratorio. (Fuente: Elaboración propia.)

Finalmente, la nave fue pintada con pinturas en aerosol en base de aceite. Bajo la línea de agua número cinco se pintó con tonos rojo y el resto de la nave se pintó de azul. En la Figura 4-6 se observa la nave ya pintada en el canal.

4.2 INSTRUMENTOS DEL LABORATORIO

La modelación del oleaje se realizó en el canal de oleaje de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, cuyas dimensiones son 15 (m) de largo y 1,2 (m) de alto. Para efectos del presente proyecto se utilizó una profundidad de 24 (cm). El canal está conformado de paredes de vidrio y una base de goma. Todos estos elementos son sostenidos por una súper estructura de metal.

El canal posee un sistema de circulación para el mantenimiento del agua, el cual evita la proliferación de algas. El sistema está compuesto por una bomba (Espa 1 Hp) y un filtro de piscina (Vulcano VC-40) que en su interior posee 5 (Kg) de grava, 80 (Kg) de cuarzo que permiten la filtración de algas, bacterias y elementos flotantes. (Memoria Laboratorio-Modelación Física, 2018).



Figura 4-7: Laboratorio de modelación física de la Universidad de Valparaíso. (Fuente: Memoria Laboratorio-Modelación Física, 2018).

Así también el canal puede ser empleado para diferentes estudios como los relacionados a la contaminación marina, impactos de olas y tsunamis sobre obras costeras y estructuras portuarias, estudios de estructuras flotantes, morfodinámica y regeneración de playas, socavación de muelles y rompeolas. En este caso se empleó para el estudio del movimiento de una nave. A continuación se exponen las herramientas que se utilizaron en el laboratorio de modelación física.

4.2.1 PALETA GENERADORA DE OLAJE

El oleaje fue generado por la paleta emplazada en el canal de (Figura 4-8). Según lo expuesto en la Memoria Laboratorio-Modelación Física, (2018), el instrumento puede producir un oleaje regular e irregular. Para efectos del presente proyecto se empleó un oleaje regular. Además, la paleta cuenta con un carro de desplazamiento y con un motor LinMot, el cual está compuesto por un startor (PS10-70x320u-BL-QJ), un slider (PL10-28X1990) y un servo drive (E1400-GP-QN-1S).



Figura 4-8: Paleta del oleaje. (Fuente: winckler, 2019)

4.2.2 SONDAS RESISTIVAS

Para las mediciones de oleaje realizadas en el canal se contó con dos sondas resistivas (Figura 4-9) y un monitor de recepción de señal. Las sondas operan midiendo la corriente eléctrica que fluye entre dos barras de acero inoxidable, sumergidas en el agua. La corriente es convertida en un voltaje de salida que es directamente proporcional a la profundidad que está sumergido (Memoria Laboratorio Modelación Física, 2018). Los resistores cuentan con una longitud de 0.96 m y se ubicaron posterior a la paleta y antes de la nave (Figura 4-12).



Figura 4-9: Sondas resistivas. (Fuente: Memoria Laboratorio-Modelación Física, 2018).

4.2.3 DISIPADOR

El canal cuenta con un sistema de disipadores pasivos en sus extremos (Figura 4-10). La playa disipativa de madera que fue construida por el personal del laboratorio. Esta tiene una pendiente de 5° y cuenta con pesos que aseguraron de forma estable a la estructura al fondo del canal. La estructura también cuenta con dos mallas disipadoras que se encuentran en el extremo opuesto del canal y que tienen el propósito de eliminar los efectos de la reflexión que se producen en la parte posterior de la paleta.

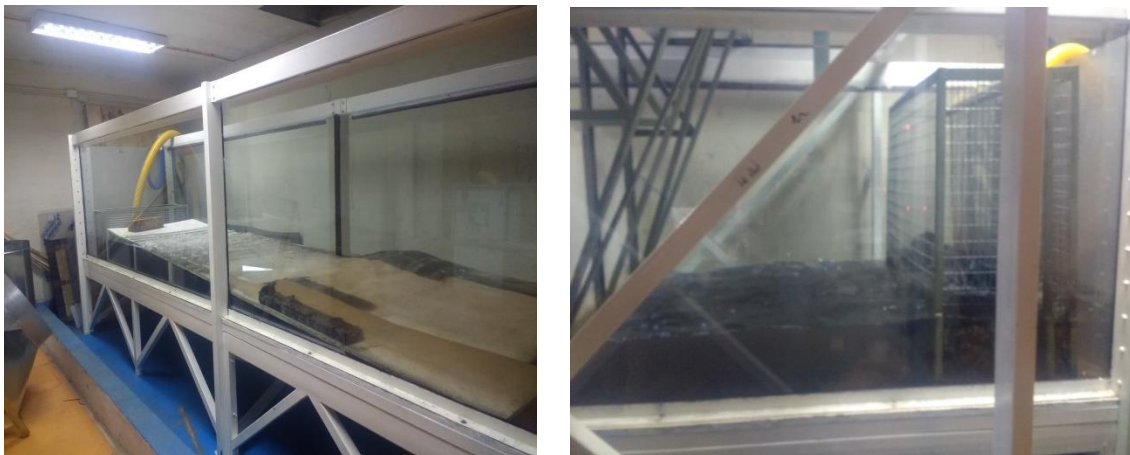


Figura 4-10: Playa disipadora (izquierda) y malla disipadora (derecha). (Fuente: Elaboración propia.)

4.3 DISTRIBUCIÓN Y VISTAS DE LAS CÁMARAS

Para realizar el registro de los datos audiovisuales se contó con tres cámaras (Gopro Hero 5) y un atril. En la Figura 4-11, se observa la disposición y vistas de cada una de las cámaras que se emplearon para realizar el registro en video. Además en la Figura 4-11 se observan los ejes del plano XYZ, estos tienen como punto inicial la esfera A, los cuales pasan cerca de la cubierta pero no coinciden en su totalidad con esta o con los otros puntos de la nave. Por lo tanto la Figura 4-11 representa una visión ideal. Mientras que en las Figura 4-12 y Figura 4-13 se observan la distribución de cada una de estas respecto al canal de oleaje.

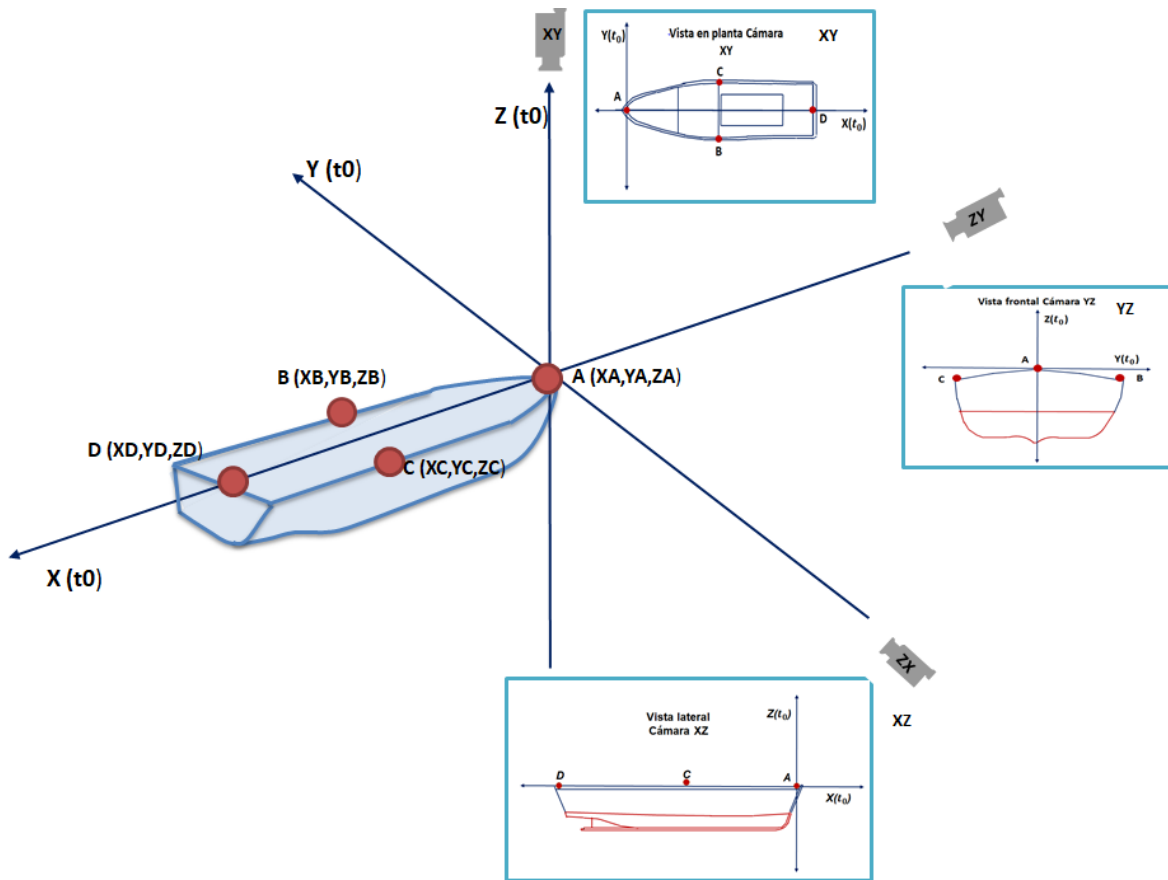


Figura 4-11: Distribución de las cámaras respecto del eje de coordenadas. (Fuente: Elaboración propia).

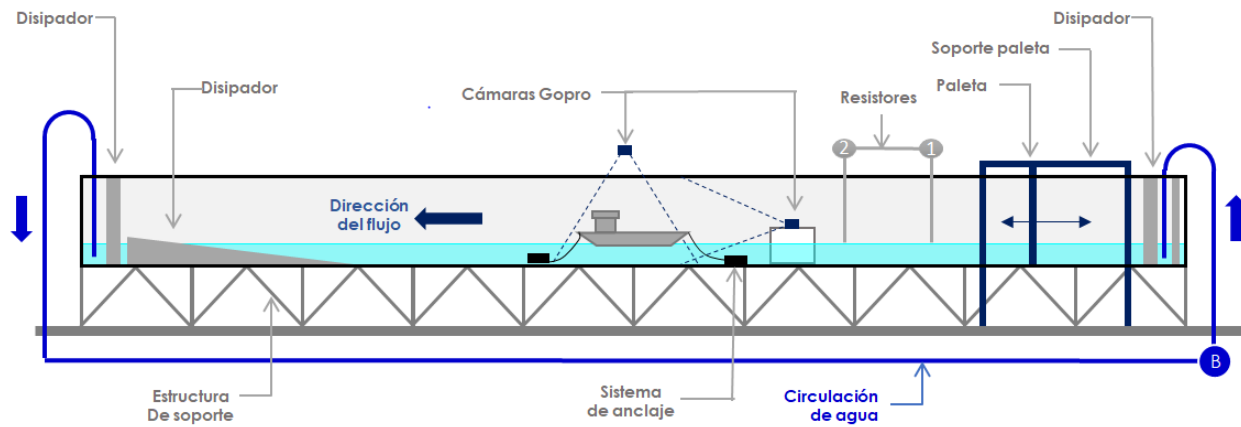


Figura 4-12: Vista frontal de la posición de las cámaras en el canal de olas. (Fuente: winckler, 2019)

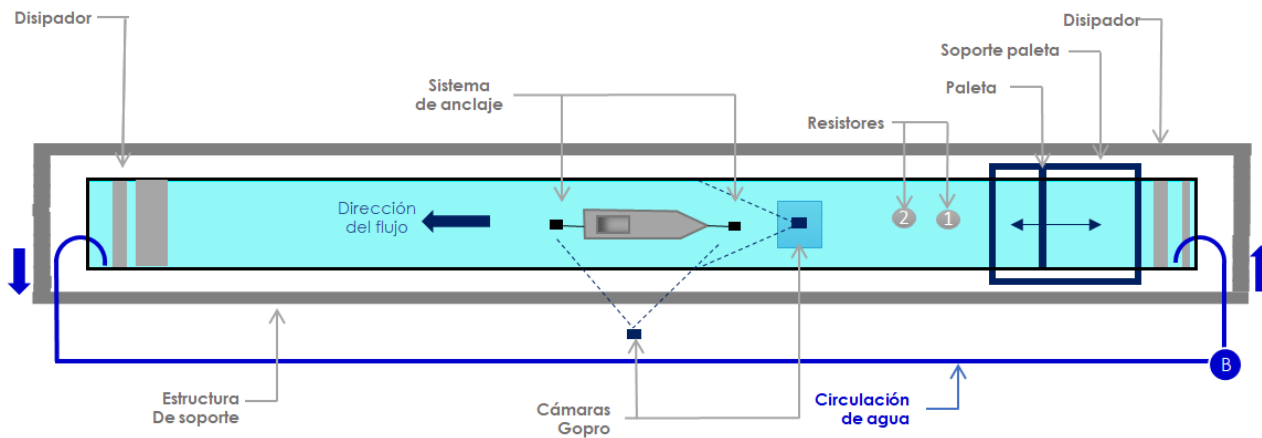


Figura 4-13: Vista en planta de la disposición de las cámaras en el canal de olas. (Fuente: Elaboración propia.)

En las Figura 4-14 a la Figura 4-16, se observan las diferentes vistas de las cámaras empleadas en los ensayos. La imagen de la izquierda muestra un esquema de una visión ideal de la embarcación, mientras la imagen de la derecha muestra uno de los ensayos típicos en el laboratorio. En la Figura 4-14, se muestra la vista de la cámara XZ esta es la “vista lateral” de la embarcación fuera del canal de olas. Desde esta vista se pueden apreciar los movimientos de traslación en el eje Z (Heave) y en el eje X (Surge).

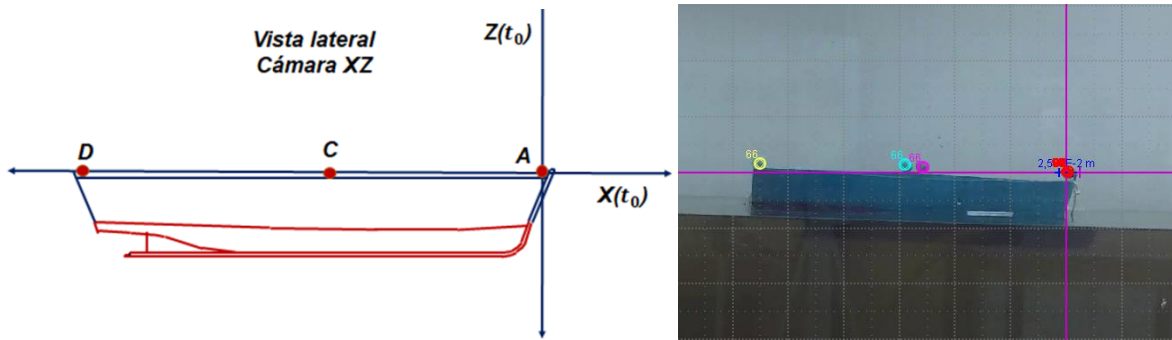


Figura 4-14: Vista lateral (Cámara XZ). (Fuente: Elaboración propia.)

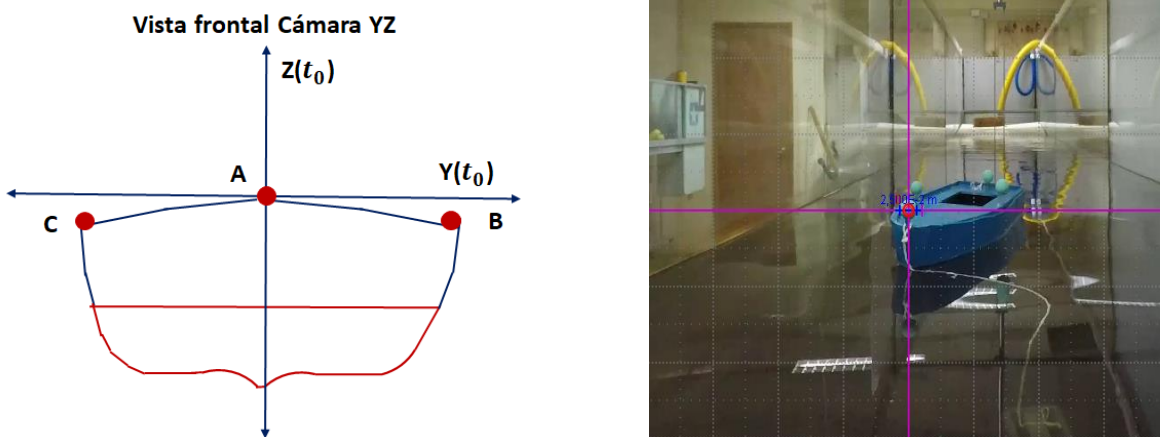


Figura 4-15: Vista frontal (cámara YZ). (Fuente: Elaboración propia.)

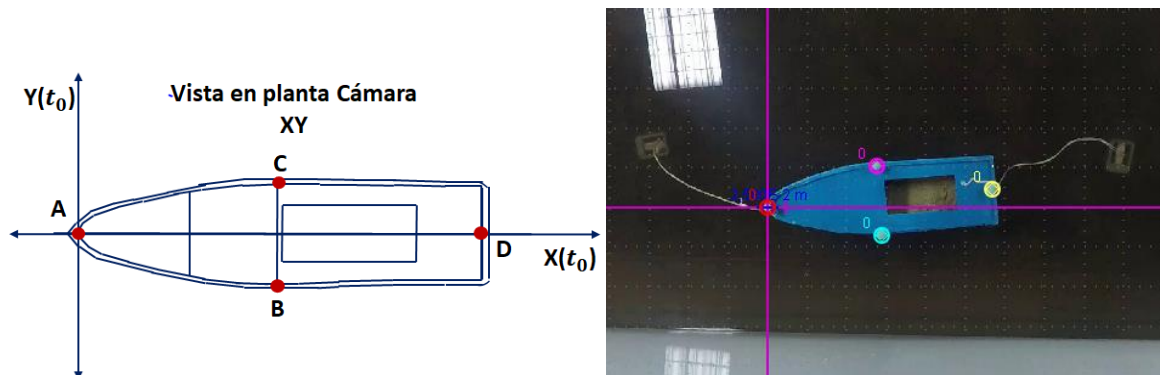


Figura 4-16: Vista planta (Cámara XY). (Fuente: Elaboración propia.)

Como se advierte en las figuras anteriores, la embarcación contó con cuatro esferas en la cubierta. Esto se realizó con el propósito de tener puntos de referencia y seguimiento en los registros de video. En la Figura 4-17, se observa una de las esferas de plumavit (ABCD) con un diámetro de 2,5 (cm), las cuales se pintaron con un color que generara constaste con el fondo. La disposición y ubicación de estas se pueden observar en la Figura 4-14.

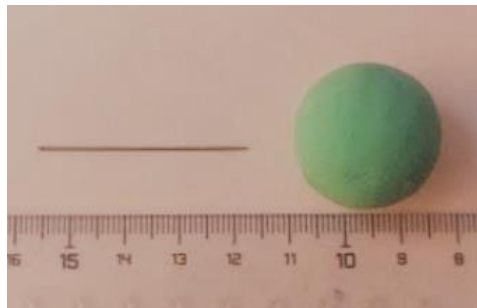


Figura 4-17: Elementos sobre cubierta. (Fuente: Elaboración propia.)

Los cabos que se emplearon para asegurar la nave menor tenían una longitud de 75 (cm) tres veces la profundidad del agua en el canal en el momento de los ensayos realizados (Figura 4-18). Los cabos fueron asegurados en con pesos de buzo esto de manera de ancla (Figura 4-19).

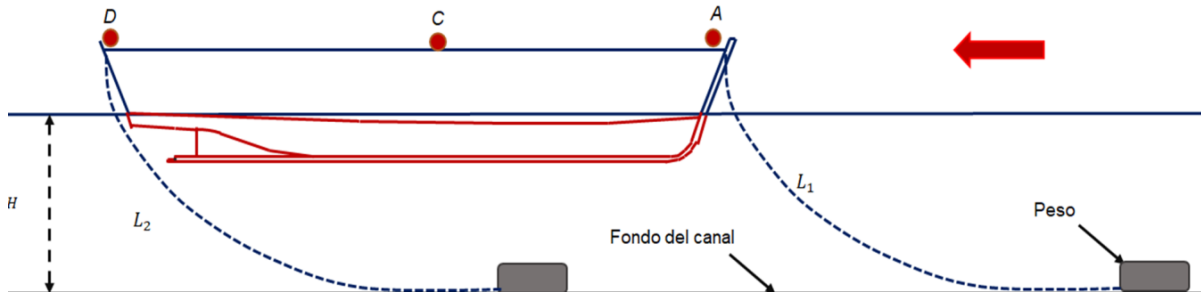


Figura 4-18: Longitud de la cadena. (Fuente: Elaboración propia.)



Figura 4-19: Sistema de amarre de la embarcación. (Fuente: Elaboración propia.)

Para efectuar la coordinación e identificación de los videos con las cámaras, se implementó un letrero (Anexo 8.5) y una campana.

En el letrero se indicó el código, fecha, hora y repetición de cada ensayo. Se utilizó una campana con el propósito de dejar un registro audible en las tres cámaras, además se realizó esto con la intención de dar un punto de partida en común entre los tres instrumentos.

Además, para realizar el procesamiento se fijó el eje en un punto común de las tres cámaras para todos los videos, el cual fue el centro de la esfera "A" o punto A. También se empleó este objeto para fijar el tamaño de los pixeles ya que sus dimensiones son conocidas y es captado por todas las cámaras en todo momento de los ensayos. Para fijar los ejes y escalar el video, se utilizaron las herramientas disponibles en el programa Tracker. También se debe mencionar que no se hicieron correcciones de perspectivas en los videos, por lo tanto se espera tener un error menor en las mediciones producto a esto.

4.3.1 SEGUIMIENTO DE LOS PUNTOS

Del seguimiento de los puntos emplazados en la nave (Figura 4-11) se obtuvo el desplazamiento horizontal y vertical de estos en un lapso de cinco minutos por video. Para ello se utilizaron tres cámaras, las cuales registrarán los movimientos para el posterior análisis y cálculo del desplazamiento y giro de la nave. De las diferentes vistas se calcularon los siguientes movimientos:

Desde la “vista en planta” (Figura 4-20), se calculan los movimientos en los ejes XY: Surge para el eje X y Sway en el caso del eje Y. También en la “vista en planta” (Figura 4-20), se obtiene el giro en el eje Z o Yaw.

Desde la “vista frontal” (Figura 4-21), se desprenden los movimientos en los ejes YZ: Heave en el caso del eje Z y Sway para el eje Y. Al mismo tiempo, de esta vista (Figura 4-21) se calculó el giro en el eje X o Roll.

Finalmente la “vista lateral” (Figura 4-22), muestra los movimientos en los ejes XZ, los cuales son los ya mencionados: Surge para el eje X y Heave para el eje Z. Además se obtiene el giro (Figura 4-22) en el eje Y o Pitch. Con esto se puede apreciar que se tendrán dos veces el mismo dato de movimiento captado por dos cámaras.

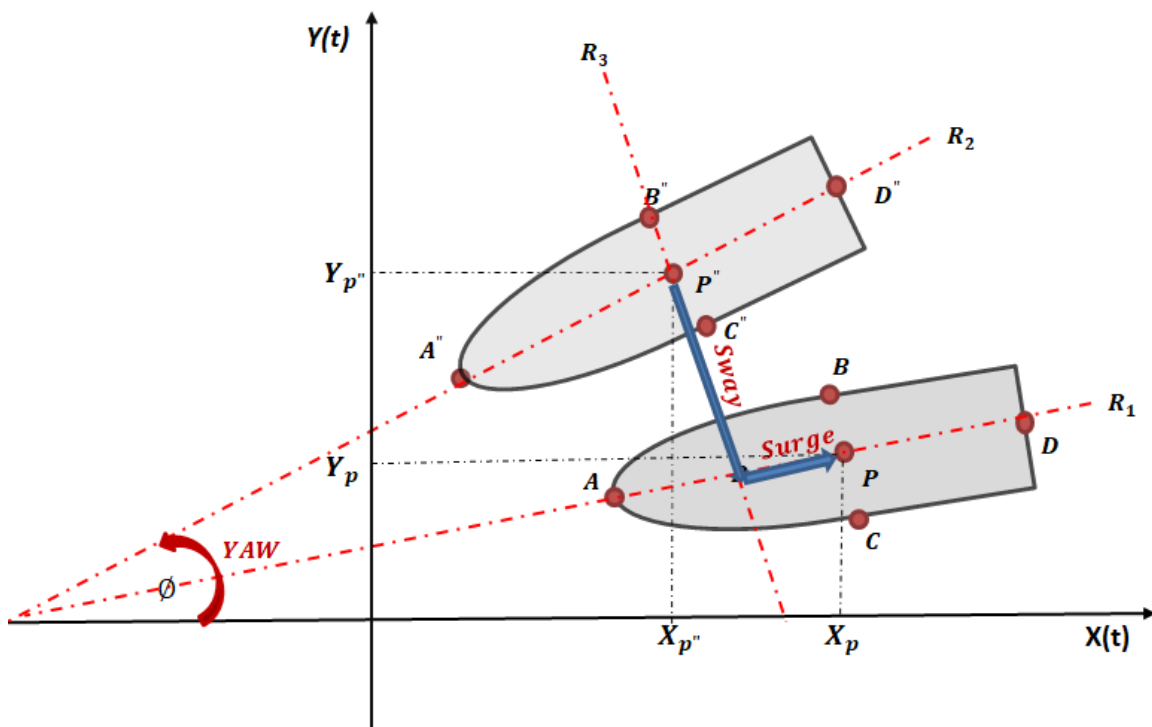


Figura 4-20: Desplazamiento y rotación de la vista en planta XY, donde se obtiene los movimientos en el eje Y (Sway) y en el eje X (Surge) y el movimiento de rotación en el eje Z (Yaw). (Fuente: Elaboración propia)

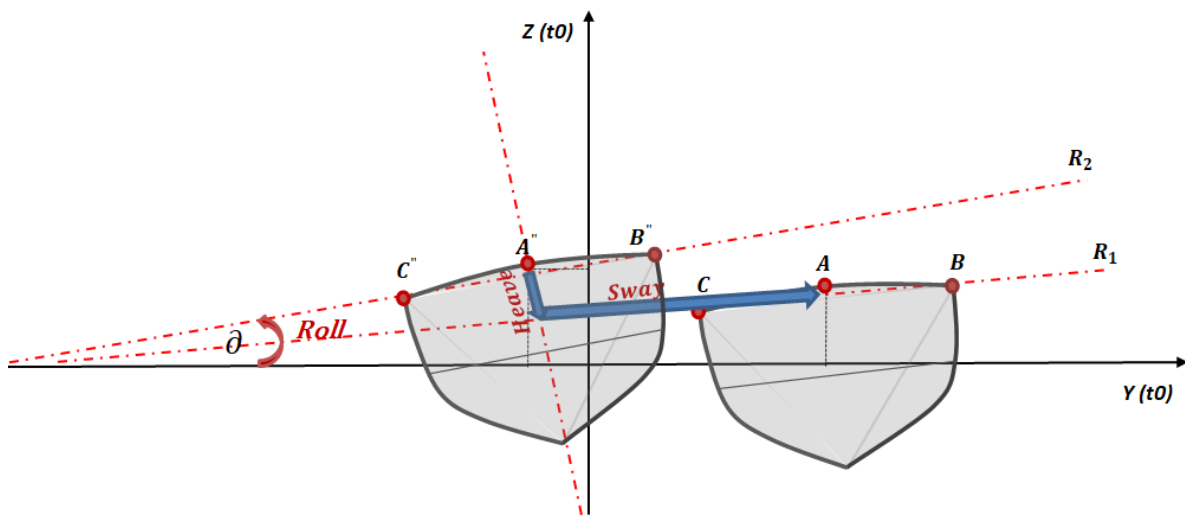


Figura 4-21: Desplazamiento y rotación en la vista frontal YZ, donde se obtiene los movimientos en el eje Z (Heave) y en el eje Y (Sway) y el movimiento de rotación en el eje X (Roll). (Fuente: Elaboración propia)

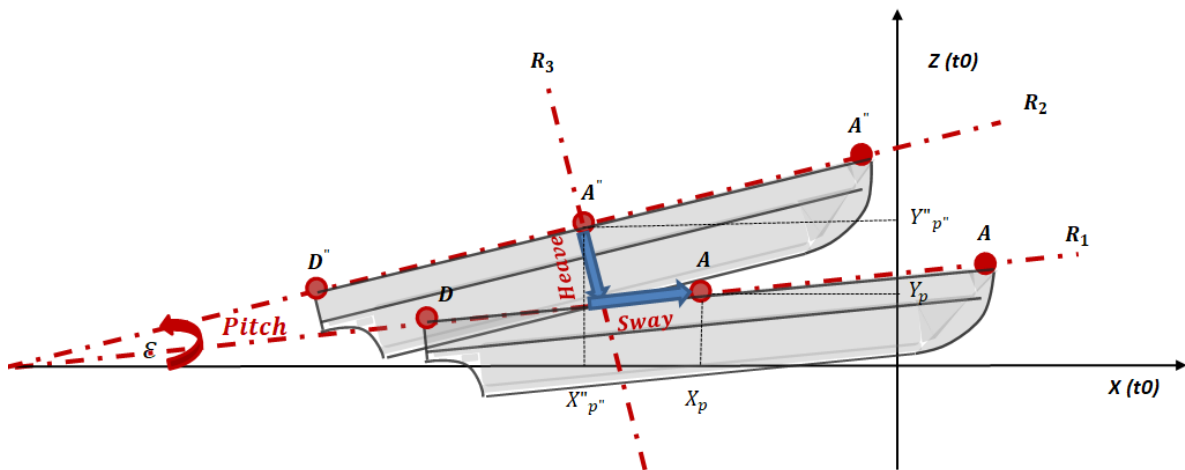


Figura 4-22: Desplazamiento y rotación en la vista lateral XZ, donde se obtiene los movimientos en el eje Z (Heave) y en el eje X (Surge) y el movimiento de rotación en el eje Y (Pitch). (Fuente: Elaboración propia.)

Los movimientos de rotación y traslación expuestos en las diferentes vistas anteriormente mencionadas para la nave, se pueden resolver con las ecuaciones planteadas en el apartado 3.2.1 del marco teórico.

4.4 CASOS A ANALIZAR

Se analizaron un total de 4 casos donde el principal agente forzante fue el oleaje. Además, se consideró tres repeticiones de cada experiencia, dando un total de 12 ensayos en laboratorio. Para diferenciar cada una de estas experiencias se crearon códigos indicados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Códigos y valores en los ensayos de oleaje.

Nº	Código	Repetición	Hmo(m)	Tp (s)
1	OH1T1R1	1	1.0	8
2	OH1T1R2	2	1.0	8
3	OH1T1R3	3	1.0	8
4	OH1T2R1	1	1.0	12
5	OH1T2R2	2	1.0	12
6	OH1T2R3	3	1.0	12
7	OH2T1R1	1	2.0	8
8	OH2T1R2	2	2.0	8
9	OH2T1R3	3	2.0	8
10	OH2T2R1	1	2.0	12
11	OH2T2R2	2	2.0	12
12	OH2T2R3	3	2.0	12

(Fuente: Elaboración propia.)

Para interpretar el código mostrado Tabla 4-1. Se plantea el siguiente ejemplo "OH1T1R1", que se puede explicar de la siguiente manera

- "OH1T1R1": oleaje (O) con altura de olas (H1) que es igual a 1 (m), con un periodo (T1) igual a 8 (s) y siendo la primera repetición (R1).

Además, se debe mencionar que se definió la escala (1:25) ya que permitía visualizar con mayor facilidad el movimiento de la nave y el oleaje en el canal de olas.

Tabla 4-2: Características del oleaje

Código	Prototipo			Modelo		
	Altura (m)	Tp(s)	Frecuencia	Altura (m)	Tp(s)	Frecuencia
OH1T1R1	0,04	0,32	0,62	1	8	0,12
OH1T2R1	1	12	0,08	0,04	0,48	0,41
OH2T1R1	2	12	0,08	0,08	0,48	0,41
OH2T2R1	2	8	0,12	0,08	0,32	0,62

(Fuente: Elaboración propia.)

En la Tabla 4-2, se observan los valores de los ensayos en el laboratorio. Además, se advierte su condición real y por otra parte su respectiva condición escalada para la experiencia en el laboratorio.

5 RESULTADOS

5.1 MODELACIÓN DE LA NAVE A ESCALA

En la Tabla 5-1, se presentan las dimensiones de la nave, que corresponde a un buque pesquero. Se seleccionó esta embarcación con el propósito de visualizar de mejor medida el movimiento de la nave al momento de aplicar la escala de reducción en el modelo (1:25). Los datos de los planos fueron obtenidos mediante el sitio de pago Bilocad.cl.

Tabla 5-1: Dimensiones de las secciones de la nave menor.

Elemento	Escala	
	1:1 (m)	1:25 (cm)
Calado LA5	1,25	5
Puntal	1,54	6,2
Borda	2,4	9,6
Eslora Entre P	12	48
Eslora	14	56
Manga	4,2	16,8

(Fuente: Elaboración Propia)

Para obtener el área y volumen de la nave se empleó las formulas expuestas en los puntos 3.4.1 y 3.4.2, donde se consideró las cinco primeras líneas de agua, siguiendo los planos de flotación de la nave. En la Tabla 5-2, se presentan los datos de la semi-mangas de las diferentes líneas de agua y en la Figura 5-1, se advierten los planos de las semi mangas. Para el cálculo del área y volumen de la embarcación se consideró una distancia entre ordenadas de 1 (m) y no se consideraron los apéndices de la embarcación.

Tabla 5-2: Semi manga de la línea de la cruija (cm)

Línea de agua	Estaciones												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
LA1	141	489	800	1119	1400	1645	1723	1647	1199	281			
LA2	281	748	1081	1372	1623	1822	1879	1860	1746	1220	97		
LA3	421	889	1223	1492	1722	1904	1957	1938	1879	1772	1547	1060	
LA4	541	986	1305	1571	1800	1972	2017	1996	1943	1900	1837	1740	1631
LA5	641	1061	1375	1645	1855	2020	2061	2033	1996	1955	1914	1879	1840

(Fuente: Elaboración propia.)

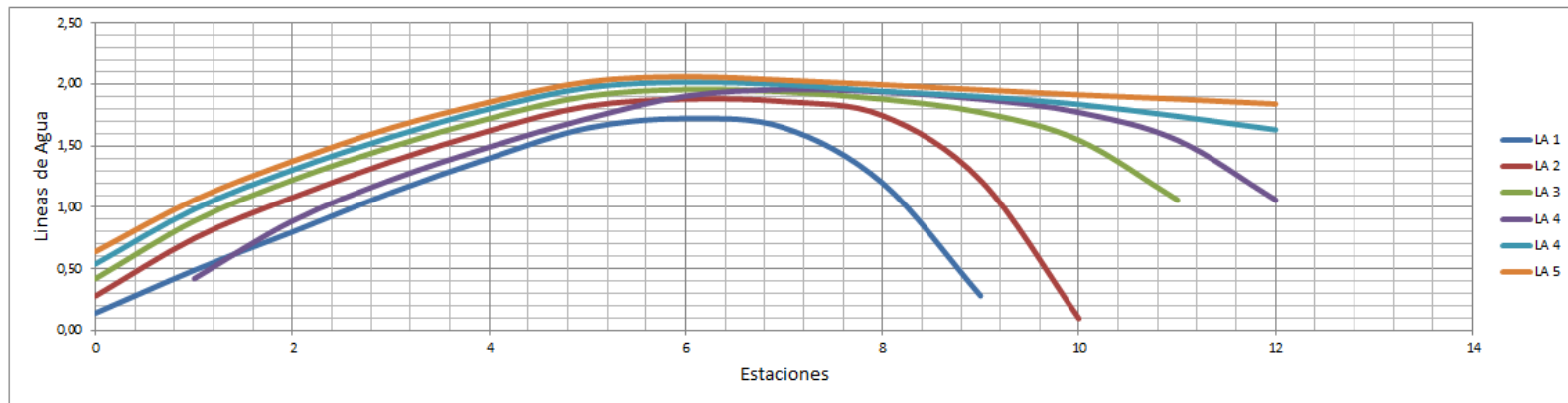


Figura 5-1: Plano de las semi-mangas. (Fuente: Elaboración propia.)

El área de la semi- manga registradas para las líneas de agua $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ y $L5$ es de $10,2 (m^2)$, $13,54 (m^2)$, $17,06 (m^2)$, $20,15 (m^2)$ y $21,03 (m^2)$, respectivamente según se presenta en el anexo 8.2. El área total de cada una de estas superficies es el doble de la semi-manga. Por otra parte el brazo adrizante para cada semi-manga se encuentra orientado hacia estribor de la nave. Finalmente en la Tabla 5-3, se presenta el resumen del cálculo del volumen total de la nave menor el cual es de $33,19 (m^3)$, mientras que el volumen del modelo es de $0,0021 (m^3)$ con un desplazamiento de $0,0021 (T)$ o $2,124 (Kg)$ en agua dulce.

Tabla 5-3: Cálculo del volumen.

Variable	Valor
Escala	1:25
Escala	15625
Volumen	33,19 (m^3)
Volumen del modelo	0,0021 (m^3)
Desplazamiento	0,0021 (t)
Desplazamiento	2,12 (Kg)
Agua dulce	1 (t/m^3)

(Fuente: Elaboración propia.)

5.1.1 MOVIMIENTOS DE LA NAVE

En las Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4, se observa el desplazamiento de la nave para los puntos A, B, C y D en las diferentes vistas mencionadas en el apartado 4.3. Para explicar el desplazamiento de la nave, se presenta uno de los doce ensayos realizados en el laboratorio (OH2T2R2), cuyas características se encuentran en la Tabla 4-2. Los otros ensayos se incluyen en el anexo 8.3.

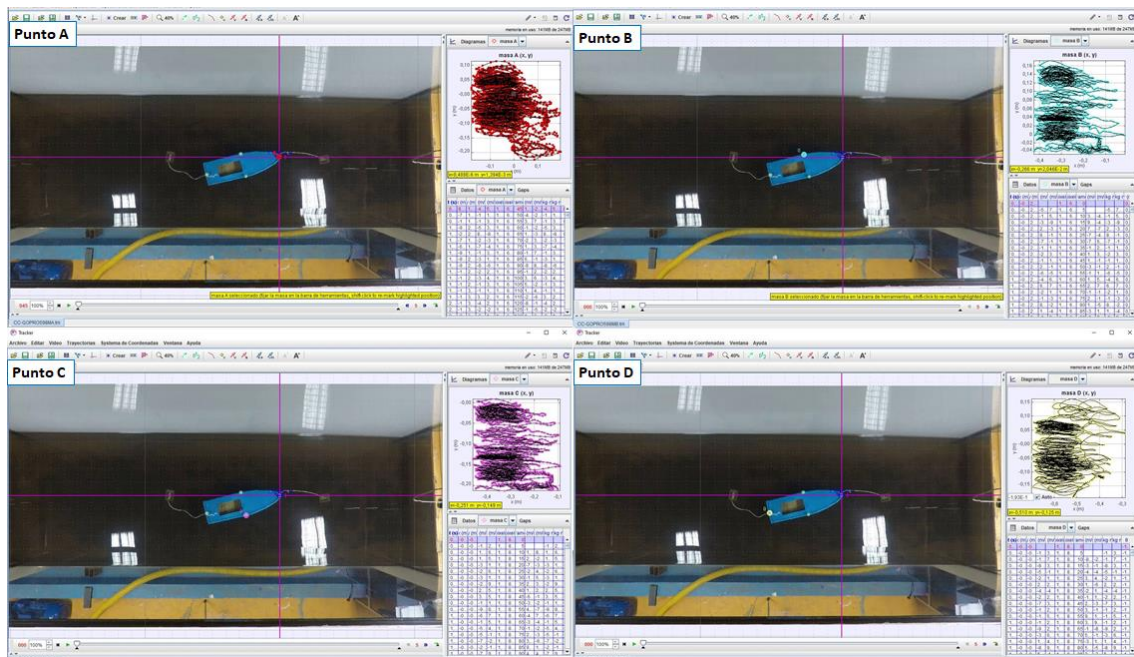


Figura 5-2: Vista de la cámara en planta (YX) en el ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

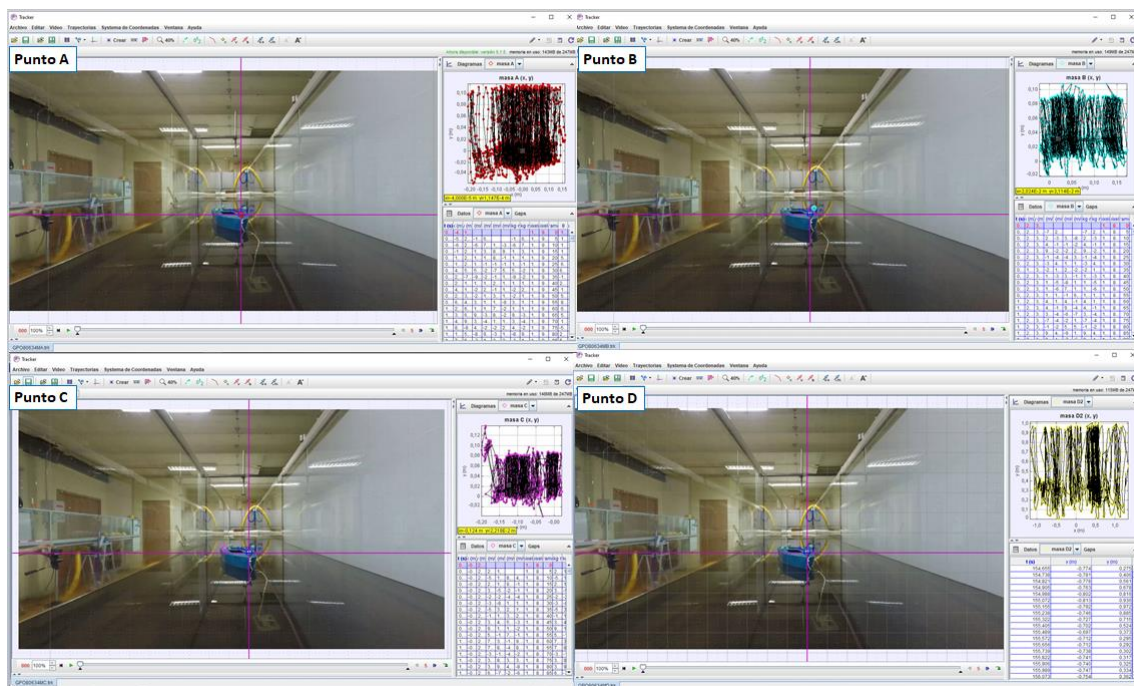


Figura 5-3: Vista de la cámara frontal (ZY) en el ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

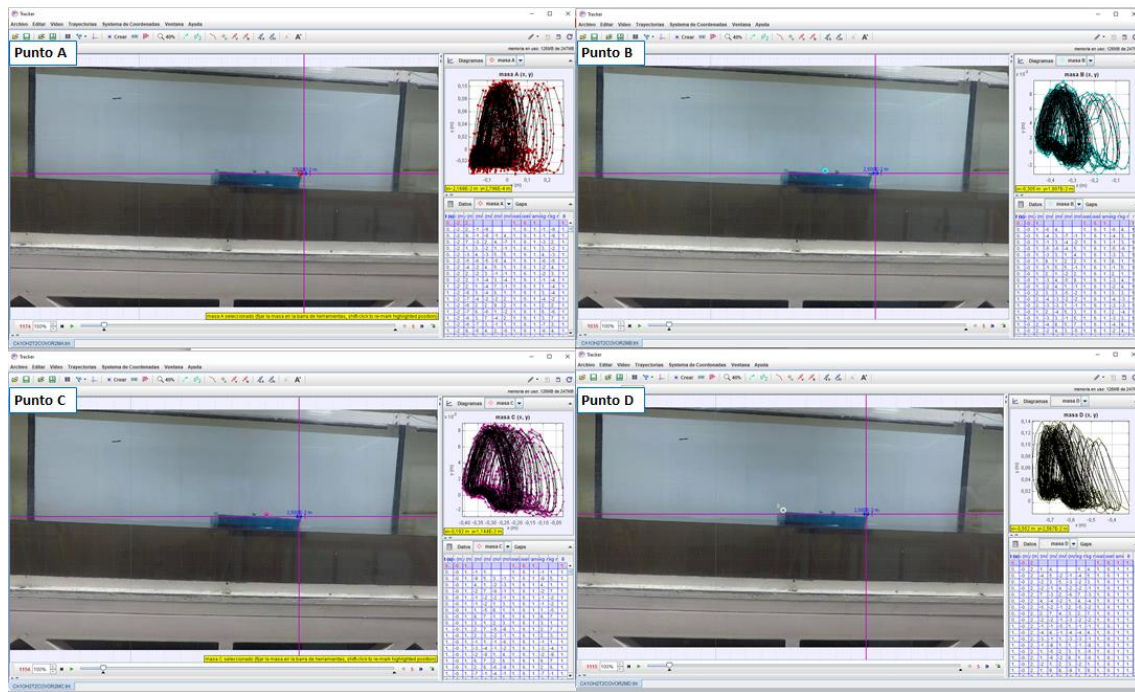


Figura 5-4: Vista de la cámara Lateral (ZX) en el ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

En el siguiente apartado se analizó el desplazamiento de la nave para el caso OH2T2R2. Las especificaciones de este caso se encuentran en la Tabla 4-2. El caso analizado fue seleccionado, ya que muestra a la nave en una posición no alineada con el eje horizontal, si no que presenta una cierta inclinación hacia uno de los ejes. Los datos obtenidos en los diferentes ensayos se encuentran en el anexo 8.3

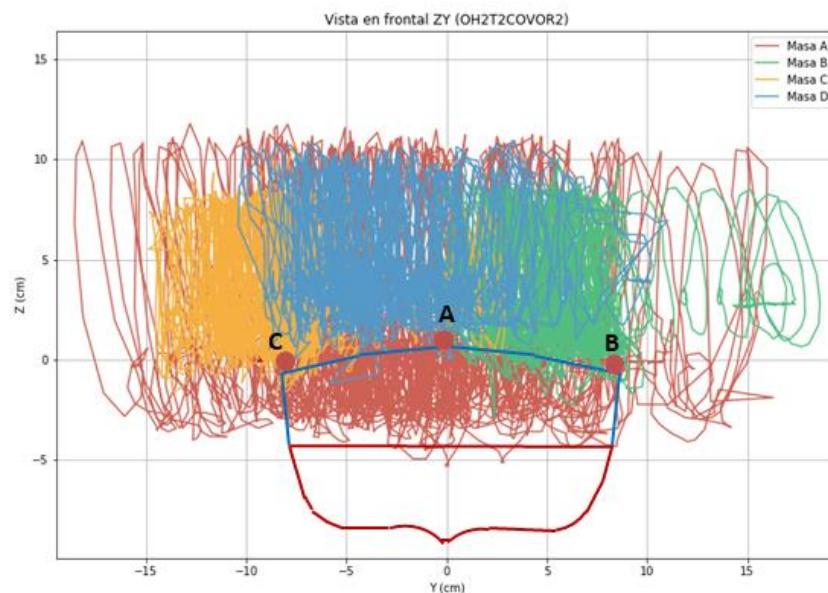


Figura 5-5: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R2 (Fuente: Elaboración propia.)

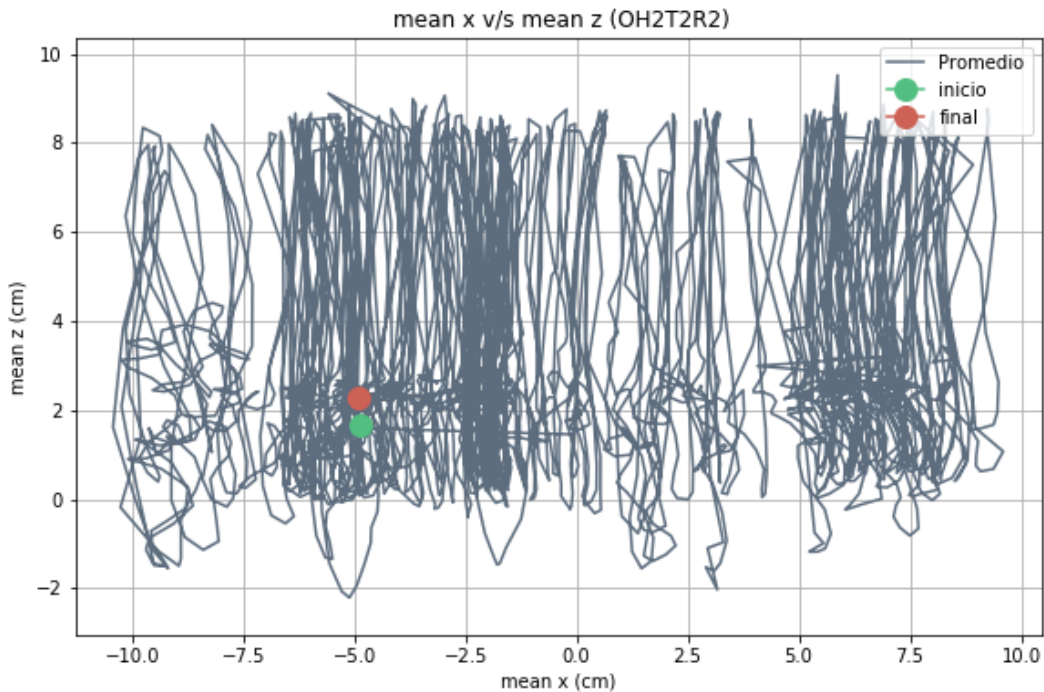


Figura 5-6: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R2).
(Fuente: Elaboración propia.)

Se advierte que para la “vista frontal” (Figura 5-5), los puntos emplazados en la nave presentan una trayectoria ascendente y descendente en su recorrido. También se aprecia que los mayores rangos de desplazamiento en el eje Z del registro se encuentran en el orden de los 11,5 (cm) para el punto A, lo que equivalente a 2,9 (m). El punto D por su parte muestra un desplazamiento en el eje de 10,1 (cm) que equivale a 2,5 (m). Mientras que los puntos B y C muestran un desplazamientos similares de 9,8 (cm) 9,7 (cm) las que equivalen a 2,4 (m).

En la Figura 5-6, se observa el desplazamientos del punto P, donde se observa que el punto de inicio en verde y el punto final en rojo del desplazamiento del punto P. Se advierte que estos puntos se encuentran cercanos el uno del otro esto se repite en las diferentes vistas, lo que nos muestra que para este ensayo en particular la nave regresa a un punto cercano al inicio. Así también se observa un máximo registrado de 8 (cm) que equivalente a 2 (m)

La Figura 5-7 y la Figura 5-8 muestran el movimiento de los puntos para la “vista en planta”. En esta vista se observa la posición inicial de la nave, la cual esta inclinada hacia uno de los ejes. En la Figura 5-2 se observa el punto inicial (verde) y el punto final (rojo) del punto P. Además, se advierte la dirección en que viene el oleaje y es recibido por la nave.

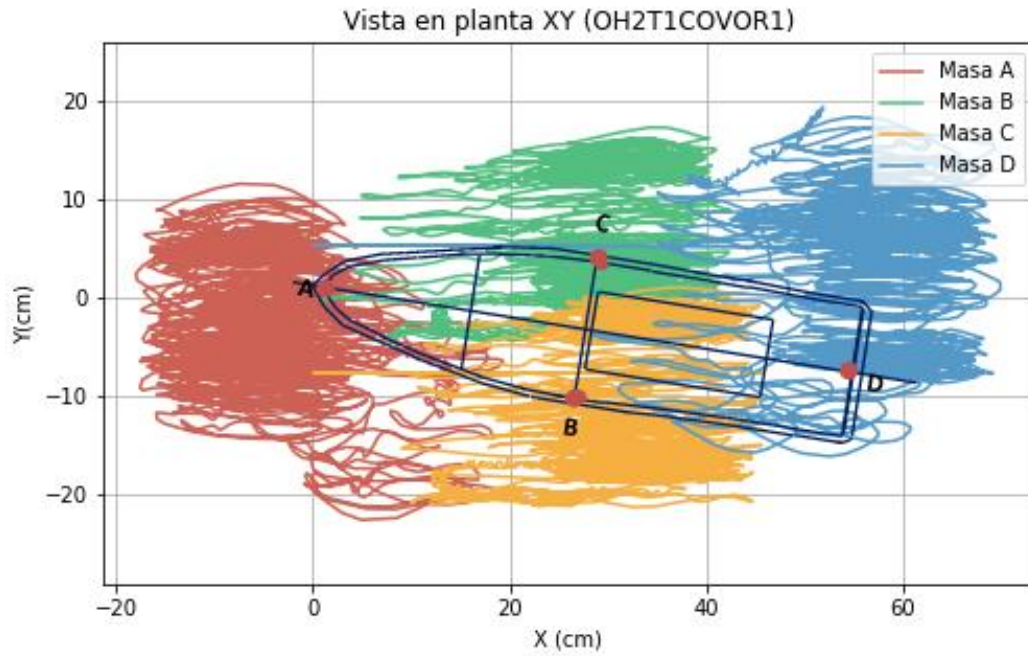


Figura 5-7: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

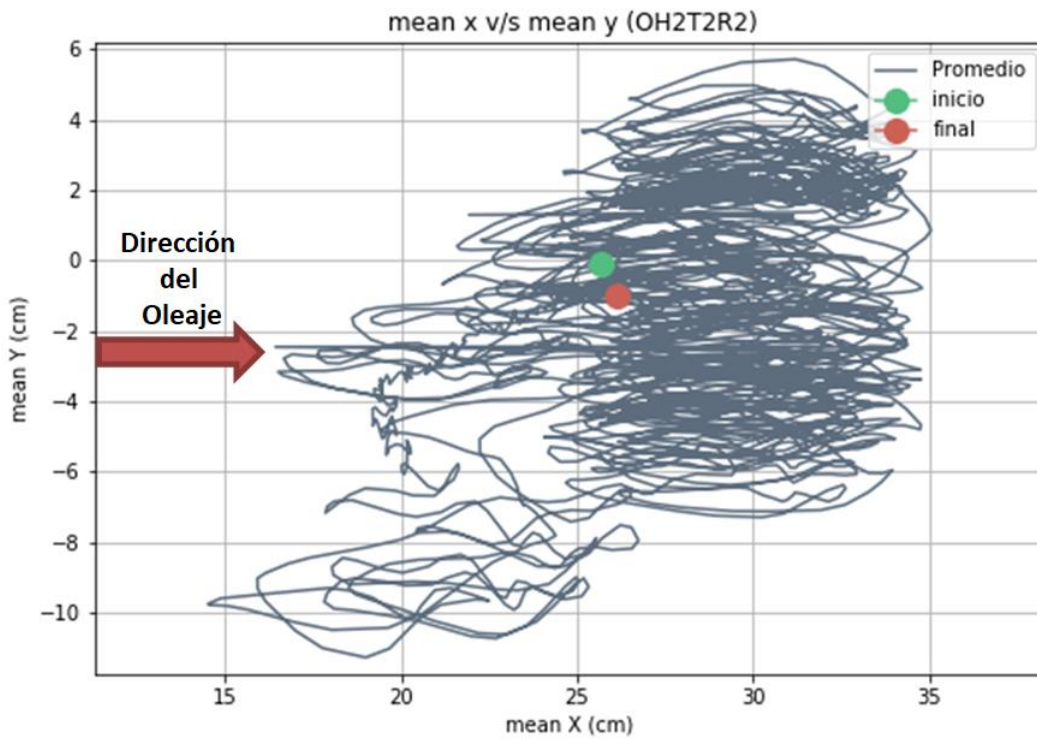


Figura 5-8: Desplazamiento lateral del punto P captado por la vista planta XY (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

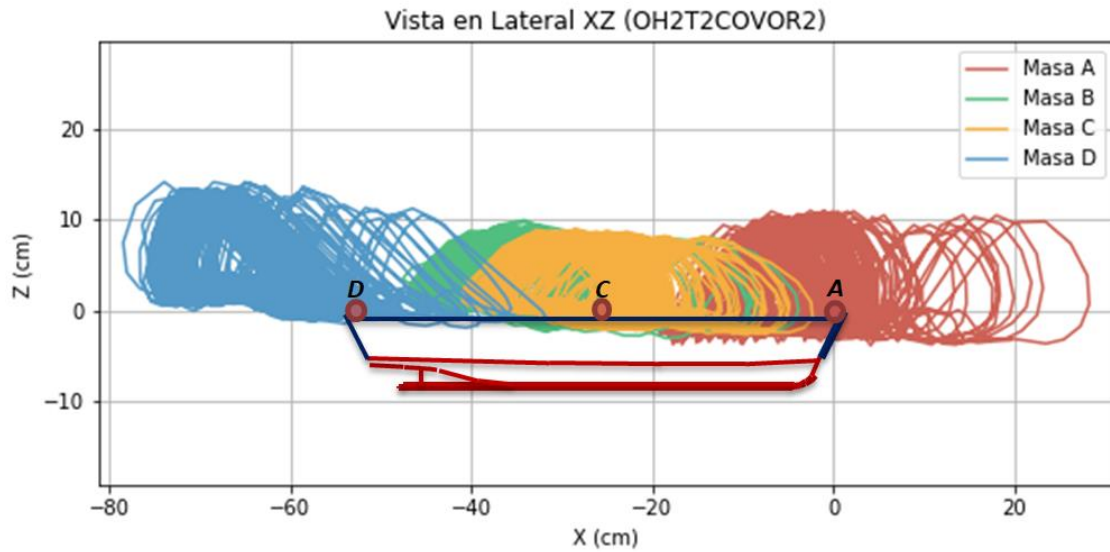


Figura 5-9: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

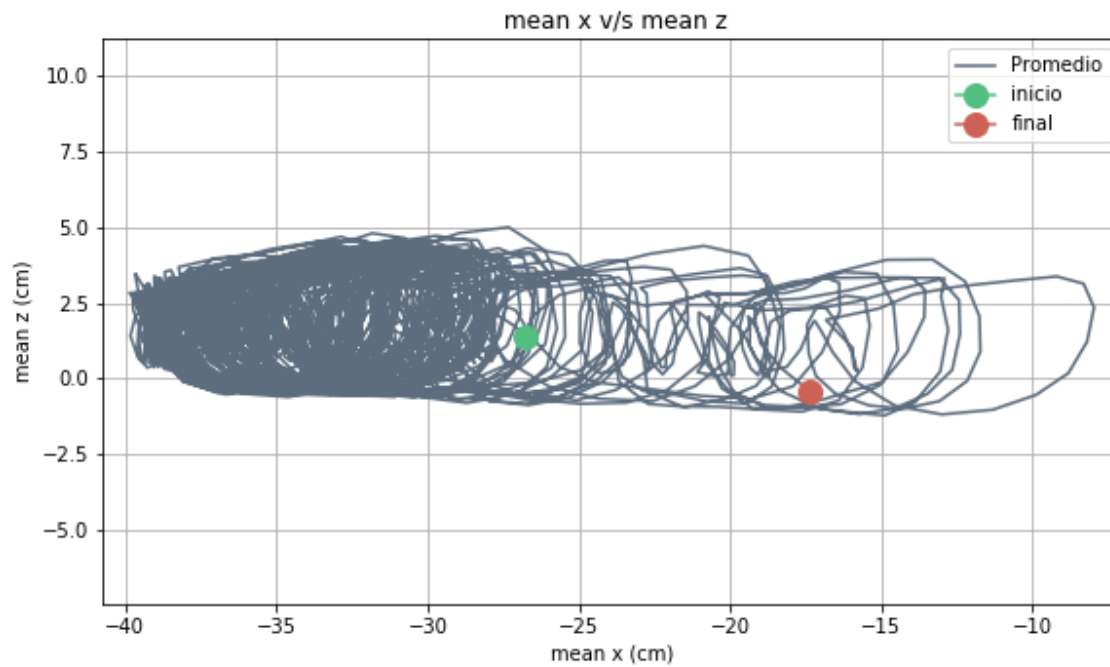


Figura 5-10: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5-9, se observa el desplazamiento de la “vista lateral”. El movimientos de esta vista describe una trayectoria semi-circular en cada uno de los puntos y de igual manera para el punto P (Figura 5-10).

En este ensayo se observó que el punto D cuenta con un desplazamiento máximo en el eje Z de 13 (*cm*) equivalente a 3,2 (*m*), el punto A presento un máximo es de 10,7 (*cm*) que equivale a 2,6 (*cm*) y el punto B y C presentaron máximos de 9,7 y 8,9 (*cm*) que equivalen a 2,4 y 2,1 (*m*) respectivamente.

En la Figura 5-10, se observó el desplazamientos del punto P. Este punto presento un máximo registrado de 8,9 (*cm*) que es equivalente a 2,1 (*m*) cuyo valor fue similar a los puntos B y C. Además en la Figura 5-10, se advirtió que el punto de inicio (verde) y final (rojo) se encuentran alejados en comparación a las otras vistas analizadas.

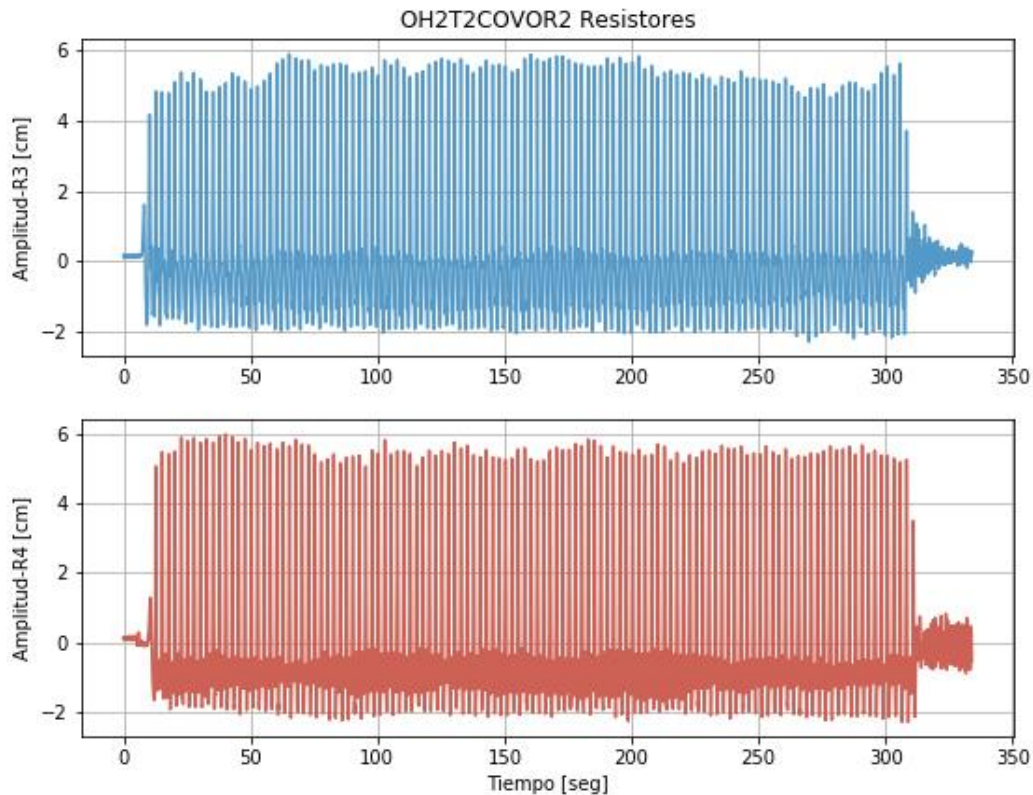


Figura 5-11: Desnivelación obtenida del ensayo OH2T2R2. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5-11, se observan los datos registrados por los resistor R3 y R4, en estos se observaron amplitudes máximas de 5,9 (*cm*) y mínimas de -2,3 (*cm*).

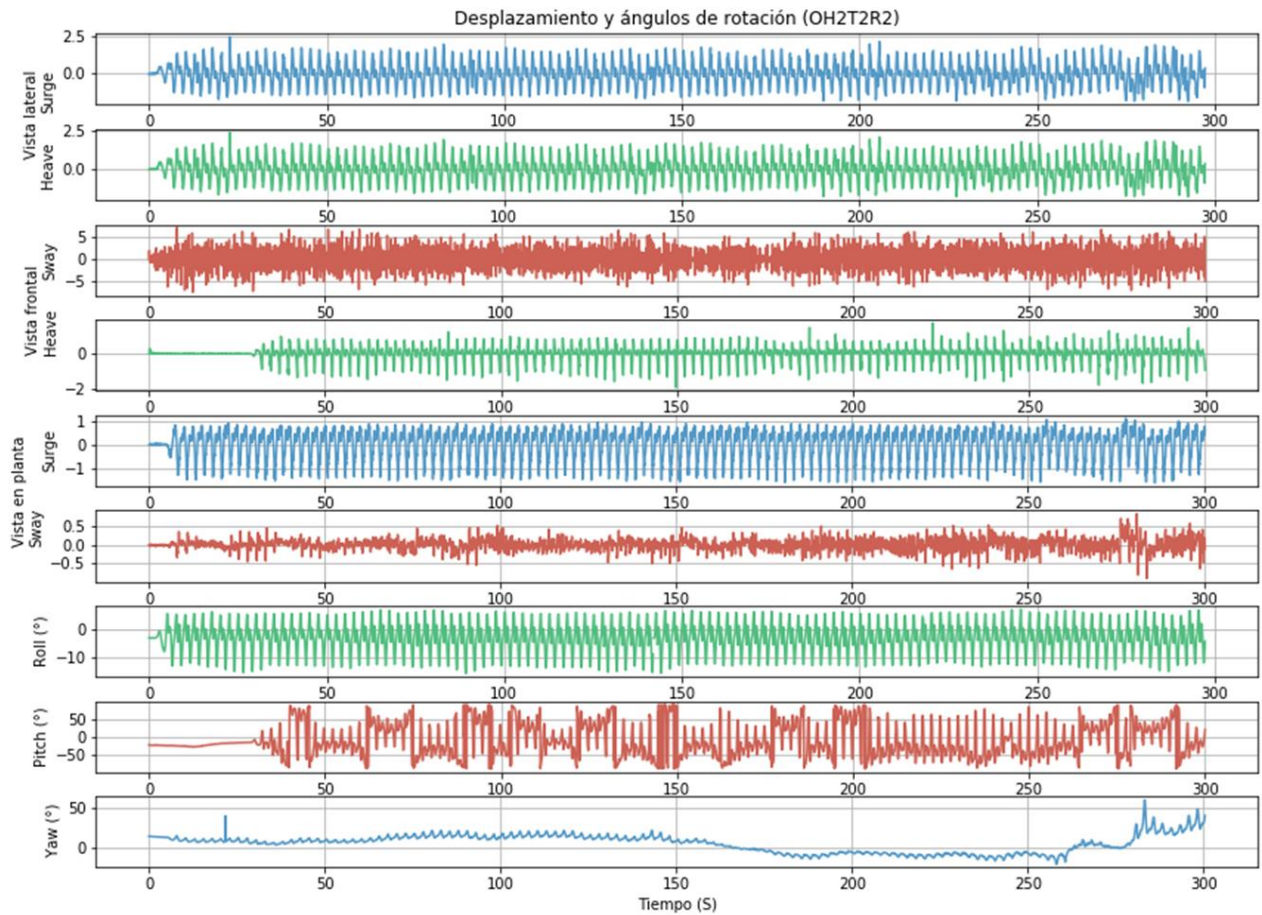


Figura 5-12: Desplazamiento y ángulos de giro de la nave (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5-12, se observa los desplazamientos y los ángulos de giro de la nave. También se observa una cierta regularidad en los datos en los diferentes gráficos. Además, se presentan similitudes entre los movimientos captados en el eje x de la “vista lateral” el cual es similar al movimiento observado en la “vista en planta”. Así también se observa similitudes entre los movimientos en el eje z para las vistas lateral y frontal. Esto se advierte con mayor claridad en los otros casos de menores amplitudes como lo observado en la Figura 8-32 del anexo 8.3.

En la Figura 5-12 se advierte una variación desde el 0° a 10 ° para el ángulo Roll en el eje X. Por otra parte, la variación para el ángulo Pich del eje Y se observa desde los -10° a los 50°. Finalmente, se observa que el ángulo en Yaw del eje Z se encuentra entre los 10° a los 50°. Los resultados de las otras experiencias realizadas en el presente proyecto se encuentran en el anexo 8.3

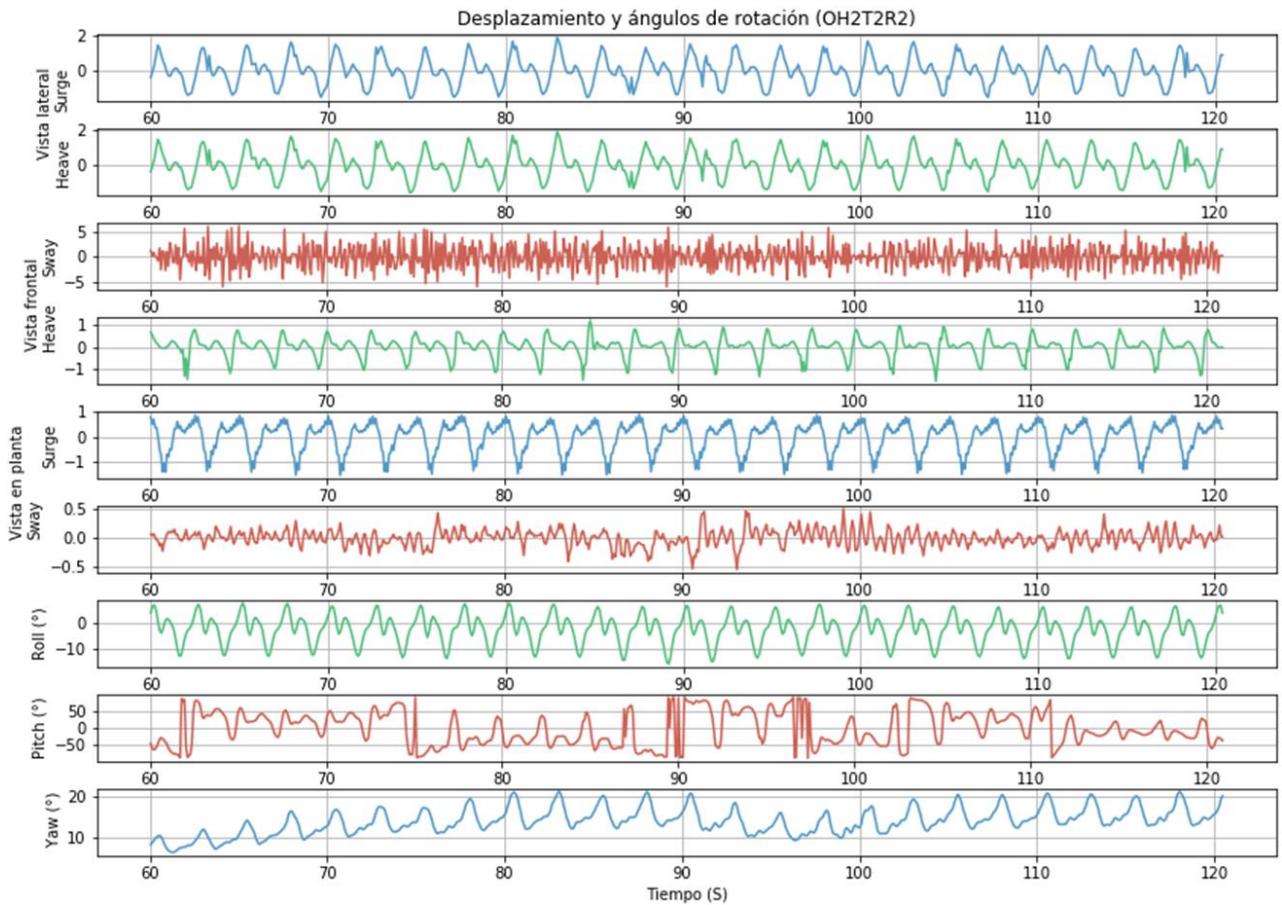


Figura 5-13: Segmento del desplazamiento y ángulos de giro de la nave (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5-13, se presenta un segmento del gráfico visto en la Figura 5-12. El segmento seleccionado va desde el 00:01:00 (*min*) hasta los 00:02:00 (*min*) del registro. Al igual que la imagen anterior se advierte el detalle del desplazamiento y ángulos de rotación en la nave y las similitudes entre cada uno de ellos.

En este segmento del registro se observó una variación desde los 10° a los 20° para el ángulo Yaw del eje Z, la cual es menor en comparación a lo observado en la Figura 5-12. Por otra parte, el ángulo formado en el eje X o Roll y el ángulo Pich del eje Y mostraron un comportamiento similar a lo observado en la Figura 5-12 variando de 0° a 10° y -10° a los 50° respectivamente.

5.1.2 CORRELACIÓN LINEAL

Se realizó una comparación de los datos obtenidos en la experiencia del laboratorio, mediante una correlación lineal con el coeficiente de Pearson. Se emplearon los datos adquiridos por las cámaras en los puntos A, B, C, D y P, y el desplazamiento vertical de la nave menor con respecto de los datos adquiridos por los dos resistores emplazados en el canal de olas. Para esto se empleó el caso OH2T2R2. En la Figura 5-14, se presentan los resultados de las correlaciones para el caso analizado, las otras experiencias se encuentran en el anexo 8.3.

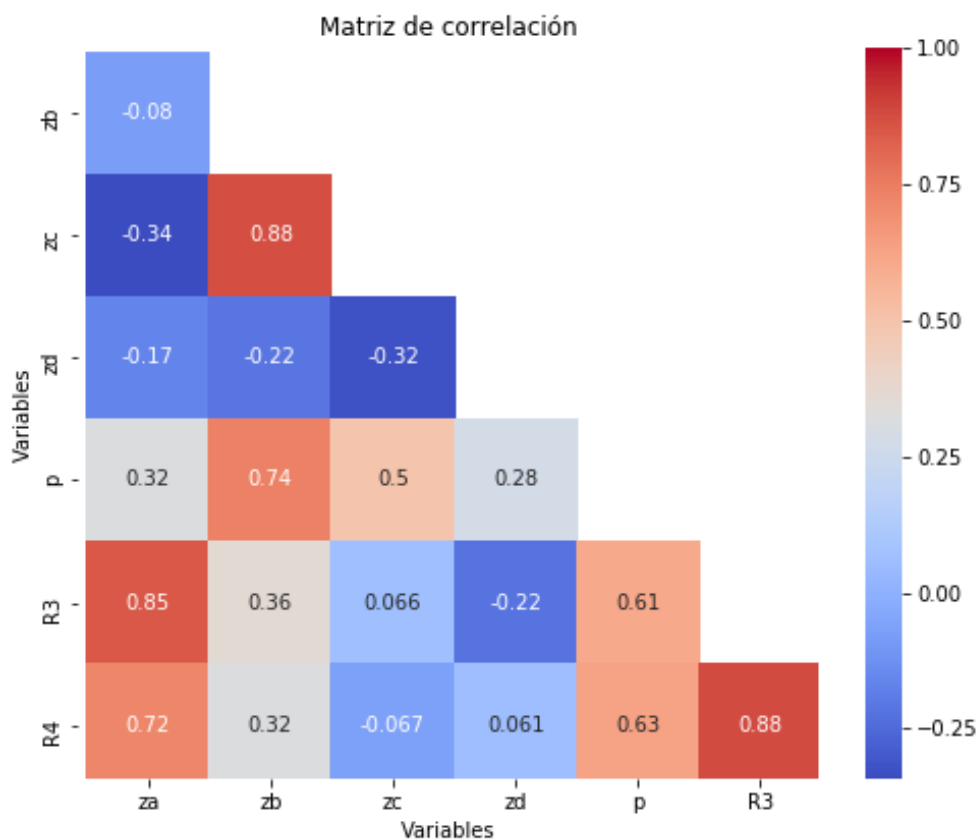


Figura 5-14: Matriz de correlación vista lateral (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5-14, se observan los coeficientes de correlación para las diferentes variables analizadas. Las variables que se observan en las Figura 5-14 y Figura 5-15 (ZA, ZB, ZC, ZD), representan los movimientos verticales en el eje Z de la nave, mientras que R3 y R4 son los datos obtenidos de los resistores emplazados en el canal.

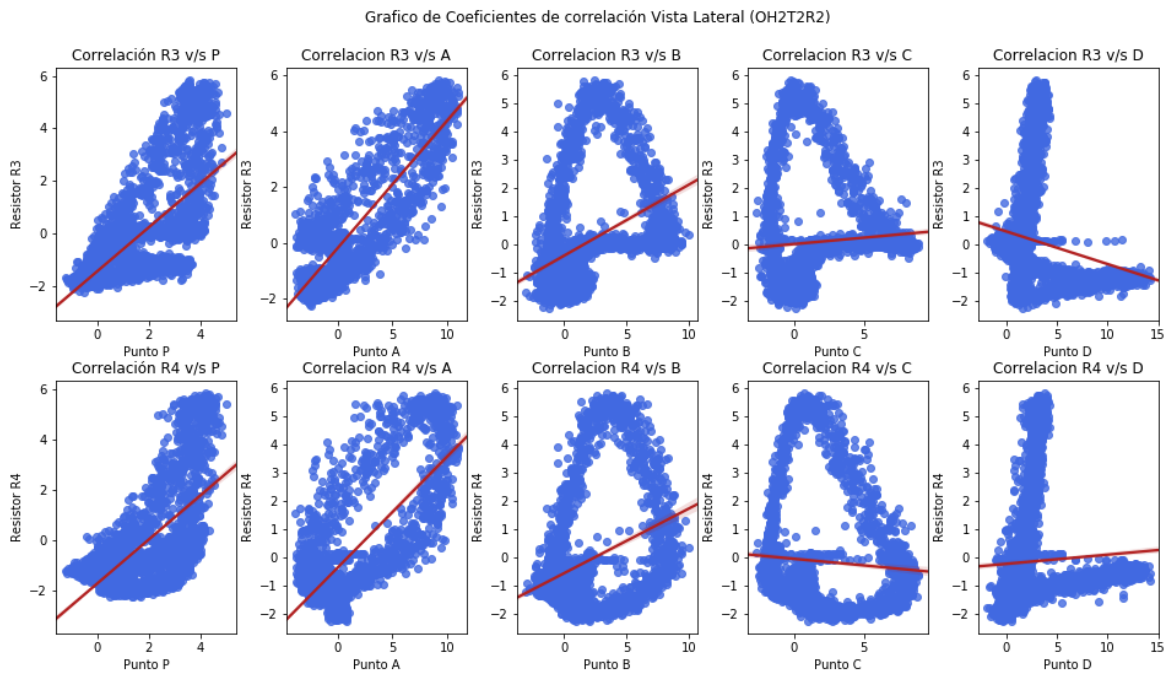


Figura 5-15: Gráficos de correlación para la vista lateral (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

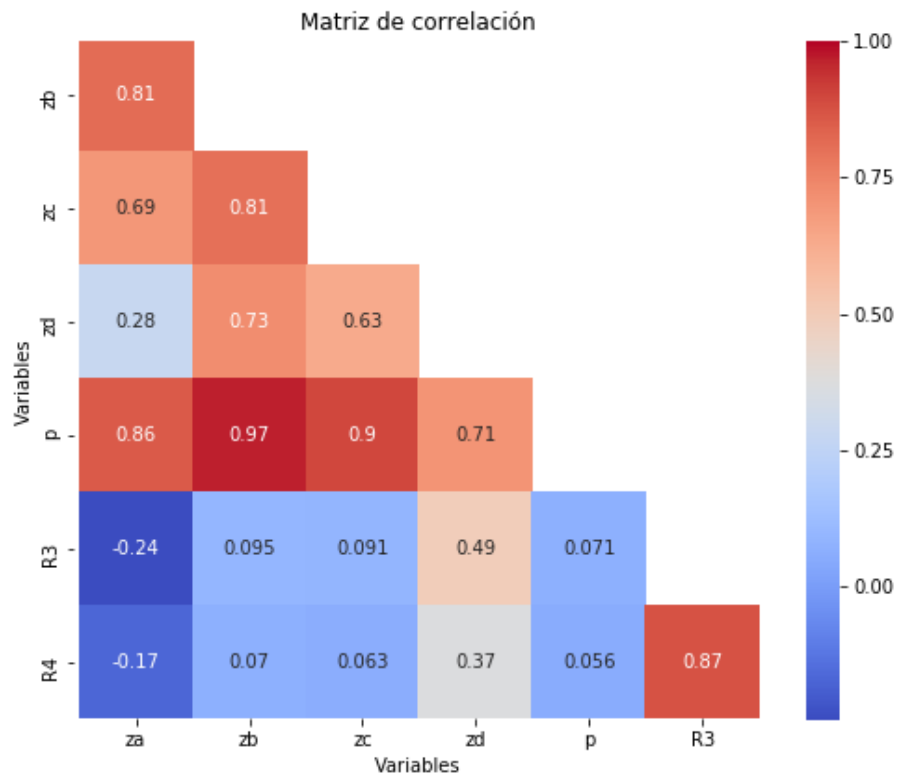


Figura 5-16: Matriz de correlación vista frontal (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia.)

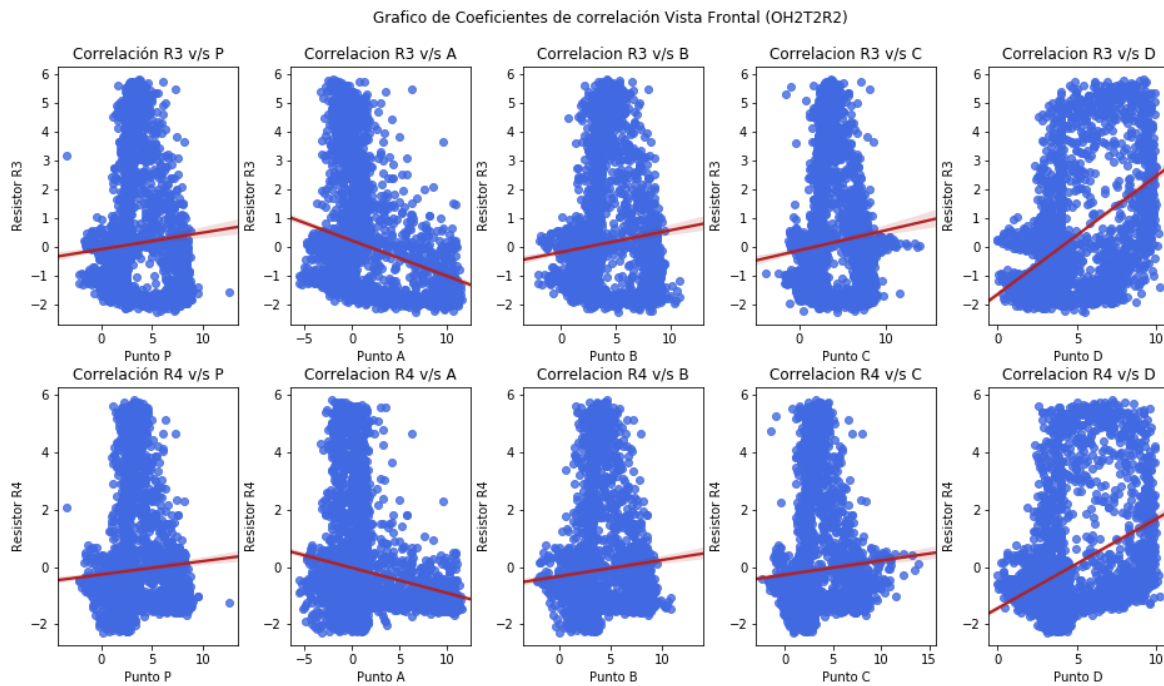


Figura 5-17: Gráficos de correlación vista frontal (Ensayo OH2T2R2). (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 5-14 , se advierte una alta correlación entre estos puntos individuales A y P que varía entre 0,85 y los 0,63 respectivamente. También se observa que los coeficientes de correlación son positivos, lo que indica que ambas variables varían en el mismo sentido. Esto se puede ver más claramente en los gráficos de correlación presentados en la Figura 5-15. En la Figura 5-16, se advierten los resultados obtenidos a partir de la “vista lateral”; se observa una baja correlación entre los puntos con respecto a los datos obtenidos por los resistores, lo que también se puede observar en la Figura 5-17.

A continuación, se observa los datos obtenidos en otros ensayos realizados:

En la Figura 8-18, se observan los resultados de los coeficientes de correlación del ensayo OH1T1R3 en la vista lateral. Se advierte una alta correlación en la mayoría de las variables, sobre todo en los puntos B y C donde los puntos tienen gran similitud con los datos obtenidos en el resistor R3. Los gráficos asociados a estos datos se encuentran en el anexo 8.3.

En la Figura 8-32, se observan los resultados de los coeficientes de correlación del ensayo OH1T2R1 en la vista lateral. Se advierte una alta correlación en la mayoría de las variables con respecto de los datos obtenidos por el resistor R3 y con las variables ubicadas en el centro de la nave B, C y P. (anexo 8.3)

Los resultados de los coeficientes de correlación obtenidos en el ensayo OH1T2R3 de la vista frontal se presentan en la Figura 8-48. Se observa que los coeficientes bajan en

comparación a la vista lateral. Además se observa que los coeficientes más altos son en las variables B, C y P, esto es similar en la mayoría de los casos analizados. (Anexo 8.3)

En la Figura 8-64, se advierte los resultados de los coeficientes de correlación del ensayo OH2T2R1 de la vista frontal. Al igual que el ensayo OH1T2R3 y en OH2T2R2, se observa una disminución en los coeficientes de correlación para la vista frontal. Aunque se observa que en este caso la variable con una mayor correlación es el punto A, mientras que los puntos B, C y P mantienen una similitud en sus valores, esto se mantiene en la mayoría de los ensayos. (Anexo 8.3)

De lo observado en las Figura 8-18 a la Figura 8-64 se desprende:

En la mayoría de los ensayos analizados y los vistos en el anexo 8.3 se observó que los puntos B, C y P muestran coeficientes de correlaciones similares, esto se debe a que estos puntos muestran un movimiento similar en toda su trayectoria. Esto implica que la embarcación tiene un movimiento más uniforme, el cual es acorde con lo observado en los casos realizados en el laboratorio.

Se observó que los resultados obtenidos en las correlaciones entre los datos de los resistores R3 y R4 y los puntos analizados bajan considerablemente cuando la altura producida en el canal aumenta. Mientras que los coeficientes de correlaciones obtenidos en casos de menor altura y menor periodo muestran valores más elevados. Por lo tanto, la altura es un factor importante al momento de seguir la embarcación siendo más fácil realizar el seguimiento de la nave con una altura menor y un periodo más bajo que en los casos de mayores magnitudes.

También se advierte que los resultados de las correlaciones para la vista laterales en la mayoría de los casos son mayores que la vista frontal donde disminuye notablemente los coeficientes. Los resultados de los otros ensayos se encuentran en el anexo 8.3

6 CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas del presente proyecto se han separado por temáticas, estas se presentan continuación:

Respecto a las herramientas de modelado y construcción en 3D se puede concluir que:

- Para efectuar el diseño de estos modelos es importante contar con los planos y conocimientos prácticos de las características de los objetos que se desean diseñar. Esto con el propósito de generar un acercamiento del modelo al prototipo.
- Para desarrollar nuevas técnicas de modelación en 3D, se debe contar con el material para ser empleadas y estar dispuesto al ensayo y al error en su confección.
- Las herramientas de diseño y modelación en 3D empleadas en el presente proyecto (Fusion 360 y AutoCAD), son muy útiles para el desarrollo de modelos físicos de diferentes fenómenos.
- Se debe tener en cuenta que las impresoras 3D son propensas a tener fallas en la producción de los elementos, sobre todo en piezas delgadas, las cuales pueden sufrir deformaciones producto del calor al que es sometido el material. Esto puede producir complicación en el ensamblaje de sus partes.
- También, se tiene que considerar a la hora de emplear esta herramienta el alto tiempo de impresión de cada pieza, donde el tiempo de impresión depende del tamaño del elemento.

Respecto a las técnicas empleadas para llevar a cabo el análisis de vídeo y procesamiento de los datos se puede concluir que:

- Las técnicas de medición mediante cámaras de videos utilizadas, pueden ser optimizadas con el propósito de mejorar la exactitud de las mediciones, ya sea efectuando correcciones en la perspectiva de las diferentes vistas o empleando otras herramientas (giroscopios, acelerómetros entre otros) para comparar el desplazamiento y tamaño de los objetos.
- El software Tracker es propenso a presentar errores en el seguimiento de la nave menor producto de la superposición de los puntos en algunos momentos de la grabación.
- Las técnicas empleadas no permiten validar los movimientos horizontales que realiza la nave, ya que no se tienen datos de algún otro instrumento para comparar.
- Las técnicas de procesamiento pueden ser perfeccionadas con el propósito de mejorar el sistema de medición, ya sea para su automatización y coordinación de las cámaras como para mejorar el seguimiento de los puntos analizados.
- El análisis de los datos puede ser profundizado y complementado realizando otros tipos de estudios como lo son las técnicas de análisis espectral o de tiempo-frecuencia. Esto podría permitir un análisis más completo de los ensayos realizados, es por esto, que se recomienda en futuros ensayos el uso de estas técnicas.

Respecto a las experiencias en el laboratorio de modelación física se puede concluir que:

- Existen consideraciones que podrían ayudar a ser más exactos en los ensayos como son la distribución de las cargas dentro de la nave, el tipo de amarre de la nave, entre otros.
- Los casos modelados solo contemplan el oleaje. Sería interesante ensayar con otros forzantes (viento, corriente o combinaciones de estos) y con diferentes métodos de amarre para una nave con el propósito de observar el comportamiento de la nave.
- Los ensayos realizados en el presente proyecto como el sistema de medición son de bajo costo y accesibles para la comunidad estudiantil. Esto puede permitir el uso de este sistema en otros casos de medición similares o parte de este para nuevas experiencias prácticas.

7 REFERENCIAS

- Armadores, Asociacion Nacional de Chile. (2006). *Historia de la marina mercante en Chile*.
- Clark, I. (2005). *Ship Dynamics for Mariners*. The Nautical Institute.
- Daza, L. R. (2017). *Memoria para obtener el título profesional de Ingeniero Civil Oceánico "Sistema de percepción remota de oleaje, mediante el uso de una cámara de video"*. Valparaíso.
- DOP. (2016). *Glosario de la infraestructura costera y portuaria*.
- Douglas Brown And Mathworks. (2005). *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. Recuperado el junio de 2019, de Tracker Video Analysis and Modeling Tool: <https://physlets.org/tracker/>
- Facultad de Ingeniería. (2018). *Memoria Laboratorio-Modelación Física*. Valparaíso.
- Fernández-Alarcón, J. M. (2004). *Ensayo de estabilidad y de funcionalidad en obras de abrigo Diques y verticales*. Madrid.
- Fossen, T. (1994). *Guidance and control of Ocean Vehicles*. Wiley.
- González, F. (2004). *Modelación matemáticos para el control de gobierno de buques*. Real.
- Hanson, R., & Brown, D. (2019). *Tracker Video analysis*. Recuperado el 1 de Octubre de 2019, de Tracker Video analysis: <https://physlets.org/tracker/>
- Johnson, T. G. (1982). *Introduction to Naval Architecture*.
- Kamphuis, W. (2000). *Introduction to Coastal Engineering and Management*. world Scientific.
- NFEC. (1981). *Naval Facilities Engineering Command*.
- Nucci, G. L. (2009). *Diccionario nautico*.
- Reif-Acherman, S. (2014). *Juguetes como instrumentos de enseñanza en ingeniería los casos del péndulo de Newton y giroscopio*. Cali Colombia.
- ROM, N. E. (2007). *Recomendación de Obras Maritimas y Portuarias ROM 2.1*.

- Serret, R. G. (2003). *LOS MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA Y SIMULACIONES DE MANIOBRAS DE BUQUES. HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO PORTUARIO*. España.
- Serret, R. G. (2004). *Estudio de puertos y costas técnicas avanzadas*. Madrid.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México.
- Vinuesa, P. (2016). *Correlación: teoría y práctica*.
- Wiley, J. (1978). *Dynamic of marine vehicles*.
- Winckler, P. (2019). *Modelación Hidráulica*. Valparaiso.

8 ANEXOS

8.1 PLANOS DE LA NAVE

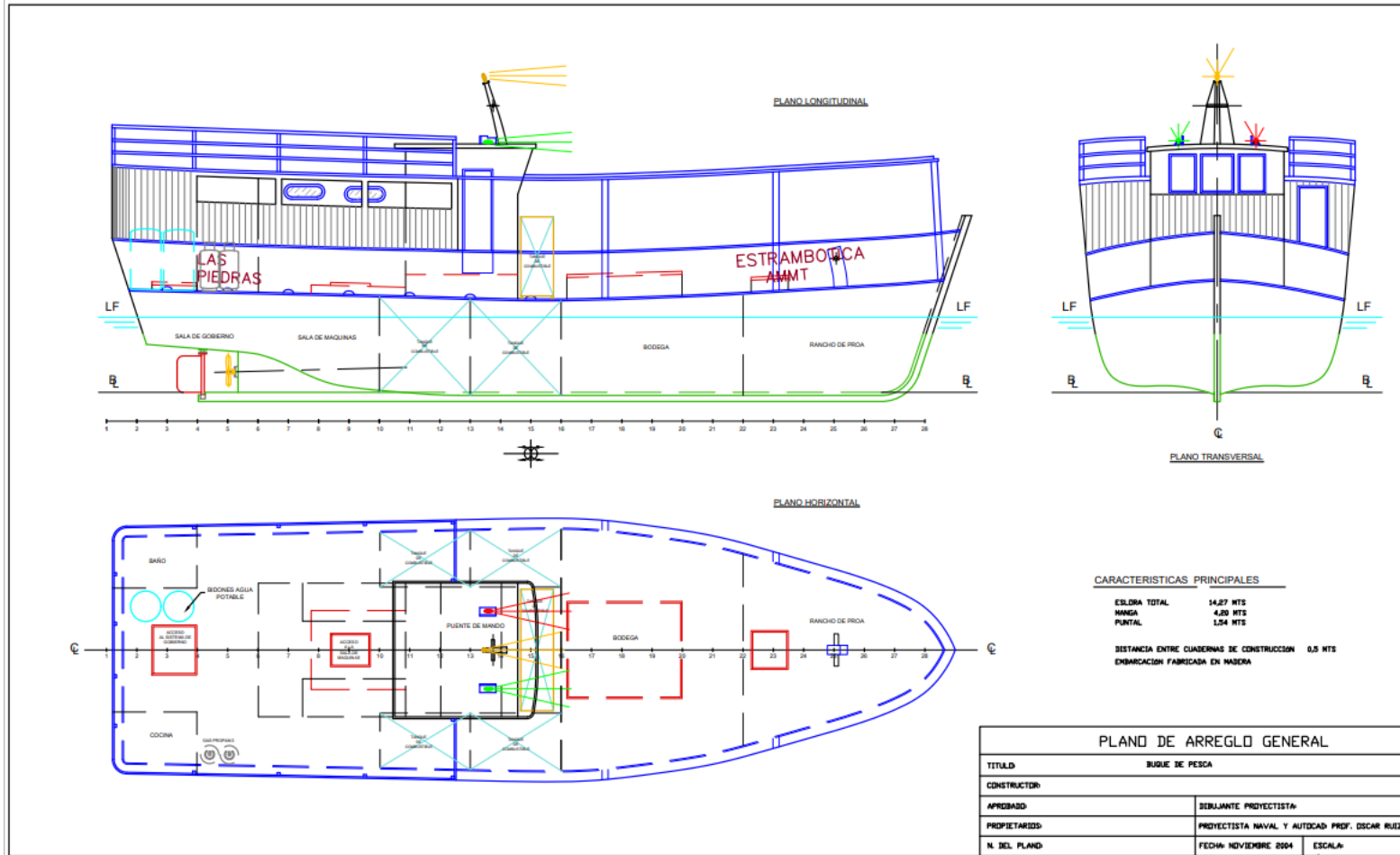


Figura 8-1: Planos generales de la nave menor

(Fuente: BILOCAD.)

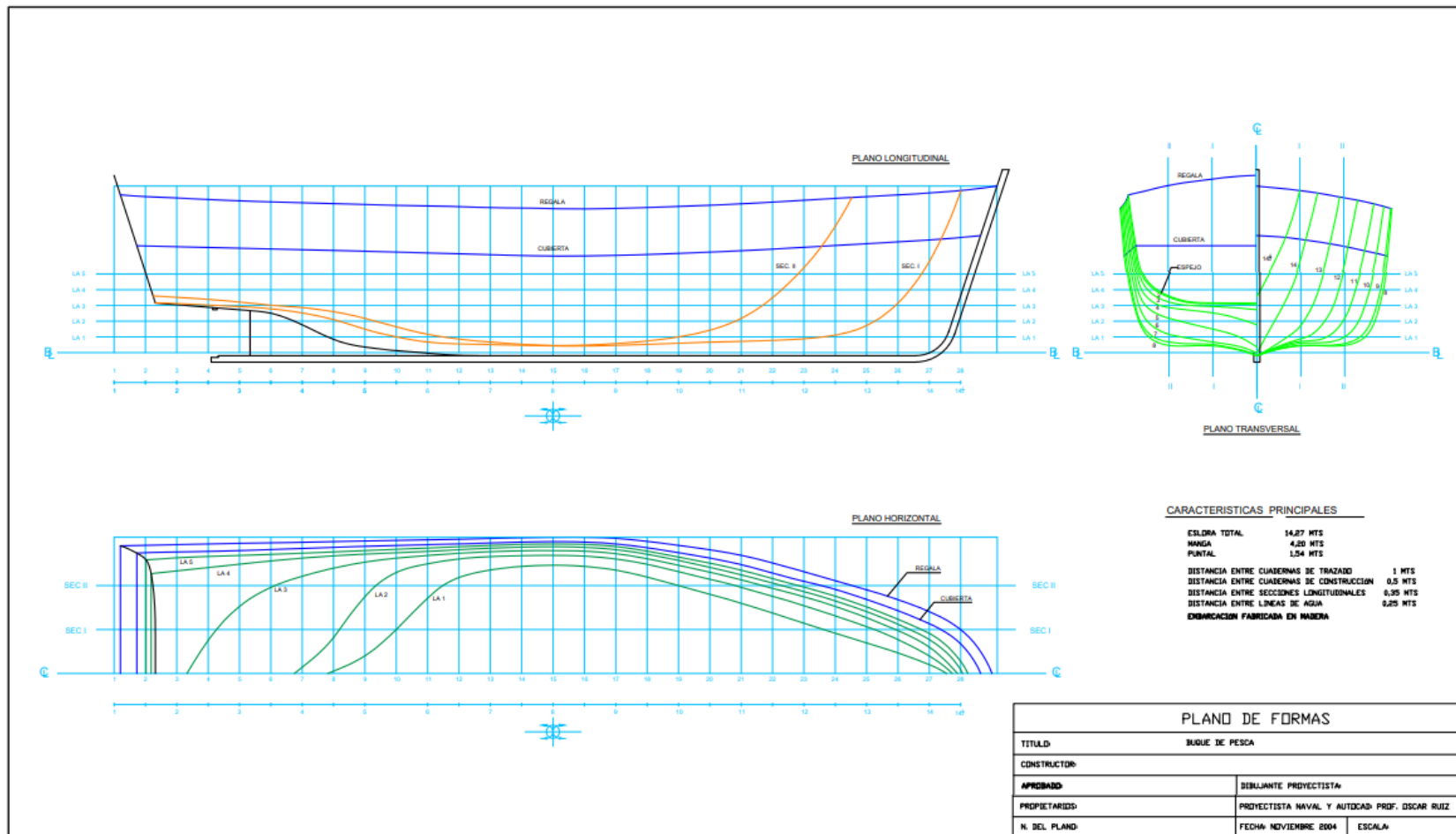


Figura 8-2: Planos longitudinales, horizontales y transversales de la nave menor

(Fuente: BILOCAD)

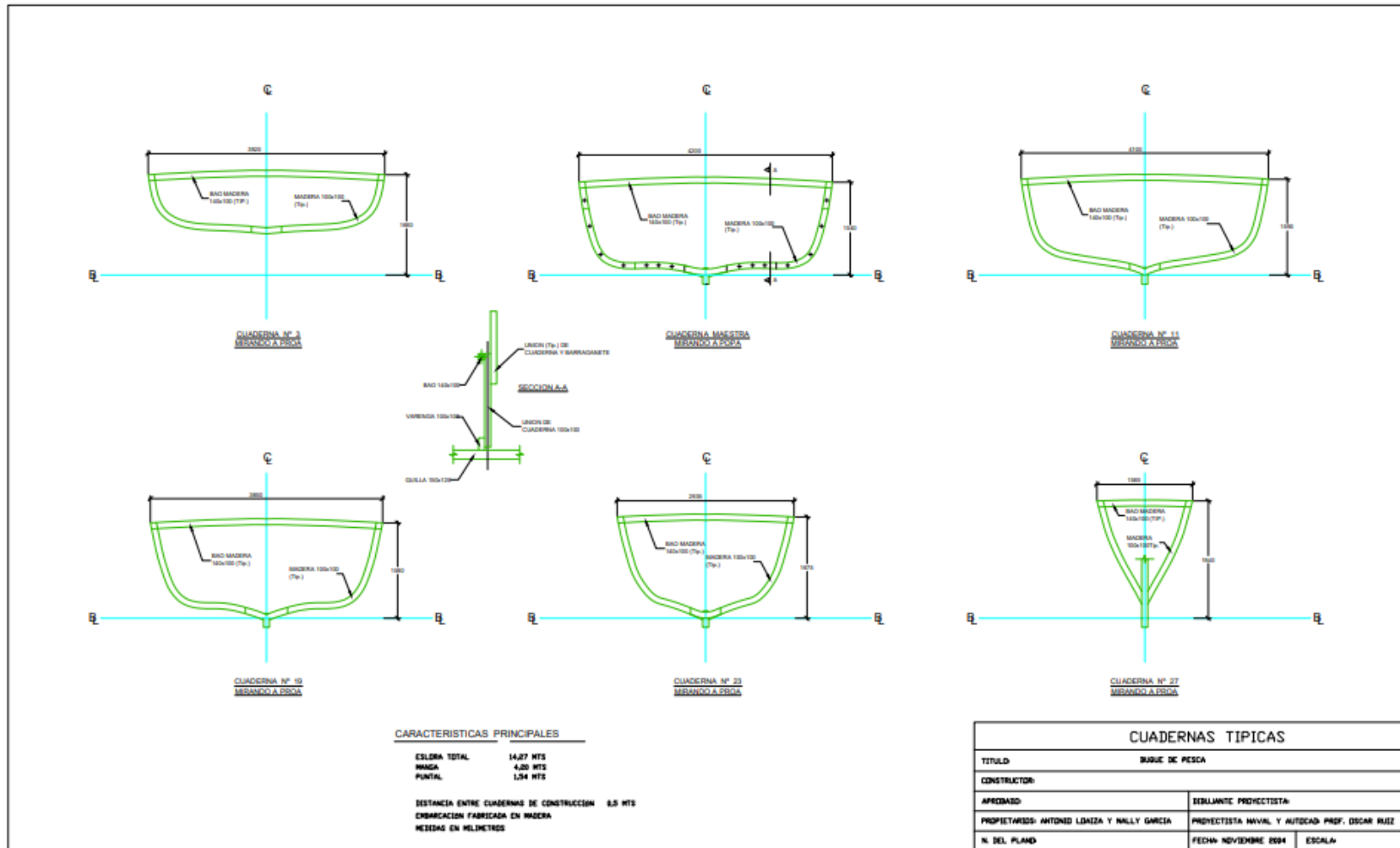


Figura 8-3: Planos cuadernas de la nave menor fuente: Bilocad

8.2 TABLAS DE LAS LÍNEAS DE AGUA DE LA NAVE

Tabla 8-1: Cálculo línea de agua N°1

LA 1					
Estación	Línea de agua	Multiplicador	Área (m ²)	Brazo adrizante	
0	0,14	0,5	0,07	4,00	0,28
1	0,49	1	0,49	3,00	1,47
2	0,80	1	0,80	2,00	1,60
3	1,12	1	1,12	1,00	1,12
4	1,40	1	1,40	0,00	0,00
5	1,65	1	1,65	-1,00	-1,65
6	1,72	1	1,72	-2,00	-3,45
7	1,65	1	1,65	-3,00	-4,94
8	1,20	1	1,20	-4,00	-4,80
9	0,28	0,5	0,14	-5,00	-0,70
		Total	10,23		-11,06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-2: Cálculo línea de agua N°2

LA 2					
Estación	Línea de agua	Multiplicador	Área (m ²)	Brazo adrizante	
0	0,28	0,5	0,14	5	0,70
1	0,75	1	0,75	4	2,99
2	1,08	1	1,08	3	3,24
3	1,37	1	1,37	2	2,74
4	1,62	1	1,62	1	1,62
5	1,82	1	1,82	0	0,00
6	1,88	1	1,88	-1	-1,88
7	1,86	1	1,86	-2	-3,72
8	1,75	1	1,75	-3	-5,24
9	1,22	1	1,22	-4	-4,88
10	0,10	0,5	0,05	-5	-0,24
		Total	13,54		-4,66

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-3: Cálculo línea de agua N°3

LA 3					
Estación	Línea de agua	Multiplicador	Área (m ²)	Brazo adrizante	
0	0,42	0,5	0,21	5	1,05
1	0,89	1	0,89	4	3,56
2	1,22	1	1,22	3	3,67
3	1,49	1	1,49	2	2,98
4	1,72	1	1,72	1	1,72
5	1,90	1	1,90	0	0,00
6	1,96	1	1,96	-1	-1,96
7	1,94	1	1,94	-2	-3,88
8	1,88	1	1,88	-3	-5,64
9	1,77	1	1,77	-4	-7,09
10	1,55	1	1,55	-5	-7,74
11	1,06	0,5	0,53	-6	-3,18
		Total	17,06		-18,62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-4: Cálculo línea de agua N°4

LA 4					
Estación	Línea de agua	Multiplicador	Área (m ²)	Brazo adrizante	
0	0,54	0,5	0,27	6	1,62
1	0,99	1	0,99	5	4,93
2	1,30	1	1,30	4	5,22
3	1,57	1	1,57	3	4,71
4	1,80	1	1,80	2	3,60
5	1,97	1	1,97	1	1,97
6	2,02	1	2,02	0	0,00
7	2,00	1	2,00	-1	-2,00
8	1,94	1	1,94	-2	-3,89
9	1,90	1	1,90	-3	-5,70
10	1,84	1	1,84	-4	-7,35
11	1,74	1	1,74	-5	-8,70
12	1,63	0,5	0,82	-6	-4,89
		Total	20,15		-10,47

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-5: Cálculo línea de agua N°5

LA 5					
Estación	Línea de agua	Multiplicador	Área (m ²)	Brazo adrizante	
0	0,64	0,5	0,32	6	1,92
1	1,06	1	1,06	5	5,31
2	1,38	1	1,38	4	5,50
3	1,65	1	1,65	3	4,94
4	1,86	1	1,86	2	3,71
5	2,02	1	2,02	1	2,02
6	2,06	1	2,06	0	0,00
7	2,03	1	2,03	-1	-2,03
8	2,00	1	2,00	-2	-3,99
9	1,96	1	1,96	-3	-5,87
10	1,91	1	1,91	-4	-7,66
11	1,88	1	1,88	-5	-9,40
12	1,84	0,5	0,92	-6	-5,52
Total			21,03		-11,07

(Fuente: Elaboración propia.)

Tabla 8-6: Cálculo línea de agua

Estación	Área (m ²)	Multiplicador	FV	FM
LA1	20,47	0,5	10,23	-22,13
LA2	27,08	1	27,08	-9,31
LA3	34,13	1	34,13	-37,24
LA4	40,31	1	40,31	-20,94
LA5	42,07	0,5	21,03	-22,13
Total			33,19	-111,75

(Fuente: Elaboración propia.)

8.3 DATOS DEL LABORATORIO

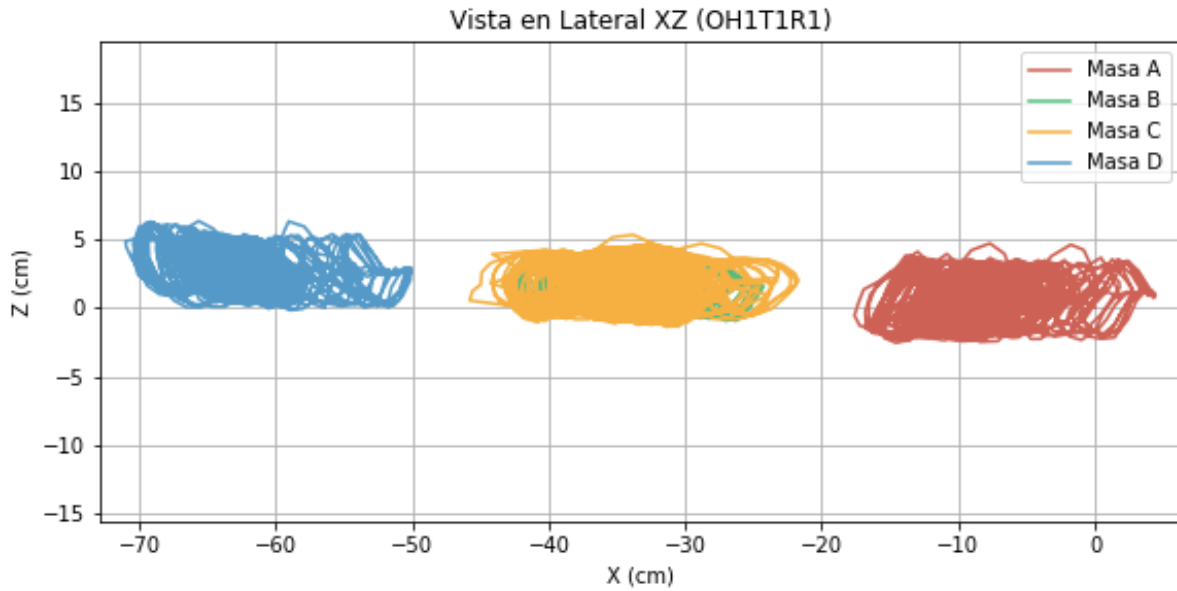


Figura 8-4: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T1R1. (Fuente: Elaboración propia.)

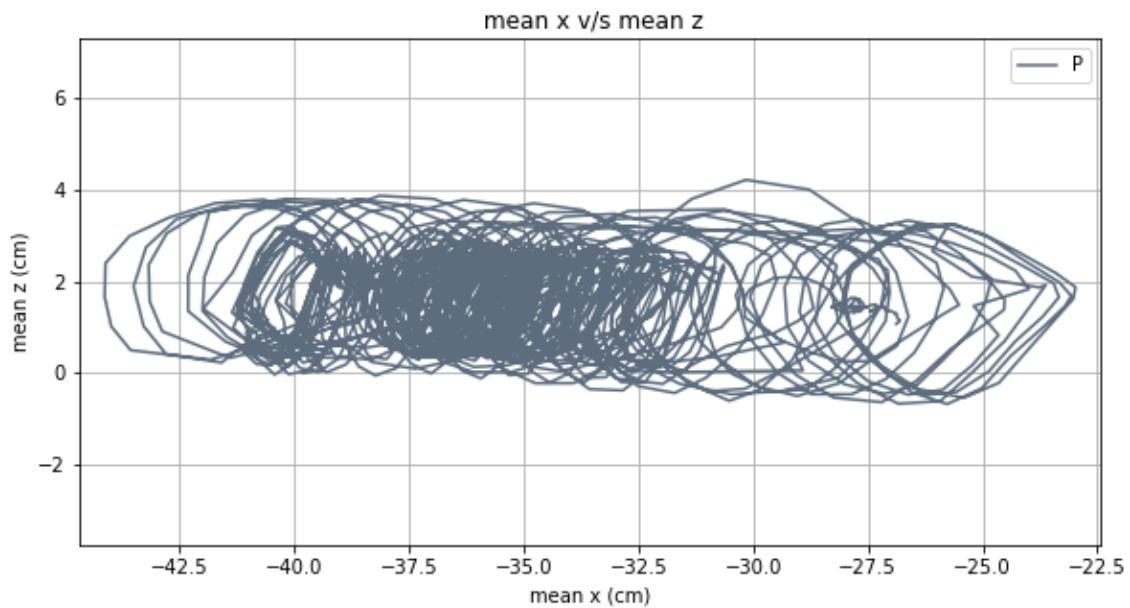


Figura 8-5: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R1). (Fuente: Elaboración propia.)

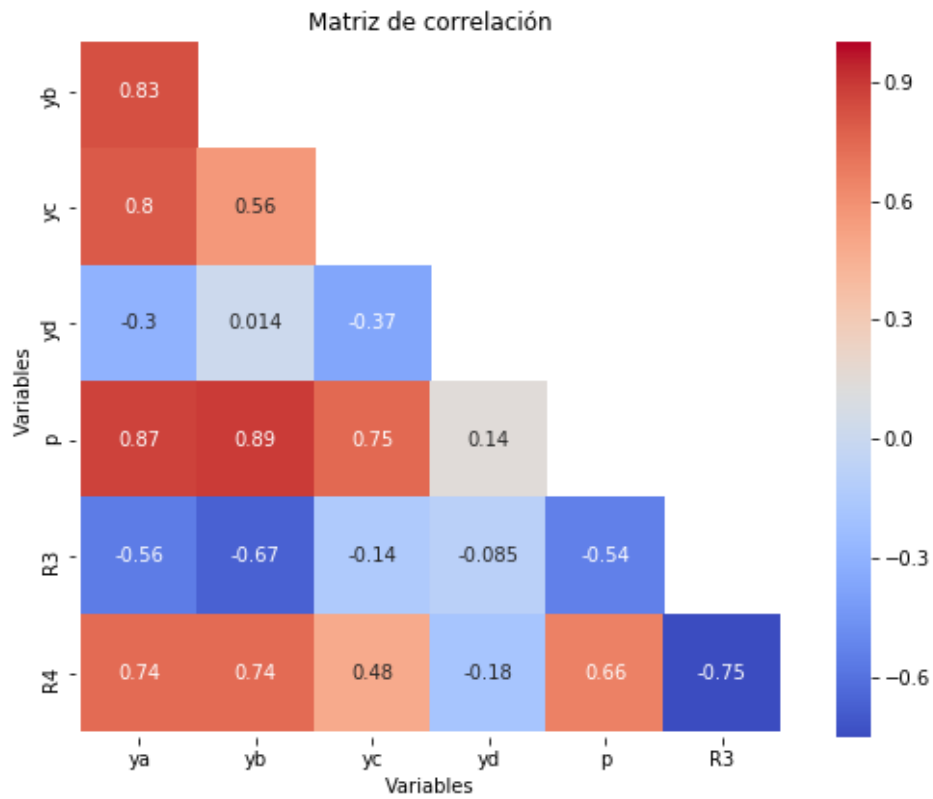


Figura 8-6: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R1). (Fuente: Elaboración propia.)

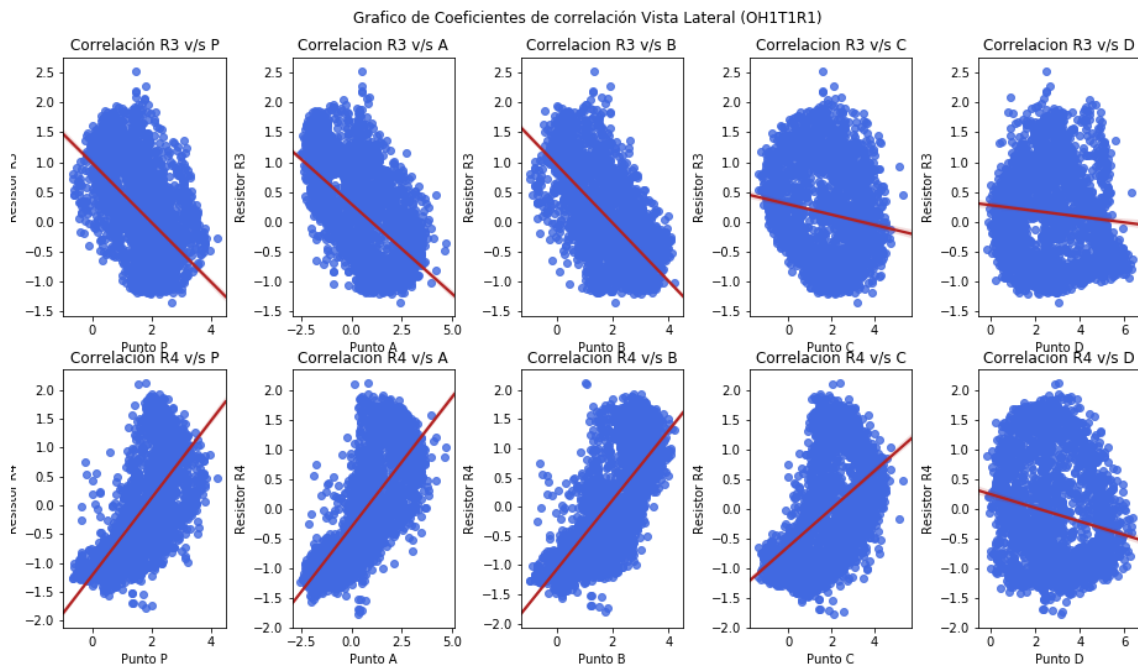


Figura 8-7: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R1). (Fuente: Elaboración propia.)

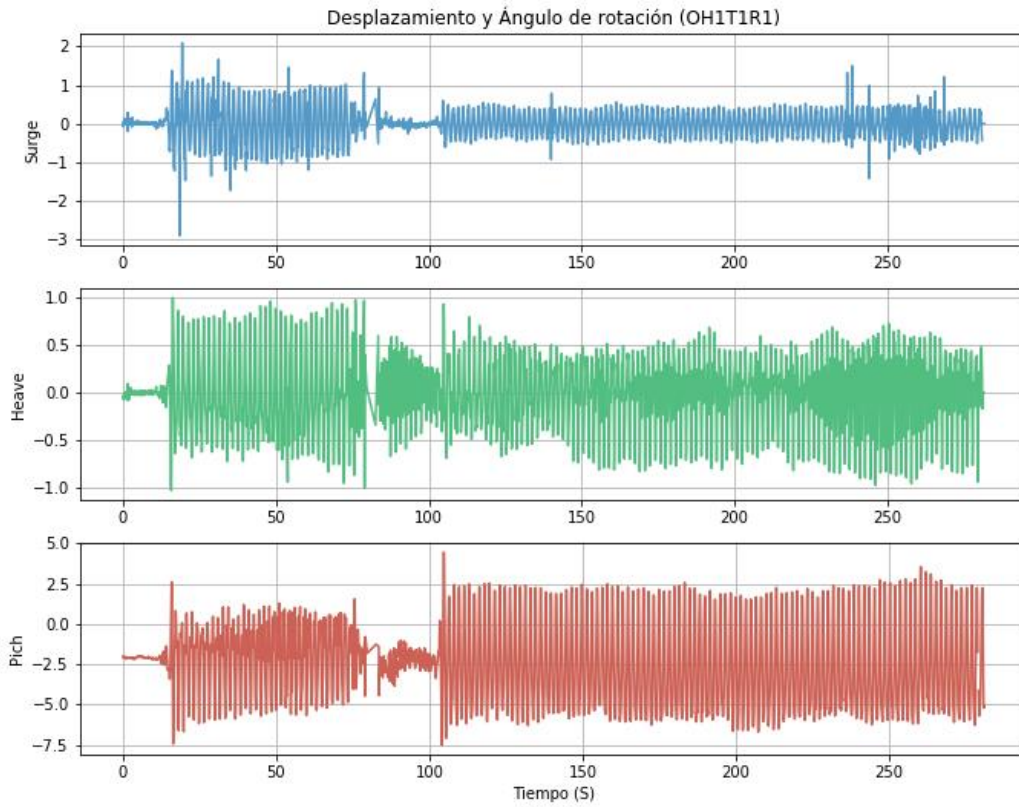


Figura 8-8: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R1). (Fuente: Elaboración propia.)

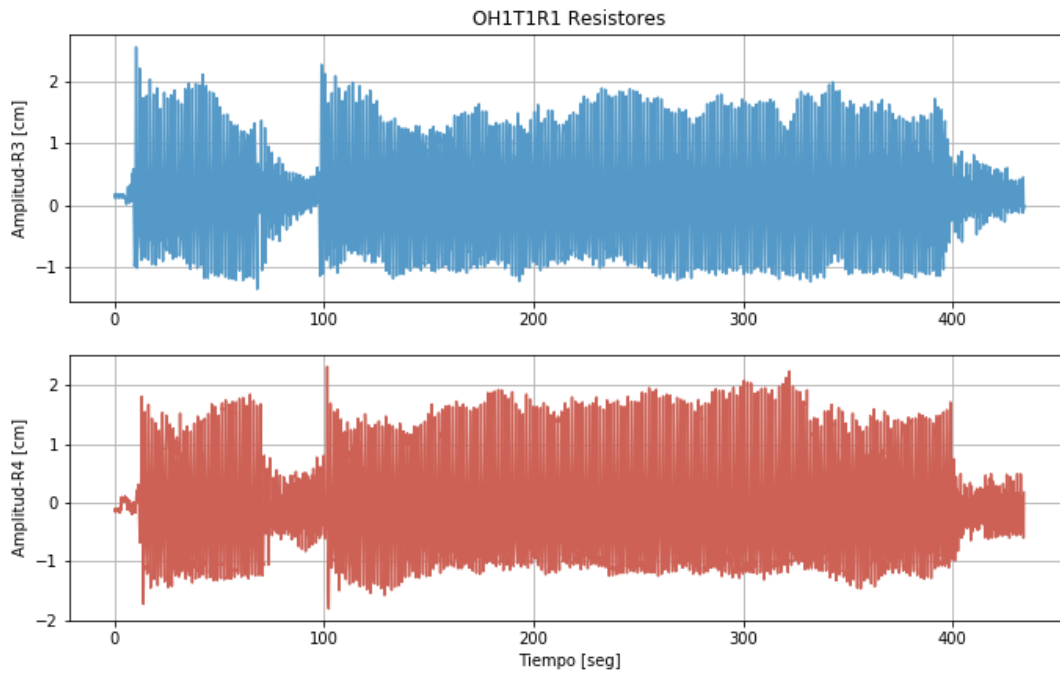


Figura 8-9: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R1) (Fuente: Elaboración propia.)

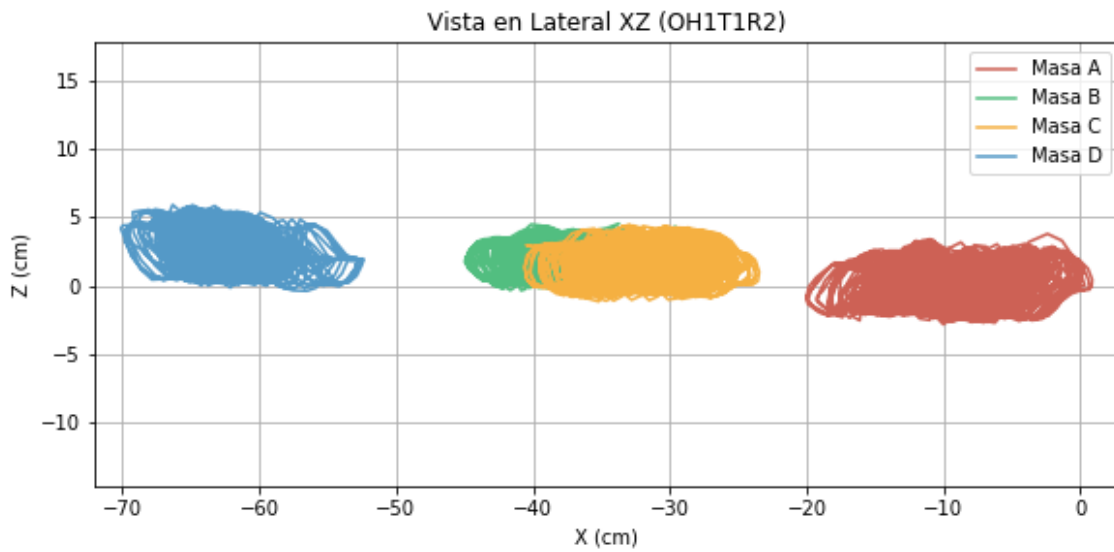


Figura 8-10: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T1R2. (Fuente: Elaboración propia.)

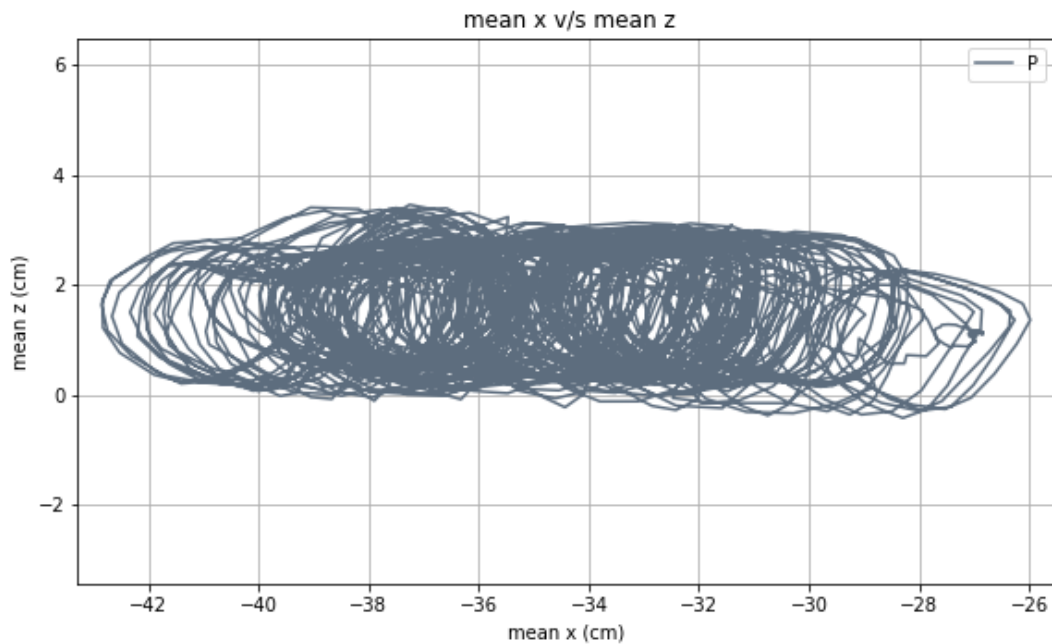


Figura 8-11: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R2). (Fuente: Elaboración propia.)

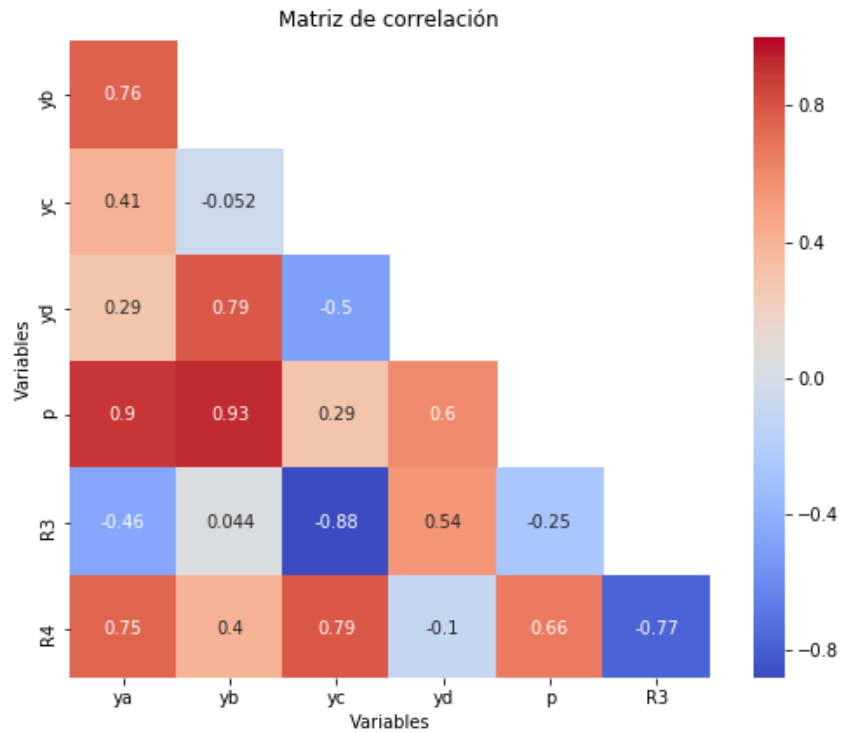


Figura 8-12: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R2). (Fuente: Elaboración propia.)

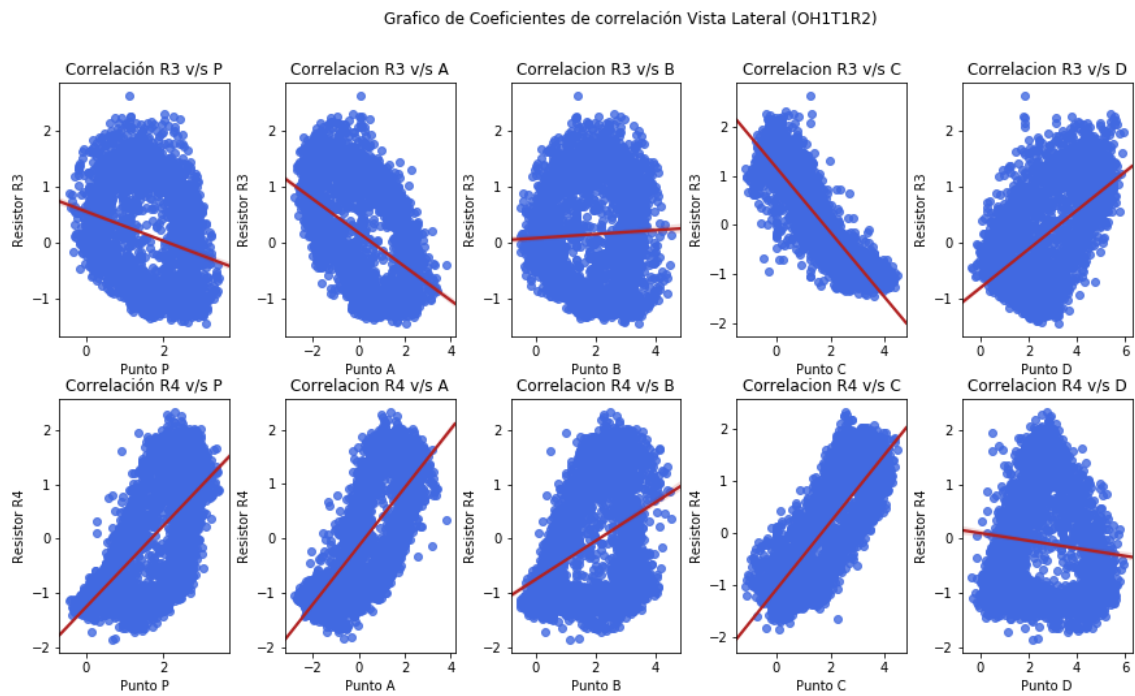


Figura 8-13: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R2). (Fuente: Elaboración propia.)

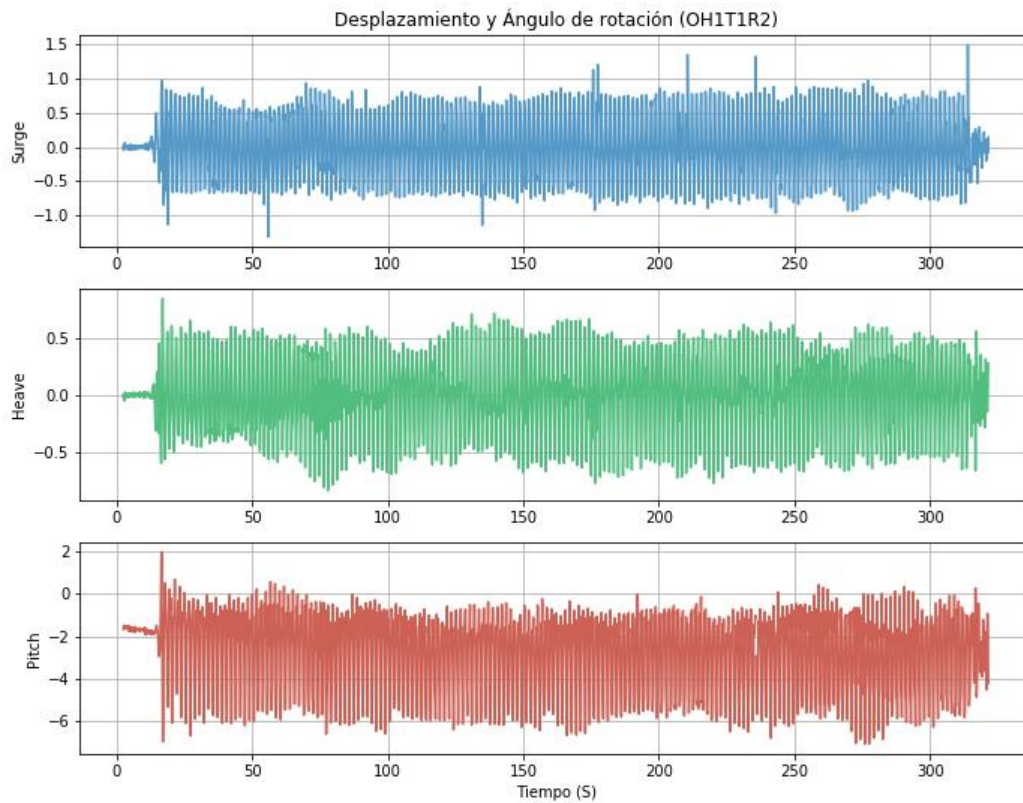


Figura 8-14: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R2) (Fuente: Elaboración propia.)

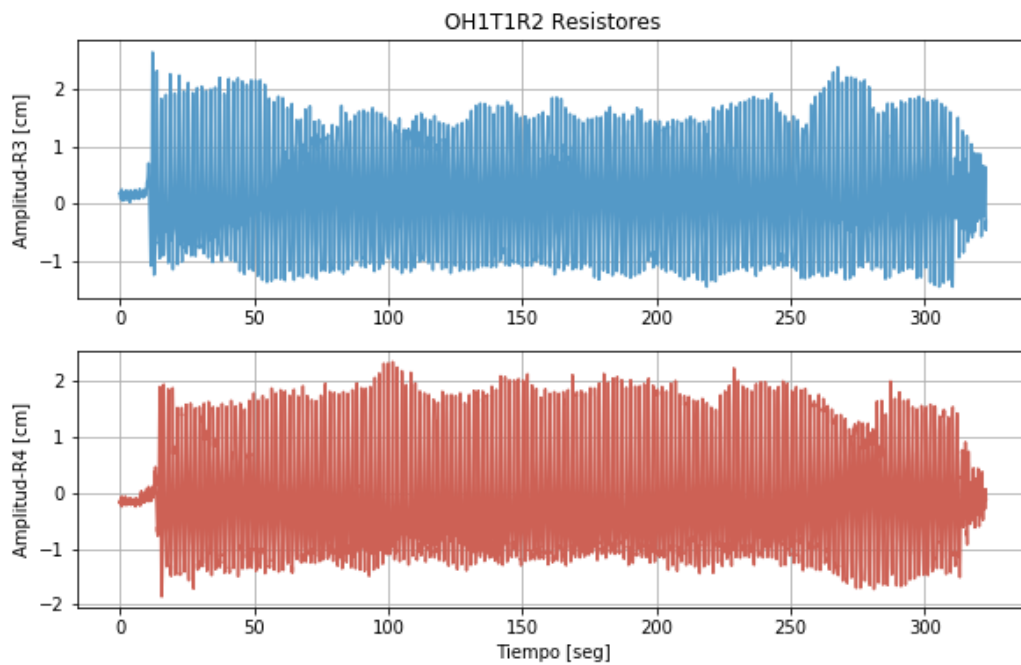


Figura 8-15: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R2) (Fuente: Elaboración propia.)

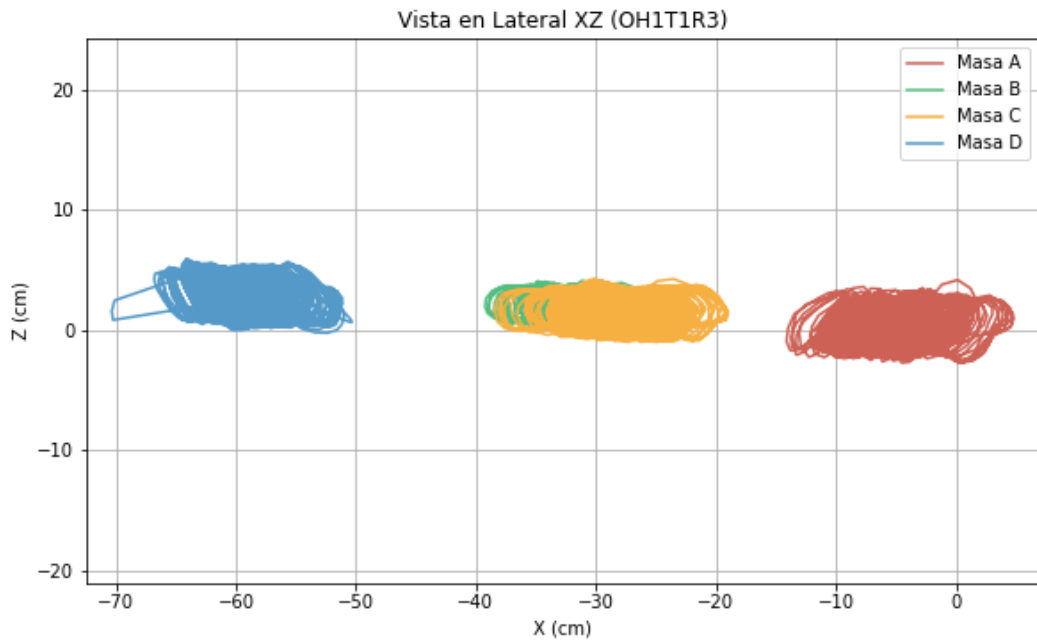


Figura 8-16: Vista de la cámara lateral ZX para el Ensayo OH1T1R3. (Fuente: Elaboración propia.)

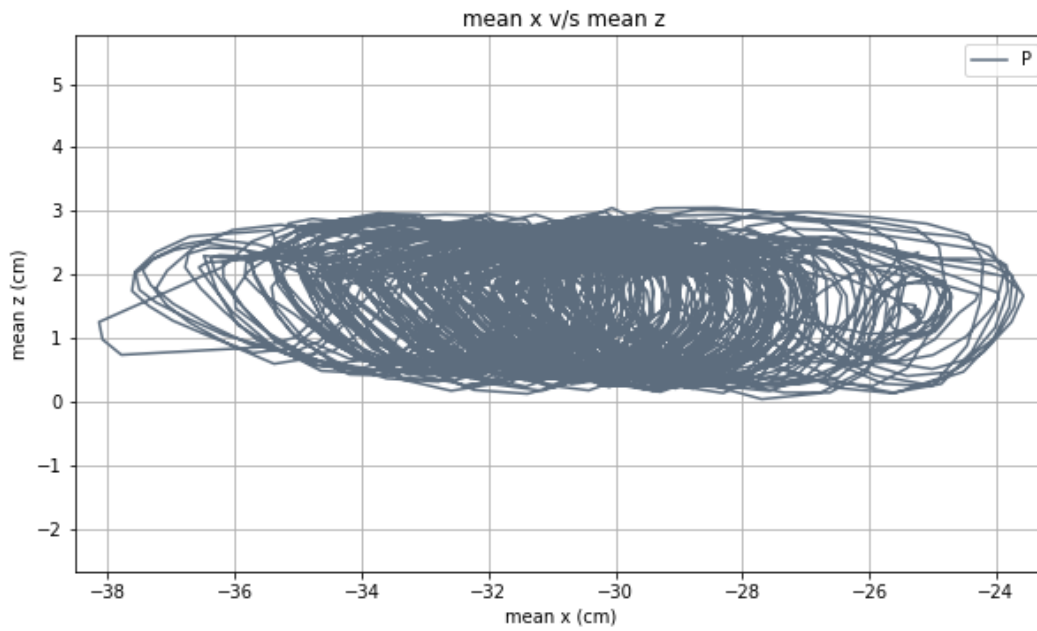


Figura 8-17: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T1R3). (Fuente: Elaboración propia.)

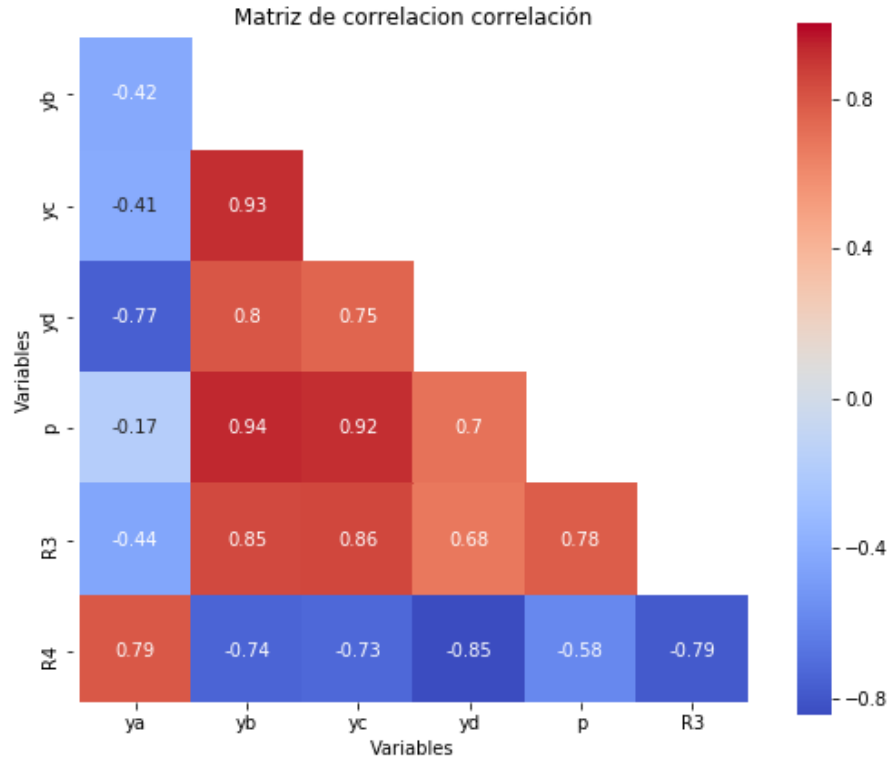


Figura 8-18: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R3) (Fuente: Elaboración propia.)

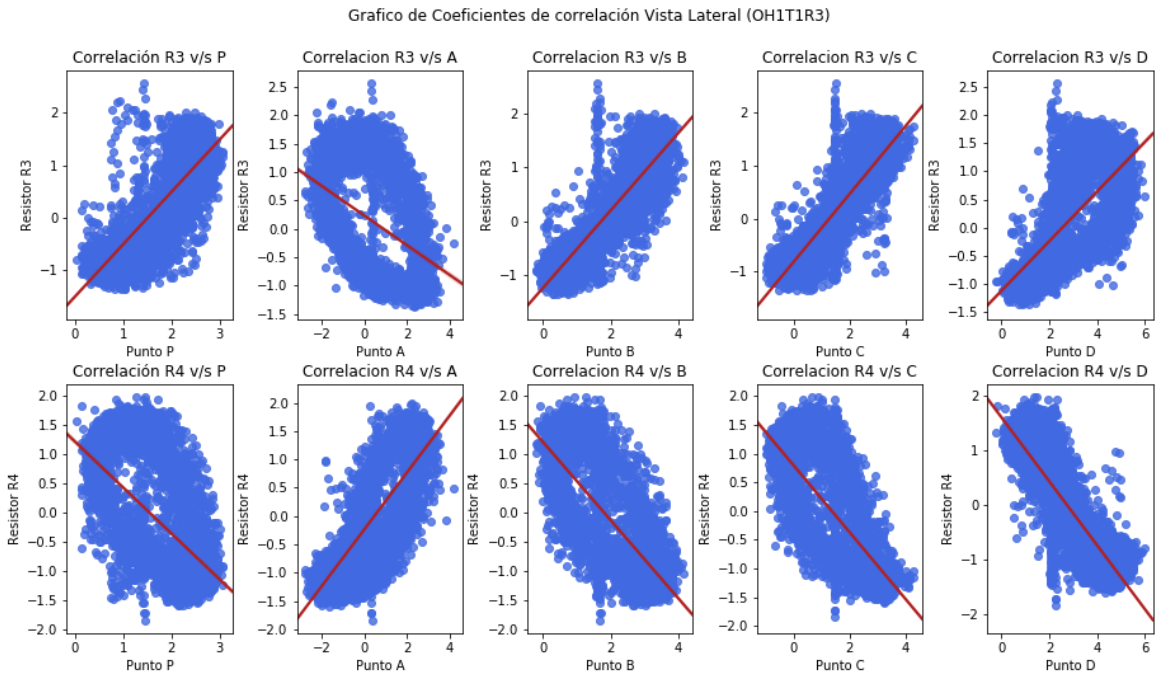


Figura 8-19: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T1R3) (Fuente: Elaboración propia.)

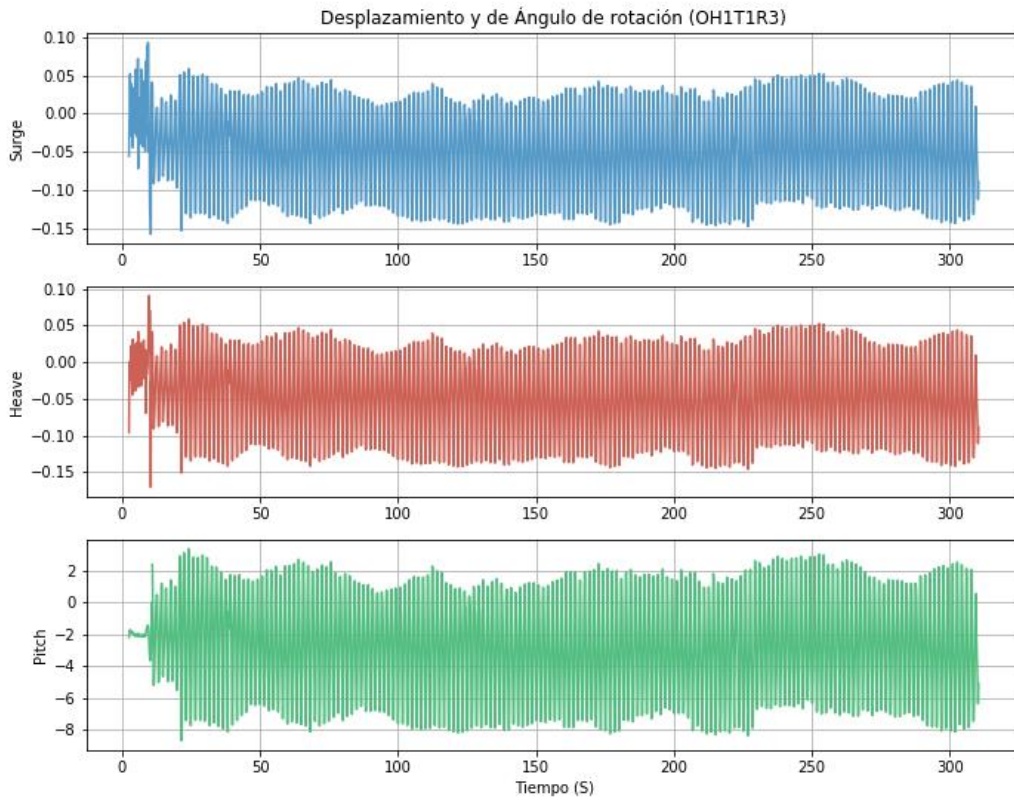


Figura 8-20: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T1R3) (Fuente: Elaboración propia.)

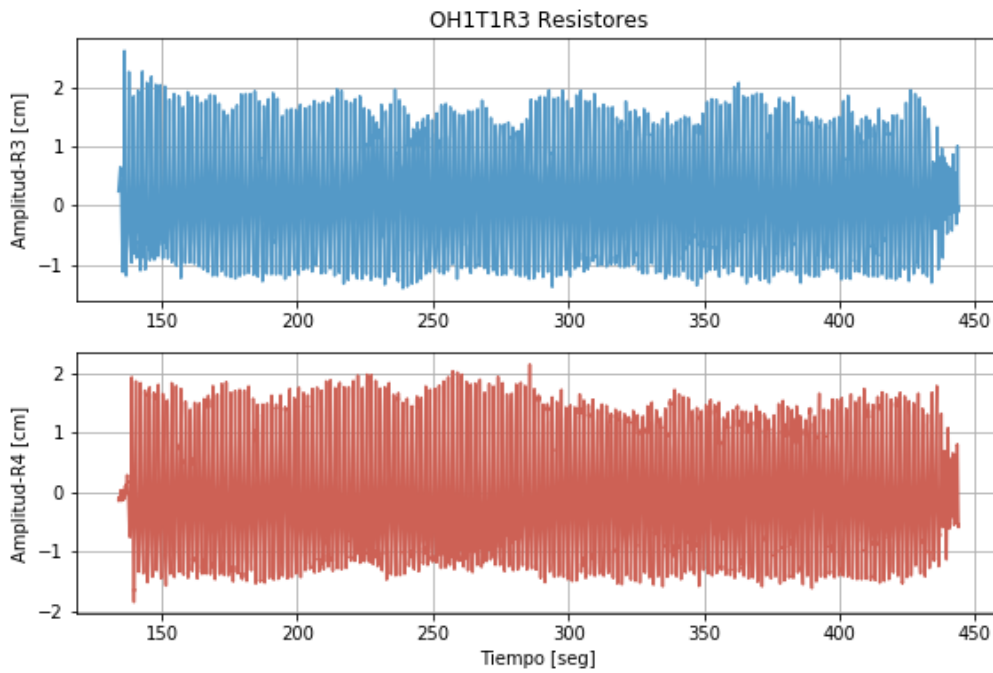


Figura 8-21: Datos de los resistores (Ensayo OH1T1R3) (Fuente: Elaboración propia.)

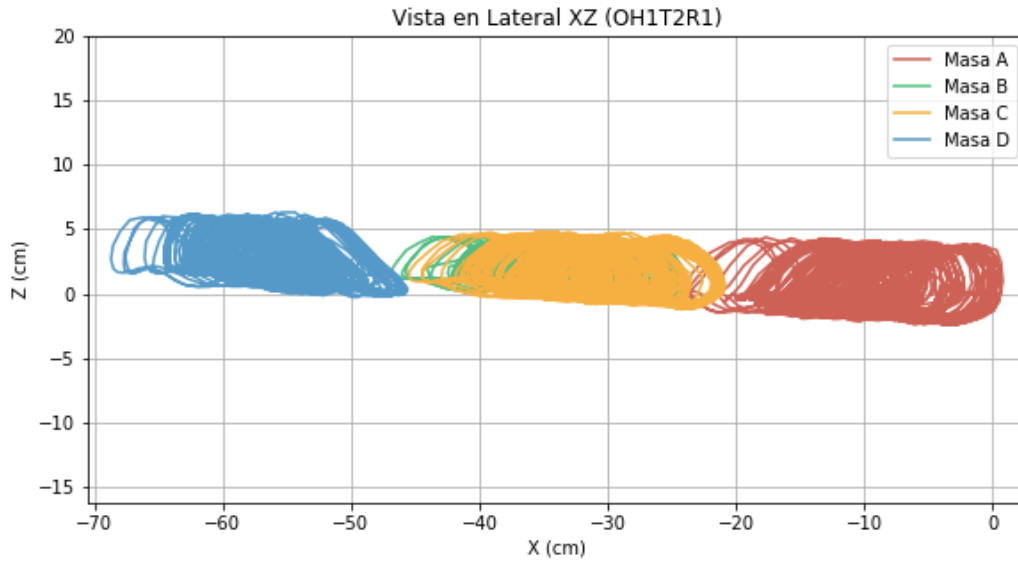


Figura 8-22: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH1T2R1 (Fuente: Elaboración propia.)

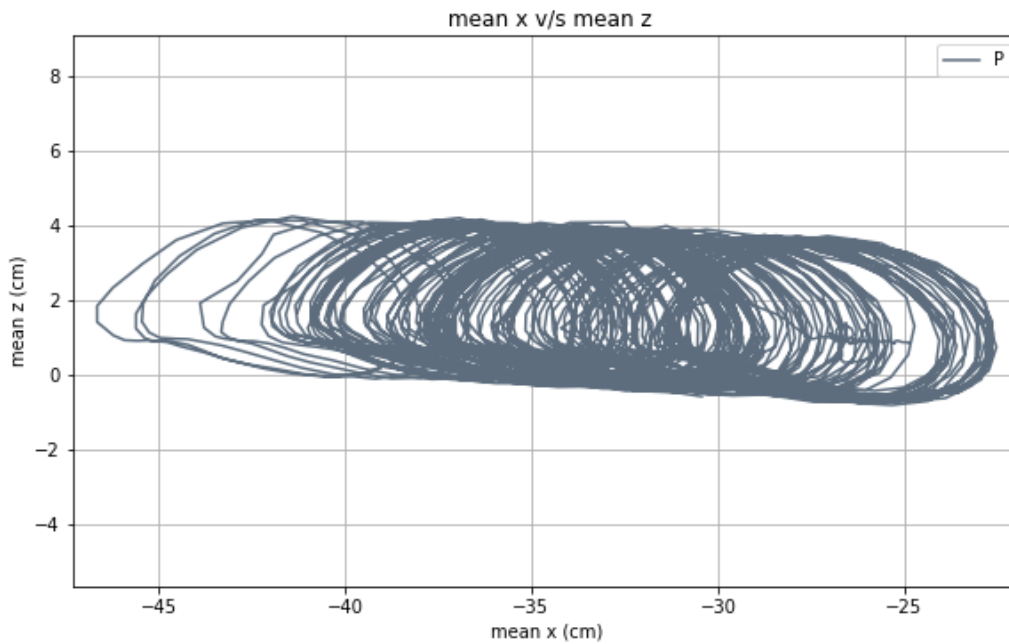


Figura 8-23: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

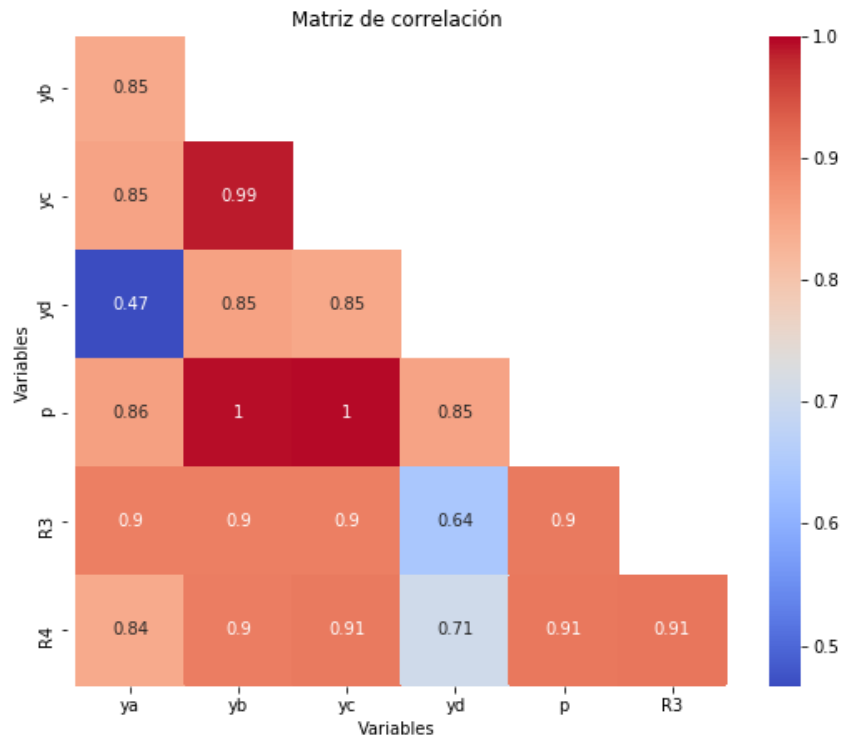


Figura 8-24: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

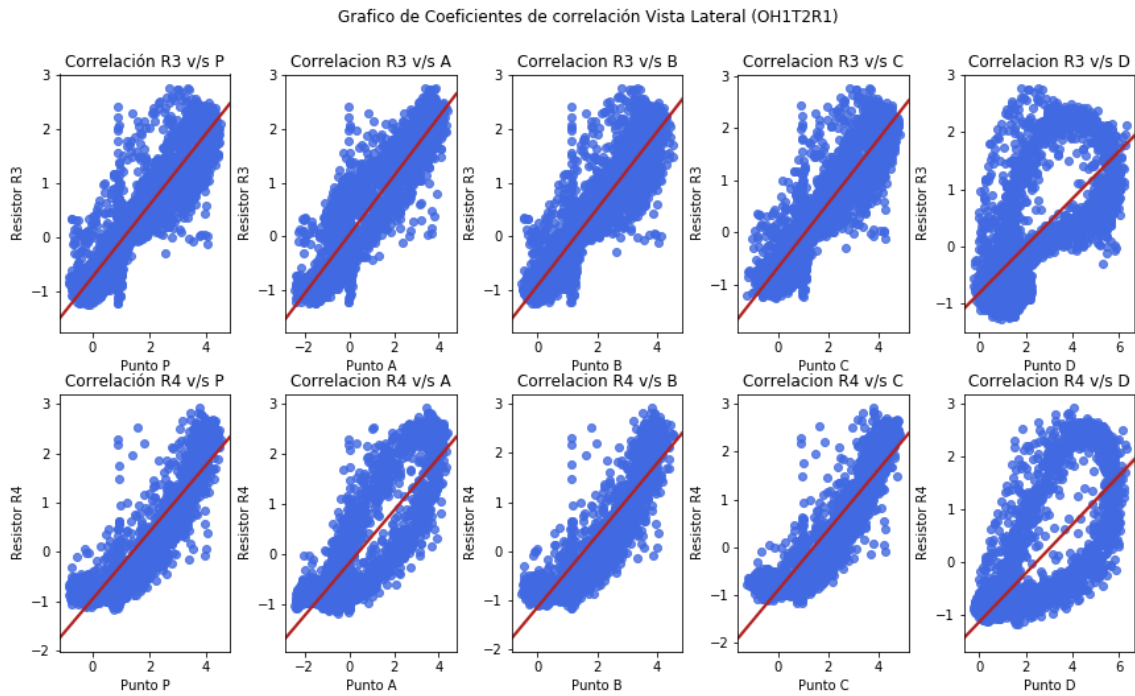


Figura 8-25: Gráficos de correlación de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

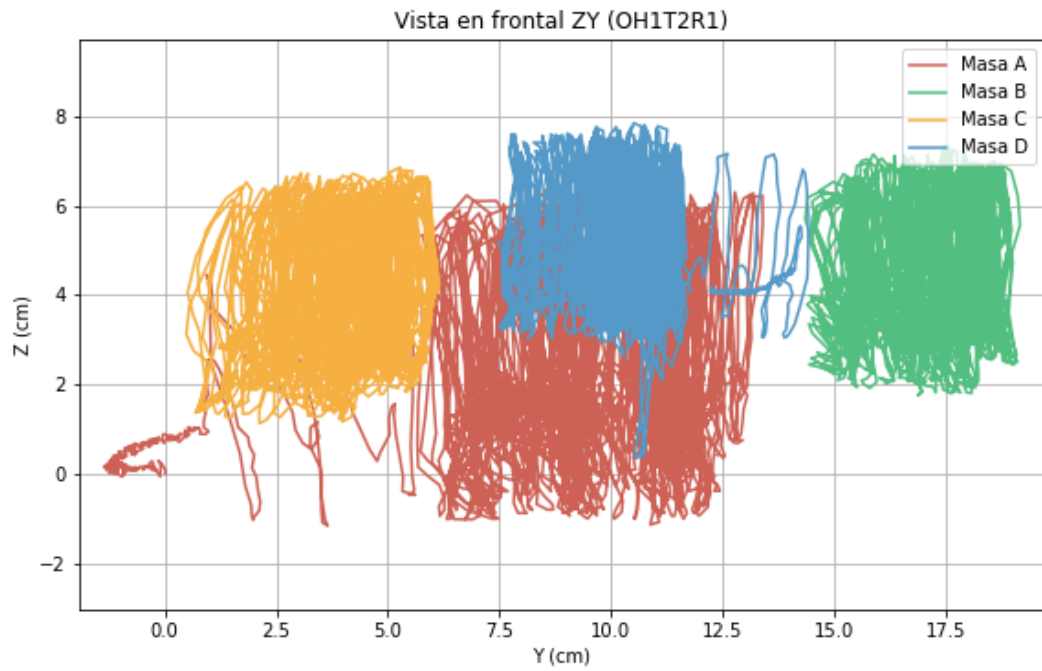


Figura 8-26: Vista de la cámara frontal ZY para el Ensayo OH1T2R1 (Fuente: Elaboración propia.)

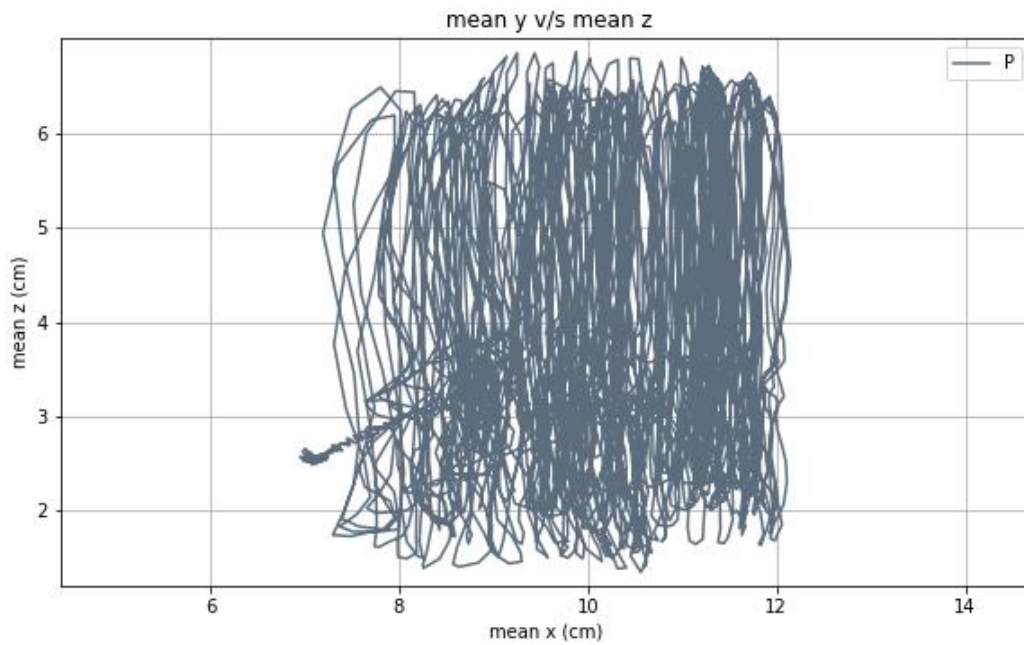


Figura 8-27: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

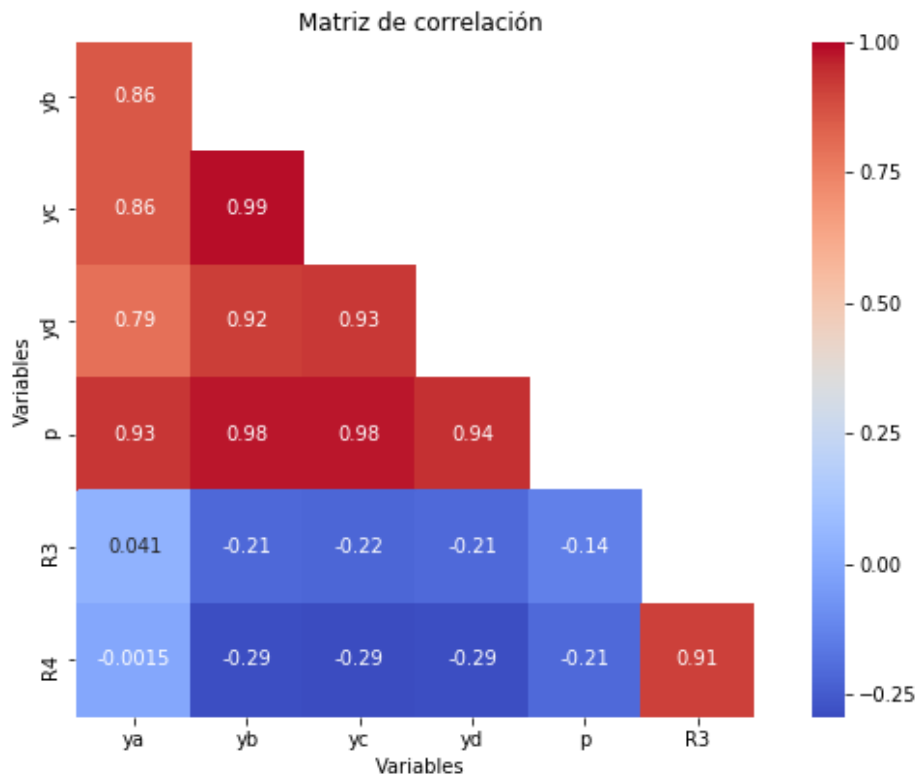


Figura 8-28: Correlación la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

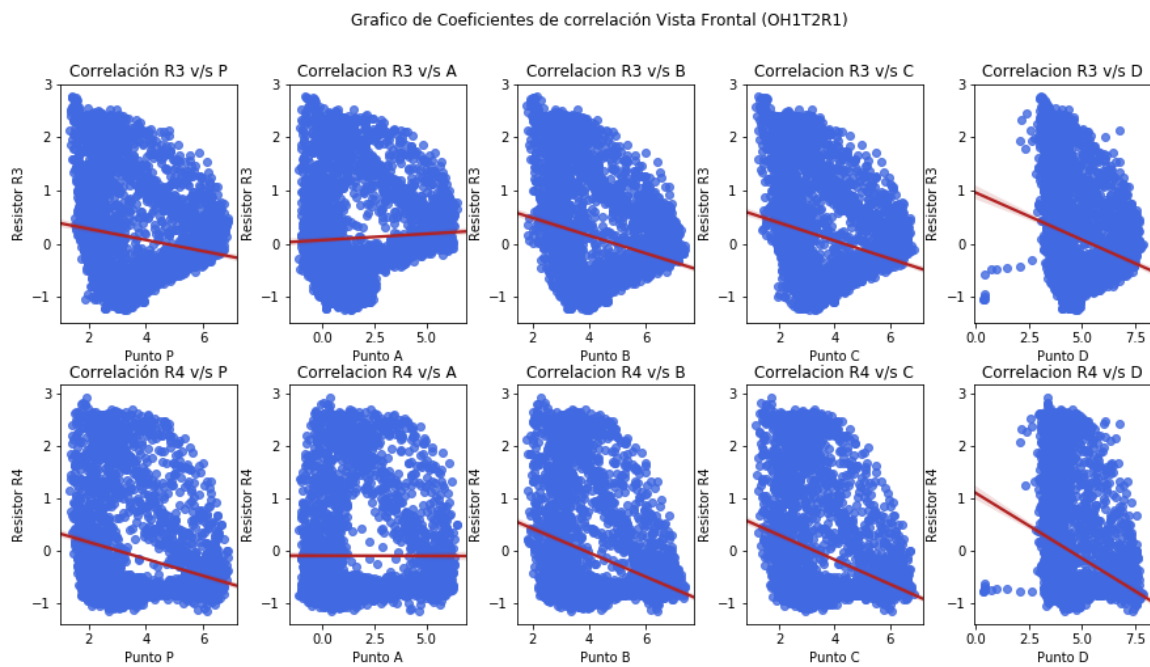


Figura 8-29: Gráficos de correlación la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

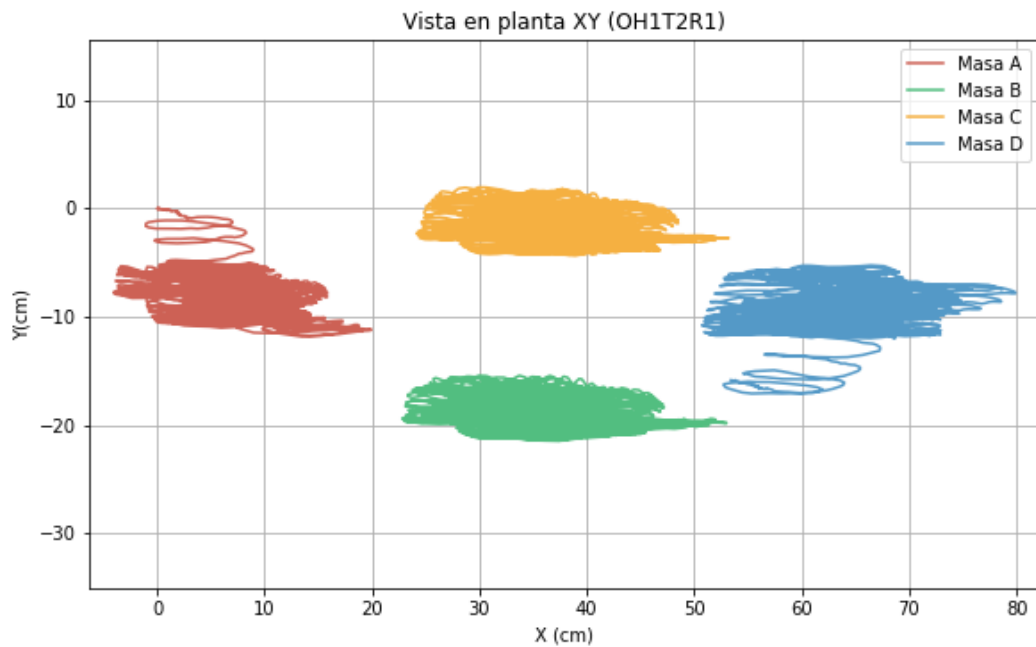


Figura 8-30: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH1T2R1 (Fuente: Elaboración propia.)

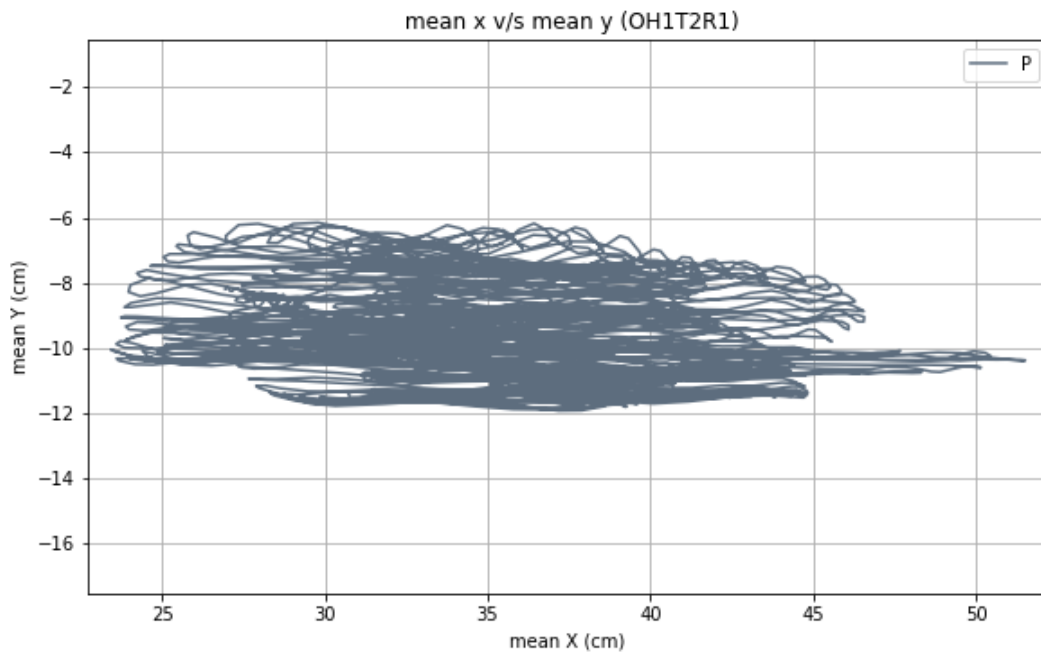


Figura 8-31: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta XY (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

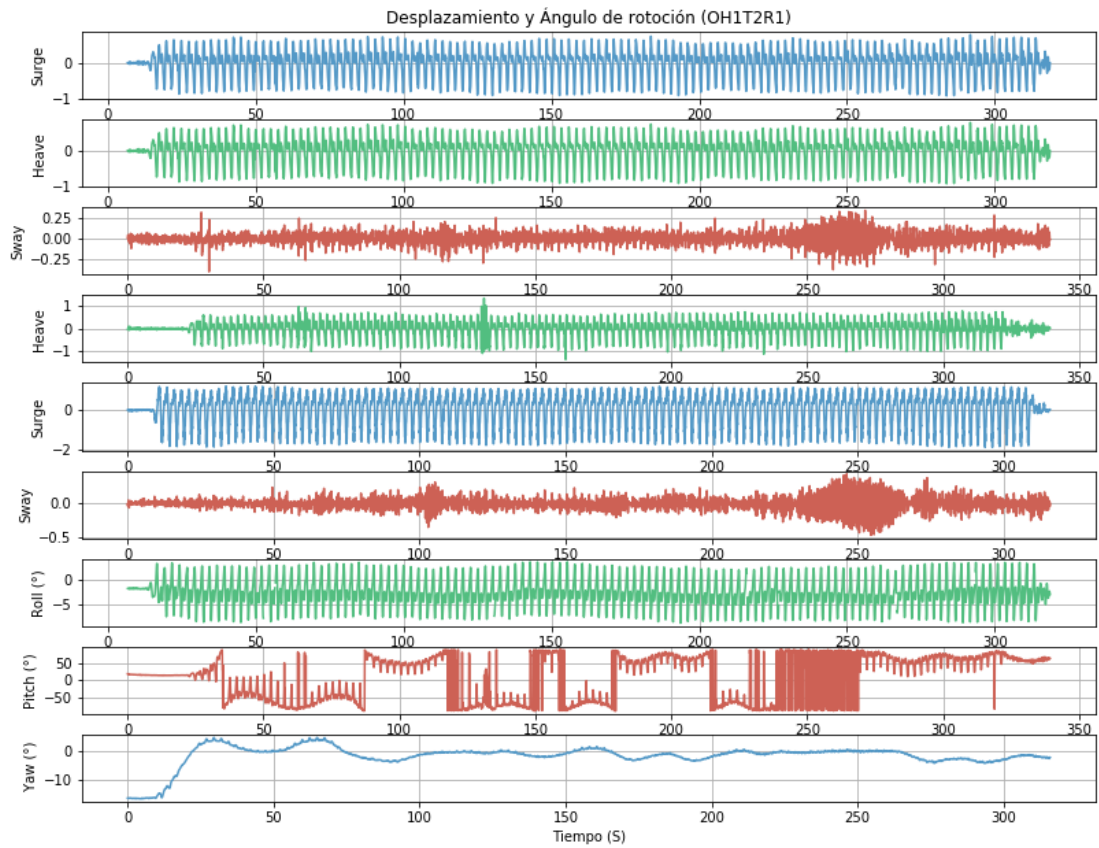


Figura 8-32: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

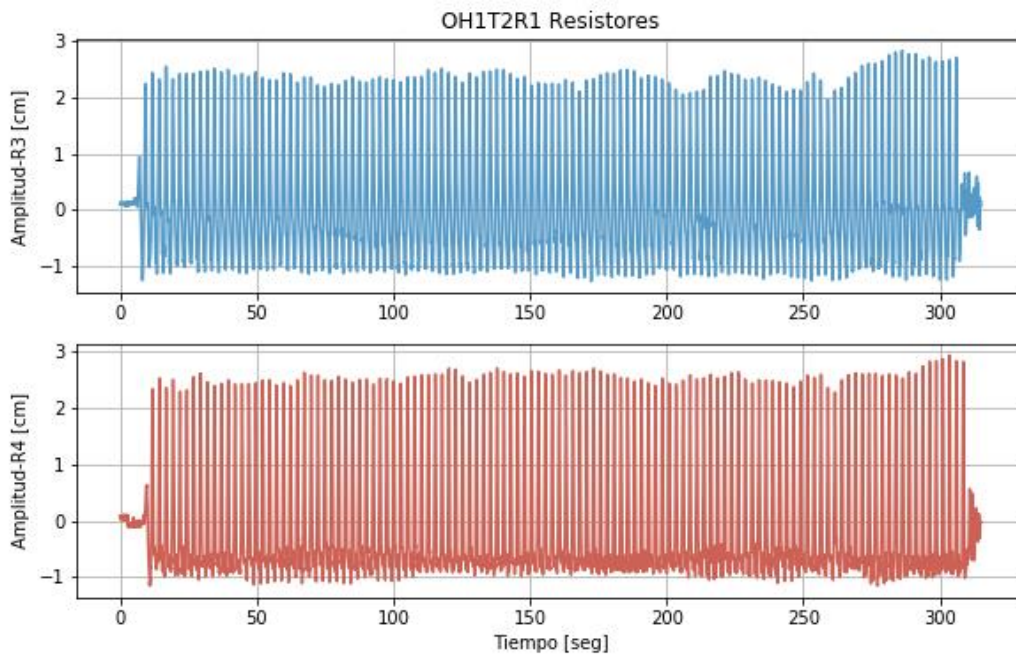


Figura 8-33: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

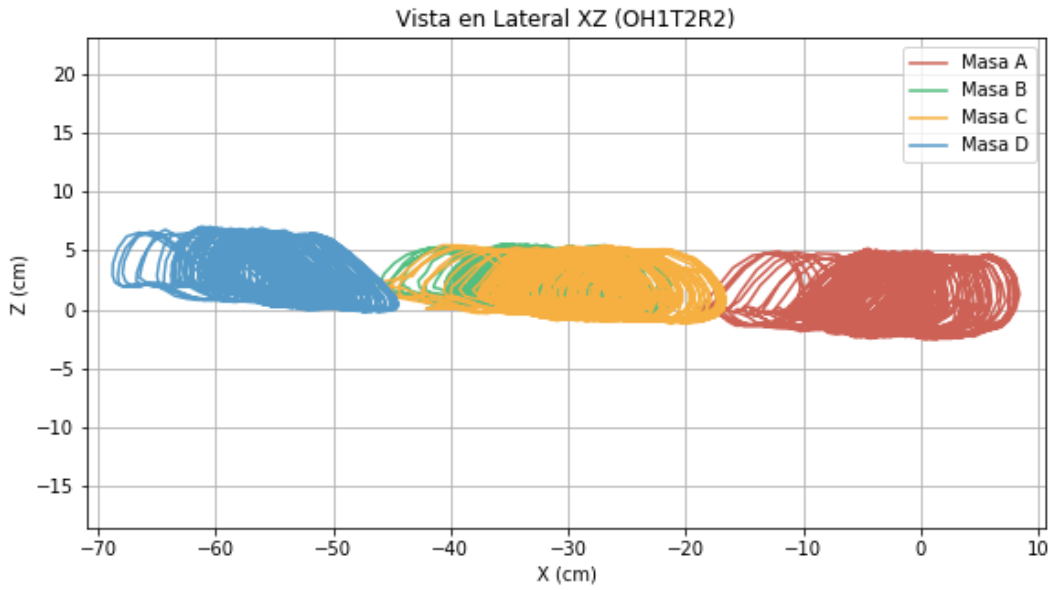


Figura 8-34: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T2R2 (Fuente: Elaboración propia.)

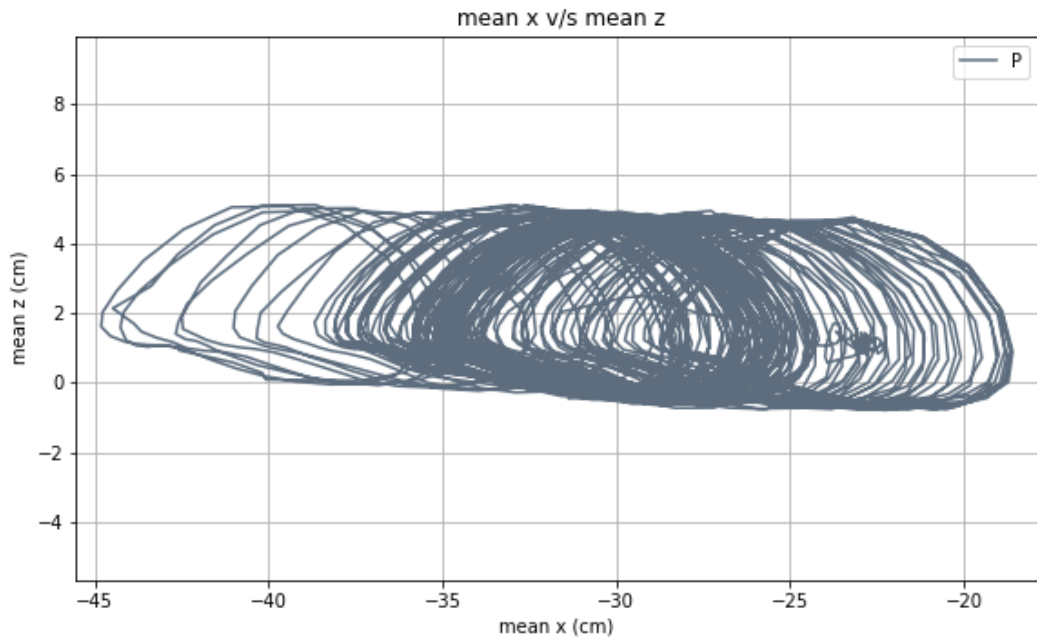


Figura 8-35: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

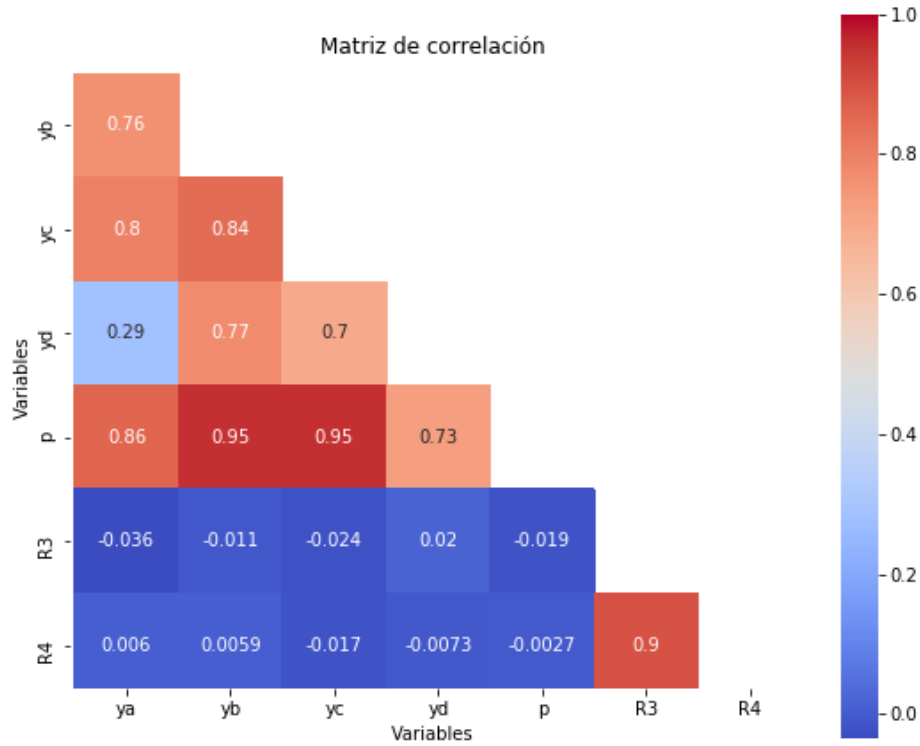


Figura 8-36: Correlación Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

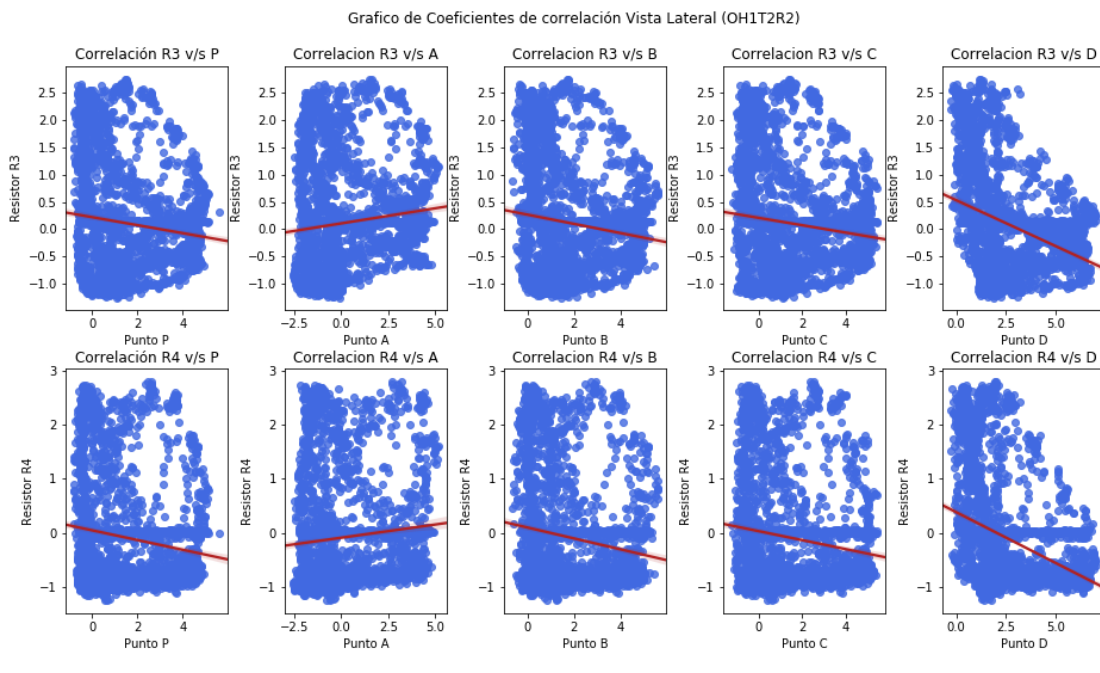


Figura 8-37: Gráficos de correlación Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

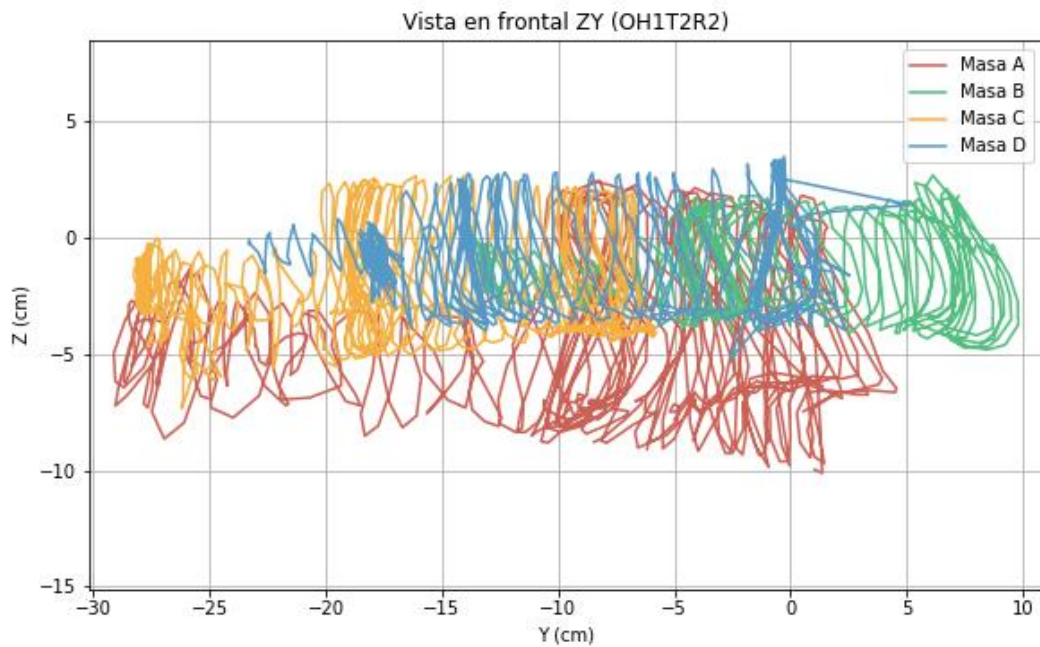


Figura 8-38: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH1T2R2 (Fuente: Elaboración propia.)

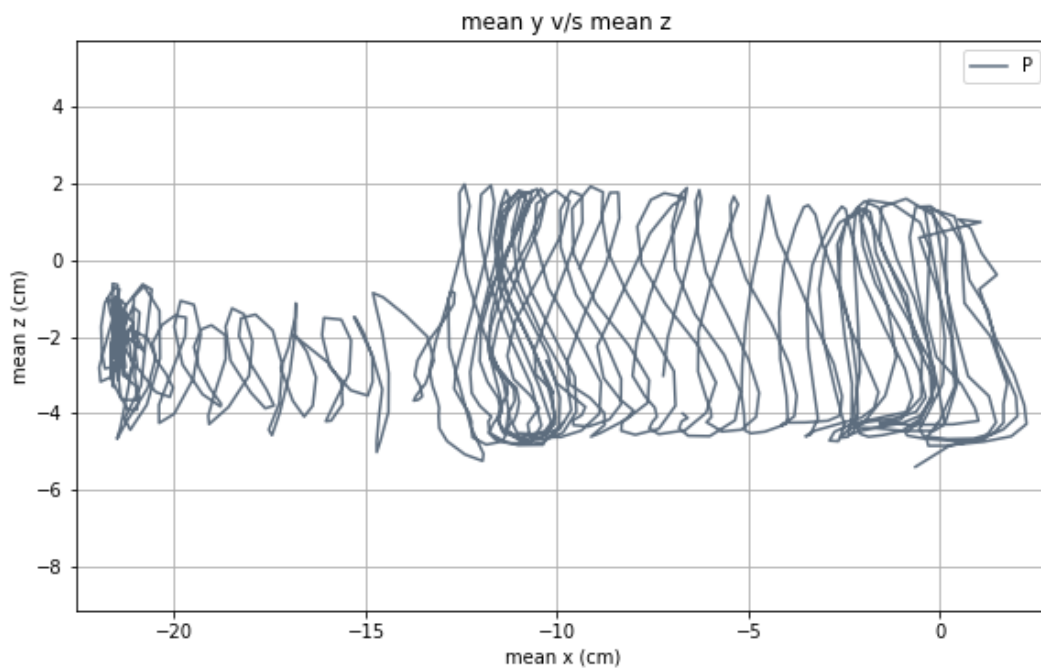


Figura 8-39: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

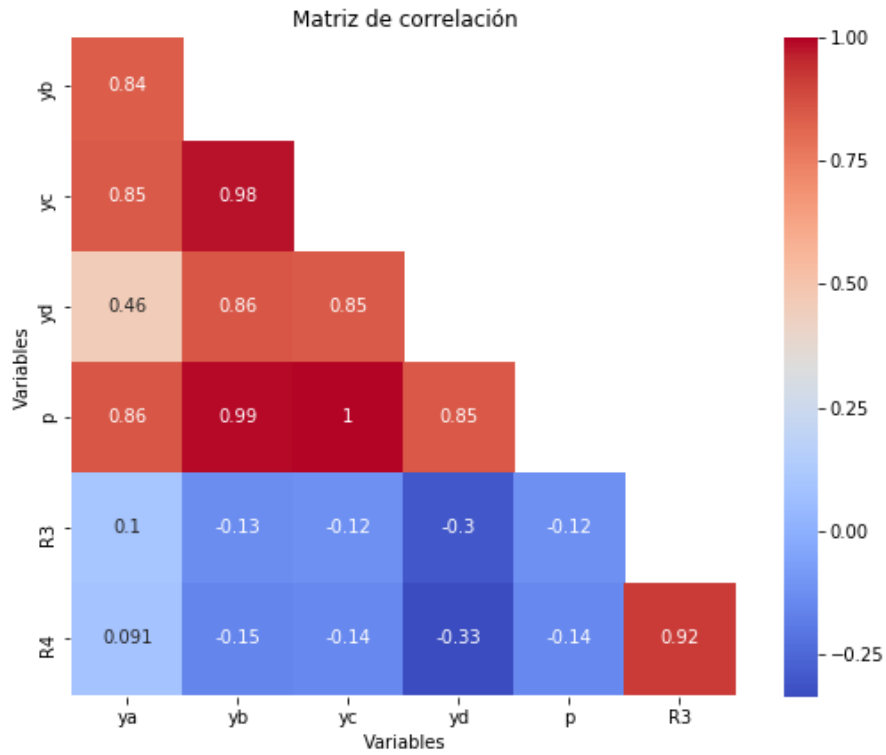


Figura 8-40: Correlación Vista de la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

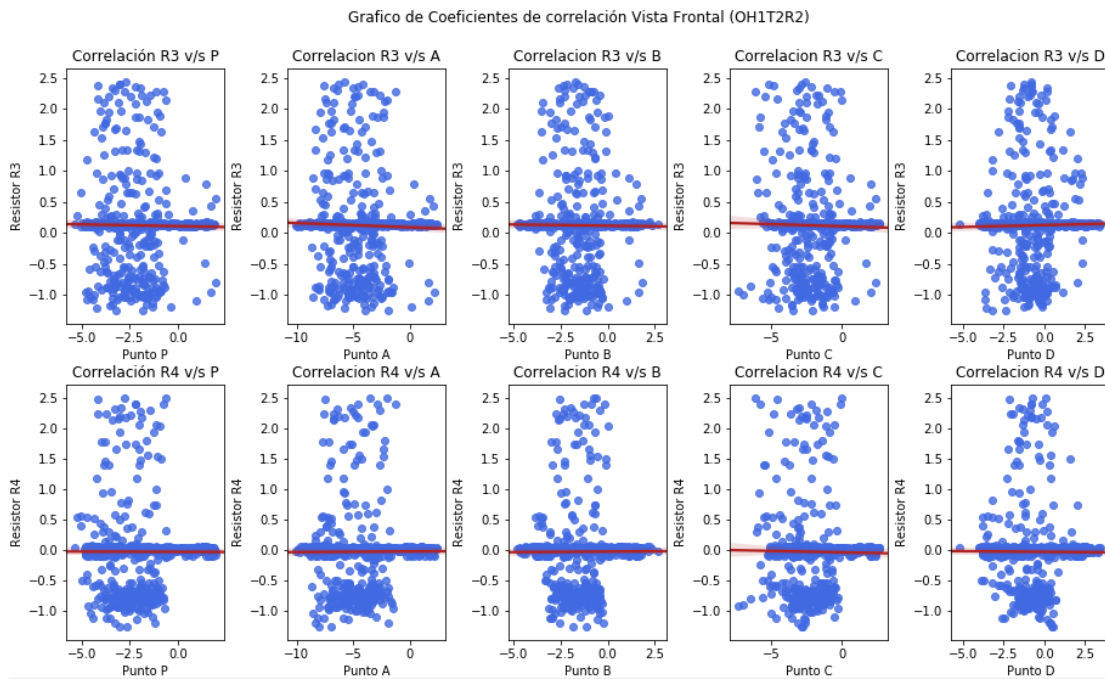


Figura 8-41: Gráficos de correlación Vista de la cámara frontal ZY (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

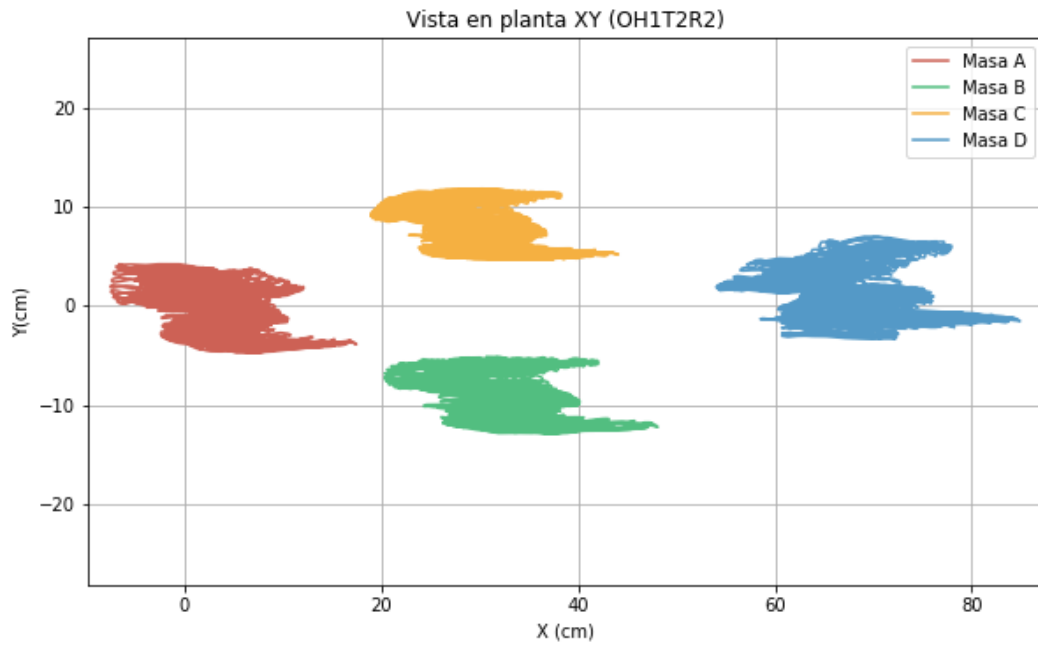


Figura 8-42: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH1T2R2 (Fuente: Elaboración propia.)

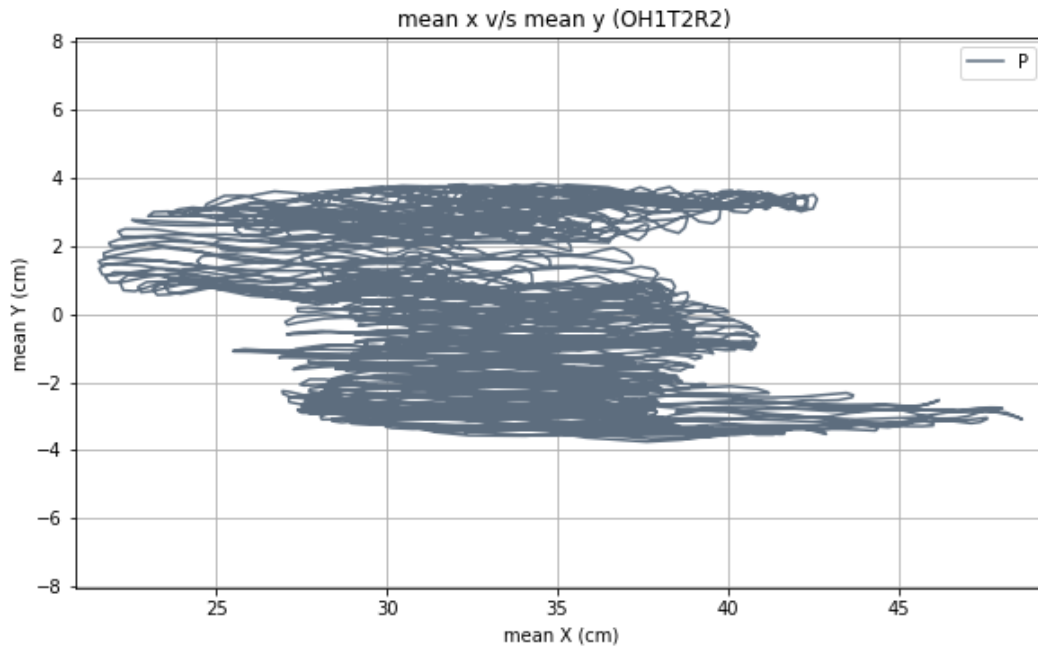


Figura 8-43: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta YX (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

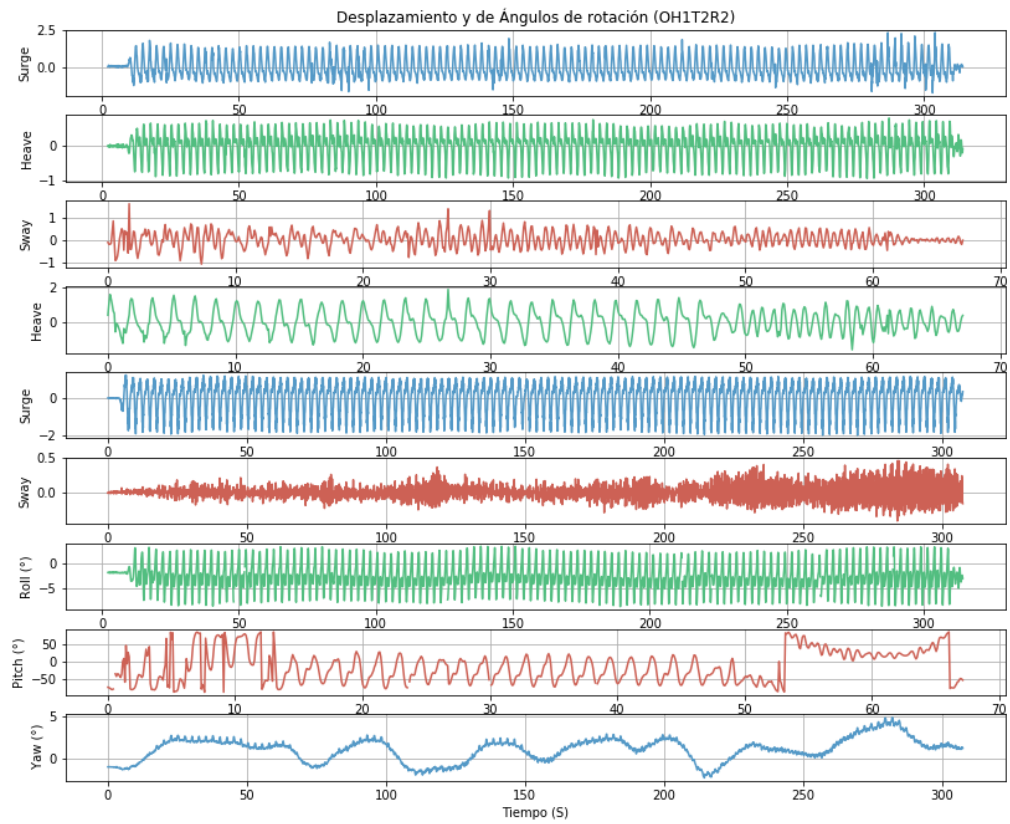


Figura 8-44: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

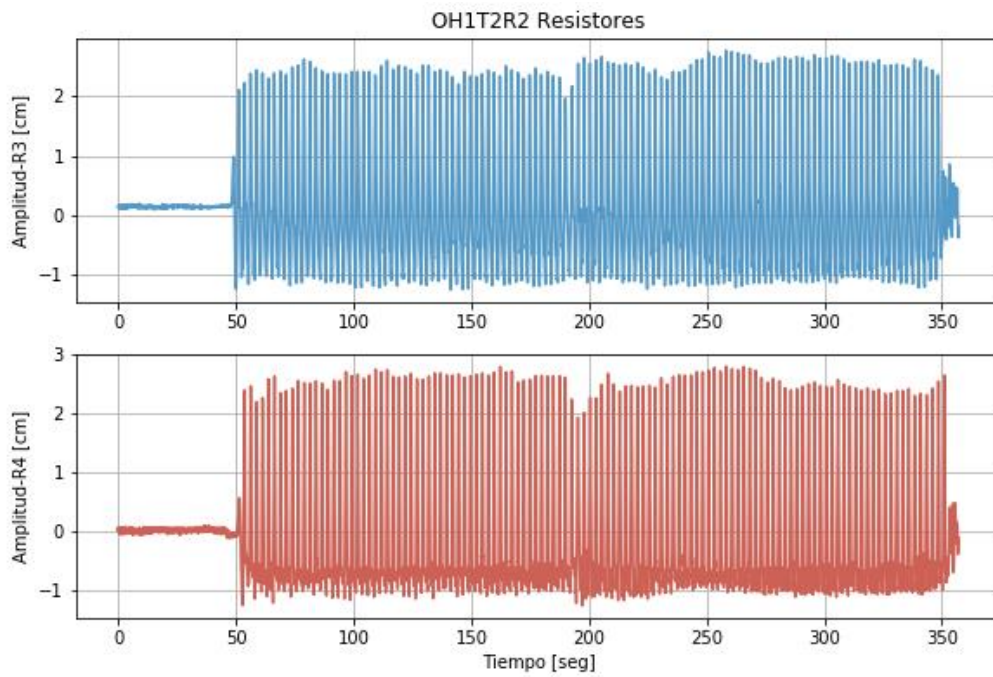


Figura 8-45: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R2) (Fuente: Elaboración propia.)

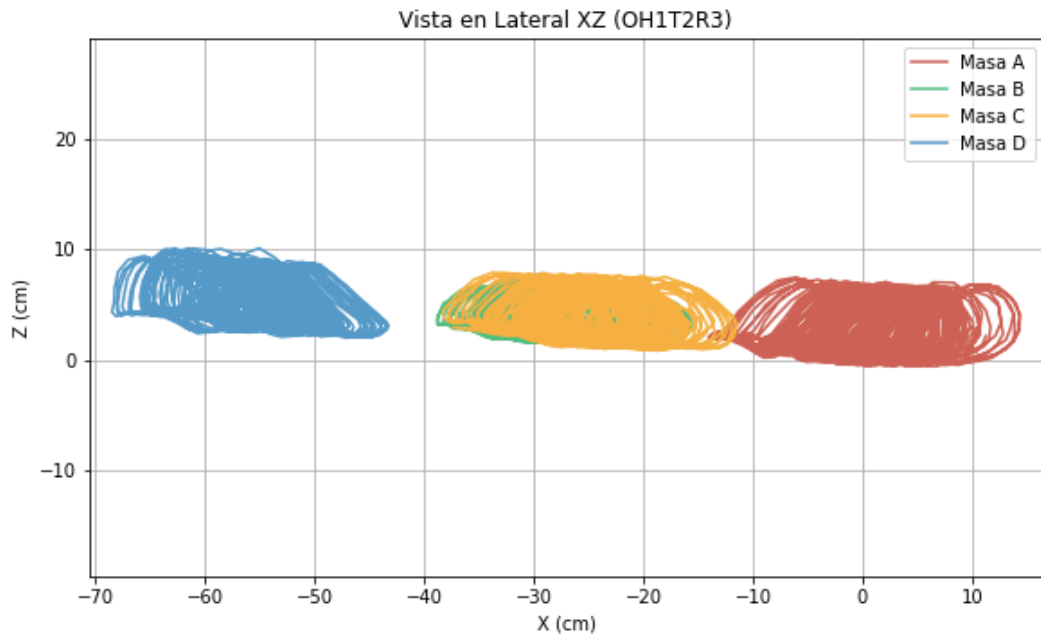


Figura 8-46: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH1T2R3 (Fuente: Elaboración propia.)

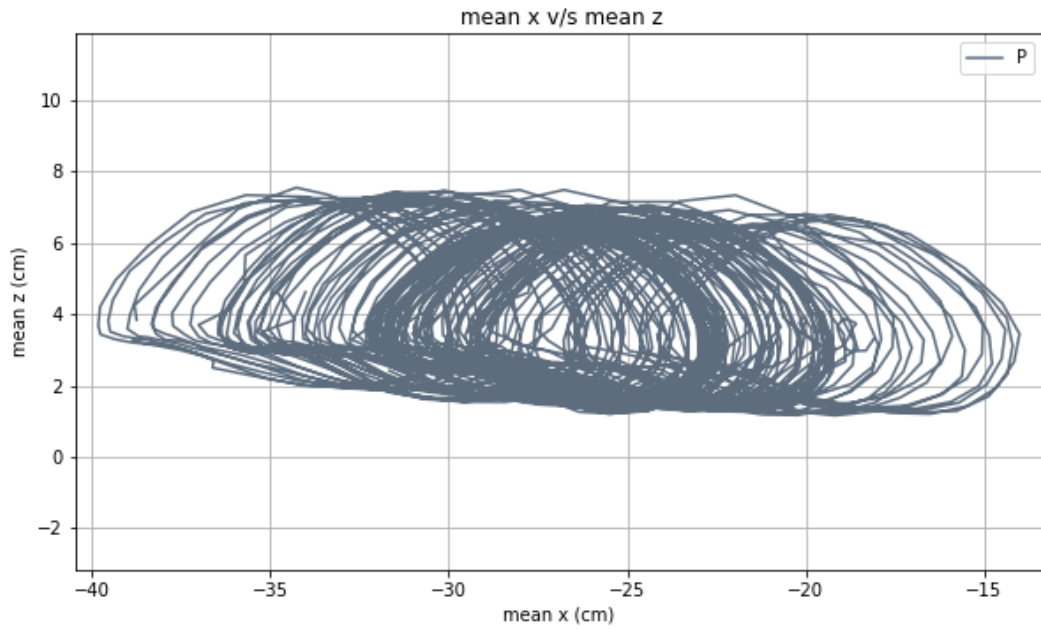


Figura 8-47: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista lateral ZX (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

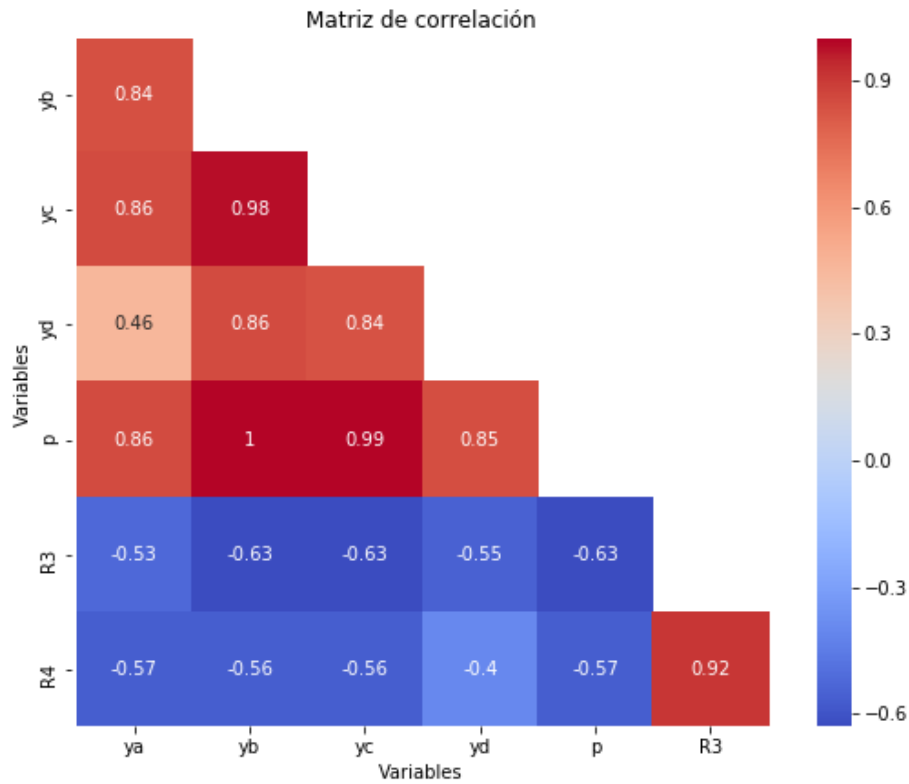


Figura 8-48: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

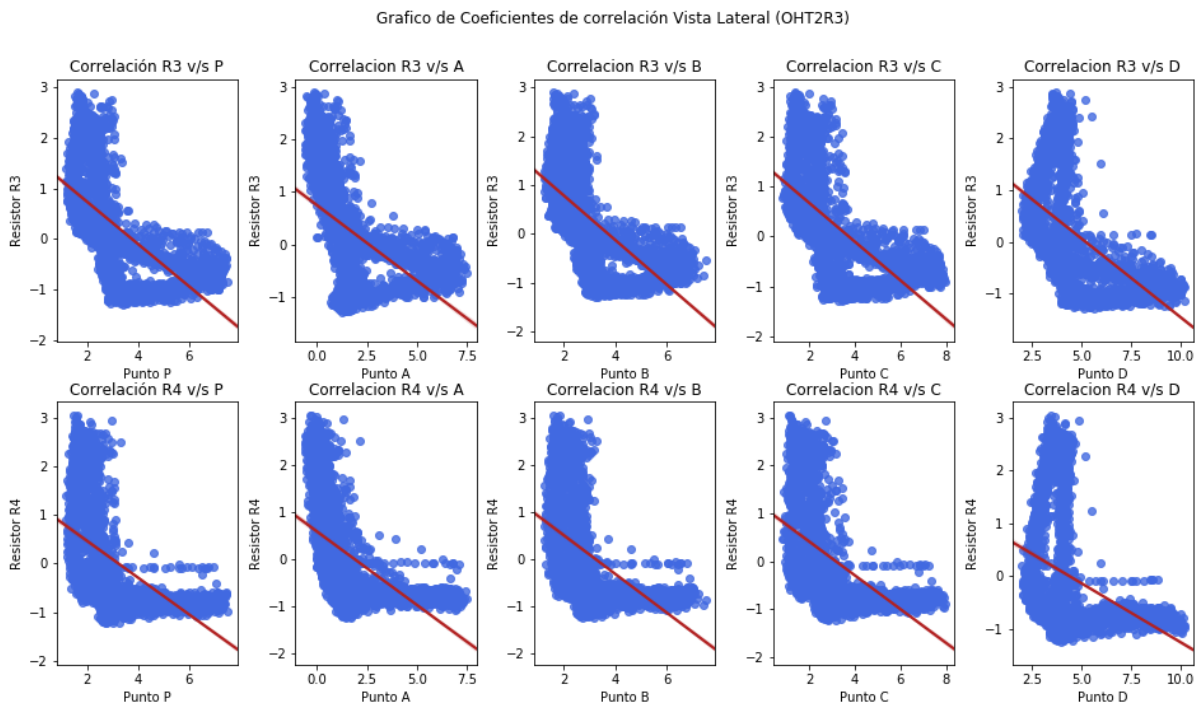


Figura 8-49: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

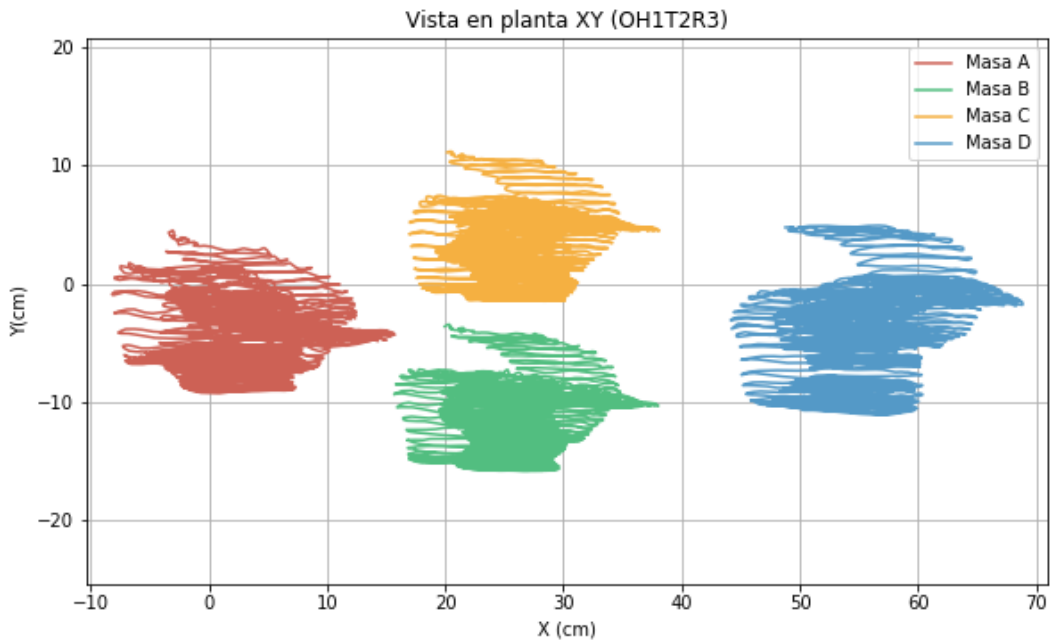


Figura 8-50: Vista de la cámara en planta XY para el Ensayo OH1T2R3 (Fuente: Elaboración propia.)

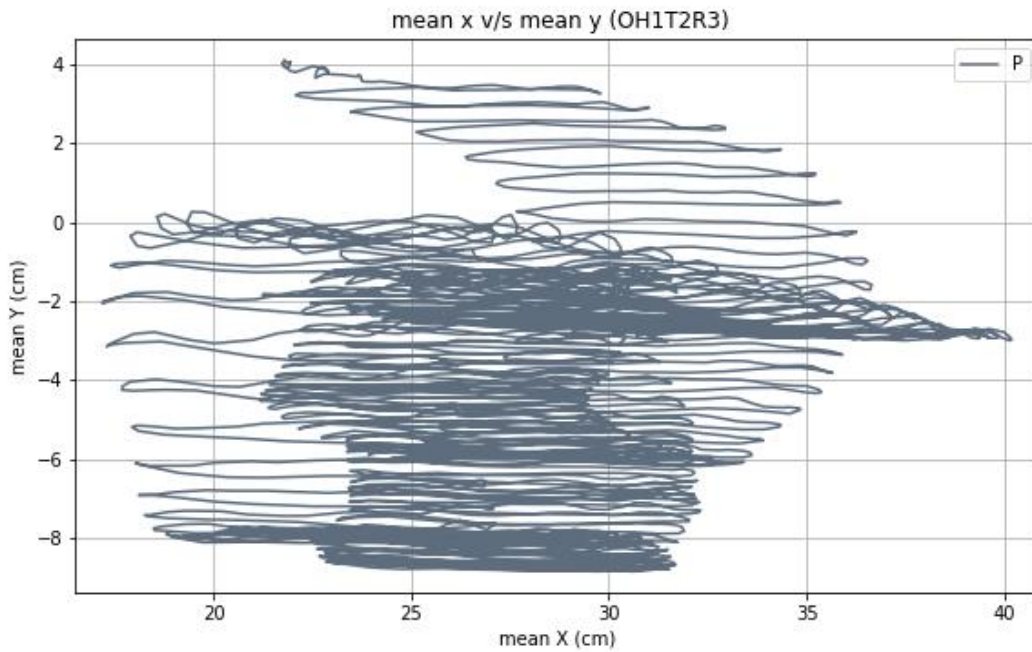


Figura 8-51: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista planta YX (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

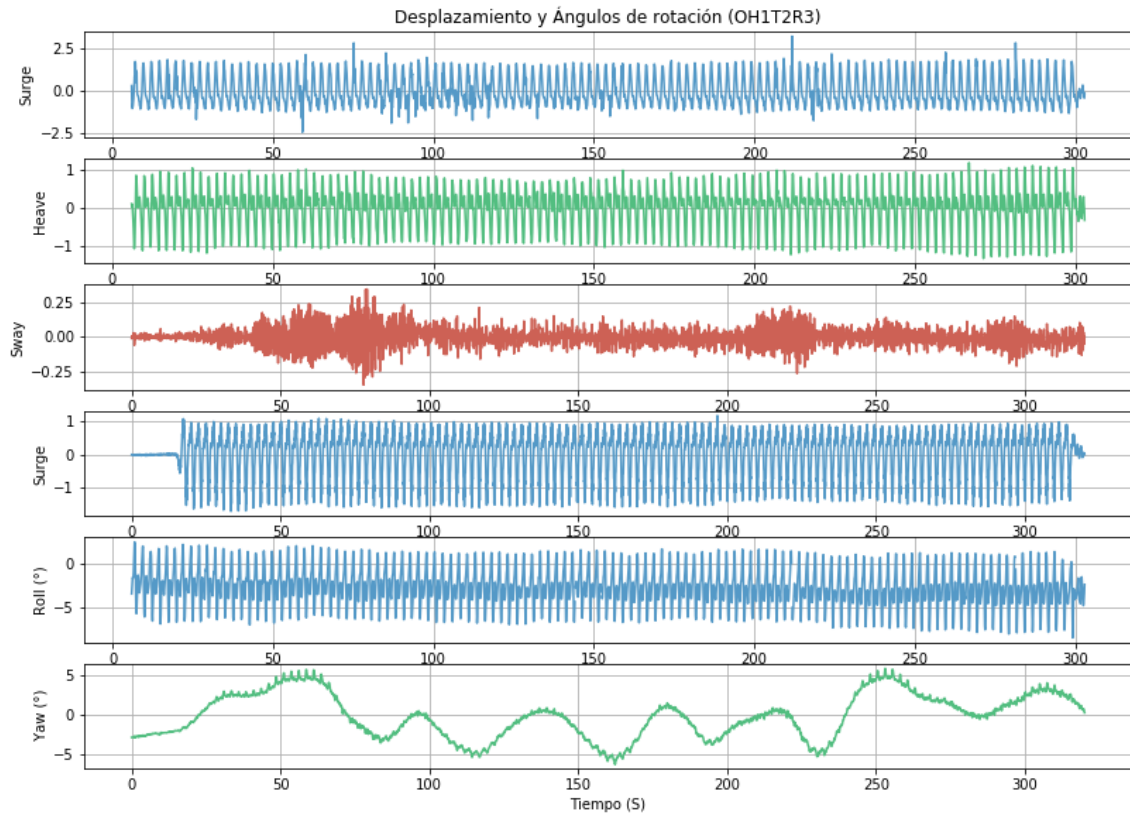


Figura 8-52: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

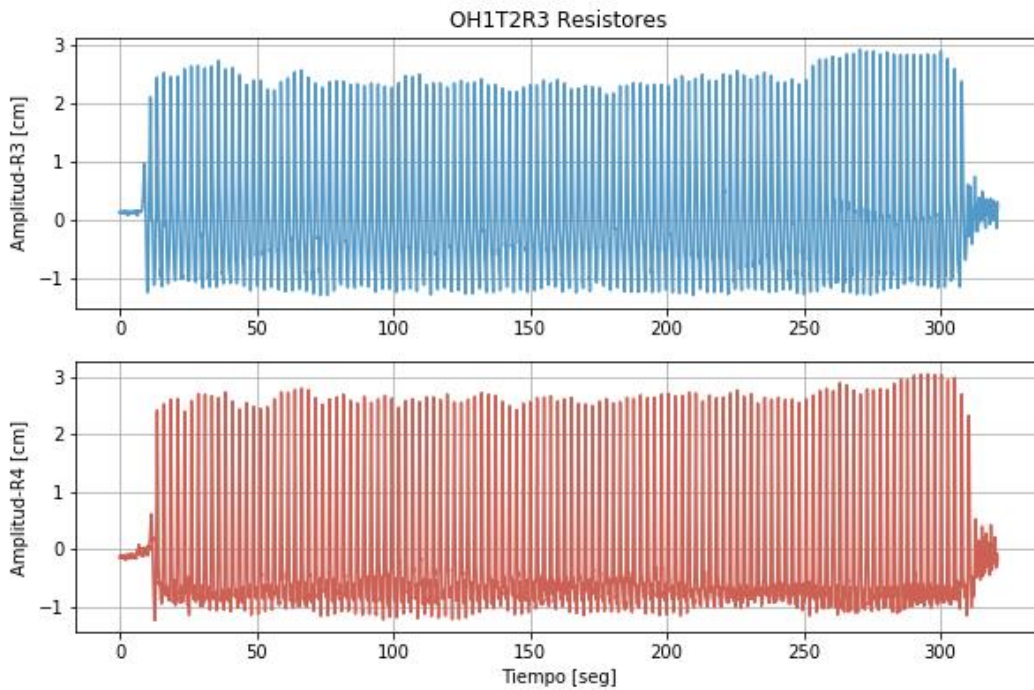


Figura 8-53: Datos de los resistores (Ensayo OH1T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

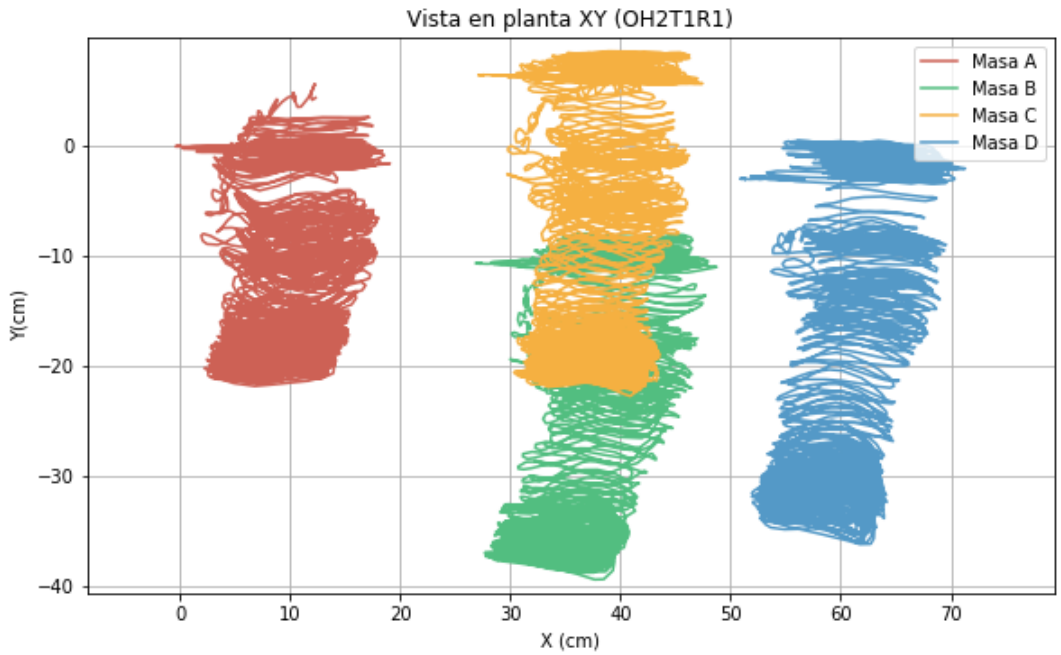


Figura 8-54: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T1R1 (Fuente: Elaboración propia.)

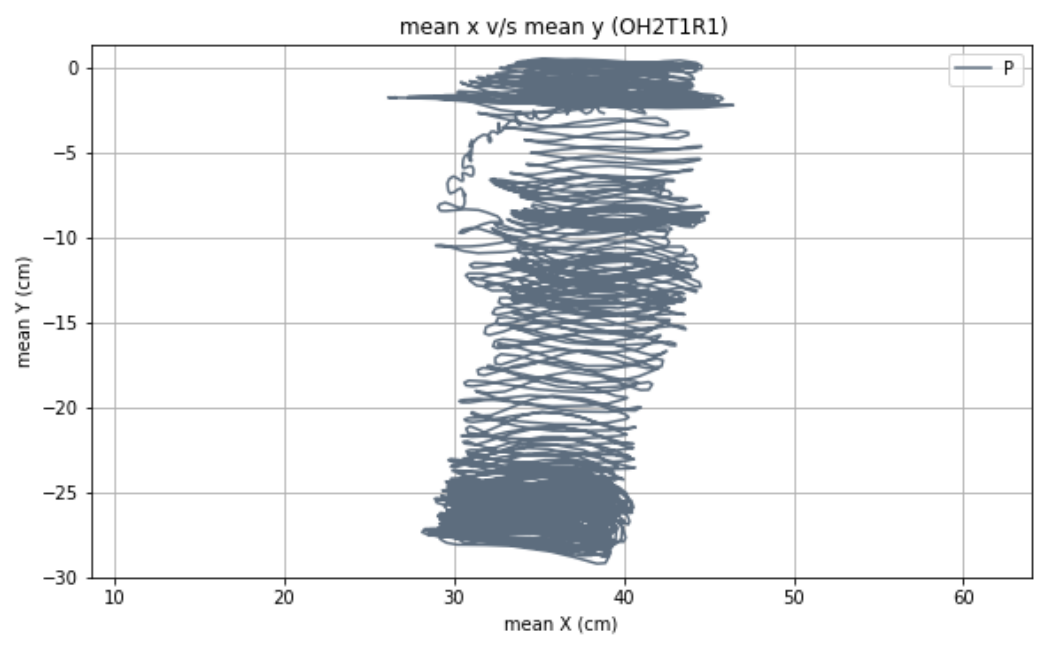


Figura 8-55: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T1R1) (Fuente: Elaboración propia.)

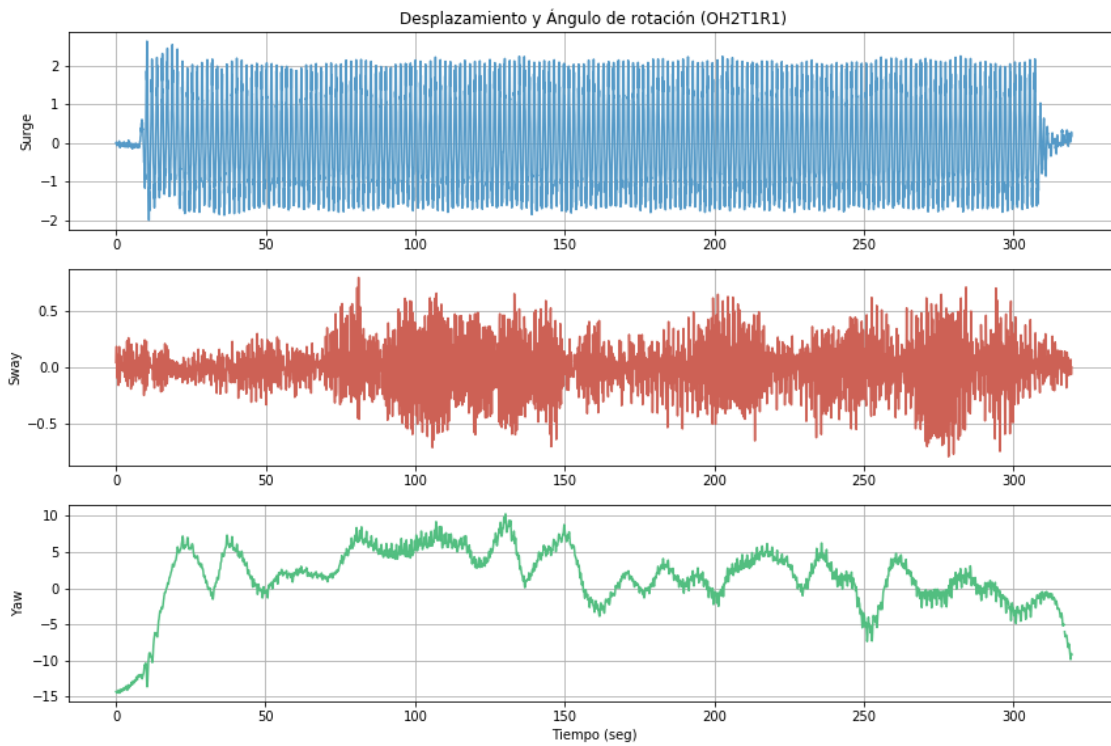


Figura 8-56: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T1R1) (Fuente: Elaboración propia.)

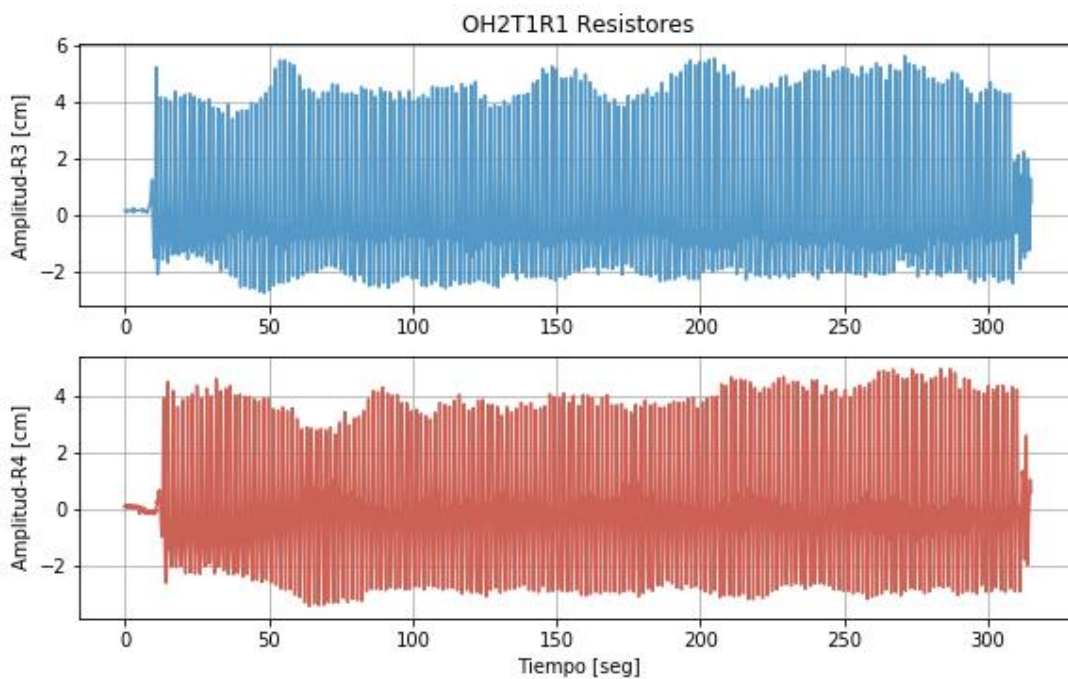


Figura 8-57: Datos de los resistores (Ensayo OH2T1R1) (Fuente: Elaboración propia.)

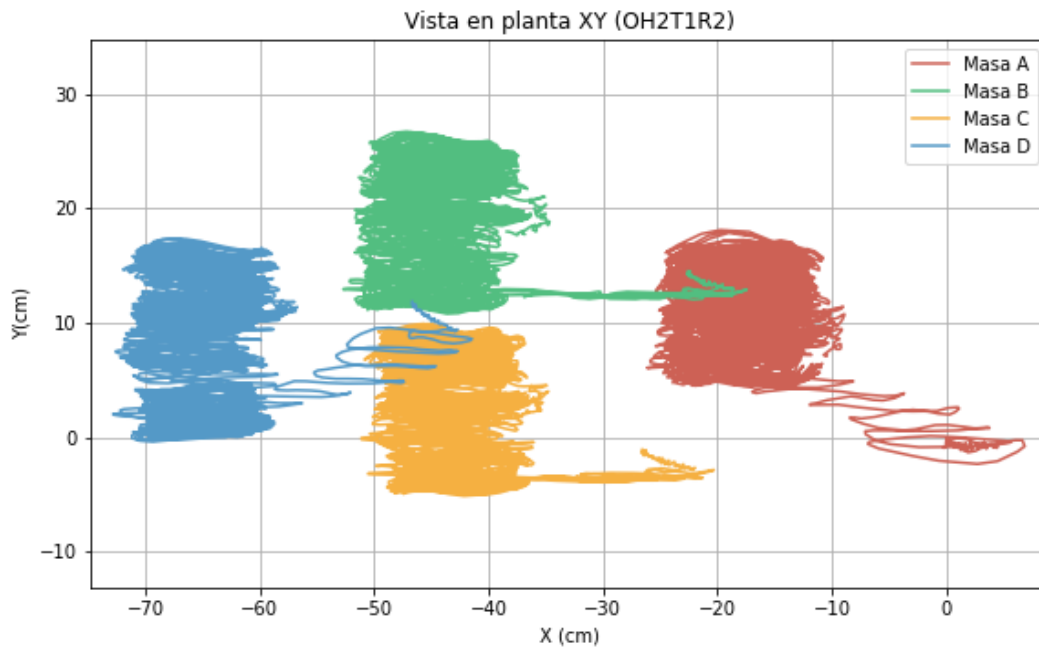


Figura 8-58: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T1R2 (Fuente: Elaboración propia.)

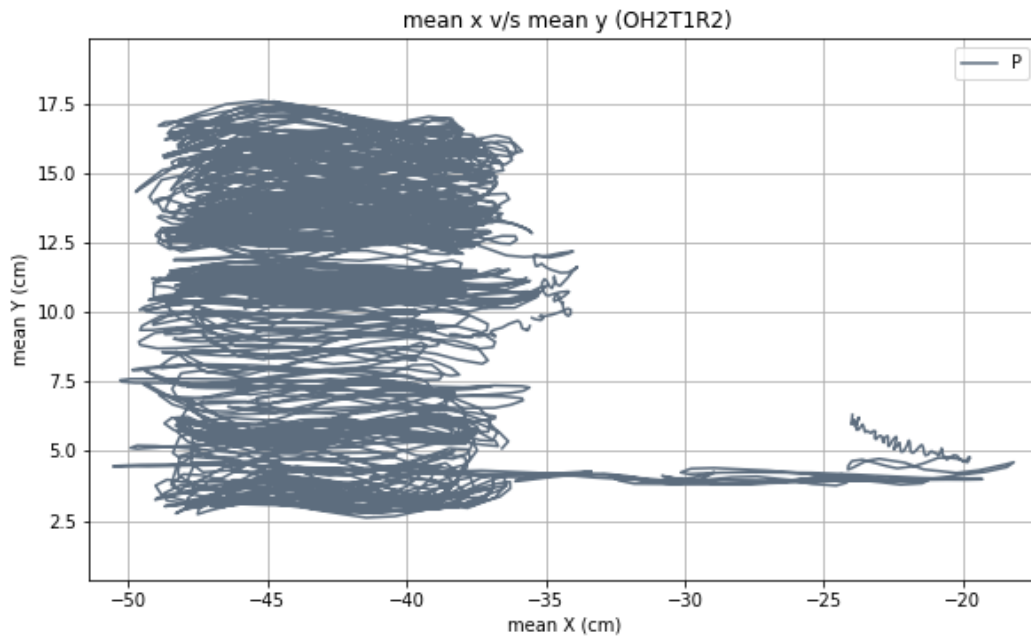


Figura 8-59: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T1R2) (Fuente: Elaboración propia.)

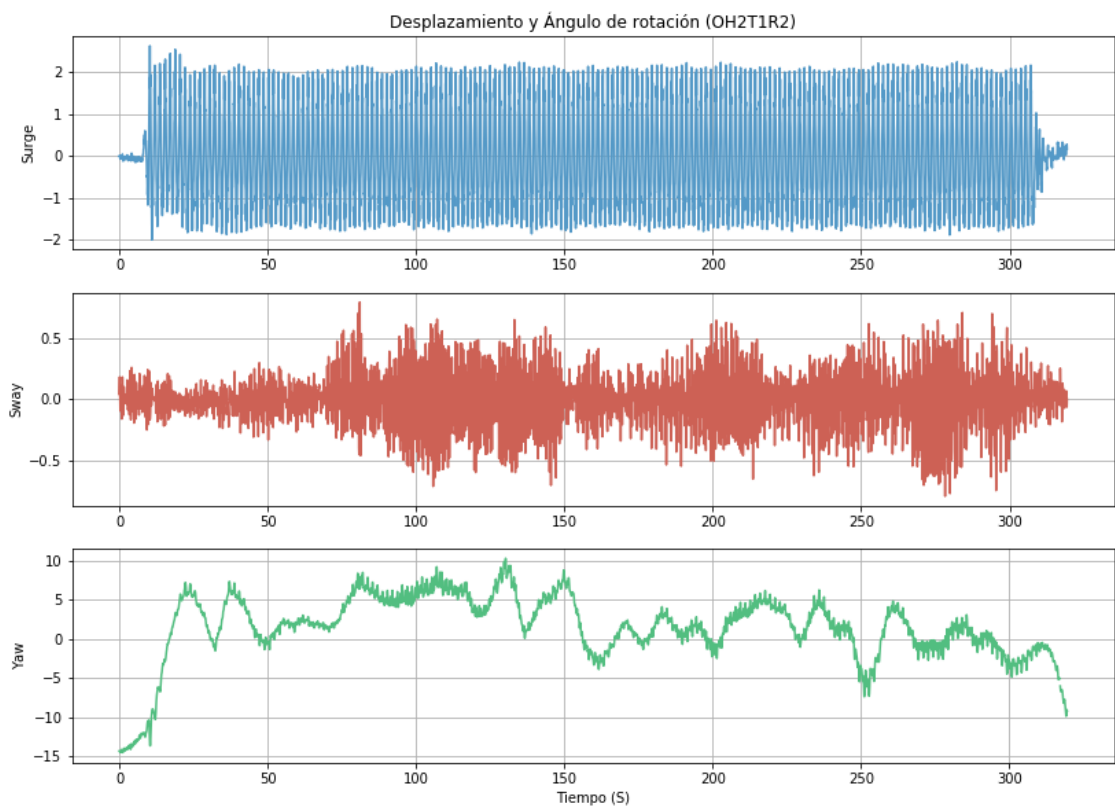


Figura 8-60: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T1R2) (Fuente: Elaboración propia.)

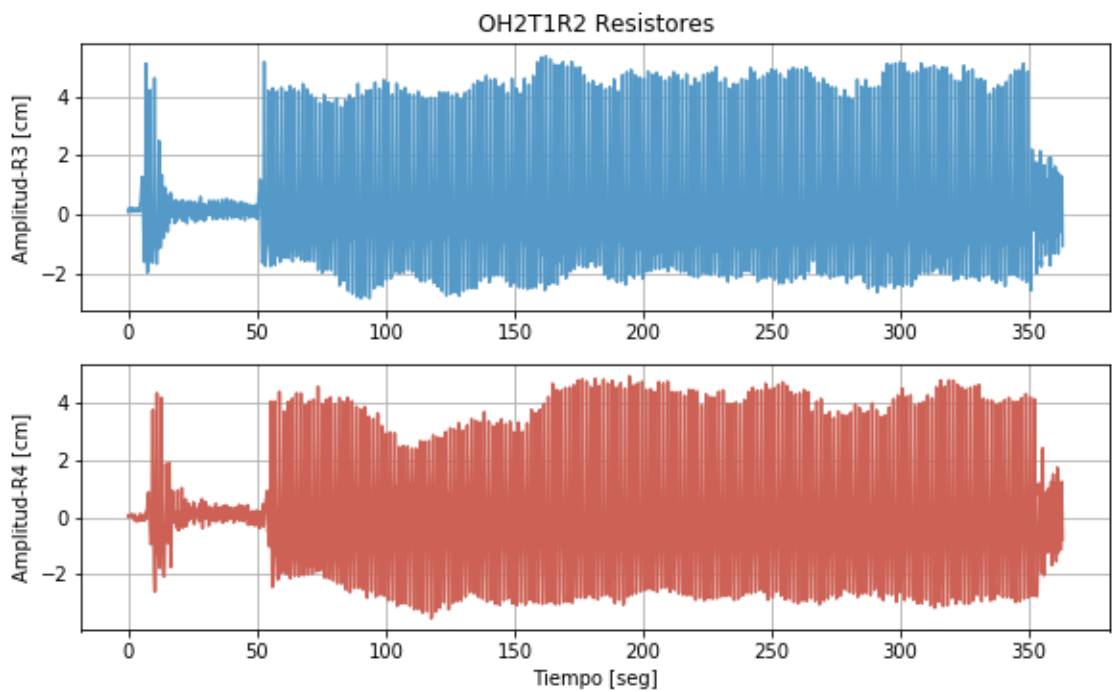


Figura 8-61: Datos de los resistores (Ensayo OH2T1R2) (Fuente: Elaboración propia.)

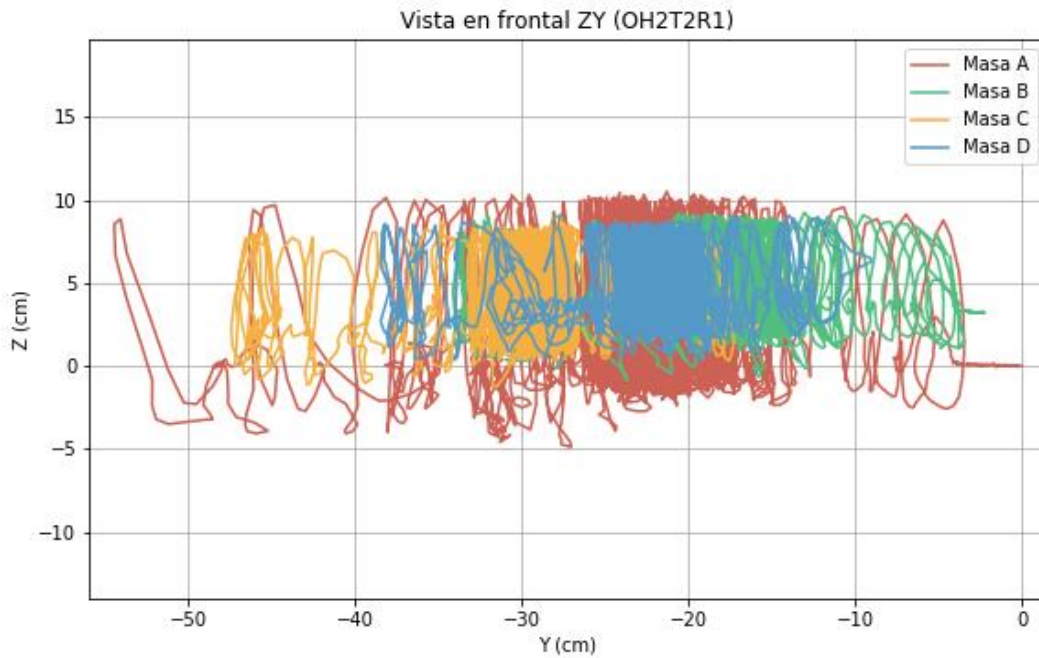


Figura 8-62: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R1 (Fuente: Elaboración propia.)

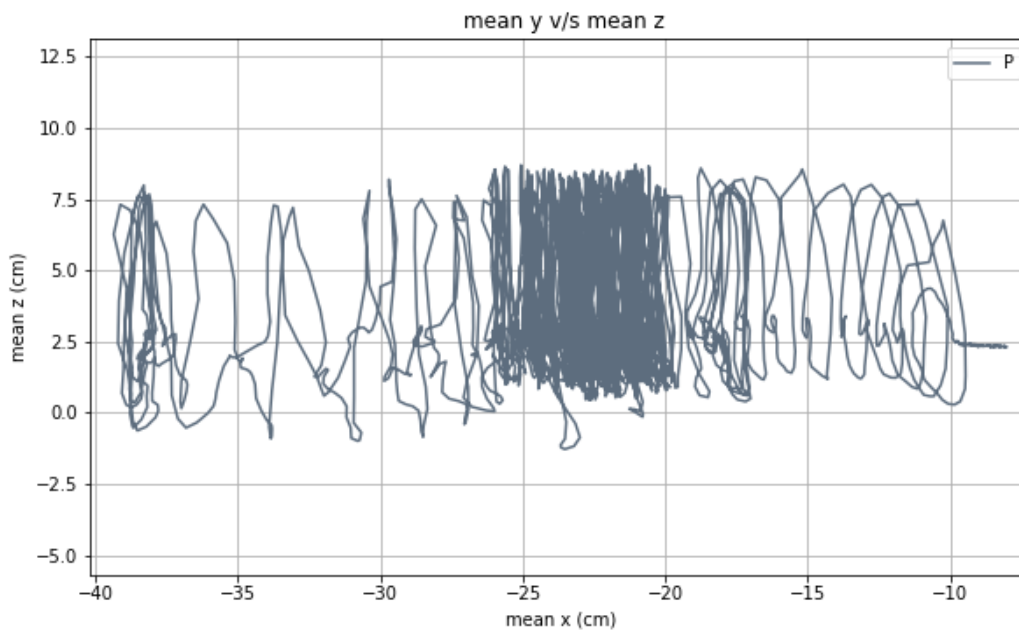


Figura 8-63: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

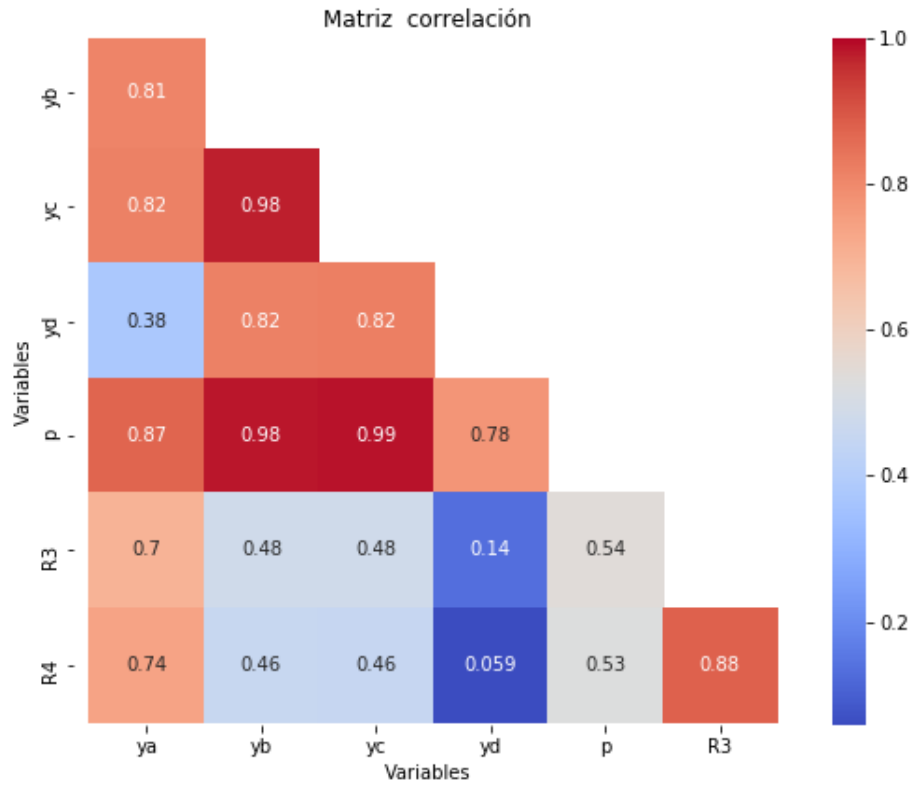


Figura 8-64: Correlación cámara frontal ZY (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

Gráfico de Coeficientes de correlación Vista frontal (OH2T2R1)

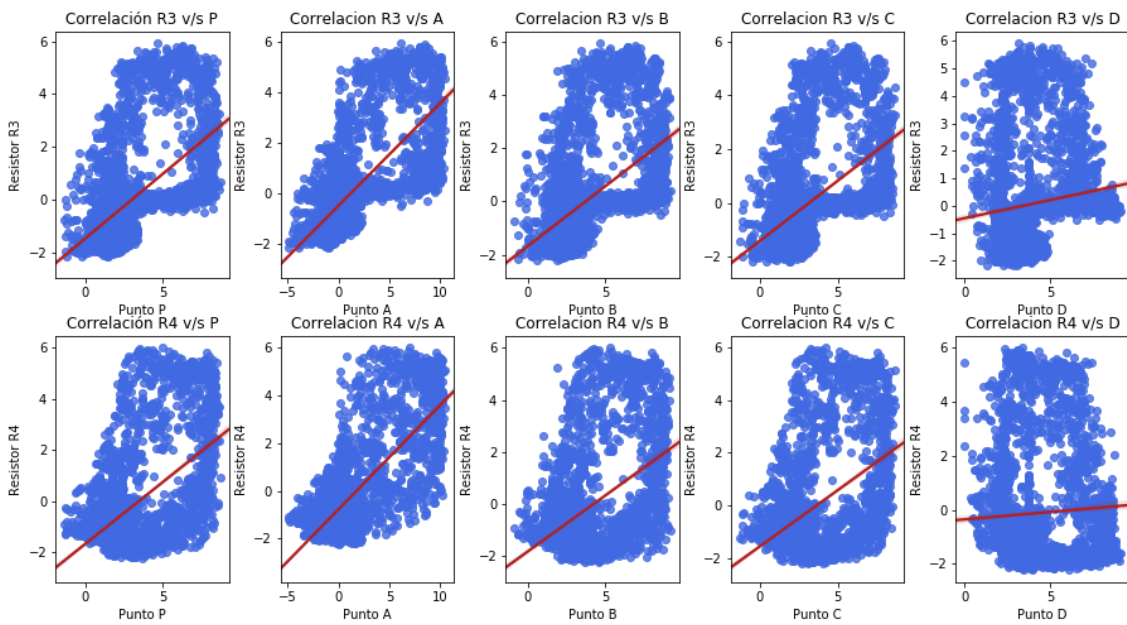


Figura 8-65: Gráfico de correlación cámara frontal ZY (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

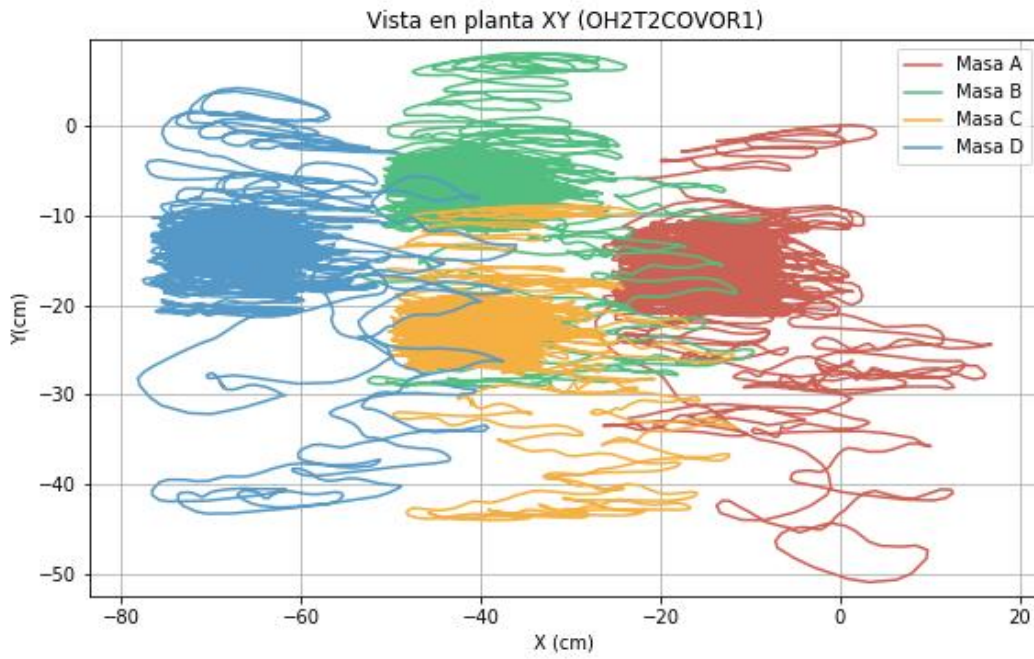


Figura 8-66: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R1 (Fuente: Elaboración propia.)

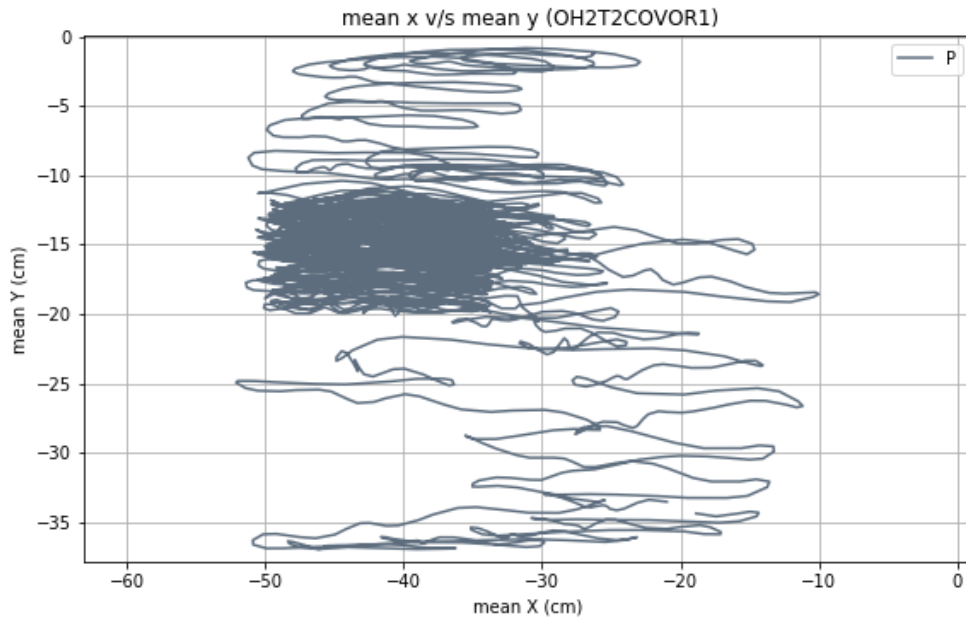


Figura 8-67: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista en planta YX (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

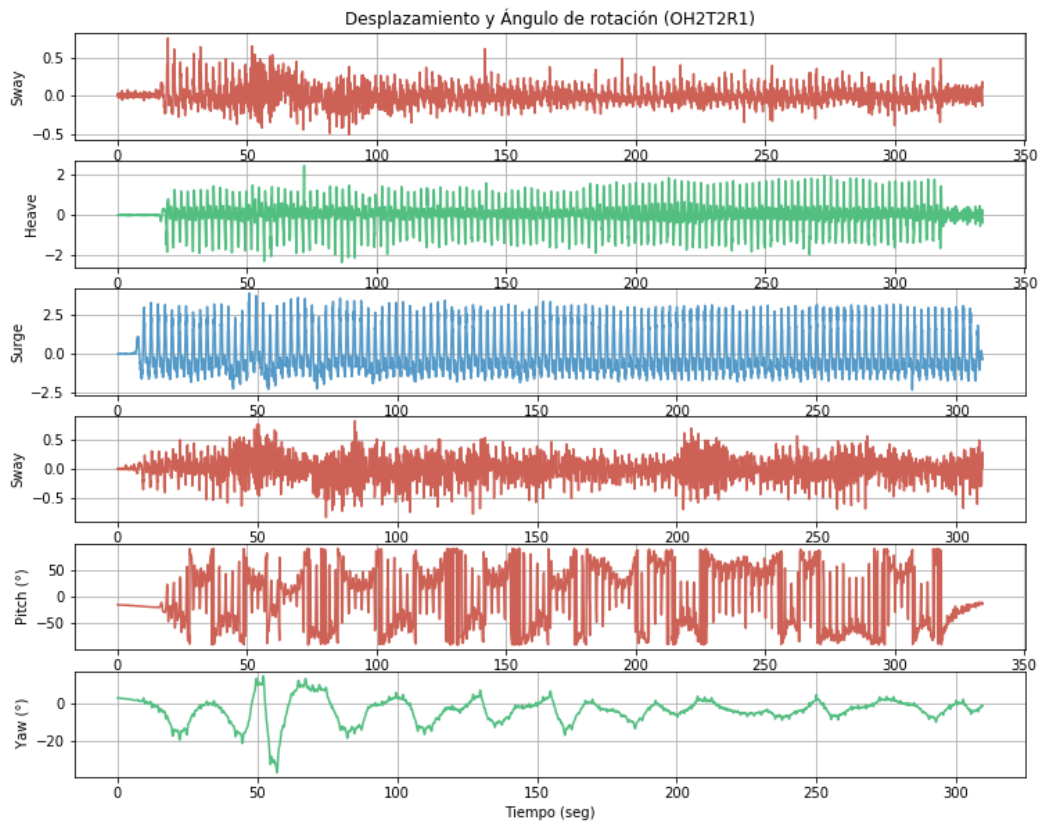


Figura 8-68: Desplazamiento y ángulo de giro (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

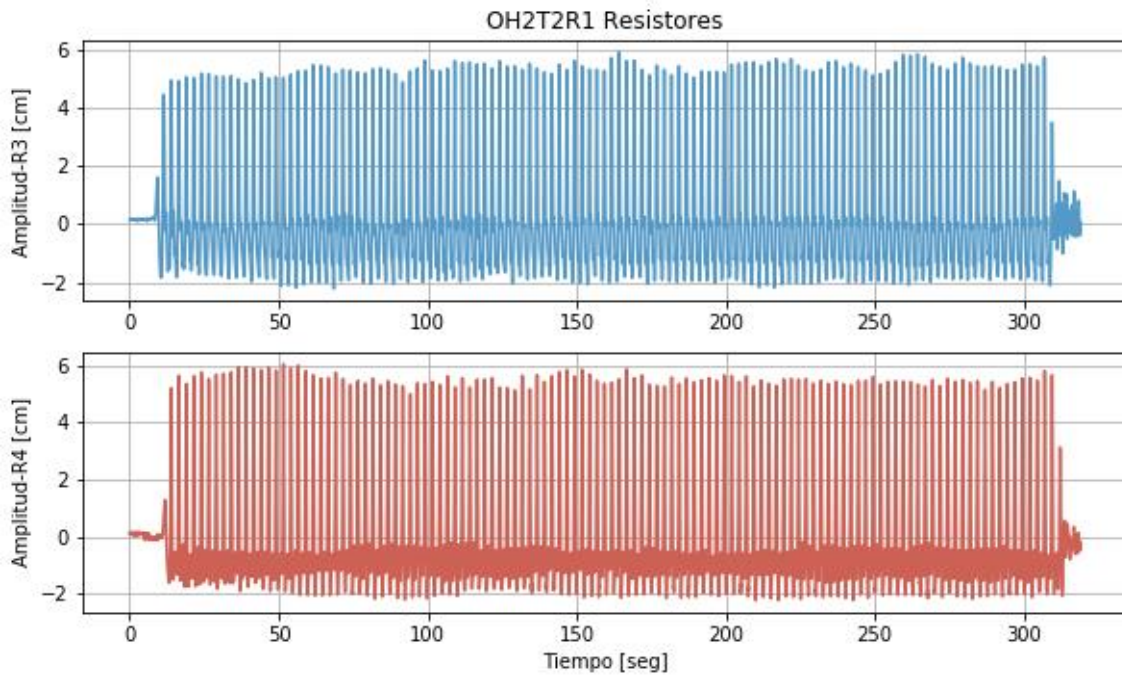


Figura 8-69: Datos de los resistores (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

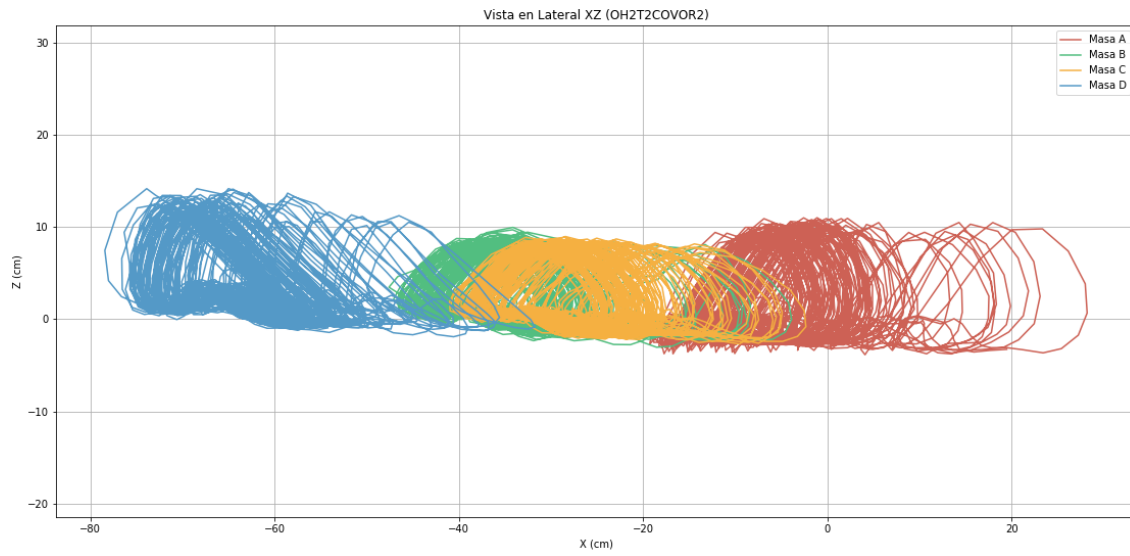


Figura 8-70: Vista de la cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

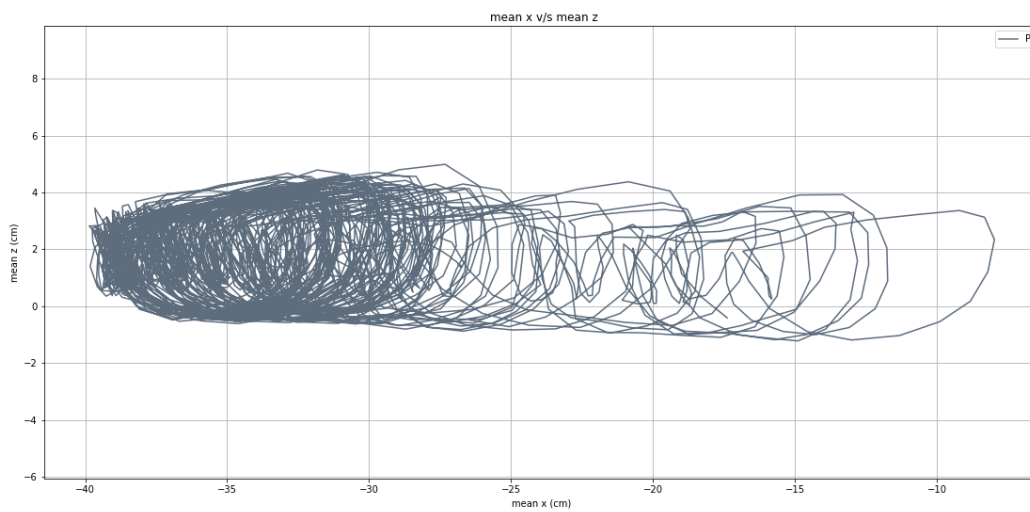


Figura 8-71: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista ZX (Ensayo OH2T2R1) (Fuente: Elaboración propia.)

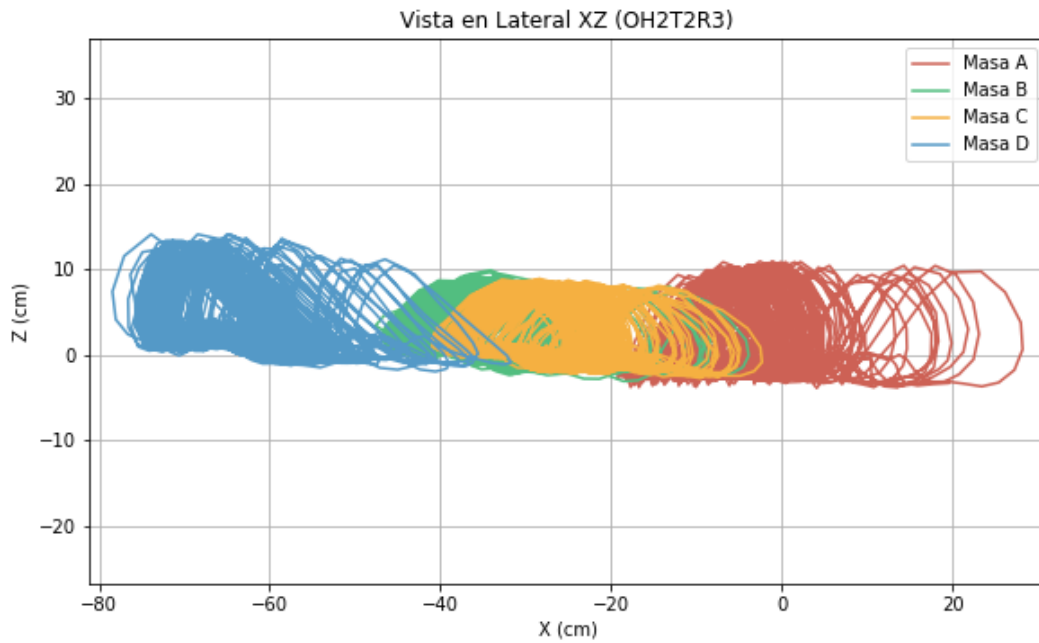


Figura 8-72: Vista de la cámara lateral ZX para el ensayo OH2T2R3 (Fuente: Elaboración propia.)

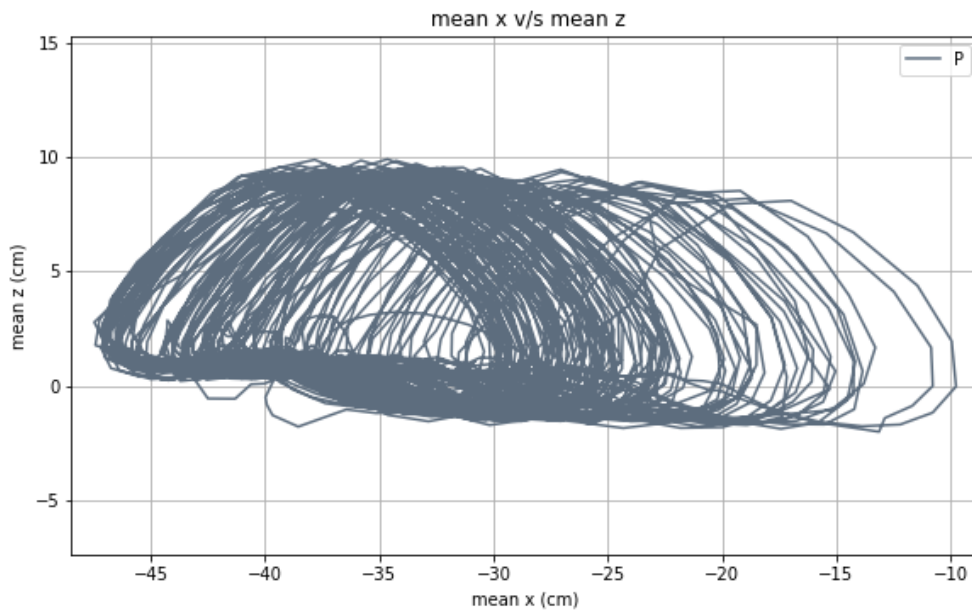


Figura 8-73: Desplazamiento promedio vista de la cámara en lateral ZX para el Ensayo OH2T2R3. (Fuente: Elaboración propia.)

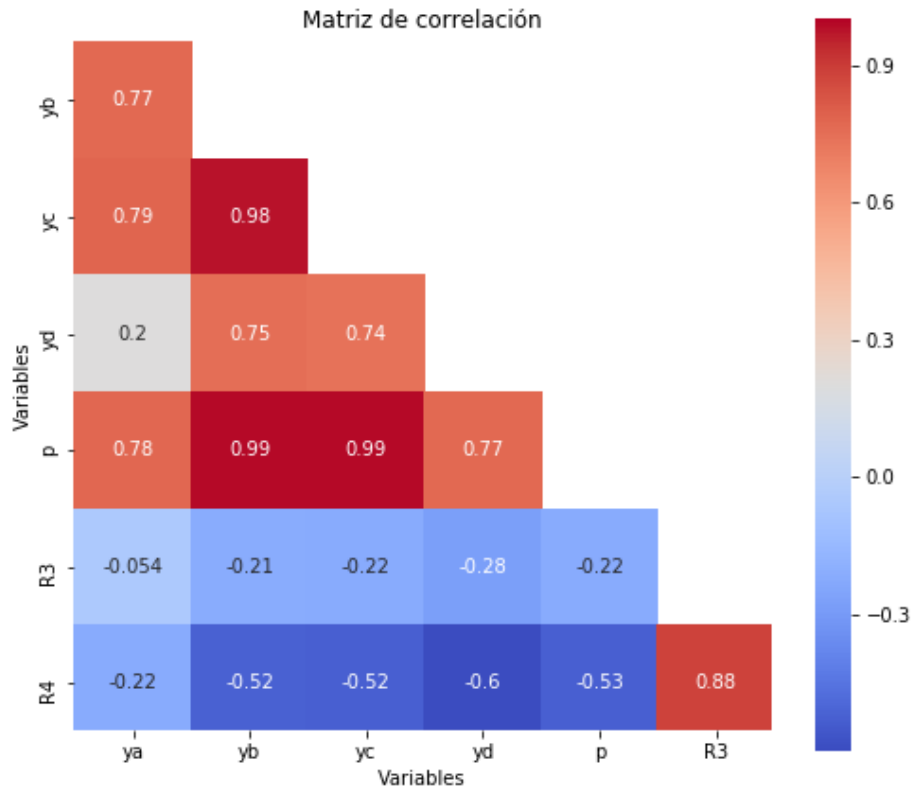


Figura 8-74: Correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

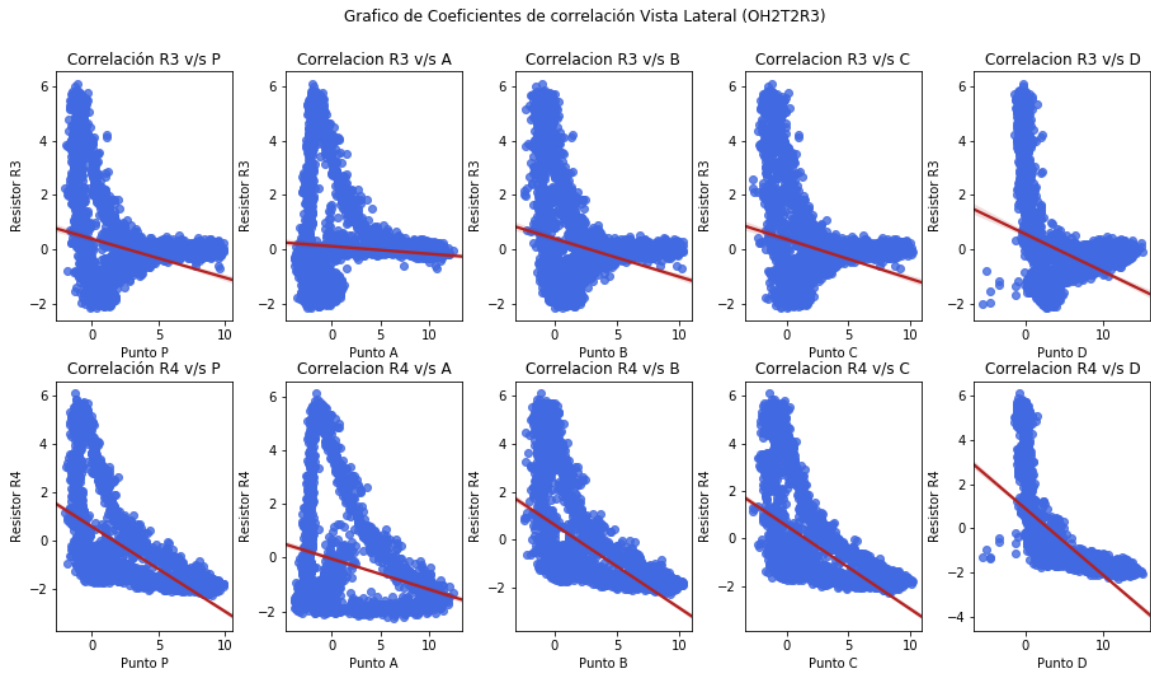


Figura 8-75: Gráficos de correlación cámara lateral ZX (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

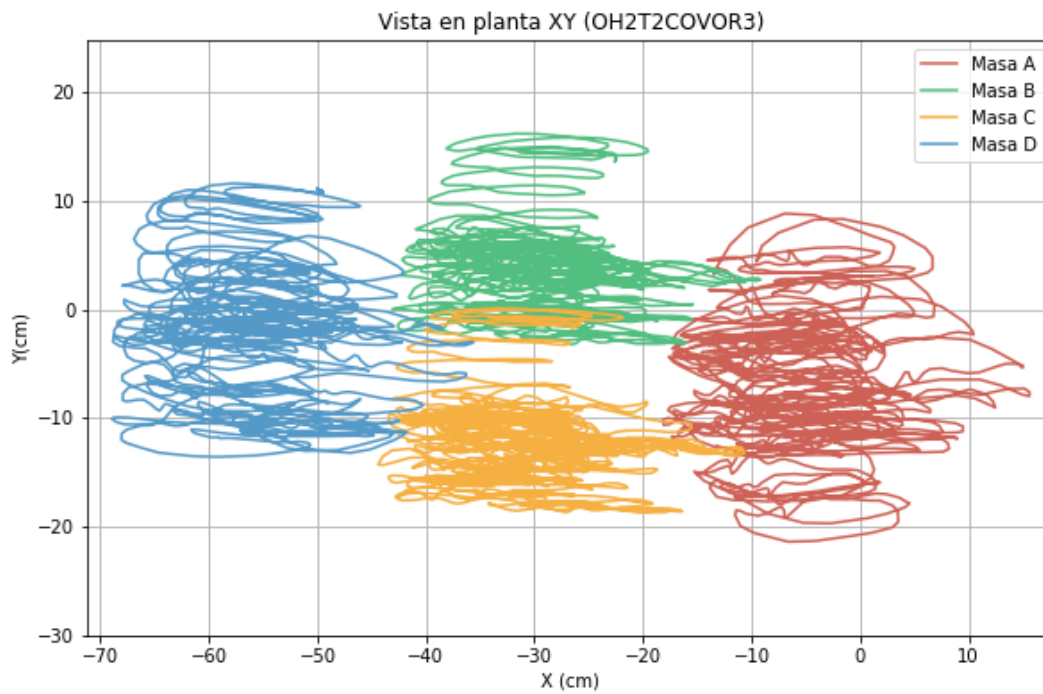


Figura 8-76: Vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R3. (Fuente: Elaboración propia.)

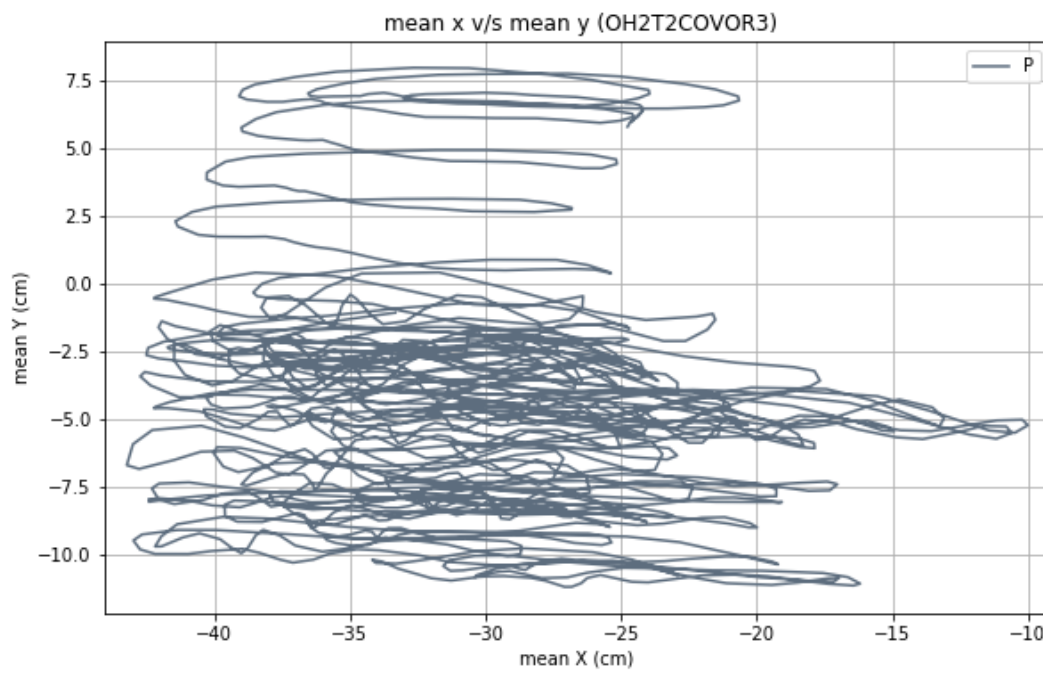


Figura 8-77: Desplazamiento promedio vista de la cámara en planta XY para el ensayo OH2T2R3. (Fuente: Elaboración propia.)

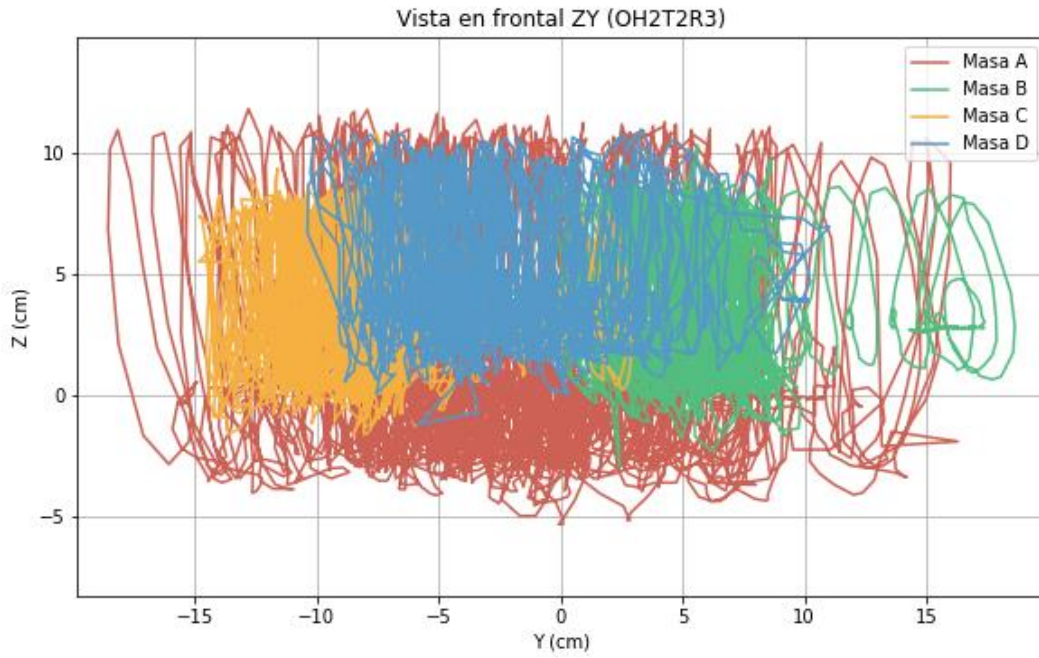


Figura 8-78: Vista de la cámara frontal ZY para el ensayo OH2T2R3 (Fuente: Elaboración propia.)

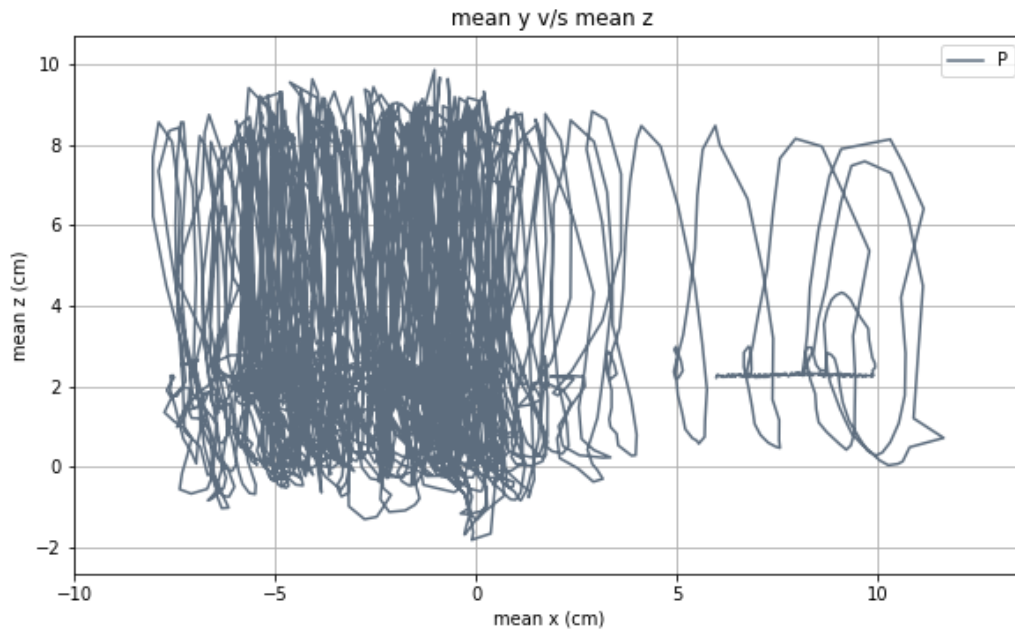


Figura 8-79: Desplazamiento vertical del punto P captado por la vista frontal ZY (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

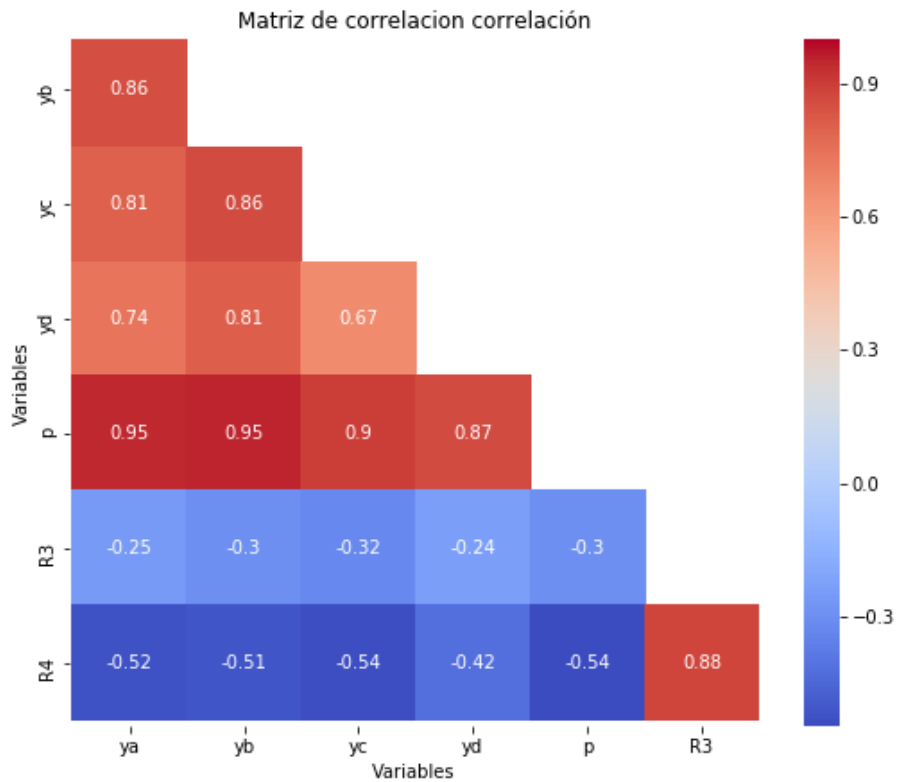


Figura 8-80: Coeficientes de correlación cámara frontal YZ (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

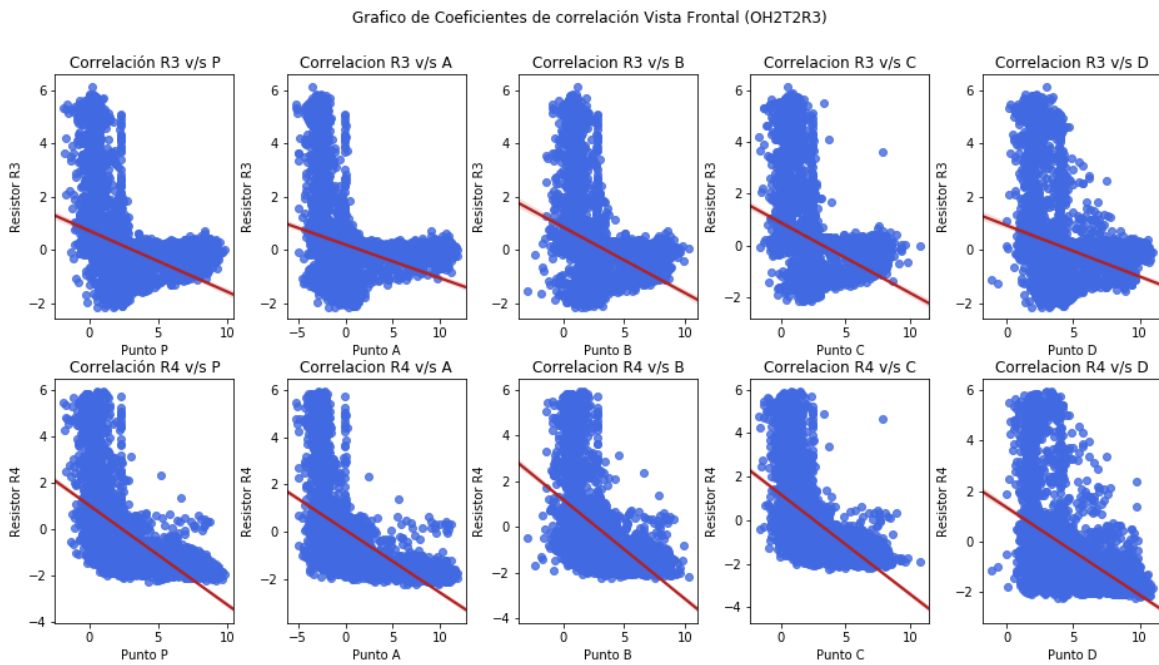


Figura 8-81: Gráficos de correlación cámara frontal YZ (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

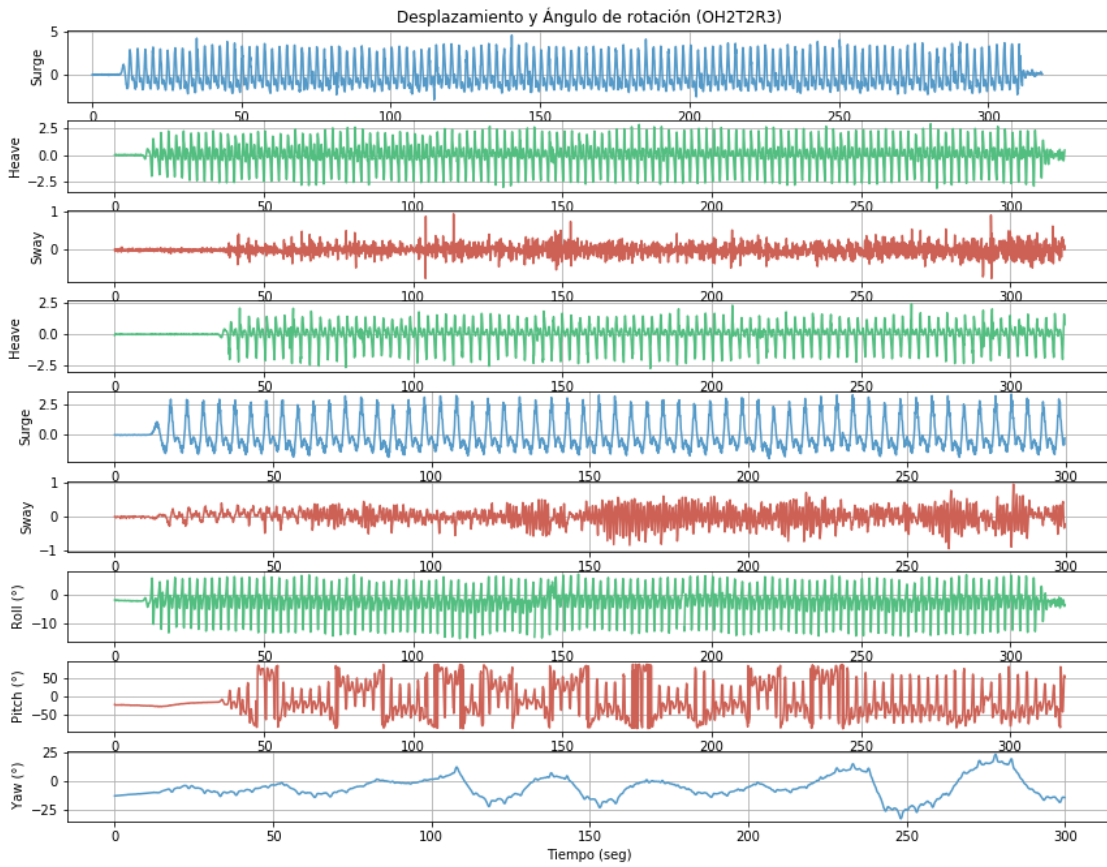


Figura 8-82: Desplazamientos y ángulos (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

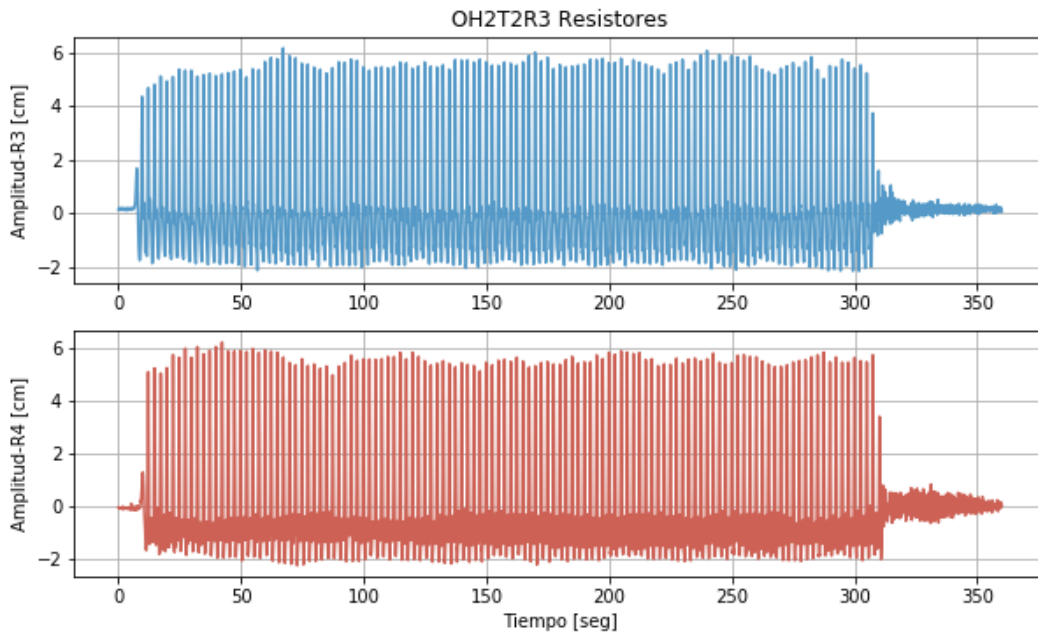


Figura 8-83: Datos de los resistores (Ensayo OH2T2R3) (Fuente: Elaboración propia.)

8.4 DIMENSIONES DEL CANAL DE OLAS

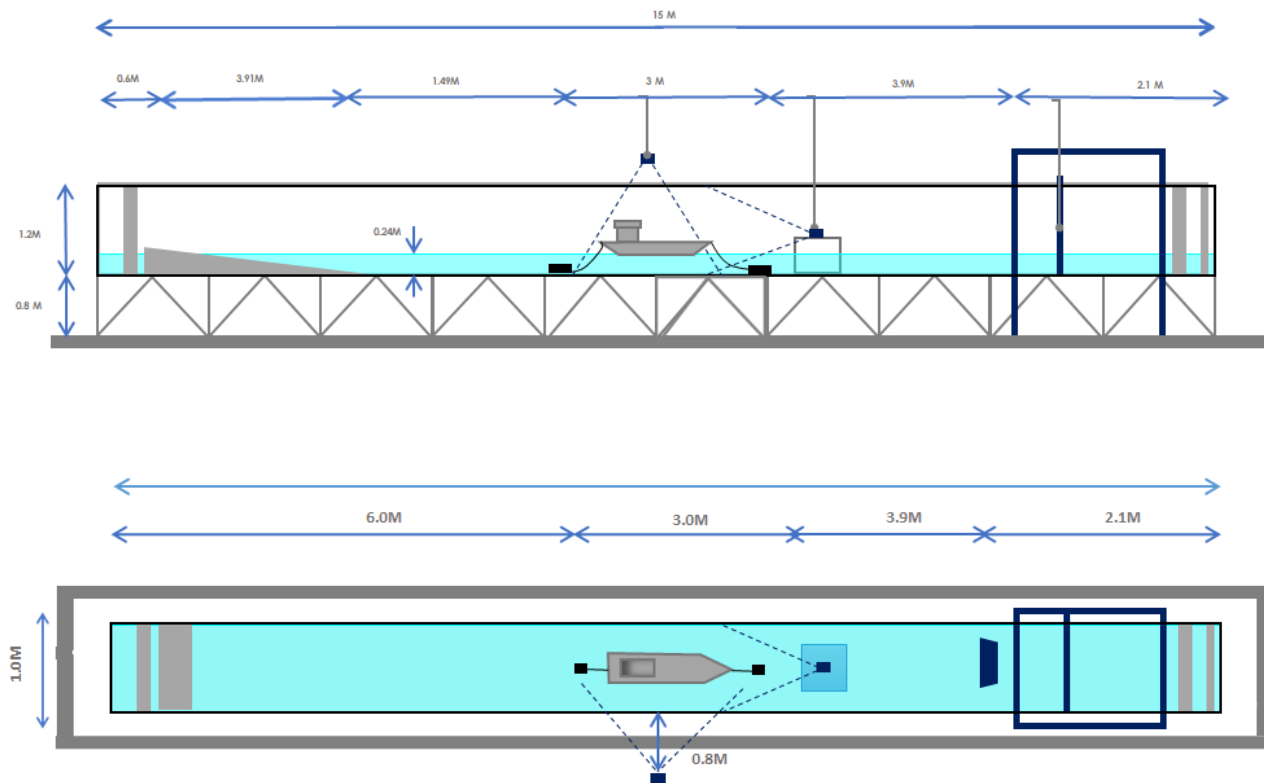
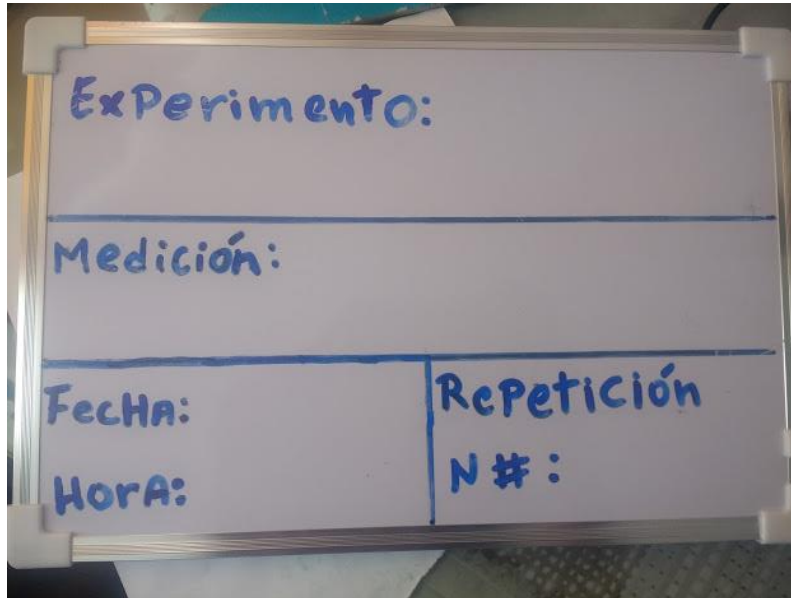


Figura 8-84: Dimensiones de la vista frontal y en planta del canal de olas.

(Fuente: Elaboración propia.)

8.5 OTROS ELEMENTOS UTILIZADOS



A whiteboard with handwritten labels in blue ink. The labels are arranged in a grid-like structure:

Experimento:	
Medición:	
Fecha:	Repetición
Hora:	N#:

Figura 8-85: Letrero. (Fuente: Elaboración propia.)