

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Experimentación con modelos simplificados de embarcaciones interislas de
Galápagos sometidos a olas rompientes laterales.

INGE-3066

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Roberto Carlos Hernández Vera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres Amada y Vicente, por su apoyo incondicional, paciencia y su constante motivación a lo largo de toda mi formación académica. A mis hermanas Carolina, Karla y Katherine, quienes han sido siempre mi ejemplo a seguir de dedicación, esfuerzo y superación personal. A mi Coquita, fiel compañera de largas noches de estudio, cuya compañía transformó el estrés en tranquilidad. A mis abuelitos, primos y tíos quienes siempre me supieron expresar sus buenos deseos. A mi novia Dabie por su amor incondicional, apoyo y compañía. A mis amigos y compañeros quienes fueron parte fundamental en mi crecimiento personal y académico. Sobre todo, este trabajo va dedicado a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y la perseverancia para cumplir esta meta.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a la ESPOL, en especial, a todos los que conforman la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo. Agradezco a mi tutor, PhD. José Marín López, por su guía, acompañamiento y valiosas observaciones durante la elaboración de este proyecto. En particular, al Ing. Gilson Jiménez y al Ing. Manuel Suárez por su apoyo y colaboración durante la ejecución de las pruebas experimentales. De manera especial a mi novia Dabie, quien además de ser mi pareja sentimental, hizo de compañera de laboratorio durante la experimentación. Finalmente, a mis amigos, Ignacio, Juan, Valentín, Ivanova, Soojin, Genesis y Jean Carlos, por su amistad sincera, con quienes compartí risas, desvelos y aprendizajes que marcaron de manera especial esta etapa de mi vida.

Declaración Expresa

Yo Roberto Carlos Hernández Vera acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

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

Guayaquil, 24 de febrero del 2026.

Roberto C. Hernández V.

Evaluadores

Mgtr. José María Rodríguez Lamchang

Profesor de Materia

PhD. José Rolando Marín López

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto analiza el mecanismo de zozobra de embarcaciones rápidas interislas de Galápagos sometidas a olas rompientes laterales con el fin de mejorar la seguridad del transporte marítimo en la región insular. Se considera que la respuesta dinámica transversal y la probabilidad de zozobra dependen de la geometría del casco, la estabilidad inicial y las características de la excitación por olas rompientes. El estudio se desarrolló de manera experimental en el tanque de olas del laboratorio SiMar, donde se implementó un sistema de generación de olas rompientes controladas con una rampa de ángulo ajustable. Además, se fabricaron tres modelos de sección constante con diferentes ángulos de astilla muerta y un sistema de lastre móvil para variar el centro de gravedad. Se realizaron pruebas de inclinación, oscilación libre y oscilación forzada variando la frecuencia y amplitud de excitación. Se registraron ángulos y aceleraciones con un sensor inalámbrico. Los resultados mostraron un comportamiento dinámico no lineal, acumulación progresiva de escora y reducción del francobordo efectivo bajo excitaciones laterales repetidas. Se concluye que la geometría del casco influye en la distribución de energía entre levantamiento y balance, condicionando la estabilidad transversal y la posibilidad de zozobra.

Palabras Clave: estabilidad transversal, respuesta dinámica, zozobra, balance.

Abstract

The present project analyzes the capsizing mechanism of high-speed inter-island craft operating in the Galapagos Islands when subjected to lateral breaking waves, with the aim of improving maritime transport safety in the insular region. It is assumed that the transverse dynamic response and the probability of capsizing depend on hull geometry, initial stability, and the characteristics of excitation induced by breaking waves. The study was conducted experimentally in the wave tank of the SiMar laboratory, where a controlled breaking-wave generation system was implemented using an adjustable-slope ramp. In addition, three constant-section models with different deadrise angles were constructed, along with a movable ballast system to vary the vertical position of the center of gravity. Inclination, free-oscillation, and forced-oscillation tests were performed by varying the excitation frequency and amplitude. Roll angles and accelerations were recorded using a wireless sensor. The results showed nonlinear dynamic behavior, progressive heel accumulation, and a reduction of the effective freeboard under repeated lateral excitations. It is concluded that hull geometry significantly influences the distribution of energy between heave and roll, thereby conditioning transverse stability and the likelihood of capsizing.

Keywords: *transverse stability, dynamic response, capsizing, roll*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 <i>Lanchas rápidas interislas de las Galápagos.</i>	6
1.5.2 <i>Ecuación de dispersión en profundidad finita.</i>	7
1.5.3 <i>Tipos de olas rompientes</i>	7
1.5.4 <i>Amortiguamiento de balance en embarcaciones rápidas.</i>	9
1.5.5 <i>Mecanismo de vuelco en embarcaciones pequeñas bajo olas rompientes laterales.</i> 10	

1.5.6	<i>Análisis de estabilidad dinámica frente a olas rompientes laterales.</i>	11
1.5.7	<i>Influencia de la geometría del casco en la estabilidad transversal bajo olas rompientes.</i>	12
Capítulo 2		13
2.	<i>Metodología.</i>	14
2.1	<i>Definición de las características de las olas rompientes considerando fondo inclinado.</i>	
14		
2.2	<i>Modelos de embarcación y pruebas experimentales.</i>	15
2.3	<i>Procesamiento y análisis de datos obtenidos.</i>	18
Capítulo 3		19
3.	<i>Resultados y análisis.</i>	20
3.1	<i>Resultados de los experimentos de inclinación.</i>	20
3.2	<i>Resultados de las pruebas de oscilación libre.</i>	22
3.3	<i>Resultados de las pruebas de oscilación forzada.</i>	25
3.3.1	<i>Características de la excitación.</i>	25
3.3.2	<i>Respuesta en balance bajo oscilación forzada por olas rompientes laterales.</i>	26
3.3.3	<i>Respuesta en aceleraciones y movimiento acoplado.</i>	31
3.3.4	<i>Análisis del francobordo en la condición crítica de excitación.</i>	34
Capítulo 4		37
4.	<i>Conclusiones y recomendaciones.</i>	38
4.1	<i>Conclusiones.</i>	38
4.2	<i>Recomendaciones.</i>	39

Referencias.....	41
Apéndices.....	45
Apéndice A: Construcción del sistema experimental.	45
Apéndice B: Experimentación.....	48
Apéndice C: Señales experimentales representativas.	50
Apéndice D: Procesamiento de datos.	64
Apéndice E: Calibración y especificaciones del sensor.	68

Abreviaturas

FRISC	Fast Raiding Interception and Special force Craft
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
MINTUR	Ministerio de Turismo
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Simbología

C	Coeficiente de Amortiguamiento
GMT	Altura metacéntrica transversal
h_b	Profundidad de rompimiento
h_0	Profundidad del tanque
Hw	Altura significativa de la ola
KG	Centro de gravedad de la embarcación.
K_{xx}	Radio de Giro Virtual
ω_n	Frecuencia natural

Índice de figuras

Figura 1 (<i>Mapa Ecoturístico de Galápagos al Alcance Del Viajero – Ministerio de Turismo, n.d.</i>)	2
Figura 2 <i>Rutas y cantidad de viajes que se realizaron en el 2018 entre las islas en las Galápagos, (Ministerio de turismo, 2018)</i>	3
Figura 3 <i>Batimetría de las Islas Galápagos, (GEBCO Gridded Bathymetry Data Download, 2025)</i>	3
Figura 4 <i>Naufragio de lancha Queen Evolution, (Turisec, 2023)</i>	4
Figura 5 <i>Accidentes registrados en las Islas Galápagos, (Marin, 2025)</i>	5
Figura 6 <i>Tipos de olas rompientes, (Robertson et al., 2013)</i>	8
Figura 7 <i>Modelo de 20° de astilla muerta oscilando en balance, (Consolo et al., 2020)</i>	10
Figura 8 <i>Zozobra observada en experimentación, (Ishida et al., 1990)</i>	11
Figura 9 <i>Parámetros de olas en tanque de profundidad finita con fondo inclinado</i>	15
Figura 10 <i>Rampa de ángulo ajustable para tanque de olas.</i>	15
Figura 11 <i>Modelos de sección constante con diferente ángulo de astilla muerta</i>	16
Figura 12 <i>Peso deslizante vertical.</i>	17
Figura 13 <i>WT901BLECL 9-axis BLE Accelerometer Inclinator</i>	17
Figura 14 <i>Pruebas experimentales realizadas.</i>	18
Figura 15 <i>Experimento de inclinación Condición 1.</i>	21
Figura 16 <i>Experimento de inclinación Condición 2.</i>	21
Figura 17 <i>Pruebas de oscilación libre Condición 1.</i>	23
Figura 18 <i>Pruebas de oscilación libre Condición 2.</i>	23
Figura 19 <i>Señal completa de oscilación forzada registrada durante un ensayo típico, Modelo MK08, desplazamiento shaker:8mm, frecuencia: 1 Hz.</i>	27
Figura 20 <i>Características de ola Crítica, Freq 1 Hz, desplazamiento shaker 8 mm, h=10cm</i>	28

Figura 21 Oscilación forzada en balance: Condición 1, 1Hz, desplazamiento shaker 8 mm.	28
Figura 22 Características de ola Crítica, Freq 1 Hz, desplazamiento shaker 11 mm, h=10cm	29
Figura 23 Oscilación Forzada en balance: Condición 1, 1Hz, desplazamiento shaker 11 mm.	29
Figura 24 Características de ola Crítica, Freq 1,5 Hz, desplazamiento shaker 8 mm, h=12.5 cm	30
Figura 25 Oscilación Forzada en balance: Condición 1, 1.5Hz, desplazamiento shaker 8 mm.	30
Figura 26 Características de ola Crítica, Freq 1,5 Hz, desplazamiento shaker 12 mm, h=12,5cm.	31
Figura 27 Oscilación Forzada 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.....	31
Figura 28 Aceleración lineal de ladeo y levantamiento.....	32
Figura 29 Aceleración lineal en el eje y, 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.	33
Figura 30 Aceleración lineal en el eje z, 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.	34
Figura 31 Francobordos en condición crítica Condición 1, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12mm, h:12.5 cm.....	35
Figura 32 Acumulación de escora por excitaciones laterales repetidas.....	36
Figura 33 Fabricación de modelos de acrílico.	45
Figura 34 Modificación de modelos de acrílico para dar soporte al pilar de peso deslizante.	45
Figura 35 Recubrimiento de rampa con impermeabilizante.	46
Figura 36 Modificación de la punta de la rampa con plancha de hierro galvanizado.	46
Figura 37 Características principales de modelo MK08.....	47
Figura 38 Características principales de modelo MK14.....	47

Figura 39 Características principales de modelo MK20.....	48
Figura 40 Experimento de inclinación.....	48
Figura 41 Registro de datos en tiempo real en el programa del sensor inalámbrico.	49
Figura 42 Condición de carga 1.....	49
Figura 43 Condición de carga 2.....	50
Figura 44 Señal representativa experimento de inclinación modelo MK08 Condición 1.	50
Figura 45 Señal representativa experimento de inclinación modelo MK14 Condición 1.	51
Figura 46 Señal representativa experimento de inclinación modelo MK20 Condición 1.	51
Figura 47 Señal representativa experimento de inclinación modelo MK08 Condición 2.	52
Figura 48 Señal representativa experimento de inclinación modelo MK14 Condición 2.	52
Figura 49 Señal representativa de oscilación libre de modelo MK20 Condición 2.	53
Figura 50 Señal representativa de oscilación libre de modelo MK08 Condición 1.	53
Figura 51 Señal representativa de oscilación libre de modelo MK14 Condición 1.	54
Figura 52 Señal representativa de oscilación libre de modelo MK20 Condición 1.	54
Figura 53 Comportamiento del coeficiente de amortiguamiento en balance.	55
Figura 54 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.	55
Figura 55 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.	56
Figura 56 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.	56
Figura 57 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker:11 mm, Condición 1.	57
Figura 58 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker:11 mm, Condición 1.	57

Figura 59 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker:11 mm, Condición 1.	58
Figura 60 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:8 mm, Condición 1.	58
Figura 61 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:8 mm, Condición 1.	59
Figura 62 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:8 mm, Condición 1.	59
Figura 63 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	60
Figura 64 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	60
Figura 65 Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	61
Figura 66 Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.....	61
Figura 67 Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.....	62
Figura 68 Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.....	62
Figura 69 Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	63
Figura 70 Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	63

Figura 71 Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker:12 mm, Condición 1.	64
Figura 72 Interfaz general de programa usado para procesamiento de datos. Elaboración propia.	64
Figura 73 Modulo de cálculos de oscilación libre.	65
Figura 74 Cálculos realizados a partir de señal de oscilación libre.	65
Figura 75 Resultados obtenidos de cálculo de oscilación libre en programa de Python.	66
Figura 76 Modulo de oscilación forzada en programa en Python.	66
Figura 77 Modulo de comparación de señales en programa de Python.	67
Figura 78 Modulo de cálculos de aceleración lineal en Python.	67
Figura 79 Parámetros del acelerómetro.	68
Figura 80 Interfaz de programa del sensor inalámbrico.	69
Figura 81 Configuración de frecuencia y banda ancha de muestreo de sensor inalámbrico. .	69

Índice de tablas

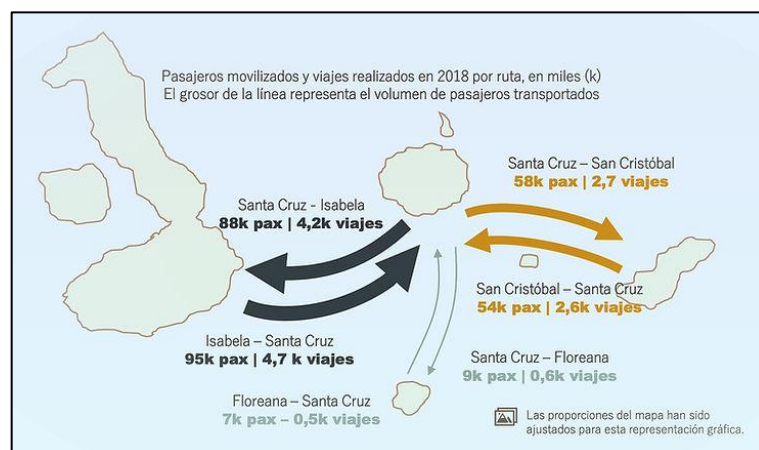
Tabla 1 Valores del parámetro de similitud del rompimiento, (Robertson et al., 2013).....	9
Tabla 2 Características principales de los modelos usados.....	20
Tabla 3 Resultados de los experimentos de inclinación para los 3 modelos.	22
Tabla 4 Resumen de resultados de oscilación libre.	24
Tabla 5 Planificación experimental de pruebas realizadas.	25

Capítulo 1

y condiciones de oleaje más fuertes entre julio y diciembre que cubren rutas entre las principales islas (Dirección del parque nacional galápagos, n.d.).

Figura 2

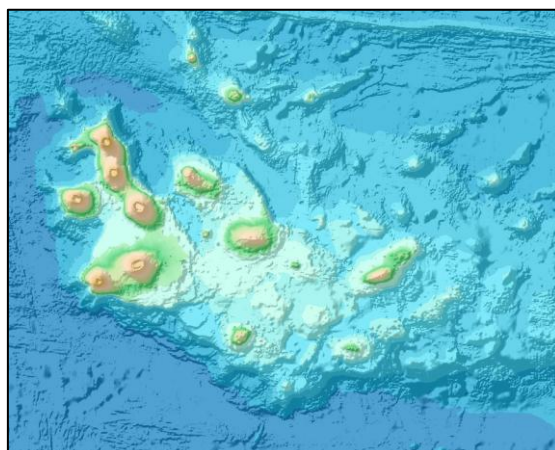
Rutas y cantidad de viajes que se realizaron en el 2018 entre las islas en las Galápagos, (Ministerio de Turismo, 2018)



El oleaje en la región se caracteriza por una altura moderada entre 0,8 y 1,5 metros y periodos medios entre 7 y 15 segundos (Portilla-Yandún et al., 2025). Esto, sumado a la batimetría del archipiélago mostrado en la **Figura 3**, presenta pendientes submarinas abruptas y plataformas rocosas debido a su origen volcánico. Ayudan a la formación de patrones complejos en las corrientes marinas que producen olas rompientes en las zonas costeras (van Norren & de Blok, 2025), lo que sustenta la necesidad de estudiar experimentalmente su interacción con embarcaciones rápidas en la región.

Figura 3

Batimetría de las Islas Galápagos, (GEBCO Gridded Bathymetry Data Download, 2025)



En los últimos años se han registrado recurrentes accidentes en el transporte interislas de las Islas Galápagos como el naufragio de la lancha Queen Evolution en 2023 mostrado en la **Figura 4**. Entre las posibles causas se señalan el sobredimensionamiento de los sistemas propulsivos, los diseños artesanales sin validación técnica y la inestabilidad transversal provocada por la acción de las olas (Frankling Vega, 2023). Por lo que, se vuelve necesario profundizar en el comportamiento dinámico de las embarcaciones interislas frente a olas rompientes para prevenir futuros siniestros marítimos.

Figura 4

Naufragio de lancha Queen Evolution, (Turisec, 2023)



1.2 Descripción del Problema

Durante la última década han ocurrido recurrentes accidentes marítimos con diversas lanchas rápidas interislas que son el principal medio de transporte en esta importante región turística del Ecuador. Con base en los registros disponibles, mostrados en la **Figura 5**, se ha evidenciado ciertos patrones.

Algunos siniestros se produjeron en zonas cercanas a la costa, donde es común la presencia de olas rompientes. Además, en ciertos casos, las embarcaciones estaban a la deriva, es decir, en condición sin propulsión.

Como consecuencias ante estos eventos se incluyen pérdidas humanas, materiales, así como también, impactos ambientales significativos, sobre todo en un ecosistema frágil y endémico. Por otro lado, tales incidentes pueden repercutir de manera negativa en la confianza de los turistas y potencialmente, reducir la afluencia turística en el archipiélago.

Figura 5

Accidentes registrados en las Islas Galápagos, (Marin, 2025)



1.3 Justificación del Problema

A pesar de la frecuencia de estos incidentes, no se dispone de estudios técnicos ni datos consolidados que determinen con certeza las causas que los originan. Entonces, ante el patrón observado, sugiere una posible relación entre las condiciones locales de oleaje, específicamente olas rompientes y características geométricas de las embarcaciones rápidas que en su mayoría son construidas de manera artesanal. Por lo que resulta necesario realizar estudios que permita evaluar, la respuesta dinámica de este tipo de embarcaciones frente a escenarios similares a la realidad. Esta necesidad se alinea con lo establecido en el párrafo 2.3.4 del International Code of Safety for High-Speed Craft (International Maritime Organization, 2008), el cual indica que, cuando una embarcación no cumple con los criterios de estabilidad intacta tradicionales, pueden aplicarse métodos alternativos equivalentes, adecuados al tipo de nave y a su zona de operación. Con la finalidad de aportar evidencia

técnica que contribuya a reducir el impacto ambiental, mejorar la seguridad, y el diseño de las lanchas que operan en las islas Galápagos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el mecanismo de zozobra de embarcaciones interislas de Galápagos mediante experimentos con modelos de sección constante sometidos a olas rompientes laterales en un tanque de olas, para una mejora futura de la seguridad de este tipo de transporte.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Implementar en el tanque de olas local del laboratorio SiMar un sistema capaz de generar olas rompientes, para el estudio de la zozobra de embarcaciones rápidas.
2. Registrar la respuesta dinámica de un modelo de embarcación rápida de sección constante mediante ensayos experimentales con diferentes ángulos de astilla muerta.
3. Analizar la relación entre los parámetros de las olas, la estabilidad transversal y las características geométricas del modelo, utilizando los datos registrados con olas rompientes.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Lanchas rápidas interislas de las Galápagos.

El sistema de transporte marítimo interislas de las Galápagos se compone principalmente de lanchas rápidas de fibra de vidrio de 12 metros de eslora con capacidades entre 20 y 40 pasajeros propulsados comúnmente por 3 o 4 motores fuera de borda de hasta 300 HP llegando alcanzar los 60 nudos. Cubren rutas entre las islas habitadas en un viaje de aproximadamente 2 horas y media, este sistema presenta limitaciones técnicas y administrativas relacionadas con la falta de regulación, control de mantenimiento y

condiciones de seguridad ya que muchas embarcaciones operan con diseños empíricos no estandarizados, contruidos localmente de manera artesanal, lo que genera diferencias en desempeño, estabilidad y consumo de combustible. Además, la carencia de inspección adecuada y de protocolos de navegación unificados incrementa el riesgo del servicio ante condiciones de mar adversas como lo indican (Huacón & Matute, 2024).

1.5.2 Ecuación de dispersión en profundidad finita.

Esta ecuación establece la relación entre la frecuencia angular ω , el número de onda k y la profundidad del agua h en ondas gravitacionales (Krogstad & Arntsen, 2000). Se expresa como:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.1)$$

Donde,

g es la gravedad

k es el número de onda ($k = \frac{2\pi}{L}$)

h es la profundidad del agua

En el contexto de tu estudio de rompimiento de olas, esta ecuación es fundamental para estimar la longitud de ola en el tanque, ya que demuestra que la profundidad afecta la propagación y el rompimiento de las olas en el tanque.

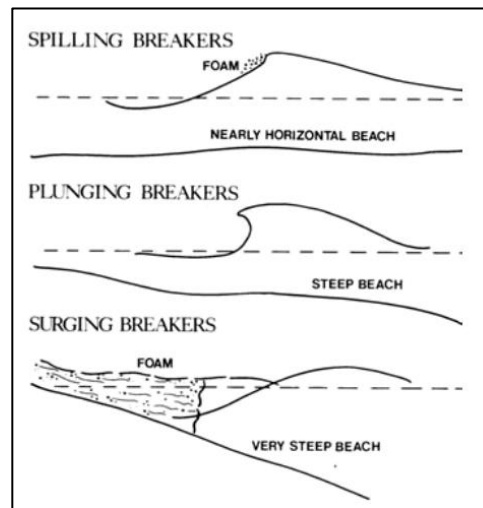
1.5.3 Tipos de olas rompientes.

Según (Robertson et al., 2013), las olas rompientes se producen cuando la pendiente del frente de la ola y la velocidad de las partículas en la cresta superan la velocidad de propagación, lo que provoca una pérdida de estabilidad y el colapso de la forma de la ola. Pueden clasificarse en tres tipos dependiendo de interacción entre la altura de la ola, la profundidad local y la pendiente del fondo marino, como se evidencia en la **Figura 6**. La

forma del rompimiento varía desde el tipo deslizante "*spilling*", en el cual la cresta pierde energía gradualmente, hasta el tipo sumergente "*plunging*", donde la cresta se curva y golpea la superficie con gran intensidad. En fondos abruptos se observan rompimientos colapsantes "*Surging/collapsing*", en el que la energía se refleja parcialmente sin romper de forma completa. En laboratorio, este fenómeno puede reproducirse variando la pendiente del fondo y la amplitud de las olas generadas, lo que permite observar y analizar los diferentes tipos de rompimiento en condiciones a escala controladas.

Figura 6

Tipos de olas rompientes, (Robertson et al., 2013)



Por otro lado, en el estudio también se muestra el parámetro de Ibarren, que está definido por la ecuación:

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (1.2)$$

Donde, relaciona la pendiente del fondo $\tan\beta$ con la forma y energía de la ola incidente, representadas por la altura H y la longitud en aguas profundas L_0 . Este número adimensional describe la interacción entre el perfil del fondo y el oleaje al aproximarse a la costa, útil para establecer variaciones de pendiente en pruebas de laboratorio con el fin de generar condiciones de olas rompientes **Tabla 1**.

Tabla 1

Valores del parámetro de similitud del rompimiento, (Robertson et al., 2013)

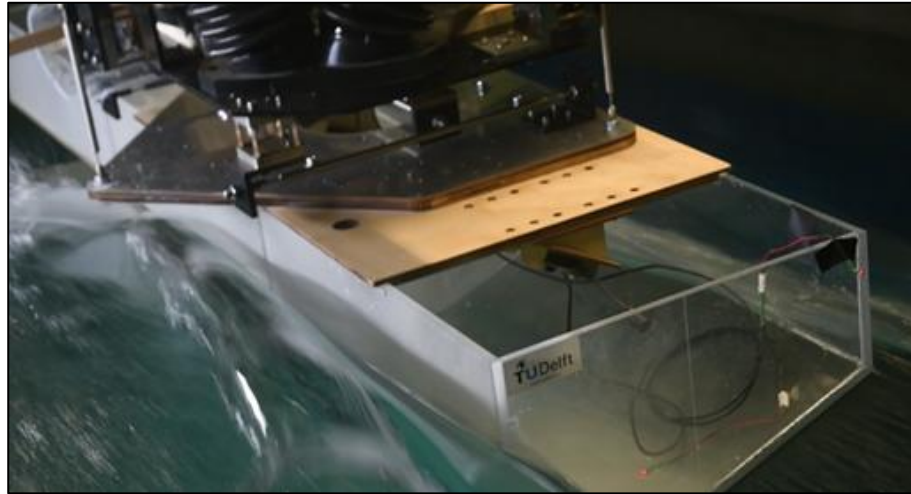
Tipo de rompiente	ξ_b (en el punto de rompimiento)	ξ_o (en aguas profundas)
Colapsante	$\xi_b > 2.0$	$\xi_o > 3.3$
Sumergente	$0.4 < \xi_b < 2.0$	$0.5 < \xi_o < 3.3$
Deslizante	$\xi_b < 0.4$	$\xi_o < 0.5$

1.5.4 Amortiguamiento de balance en embarcaciones rápidas.

De acuerdo con (Consolo et al., 2020), el amortiguamiento de balance en embarcaciones rápidas depende directamente de la velocidad de avance y las condiciones hidrodinámicas del flujo alrededor del casco. Al trabajar con lanchas rápidas tipo FRISC (Fast Raiding Interception and Special force Craft) mostrada en la **Figura 7**, señalaron que el amortiguamiento en aguas tranquilas difiere considerablemente del obtenido en presencia de olas irregulares, lo que confirma que la disipación de energía transversal no puede representarse adecuadamente mediante coeficientes constantes. Concluyeron que la estimación del amortiguamiento de balance requiere una evaluación del amortiguamiento hidrodinámico en función de la inmersión y la frecuencia de excitación similares a la realidad, dado que los modelos linealizados suelen subestimar las oscilaciones y aceleraciones transversales de las embarcaciones rápidas.

Figura 7

Modelo de 20° de astilla muerta oscilando en balance, (Consolo et al., 2020)

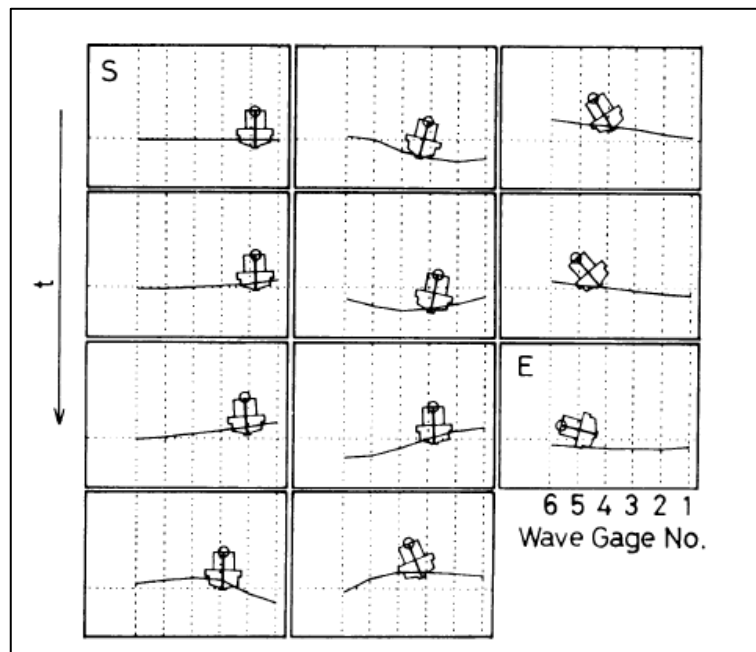


1.5.5 Mecanismo de vuelco en embarcaciones pequeñas bajo olas rompientes laterales.

Los trabajos desarrollados por Ishida y colaboradores entre 1990 y 2000 describen de forma progresiva los mecanismos que provocan la zozobra de embarcaciones pequeñas bajo la acción de olas rompientes laterales. En su primera investigación (Ishida et al., 1990), demostraron mediante experimentación en tanque de olas que la zozobra no depende exclusivamente del impacto directo de una ola, sino de la acumulación de escora producida por olas rompientes consecutivas, como se observa en la **Figura 8**. Más adelante, (Ishida, 1993) analizó experimentalmente el efecto del movimiento lateral "sway", comprobando que el momento de arrastre lateral se incrementa con la velocidad de desplazamiento transversal y produce un comportamiento no lineal del amortiguamiento, reduciendo la capacidad de recuperación de la embarcación.

Figura 8

Zozobra observada en experimentación, (Ishida et al., 1990)



En trabajos posteriores, (Ishida & Fujiwara, 2000) estudiaron el impacto de la forma del casco y observaron que las presiones asimétricas y la separación del flujo en la zona del chine aumentan el momento de escora hasta zozobrar. Como conclusión de estos estudios se evidencia que la pérdida de estabilidad transversal en embarcaciones rápidas resulta del acoplamiento entre balance y deriva, así como también por la velocidad, la geometría del casco y la no linealidad del amortiguamiento hidrodinámico. Comprender esta interacción orienta el diseño experimental de la presente tesis, enfocado en reproducir las condiciones de rompimiento lateral para identificar los factores que más influyen en la zozobra.

1.5.6 Análisis de estabilidad dinámica frente a olas rompientes laterales.

El análisis experimental presentado por (Zselezky et al., 1987), determinaron que el momento de escora inducido por el impacto del rompiente en especial las sumergentes "*plunging*", depende tanto de la altura relativa de la ola como de su velocidad de avance, ya que generan presiones asimétricas que producen momentos de balance no lineales. También observaron que, durante la zozobra, el flujo ascendente del rompiente provoca una reducción

temporal de la sustentación en el costado opuesto, acelerando la rotación. Los resultados demostraron que la resistencia al vuelco aumenta con la elevación del francobordo y cuando el casco mantiene un momento de adrizamiento residual más allá de los 90°, así como también, que la fase de la ola en el momento del impacto influye en la capacidad de la embarcación de recuperar su posición o continuar hasta el naufragio.

1.5.7 Influencia de la geometría del casco en la estabilidad transversal bajo olas rompientes.

En su estudio (Renilson et al., 2004), obtuvieron que la estabilidad depende de la respuesta hidrodinámica del casco al impacto del rompiente, observaron que embarcaciones con mayor francobordo presentan menor frecuencia de inversión completa, ya que el volumen emergido actúa como barrera contra el ingreso de agua durante la escora. En cambio, los cascos de manga amplia tienen un incremento del momento de inercia transversal, lo que prolonga la duración del balance y favorece la acumulación de escora. Se verificó que la estabilidad mejora cuando el metacentro transversal (GMT) se dimensiona de modo que el brazo adrizante máximo ocurra antes de los 60°, garantizando una recuperación más rápida frente a impactos sucesivos. A partir de la experimentación, se propuso un criterio empírico en el cual $GMT \approx 0.2 H_w$, donde H_w la altura significativa de la rompiente, como mínimo para evitar la zozobra ante el impacto de olas rompientes laterales.

Capítulo 2

2. Metodología.

La metodología usada en este proyecto tiene un enfoque experimental, con el fin de analizar la respuesta dinámica de modelos de sección constante de embarcaciones rápidas bajo la acción de olas rompientes laterales. En primer lugar, se revisó la literatura y se implementó un programa automatizado en Python que permitió conocer las características de ola rompiente de acuerdo con la inclinación del fondo y la frecuencia de excitación del "shaker" disponible en el laboratorio SiMar. Posteriormente, se construyó una rampa con pendiente ajustable para simular distintas zonas costeras de manera controlada y repetible.

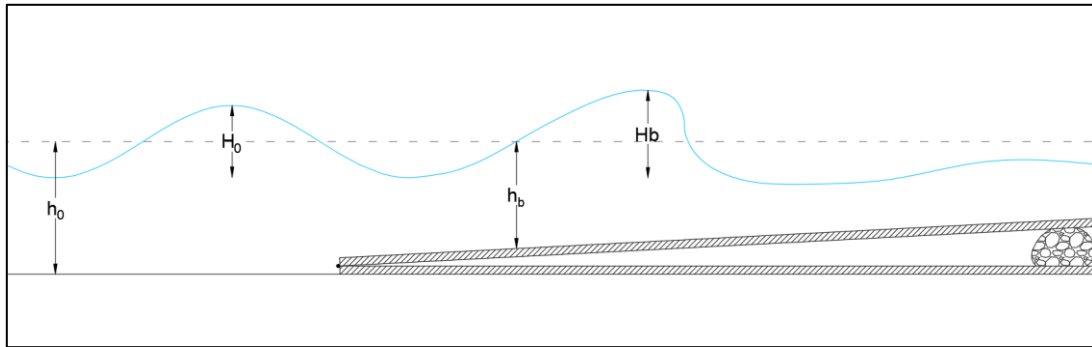
Para la experimentación se construyeron 3 modelos de sección constante con diferentes ángulos de astilla muerta y un peso móvil vertical que permitió variar el KG del modelo. Se realizaron pruebas de oscilación libre y excitación forzada por acción de la ola rompiente, registrando datos con un inclinómetro y acelerómetro inalámbrico. En la tercera etapa se obtuvieron graficas de amortiguamiento, inercia virtual, frecuencia natural y altura metacéntrica para identificar las condiciones condujeron a la zozobra.

2.1 Definición de las características de las olas rompientes considerando fondo inclinado.

El proceso comenzó con la definición de las características de las olas a generar en el tanque del laboratorio SiMar; se aplicó la **ecuación (1.1)** utilizando un programa desarrollado en Python lo que permitió relacionar la frecuencia del "shaker" con la longitud de ola L y la profundidad de rompimiento h_b (Rattanapitikon & Shibayama, 2006), de acuerdo con la elevación del fondo como se observa en la **Figura 9** donde h_0 es la profundidad del tanque.

Figura 9

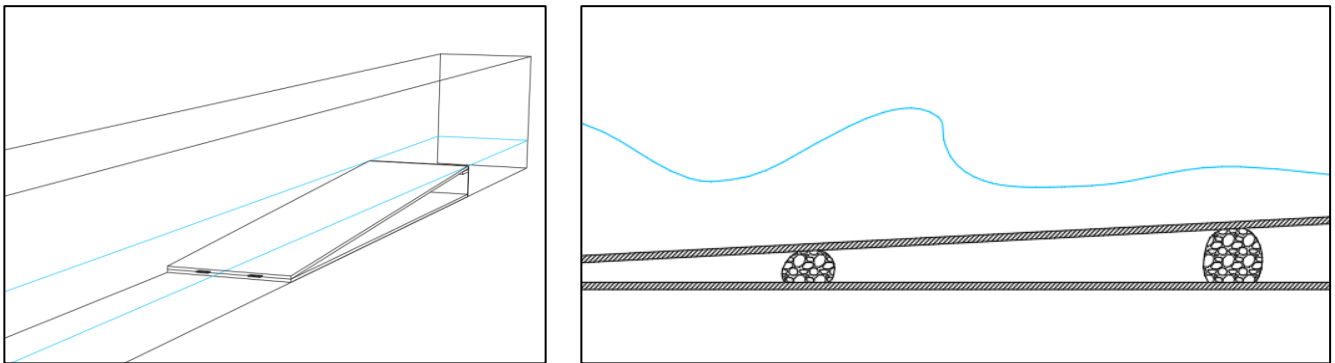
Parámetros de olas en tanque de profundidad finita con fondo inclinado.



Para simular el fondo marino, se construyó una rampa con pendiente ajustable, fabricada de plywood marino de 12 mm de espesor, con ángulo regulable mediante bisagras y una base con soporte movable al final de la rampa, que permitió variar la inclinación de forma precisa. Este sistema facilitó reproducir diferentes configuraciones de playa dentro del tanque de olas de SiMar, asegurando que las olas rompieran bajo condiciones controladas y repetibles **Figura 10**.

Figura 10

Rampa de ángulo ajustable para tanque de olas.



2.2 Modelos de embarcación y pruebas experimentales.

Para el diseño y construcción de los modelos de embarcación rápida se optó por modelos de sección constante para simplificar el análisis hidrodinámico y enfocarse en la influencia de la geometría del casco en la zozobra.

Cada casco fue construido en acrílico de 5 mm de espesor con tres cuadernas internas y una cubierta inferior. Se eligieron tres configuraciones de ángulo de astilla muerta 8° , 14° y 20° **Figura 11**, tomando como base el ángulo real de la lancha *Angy* (*Tragedia En Galápagos: El Naufragio de La Lancha Angy Contado Por Las Víctimas - Plan V*, n.d.), con el fin de representar cascos con geometrías de fondo poco, moderada y altamente en V.

Figura 11

Modelos de sección constante con diferente ángulo de astilla muerta.



En los modelos se incorporó un mecanismo de lastre móvil vertical **Figura 12**, lo que permitió modificar la posición del centro de gravedad KG , para modificar frecuencia natural de balance. Primero se realizaron pruebas de oscilación libre, inclinando lateralmente el modelo un ángulo inicial de 6° y registrando su movimiento con un inclinómetro inalámbrico (WT901BLECL5.0). A partir de las señales obtenidas se calcularon la frecuencia natural ω_n , el coeficiente de amortiguamiento C y el radio de giro virtual K_{xx} .

Figura 12

Peso deslizante vertical.



Posteriormente, se efectuaron pruebas de oscilación forzada con olas rompientes. El "shaker" fue programado para oscilar con frecuencias de 1 y 1.5 Hz, la rampa se ajustó a 9° y para cada frecuencia se varió el desplazamiento del "shaker" 8 y 11 mm para 1 Hz, y 8 y 12 mm para 1.5 Hz. Durante cada ejecución se registraron los ángulos de balance y las aceleraciones verticales y laterales con el sensor inalámbrico mostrado en la **Figura 13**.

Figura 13

WT901BLECL 9-axis BLE Accelerometer Inclinator.

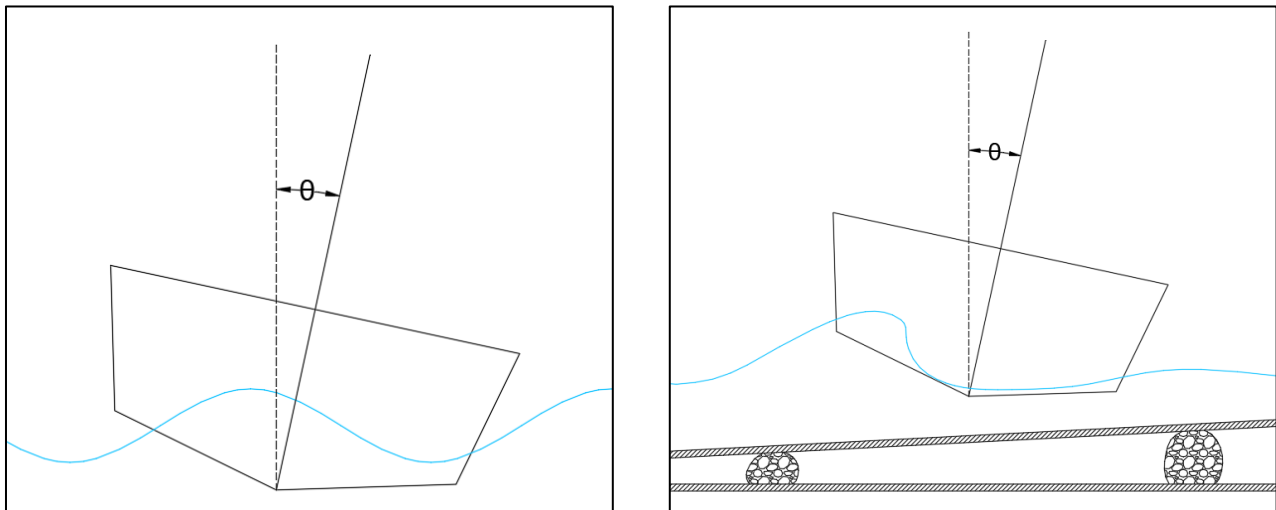


2.3 Procesamiento y análisis de datos obtenidos.

Con los datos obtenidos de tiempo, ángulo y aceleración, se realizó el procesamiento de señales para caracterizar la respuesta dinámica de los modelos. En el caso de las pruebas de oscilación libre, se identificó la frecuencia natural de balance y se estimó el coeficiente de amortiguamiento mediante el método del decremento logarítmico; con estos parámetros se determinaron el segundo momento de inercia, la inercia virtual asociada al movimiento de balance y el radio de giro virtual.

Figura 14

Pruebas experimentales realizadas.



Por último, para las pruebas de oscilación forzada **Figura 14**, se analizaron el ángulo de balance y las aceleraciones laterales y verticales vs el tiempo, obteniendo las curvas de respuesta forzada. Se evaluó la influencia de la frecuencia de excitación, amplitud de la ola incidente y la geometría de la sección transversal del casco.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas para los 3 modelos de sección constante **Tabla 2**. Los resultados están organizados según el tipo y condiciones establecidas de las pruebas, con el fin de conocer la estabilidad transversal y la respuesta dinámica del sistema.

El análisis está enfocado en el movimiento acoplado de levantamiento, ladeo y balance, mediante la interpretación de las señales de ángulo de balance y de aceleraciones en el eje vertical y transversal. Se presentan los resultados más significativos examinando la influencia de la condición de carga 1, el ángulo de astilla muerta y los parámetros de excitación para conocer la respuesta dinámica y posibilidad de zozobra.

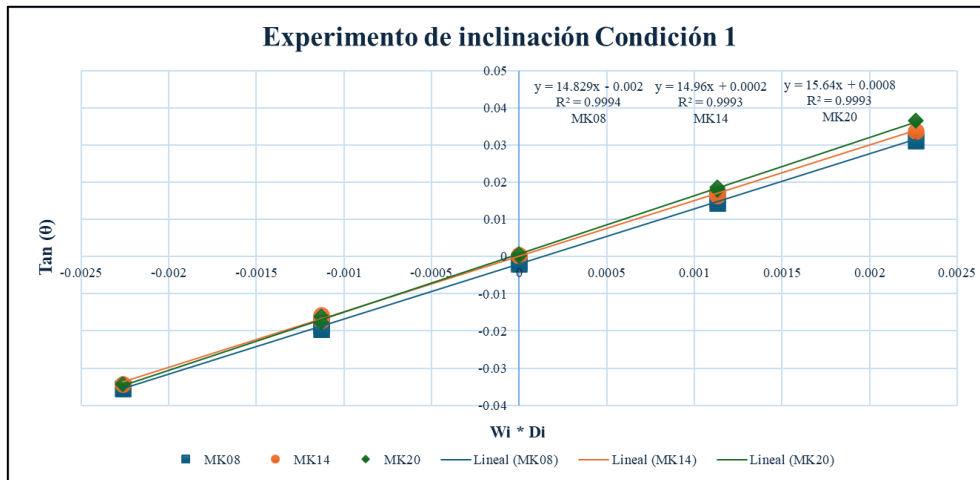
Tabla 2

Características principales de los modelos usados.

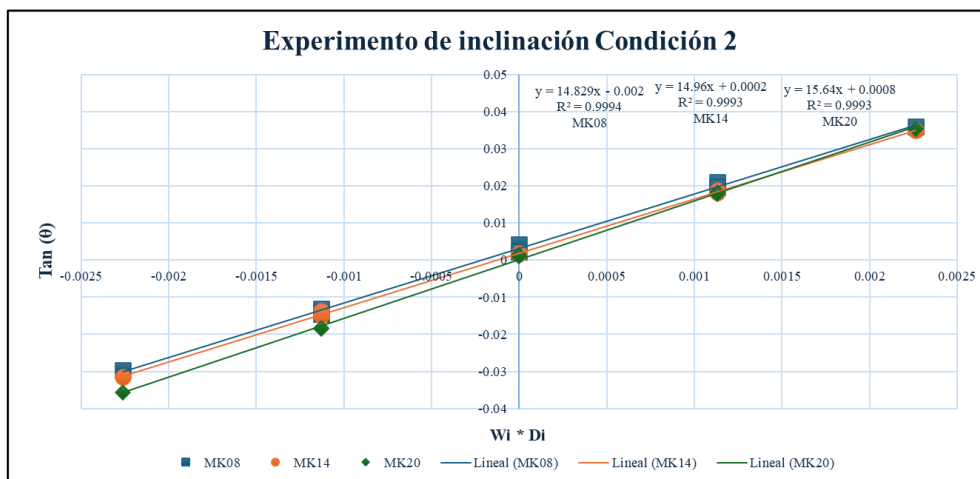
Modelo	L [cm]	B [cm]	D [cm]	Ángulo de astilla muerta [°]
MK08	46.4	25	11	8
MK14	46.4	25	11	14
MK20	46.4	25	11	20

3.1 Resultados de los experimentos de inclinación.

Se realizaron primero experimentos de inclinación con los tres modelos de embarcación rápida (se denominan MK08, MK14 y MK20 de acuerdo con el ángulo de astilla muerta) bajo dos condiciones de carga, condición 1 que simula la embarcación sin pasajeros y condición 2 que simula la embarcación cargada. Las pruebas permitieron conocer la estabilidad estática inicial para usarlos como referencia en la interpretación de la respuesta dinámica observada en los ensayos posteriores.

Figura 15*Experimento de inclinación Condición 1.*

Como se observa en la **Figura 15**, existe un comportamiento lineal con coeficientes de determinación cercanos a la unidad. Aunque las curvas se encuentran próximas entre sí, se distinguen diferencias en su pendiente, lo que indica variaciones en la estabilidad transversal inicial. En esta condición, el modelo MK20 presenta una mayor capacidad de restauración, mientras que el modelo MK08 tiene la menor capacidad de restauración transversal.

Figura 16*Experimento de inclinación Condición 2.*

La **Figura 16** presenta los resultados del experimento de inclinación en la condición de carga 2, con un comportamiento similar a la condición 1; sin embargo, se observa una disminución en la pendiente de las curvas lo que representa una disminución de la estabilidad

transversal inicial debido al incremento del centro de gravedad vertical. Esta variación resulta relevante ya que anticipa una mayor sensibilidad del sistema ante excitaciones dinámicas.

Tabla 3

Resultados de los experimentos de inclinación para los 3 modelos.

	MK08 C1	MK08 C2	MK14 C1	MK14 C2	MK20 C1	MK20 C2
Wtotal [kg]	2.984	3.456	3.044	3.462	2.928	3.400
GMT [m]	0.023	0.020	0.022	0.020	0.021	0.019
KB [m]	0.023	0.025	0.028	0.030	0.028	0.032
BMT [m]	0.120	0.025	0.122	0.111	0.161	0.131
KG[m]	0.120	0.112	0.128	0.121	0.168	0.144

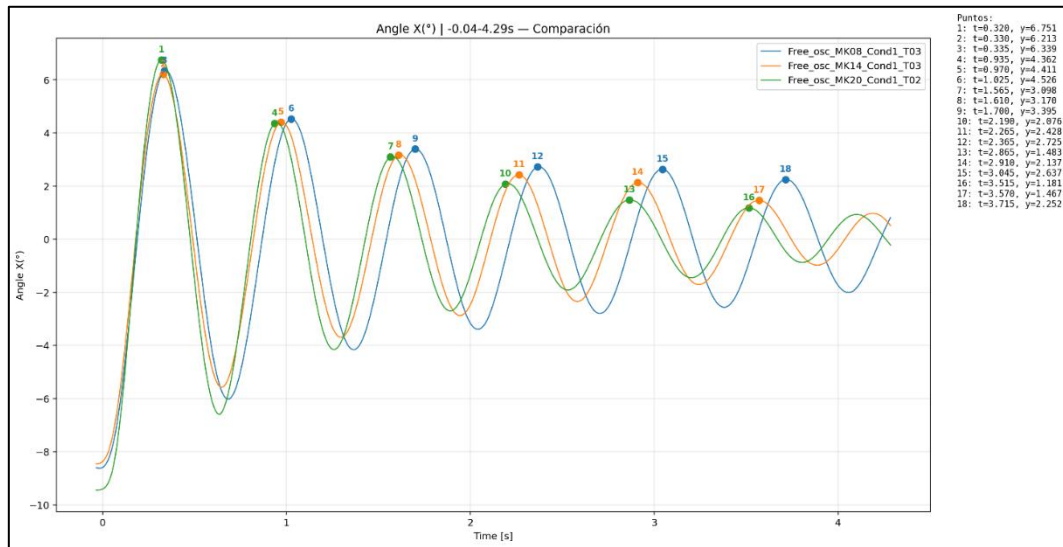
En la **Tabla 3** se presentan los valores obtenidos a partir de los experimentos de inclinación, Al comparar las dos condiciones de carga, se observa que el incremento del centro de gravedad vertical implica una reducción de la altura metacéntrica (GMT) en los tres modelos. A modo de comparación, el modelo MK20 presenta los mayores valores de GMT en ambas condiciones de carga, indicando una mayor estabilidad transversal inicial, mientras que MK08 exhibe los valores más bajos, con MK14 mostrando un comportamiento intermedio. Aunque las variaciones de GMT son moderadas, resultan relevantes ya que una menor estabilidad inicial es susceptible a desarrollar mayores amplitudes de balance bajo excitaciones laterales, lo cual será analizado en las pruebas de oscilación forzada.

3.2 Resultados de las pruebas de oscilación libre.

Se realizaron ensayos de oscilación libre con el fin de caracterizar la respuesta dinámica de los modelos en balance, dependiendo de las condiciones de carga antes mencionadas. Estas pruebas permiten identificar parámetros dinámicos como la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento que están relacionados directamente con la estabilidad transversal.

Figura 17

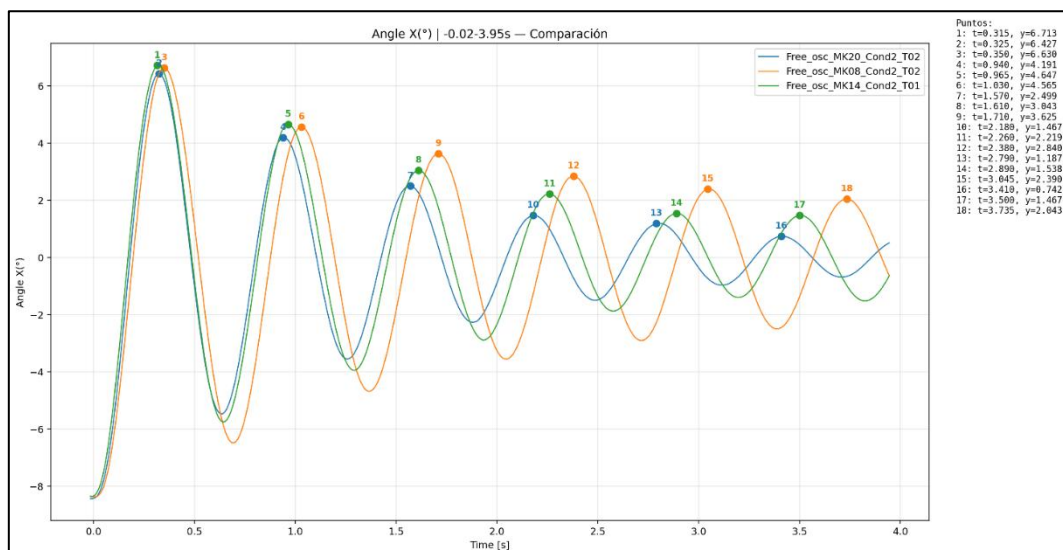
Pruebas de oscilación libre Condición 1.



La **Figura 17** muestra la comparación en el comportamiento dinámico de los tres modelos bajo la condición de carga 1. Se observa que el modelo MK08 tiene mayores amplitudes iniciales de balance, mientras que MK20 se observa un menor periodo de oscilación. Aunque MK08 presenta mayores valores de GMT, los resultados sugieren que la forma del casco influye de manera significativa en la disipación de energía y en la respuesta dinámica, ya que MK20 muestra un decaimiento más rápido de la oscilación.

Figura 18

Pruebas de oscilación libre Condición 2.



Por otro lado, en la **Figura 18** corresponde a las señales obtenidas para la condición de carga 2. Se observa mayor respuesta dinámica en balance, debido a un incremento de las amplitudes iniciales. Sin embargo, MK20 mantiene una respuesta más estable en comparación con MK08 y MK14, lo que indica que los efectos asociados a la forma del casco siguen dominando la dinámica del sistema, aun cuando la estabilidad transversal estática se ve reducida por el aumento del centro de gravedad vertical.

Tabla 4

Resumen de resultados de oscilación libre.

1ra Condición							
Modelos	GMT [m]	τ [s]	f_d [Hz]	ξ	f_n [Hz]	J [kg m ²]	K _{xx} /B
MK 08	0.023	0.678	1.474	0.046	1.476	0.0079	0.206
MK 14	0.020	0.647	1.547	0.045	1.548	0.0069	0.191
MK 20	0.022	0.625	1.600	0.070	1.604	0.0060	0.182
2da Condición							
Modelos	GMT [m]	τ [s]	f_d [Hz]	ξ	f_n [Hz]	J [kg m ²]	K _{xx} /B
MK 08	0.020	0.677	1.478	0.032	1.479	0.0081	0.193
MK 14	0.021	0.645	1.550	0.062	1.553	0.0070	0.180
MK 20	0.019	0.624	1.603	0.066	1.607	0.0063	0.172

En la **Tabla 4** se resumen los valores del período de oscilación τ , la frecuencia natural f_n , el coeficiente de amortiguamiento ξ , y el radio de giro virtual relativo a la manga K_{xx}/B obtenidos para los tres modelos en ambas condiciones de carga. Se observa que el cambio de condición de carga provoca ligeras variaciones en el período y la frecuencia natural, sin alterar de manera significativa la jerarquía de respuesta entre los modelos. En resumen, los valores obtenidos constituyen una referencia para la interpretación de los ensayos de oscilación forzada desarrollados en la sección siguiente.

3.3 Resultados de las pruebas de oscilación forzada.

Se realizaron pruebas de oscilación forzada con el fin de analizar la respuesta dinámica de los modelos bajo excitaciones por olas rompientes laterales. A través de estos ensayos es posible estudiar la influencia de la frecuencia y la amplitud de excitación en la respuesta del sistema, así como la presencia de fenómenos de amplificación y movimiento acoplado. En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los tres modelos, para una condición de carga, considerando combinaciones de frecuencia y amplitud de excitación para analizar las respuestas medidas en balance, levantamiento y ladeo.

3.3.1 Características de la excitación.

Para el análisis se emplearon dos frecuencias de excitación y dos amplitudes del "shaker", manteniendo constante la condición de carga del modelo durante todas las pruebas. La selección de estas combinaciones se definió en función de los resultados obtenidos en los ensayos de oscilación libre con el fin de analizar la respuesta del sistema tanto en condiciones alejadas como cercanas a su frecuencia natural de balance, dando un total de 88 pruebas realizadas como se observa en la **Tabla 5**

Tabla 5

Planificación experimental de pruebas realizadas.

Modelos	Condición de carga	Frecuencia de excitación (Hz)	Desplazamiento del shaker (mm)	Angulo de rampa (°)	Profundidad del tanque (cm)	N° tests	Duración de la prueba
MK08,							
MK14,	1	1	8	9	10	3, 8,	2 min, 45 s,
MK20						12	30 s

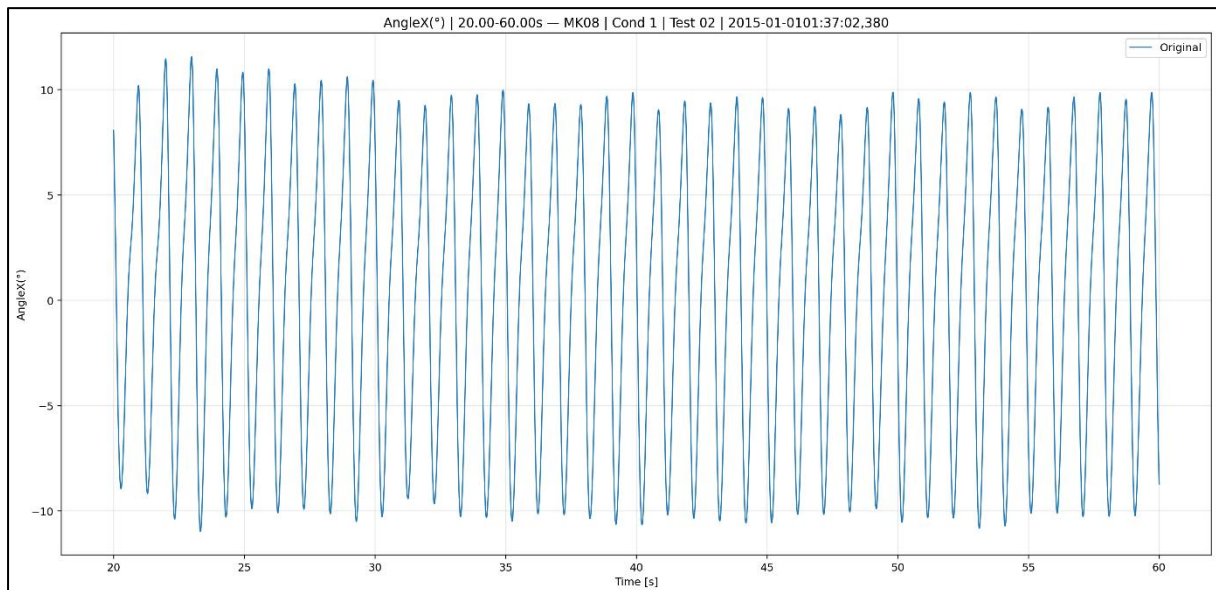
MK08,						3, 5,	2 min, 30 s,
MK14,	1	1	11	9	10	9	10 s
MK20							
MK08,						6, 9,	15 s, 15 s,
MK14,	1	1.5	8	9	12.5	7	15 s
MK20							
MK08,						9, 8,	10 s, 10 s,
MK14,	1	1.5	12	9	12.5	9	10 s
MK20							

3.3.2 Respuesta en balance bajo oscilación forzada por olas rompientes laterales.

En esta sección, se presentan los resultados correspondientes a las pruebas de oscilación forzada realizadas sobre los modelos a escala. Se compararán las señales obtenidas de los 3 diferentes modelos bajo una misma condición de excitación como se muestra en la **Figura 19**, con el fin de analizar la influencia de la forma geométrica del casco en la posibilidad de zozobra.

Figura 19

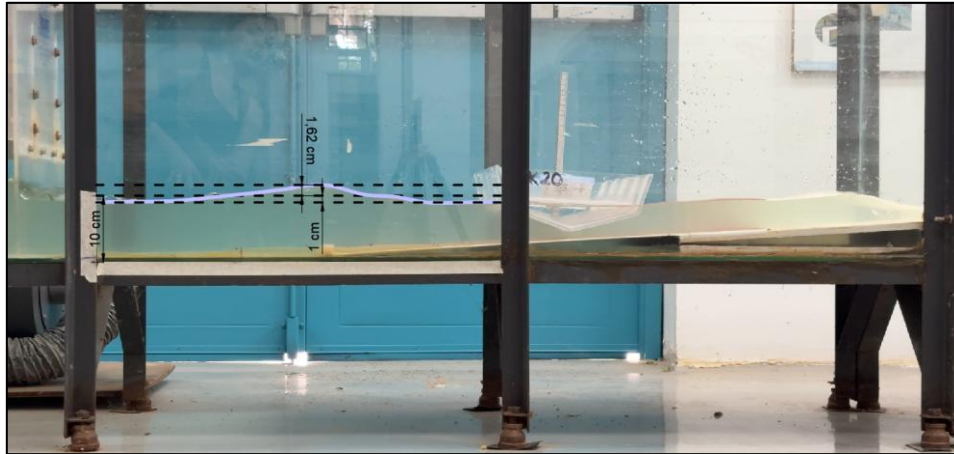
Señal completa de oscilación forzada registrada durante un ensayo típico, Modelo MK08, desplazamiento shaker: 8mm, frecuencia: 1 Hz..



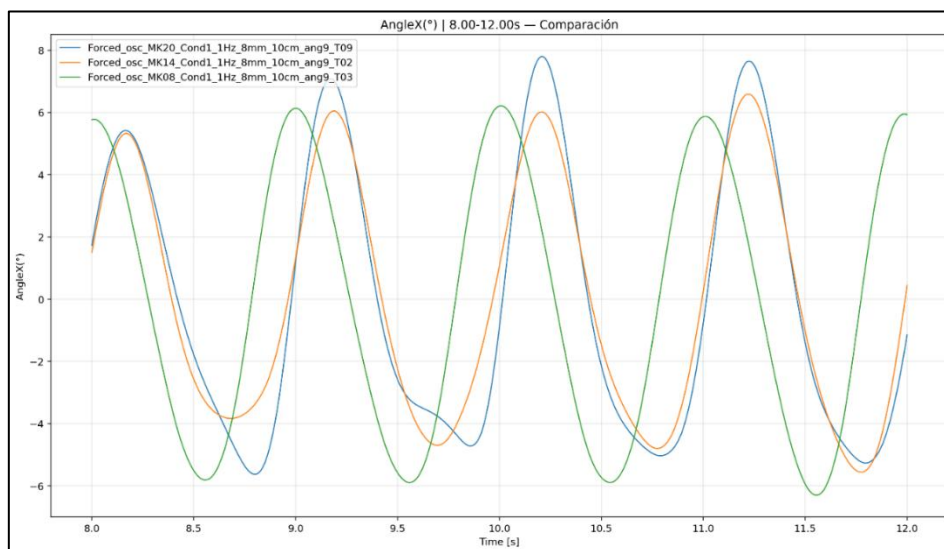
La **Figura 20** muestra las condiciones de ensayo, correspondientes a una excitación forzada de 1 Hz, con un desplazamiento del "shaker" de 8 mm y una profundidad del tanque de 10 cm. La **Figura 21** presenta la comparación de la respuesta en balance de los tres modelos, evidenciando diferencias claras en amplitud y forma de la señal entre ellos, pese a estar sometidos a la misma excitación. Los valores positivos más altos de balance los presenta el modelo MK20, mientras que MK08 presenta los mayores valores negativos, lo que nos dice que el comportamiento es no sinusoidal. Por otro lado, el modelo MK14 muestra un comportamiento intermedio, evidenciando la influencia de la forma del casco en la respuesta dinámica.

Figura 20

Características de ola Crítica, Freq 1 Hz, desplazamiento shaker 8 mm, $h=10\text{cm}$

**Figura 21**

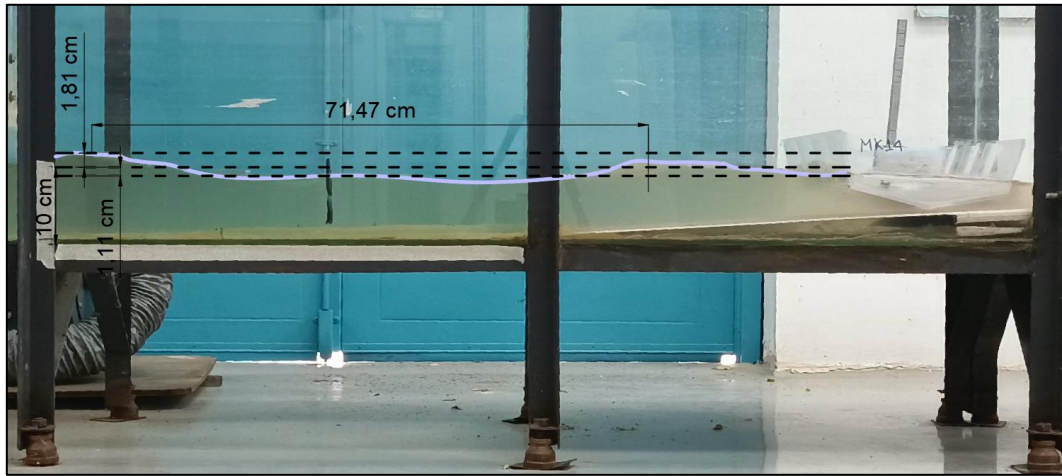
Oscilación forzada en balance: Condición 1, 1Hz, desplazamiento shaker 8 mm.



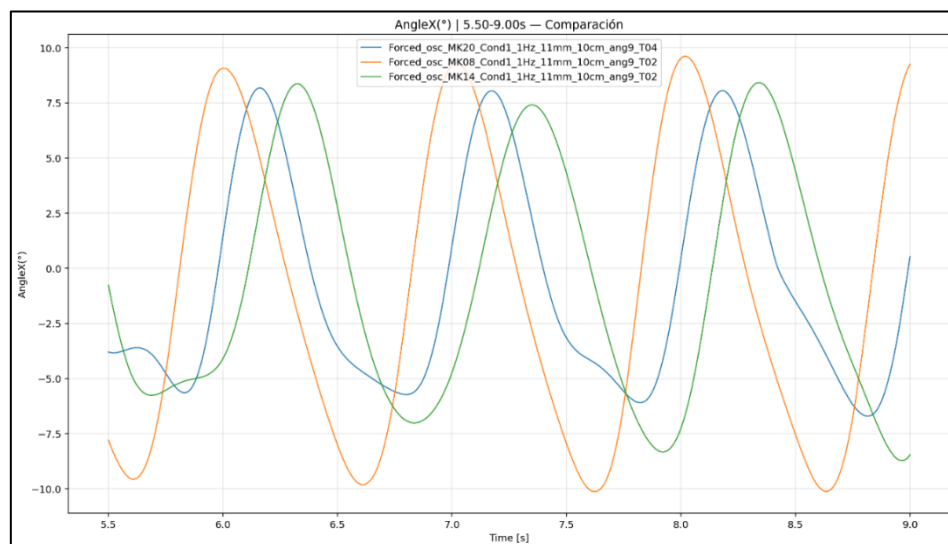
Para la siguiente condición se muestra la señal cuando se mantiene la frecuencia de 1 Hz y se incrementa el desplazamiento del "shaker" a 11 mm **Figura 22**. Se observa un aumento significativo de la amplitud de balance en los tres modelos respecto a los registrados anteriormente. Además, la señal presenta una mayor distorsión respecto a una forma sinusoidal, lo que indica una respuesta no lineal. El incremento de la amplitud de excitación provoco un incremento de la amplitud de respuesta particularmente en MK20 y MK08 como se observa en la **Figura 23**.

Figura 22

Características de ola Crítica, Freq 1 Hz, desplazamiento shaker 11 mm, $h=10\text{cm}$

**Figura 23**

Oscilación Forzada en balance: Condición 1, 1Hz, desplazamiento shaker 11 mm.



En la **Figura 24** se muestra las señales cuando se incrementa la frecuencia de excitación a 1.5 Hz, con un desplazamiento del "shaker" de 8 mm y una profundidad del tanque de 12.5 cm. Como se observa en la **Figura 25** un gran incremento de la respuesta dinámica en comparación con las condiciones a menor frecuencia, alcanzando amplitudes de balance alrededor de $\pm 15^\circ$ especialmente en el modelo MK20. El modelo MK14 presenta una respuesta parecida, mientras que MK08 muestra amplitudes menores alrededor de $\pm 10^\circ$. El

aumento de la frecuencia de excitación y la mayor profundidad del tanque provocan una mayor transferencia de energía al sistema, por ende, una respuesta más severa.

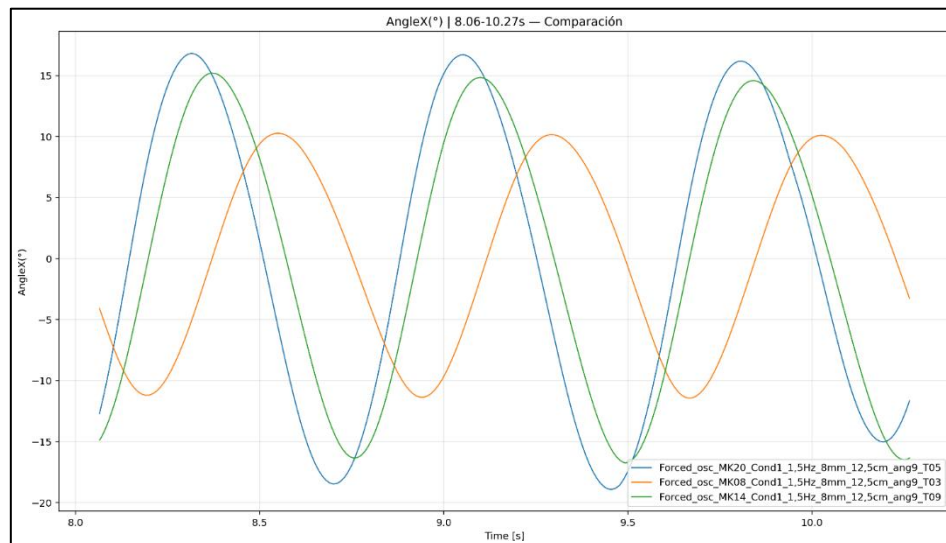
Figura 24

Características de ola Crítica, Freq 1,5 Hz, desplazamiento shaker 8 mm, $h=12.5$ cm



Figura 25

Oscilación Forzada en balance: Condición 1, 1.5Hz, desplazamiento shaker 8 mm.



Continuando con el análisis dinámico se varió el desplazamiento del "shaker" a 12mm y se aumentó la frecuencia de excitación a 1.5 Hz, lo que corresponde a la condición crítica de las pruebas de oscilación forzada como se observa en la **Figura 26**.

En esta condición la **Figura 27** nos muestra un mayor efecto en la respuesta dinámica de los modelos debido a un incremento de amplitud. Por otro lado, el aumento de la profundidad del tanque incrementa la energía disponible para el impacto de las olas. En todas

las condiciones analizadas, el modelo MK20 y MK08 presentan las respuestas más severas, en cambio, MK14 muestra una respuesta intermedia, lo que demuestra la influencia de la geometría del casco en la respuesta dinámica bajo excitaciones forzadas.

Figura 26

Características de ola Crítica, Freq 1,5 Hz, desplazamiento shaker 12 mm, $h=12,5$ cm.

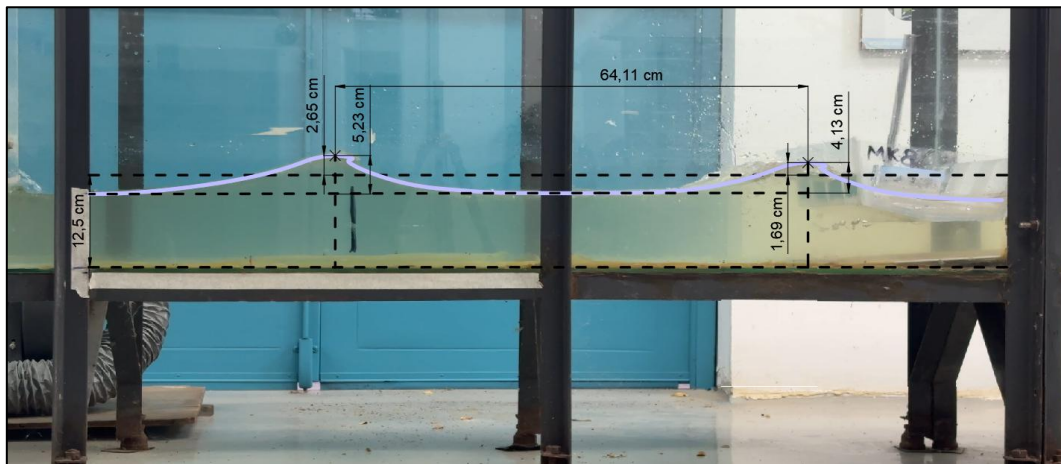
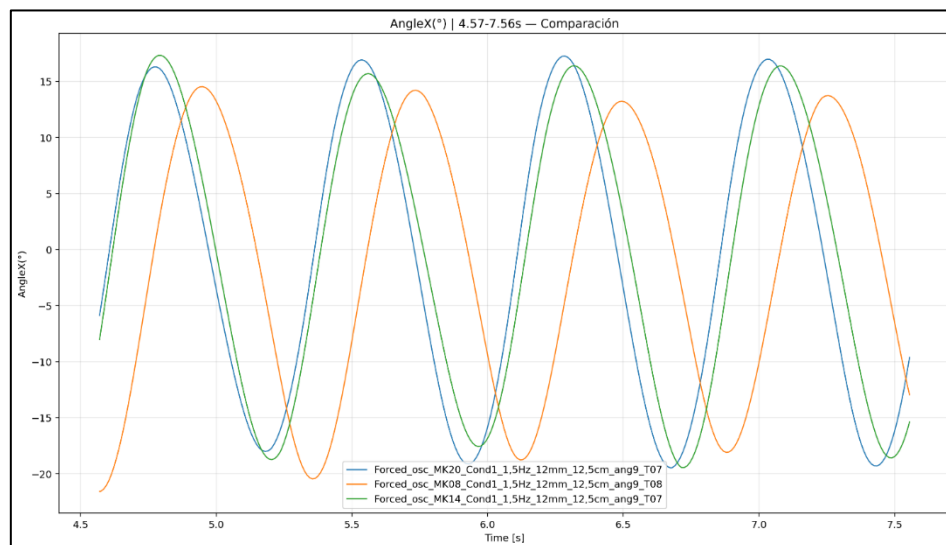


Figura 27

Oscilación Forzada 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.



3.3.3 Respuesta en aceleraciones y movimiento acoplado.

Dado que el sensor inalámbrico rotaba junto con el casco, las aceleraciones medidas tienen inclinación debido al movimiento acoplado, pero el sensor también considera estos

ángulos para los mismos instantes de tiempo. Por ello se usó relaciones trigonométricas **ecuación (1.3) y (1.4)** para calcular las componentes de la aceleración reales asociadas al ladeo y levantamiento como se observa en la **Figura 28**.

Las relaciones trigonométricas usadas fueron:

$$\phi = \text{balance}, \theta = \text{cabeceo}$$

Primero se calculó la gravedad proyectada:

$$g_y = g \sin(\phi) \cos(\theta) \quad (1.3)$$

$$g_z = g \cos(\phi) \cos(\theta)$$

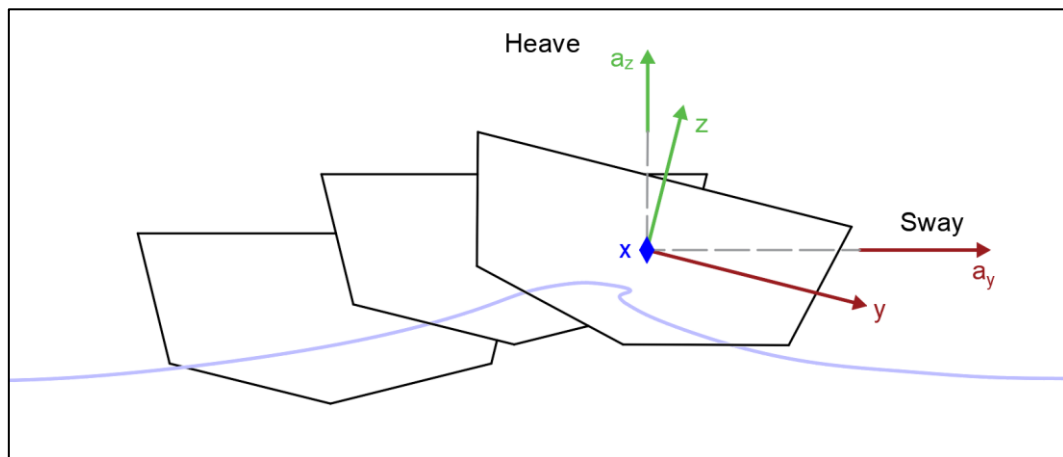
Por ende, la componente de aceleración para ladeo y levantamiento:

$$a_{y,lin} = a_y - g_y \quad (1.4)$$

$$a_{z,lin} = a_z - g_z$$

Figura 28

Aceleración lineal de ladeo y levantamiento.

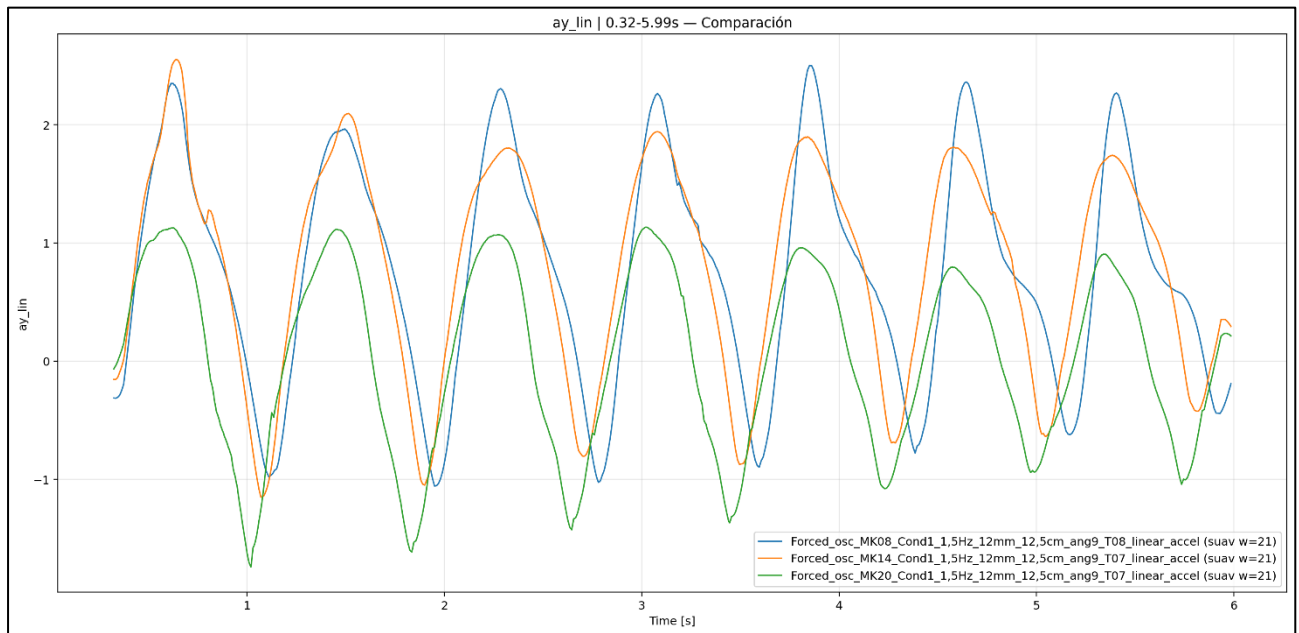


Con respecto a la aceleración lineal en dirección y asociada al ladeo en la **Figura 29** se nos muestra claras diferencias entre los modelos. El MK08 presenta los mayores picos positivos, el MK14 tiene una respuesta intermedia, mientras que el MK20 registra los picos negativos más profundos, lo que evidencia una notoria asimetría. Además, la señal no tiene

un comportamiento sinusoidal con variaciones de amplitud entre ciclos consecutivos, lo que indica una respuesta lateral no lineal diferente entre los modelos bajo una misma condición de excitación.

Figura 29

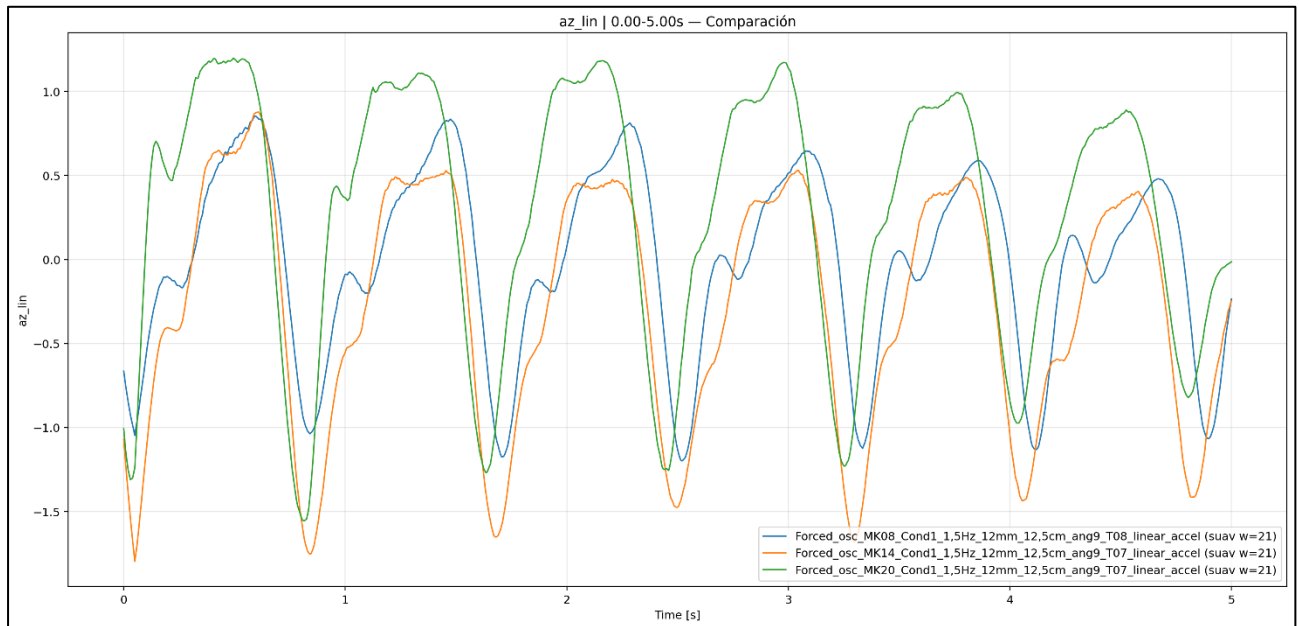
Aceleración lineal en el eje y, 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.



Comparando las aceleraciones en dirección y con las de z asociadas al levantamiento mostradas en **Figura 30**, se evidencia el comportamiento acoplado, pero con respuestas opuestas entre los ejes. Los modelos que desarrollan mayores aceleraciones verticales tienden a presentar respuestas laterales menos severas, esto se asocia al ángulo de astilla muerta ya que favorecen el levantamiento por la disipación de energía en el eje vertical, mientras que, a menor ángulo hay una mayor respuesta en el eje transversal.

Figura 30

Aceleración lineal en el eje z, 1,5Hz desplazamiento 12 mm Condición 1.

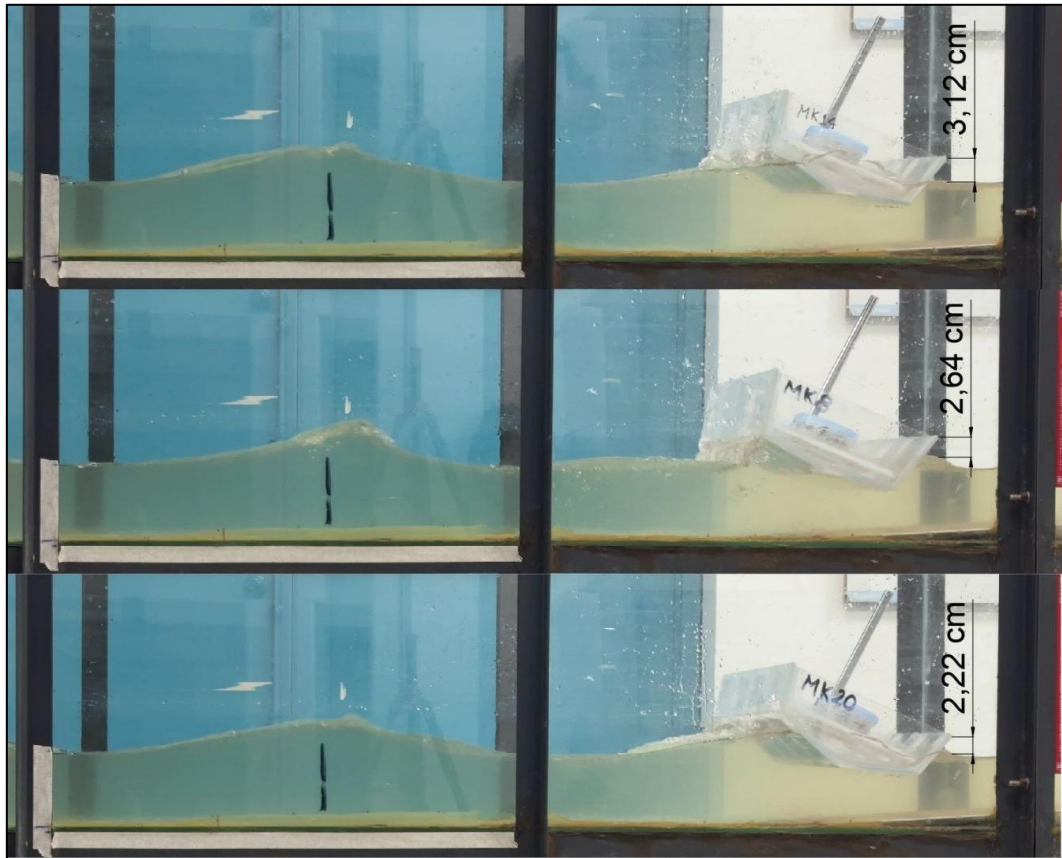


3.3.4 Análisis del francobordo en la condición crítica de excitación.

De acuerdo con lo analizado en los párrafos previos para la condición crítica se observó amplitudes elevadas de balance y que los modelos que desarrollan mayores aceleraciones verticales tienden a presentar menores respuestas laterales. Reforzando este análisis en la **Figura 31** se muestra que durante las pruebas existe una elevación local de la superficie libre en el costado opuesto al impacto de la ola, la cual modifica el nivel del agua y reduce el francobordo instantáneo. Este efecto está estrechamente relacionado con el ángulo de astilla muerta, por lo que, el modelo MK20 presenta el menor francobordo instantáneo, seguido por MK08, mientras que MK14 alcanza el mayor valor.

Figura 31

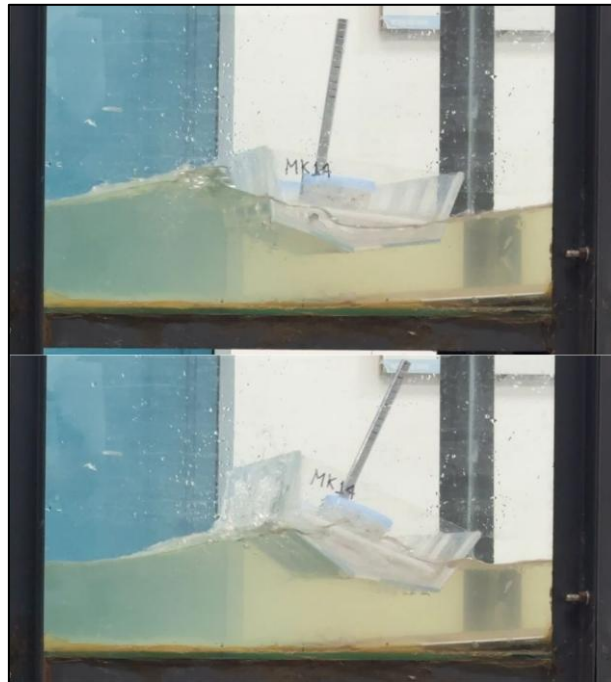
Francobordos en condición crítica Condición 1, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12mm, h:12.5 cm.



Los resultados experimentales demuestran que la respuesta dinámica de modelos con forma en V está gobernada por el acoplamiento entre balance, levantamiento y ladeo, donde en ángulo de astilla muerta influye en la distribución de energía entre el eje vertical y transversal. En resumen, cuando se incrementa la frecuencia de excitación se observa mayor respuesta de balance, así como también que los modelos con mayor levantamiento tienden a reducir la respuesta lateral.

Figura 32

Acumulación de escora por excitaciones laterales repetidas.



El fenómeno de acumulación progresiva de escora mostrado en la **Figura 32** concuerda con los mecanismos de zozobra descritos en la literatura por (Ishida, 1993), donde, la respuesta crítica del sistema no está asociada a un evento aislado, sino a la acumulación progresiva de escora bajo excitaciones laterales repetidas.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del trabajo experimental realizado. Se realizaron pruebas de inclinación, oscilación libre y forzada para analizar la respuesta dinámica y estabilidad transversal de modelos de sección constante de embarcaciones rápidas interislas de Galápagos sometidas a olas rompientes de costado.

4.1 Conclusiones.

- Se implementó una rampa de ángulo ajustable para generar olas rompientes en el tanque de olas del laboratorio SiMar, de forma repetitiva y controlada. Una inclinación de 9° permitió generar olas deslizantes (*spilling*) para una frecuencia de excitación de 1 Hz y desplazamientos del "shaker" de 8 y 11 mm. Además, también se obtuvieron olas sumergentes (*plunging*) para 1.5 Hz y desplazamiento de 8 y 12 mm, permitiendo analizar el comportamiento dinámico de embarcaciones rápidas bajo la acción de dos tipos de olas rompientes laterales.
- Los resultados de los experimentos de inclinación muestran valores de GMT de alrededor de 2 cm para los tres modelos probados y en las dos condiciones de carga. Con los experimentos de oscilación libre se determinó que el coeficiente de amortiguamiento es en promedio 5% del crítico, y el radio de giro virtual respecto de la manga es del 20%.
- Los resultados experimentales revelaron que la respuesta transversal depende de la frecuencia y amplitud de la ola, la estabilidad inicial y la geometría del casco. El efecto de la ola para cascos con mayor ángulo de astilla muerta es prácticamente sobre el fondo de la sección por lo que se genera una fuerza vertical importante y produciéndose mayor levantamiento. Para ángulos menores la presión actúa sobre el costado, ocasionando más ladeo y balance. Las excitaciones laterales causan una

respuesta con un comportamiento no lineal, pero también una acumulación de escora y reducción del francobordo instantáneo, aumentando la posibilidad de zozobra de embarcaciones rápidas.

4.2 Recomendaciones.

Una vez culminados la experimentación planificada para este proyecto y analizar los resultados obtenidos de las mismas, a continuación, se establecen las principales recomendaciones enfocadas en mejorar el sistema experimental usado y consideraciones a tomar en cuenta para futuros trabajos del estudio sobre la respuesta dinámica transversal de embarcaciones rápidas sometidas a olas rompientes laterales.

- Se recomienda mejorar el sistema de variación del GMT, cambiando la varilla por una de menor longitud, además de usar un peso menor y más pequeño, para tener mayor precisión sobre el control del centro de gravedad vertical del modelo y que no quede por encima de cubierta. Esta optimización disminuiría el riesgo de inestabilidades iniciales durante las pruebas generando mayor confiabilidad de los resultados obtenidos.
- Es importante continuar con los ensayos de oscilación forzada para la condición de carga 2, con el fin de evaluar de manera más completa la influencia de la distribución de masas y la variación del GMT sobre la respuesta transversal acoplada del sistema. Esto permitirá fortalecer la comprensión de la estabilidad dinámica transversal de embarcaciones rápidas bajo excitaciones laterales repetitivas e identificar los factores que conducen hacia la zozobra tanto en condiciones cargadas como sin carga.
- Derivado de las pruebas experimentales, se sugiere modificar el sistema de generación de olas incorporando un resorte en el pistón del "shaker", de modo que, al aplicar un desplazamiento específico, se genere una única ola rompiente capaz de producir un solo impacto controlado sobre el modelo. Esta modificación reduciría la variabilidad

en la duración de las pruebas, facilitando la comparación directa entre los distintos modelos y condiciones de carga, aumentando la calidad experimental del estudio.

Referencias

- [1] Consolo, O., Hillege, L., & Bonci, M. (2020). *The Roll Damping of High-Speed Craft in Waves*. 15–16.
https://indico.atenanazionale.org/event/4/papers/231/files/406-ConsoloHillegeBonci_HSMV2020_2.pdf
- [2] Dirección del parque nacional galápagos. (n.d.). *Transporte entre islas pobladas – Parque Nacional Galápagos*. Retrieved October 15, 2025, from <https://galapagos.gob.ec/transporte-entre-islas-pobladas/>
- [3] Frankling Vega. (2023, October 17). *Lanchas interislas de Galápagos: más velocidad, menos seguridad*. <https://www.bitacoraec.com/post/lanchas-interislas-de-gal%C3%A1pagos-m%C3%A1s-velocidad-menos-seguridad>
- [4] *GEBCO Gridded Bathymetry Data Download*. (2025).
<https://download.gebco.net/>
- [5] Huacón, E., & Matute, R. (2024). *Estudio de los factores para la mejora en el sistema de transporte interislas del archipiélago de las Galápagos*. [Escuela Superior Politécnica del Litoral].
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/60738>
- [6] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2022). *Resultados del Censo de Población y Vivienda – Provincia de Galápagos*.
<https://cubos.inec.gob.ec/AppCensoEcuador/>
- [7] International Maritime Organization. (2008). *International Code of Safety for High-Speed Craft (2000 HSC Code)* (2008th ed.). IMO Publishing.
https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7482d8e5274a7f9c586923/msis34_hsc_code_2000_2008_itos_rev1.01-full-2.pdf

- [8] Ishida, S. (1993). Model Experiment on the Mechanism of Capsizing of a Small Ship in Beam Seas Part 2 On the Nonlinearity of Sway Damping and its Lever. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1993(174), 163–170.
https://doi.org/10.2534/JJASNAOE1968.1993.174_163
- [9] Ishida, S., & Fujiwara, T. (2000). On the capsizing mechanism of small craft in beam breaking waves. In Martin Renilson (Ed.), *7th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles: B* (pp. 868–877). The Australian Maritime Engineering CRC Ltd.
- [10] Ishida, S., Yasuno, M., & Takaishi, Y. (1990). Model Experiment on the Mechanism of Capsizing of a Small Ship in Beam Seas. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1990(167), 91–101.
<https://doi.org/10.2534/JJASNAOE1968.1990.91>
- [11] Krogstad, H. E., & Arntsen, Ø. A. (2000). *LINEAR WAVE THEORY PART A Regular waves*.
- [12] *Mapa Ecoturístico de Galápagos al alcance del viajero – Ministerio de Turismo*. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from
<https://www.turismo.gob.ec/mapa-ecoturistico-de-galapagos-al-alcance-del-viajero/>
- [13] Marin, J. (2025). *Small Craft Capsizing in the Galápagos Islands: Linking Vessel Stability, Wave Climate, and Coastal Morphology*.
- [14] Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2025, February 12). 279.277 visitantes llegaron a las Islas Galápagos durante 2024. <https://galapagos.gob.ec/279-277-visitantes-llegaron-a-las-islas-galapagos-durante-2024/>
- [15] Portilla-Yandún, J., Acero, W. G., Soria, R., Bravo, J., Alvarez, R., Paredes, R., & Arias, M. (2025). Spectral and Entropy-based Wave Energy resource

assessment: A global view, and point analysis at the Galapagos Islands.

Renewable Energy, 246. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122830>

- [16] Rattanapitikon, W., & Shibayama, T. (2006). Breaking wave formulas for breaking depth and orbital to phase velocity ratio. *Coastal Engineering Journal*, 48(4), 395–416.

<https://doi.org/10.1142/S0578563406001489;WGROUP:STRING:PUBLICATION>

- [17] Renilson, M., Hardon, P., Al-Nassar, W., & Al-Salem, K. A. (2004). Capsizing of Small Vessels In Breaking Waves. *The International Journal of Small Craft Technology*, 146(b2), 15.

<https://doi.org/10.3940/rina.ijst.2004.b2.31041>

- [18] Robertson, B., Hall, K., Zytner, R., & Nistor, I. (2013). Breaking waves: review of characteristic relationships. *Coastal Engineering Journal*, 55(1).

<https://doi.org/10.1142/S0578563413500022>

- [19] *Tragedia en Galápagos: el naufragio de la lancha Angy contado por las víctimas - Plan V.* (n.d.). Retrieved November 13, 2025, from <https://planv.com.ec/historias/tragedia-galapagos-el-naufragio-la-lancha-angy-contado-victimas/>

- [20] Turisec. (2023, September 14). *El turismo y los constantes naufragios en Galápagos: periodista ambiental Franklin Vega analiza y recomienda* - Turisec.

<https://www.turisec.com/el-turismo-y-los-constant-naufragios-en-galapagos/>

- [21] UNESCO. (n.d.). *Islas Galápagos - Centro del Patrimonio Mundial de la UNESCO*. Retrieved October 15, 2025, from <https://whc.unesco.org/en/list/1>

- [22] van Norren, D. E., & de Blok, C. (2025). Ocean management and rights of Nature: The case of the Galapagos in Ecuador and beyond. *Marine Policy*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106564>
- [23] Zselezky, J. J., Wallendorf, L. A., & Duncan, J. H. (1987). *Model tests to compare capsize resistance of the uscg 44' mlb and proposed 47' mlb in breaking waves*. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA197420.pdf>

Apéndices

Apéndice A: Construcción del sistema experimental.

Figura 33

Fabricación de modelos de acrílico.



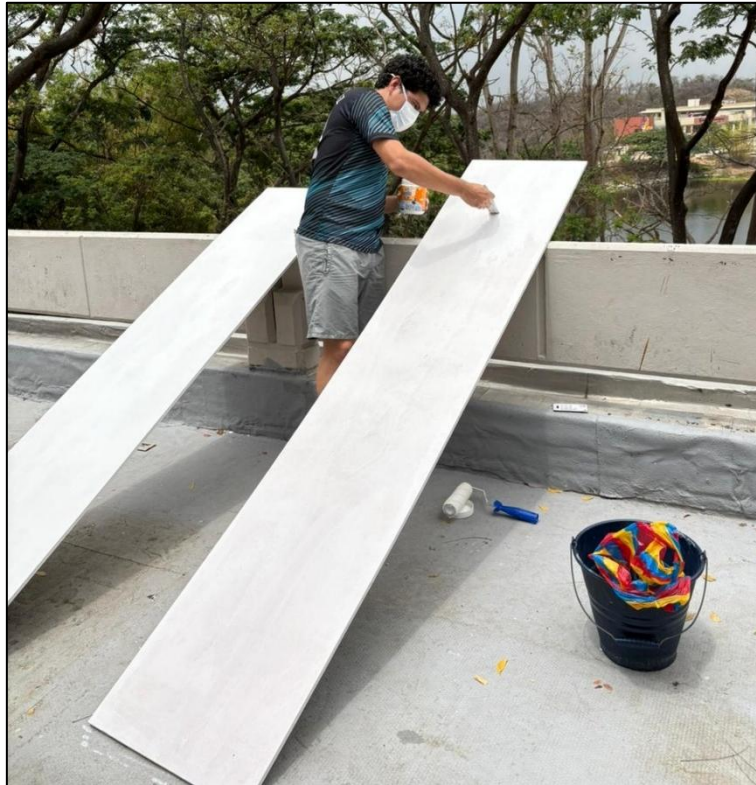
Figura 34

Modificación de modelos de acrílico para dar soporte al pilar de peso deslizante.



Figura 35

Recubrimiento de rampa con impermeabilizante.

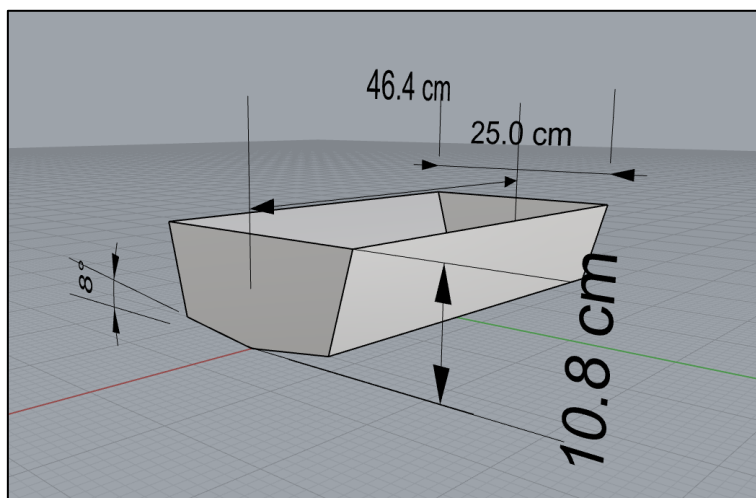
**Figura 36**

Modificación de la punta de la rampa con plancha de hierro galvanizado.



Figura 37

Características principales de modelo MK08.

**Figura 38**

Características principales de modelo MK14.

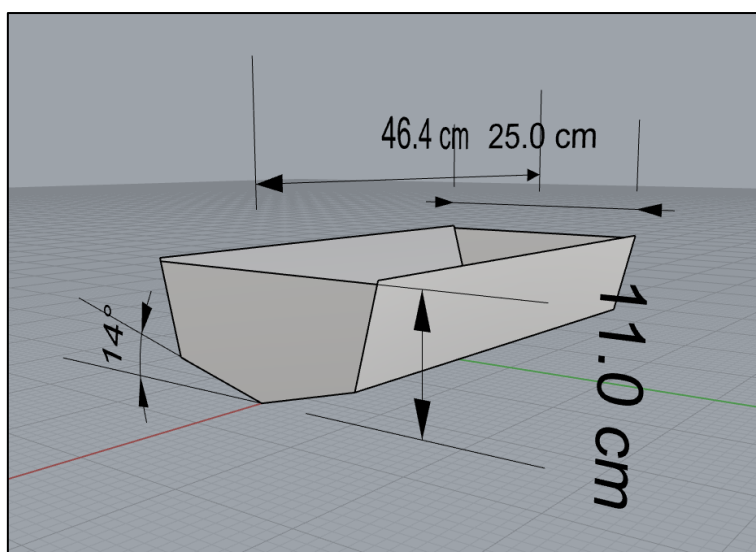
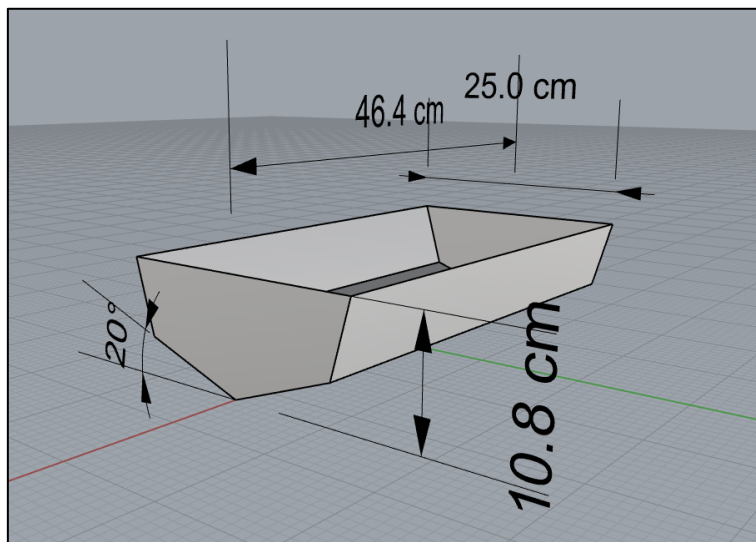


Figura 39

Características principales de modelo MK20.



Apéndice B: Experimentación.

Figura 40

Experimento de inclinación.

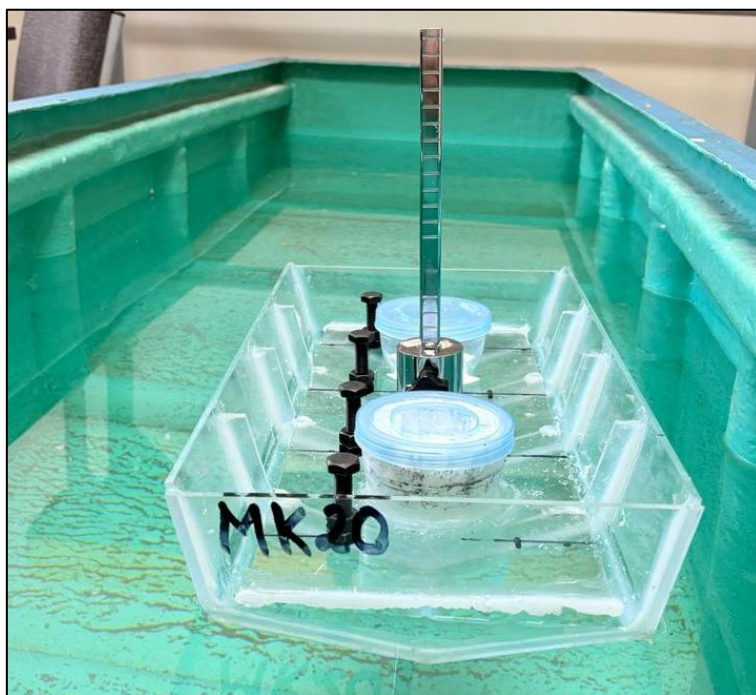
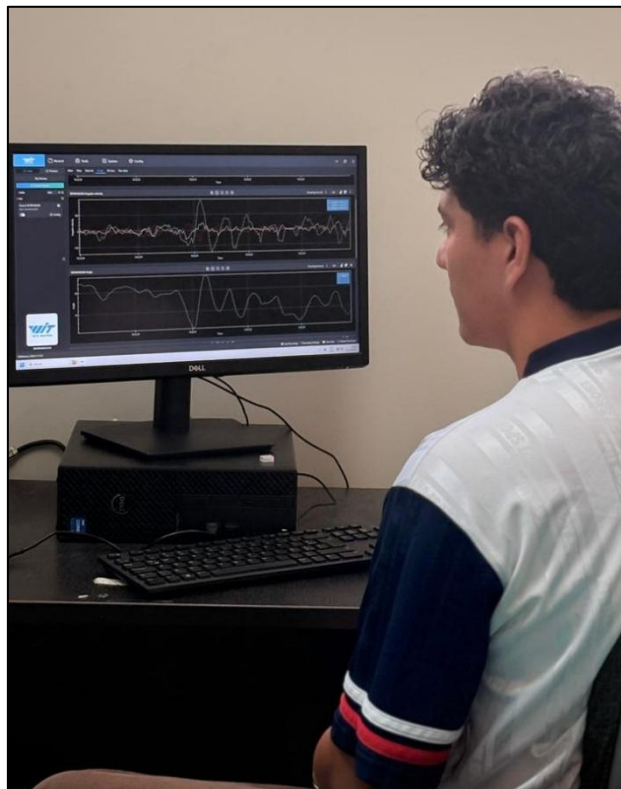


Figura 41

Registro de datos en tiempo real en el programa del sensor inalámbrico.

**Figura 42**

Condición de carga 1.

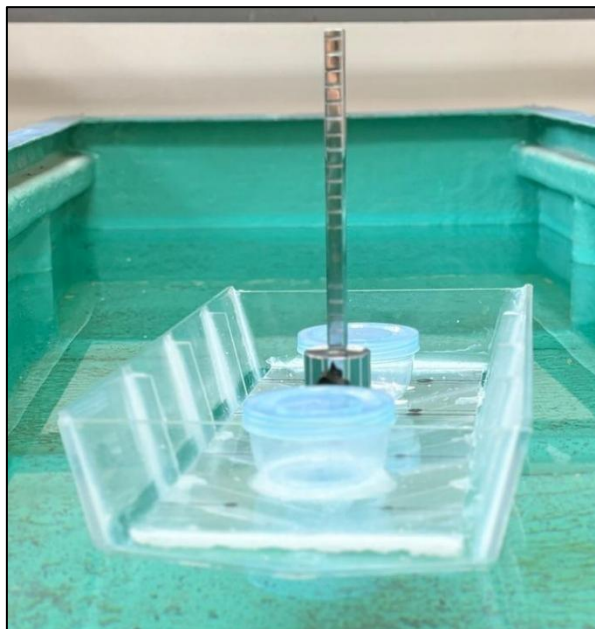


Figura 43

Condición de carga 2.



Apéndice C: Señales experimentales representativas.

Figura 44

Señal representativa experimento de inclinación modelo MK08 Condición 1.

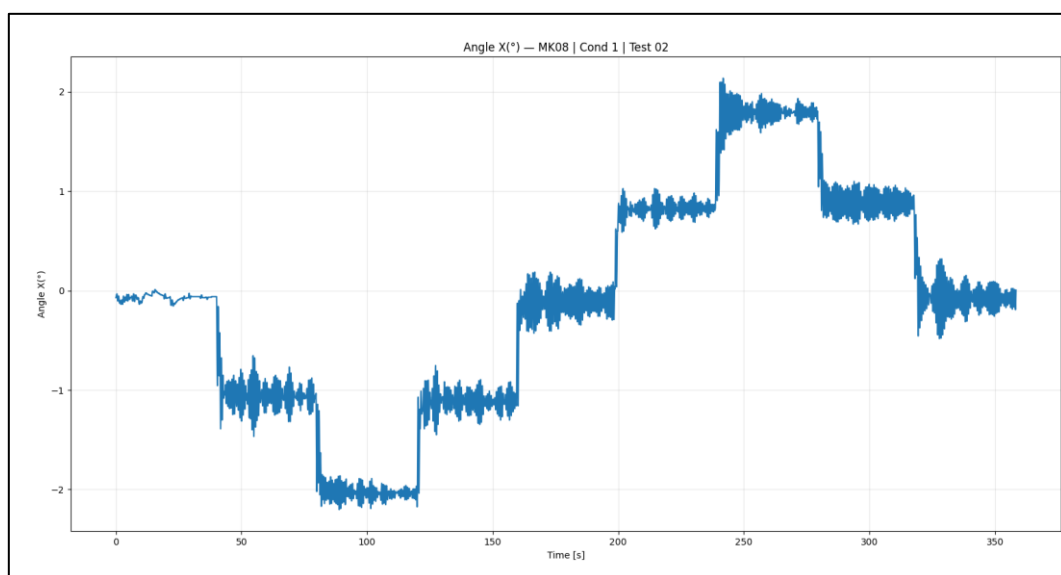
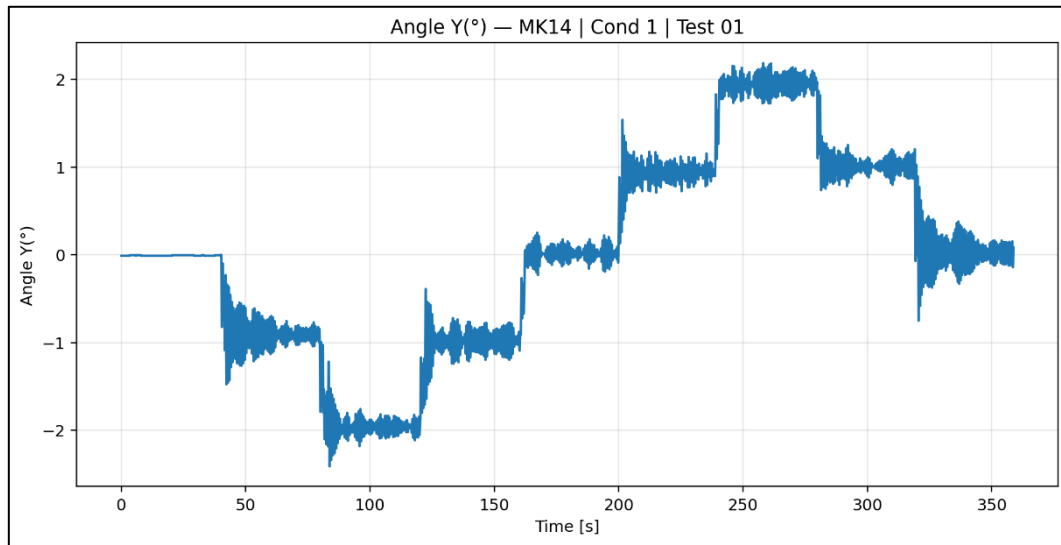


Figura 45

Señal representativa experimento de inclinación modelo MK14 Condición 1.

**Figura 46**

Señal representativa experimento de inclinación modelo MK20 Condición 1.

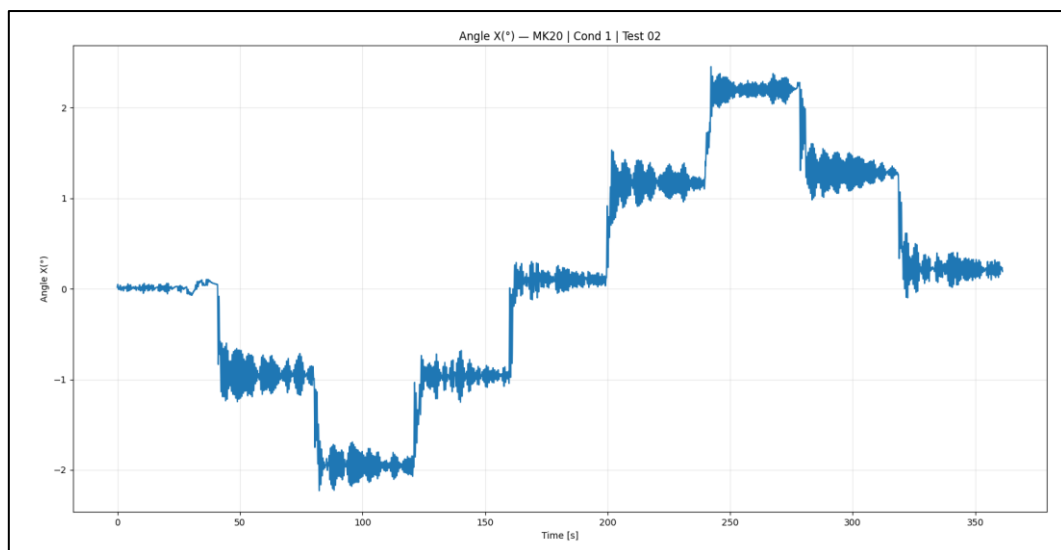
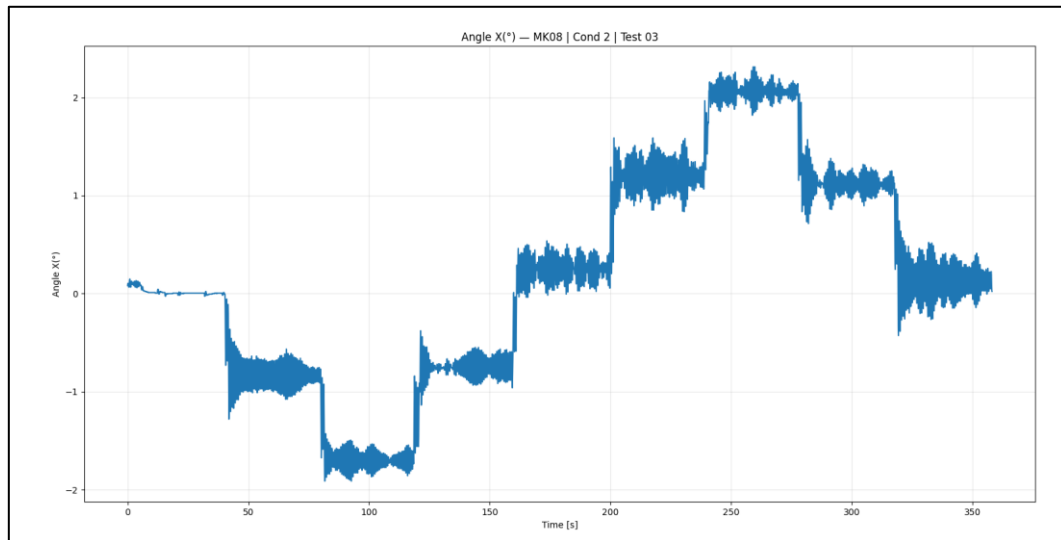


Figura 47

Señal representativa experimento de inclinación modelo MK08 Condición 2.

**Figura 48**

Señal representativa experimento de inclinación modelo MK14 Condición 2.

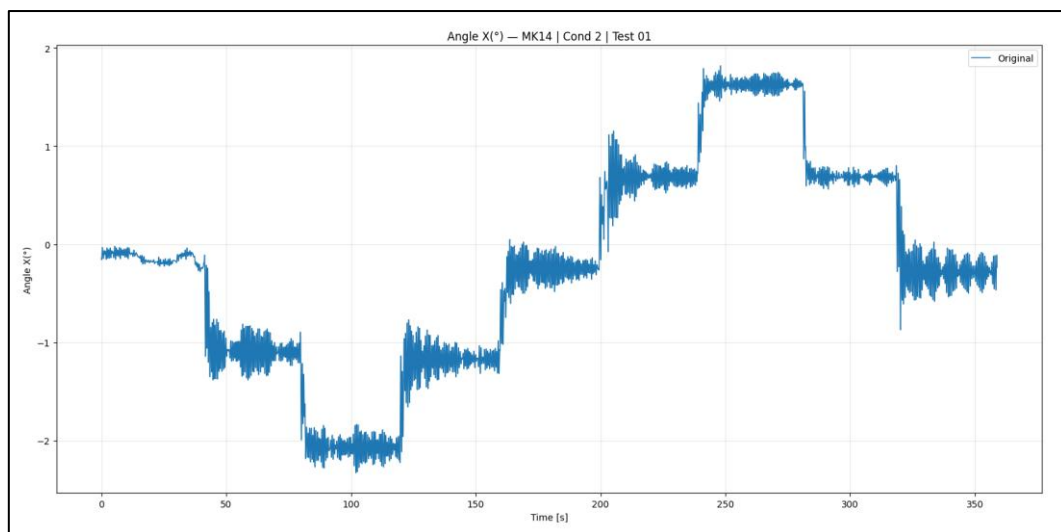
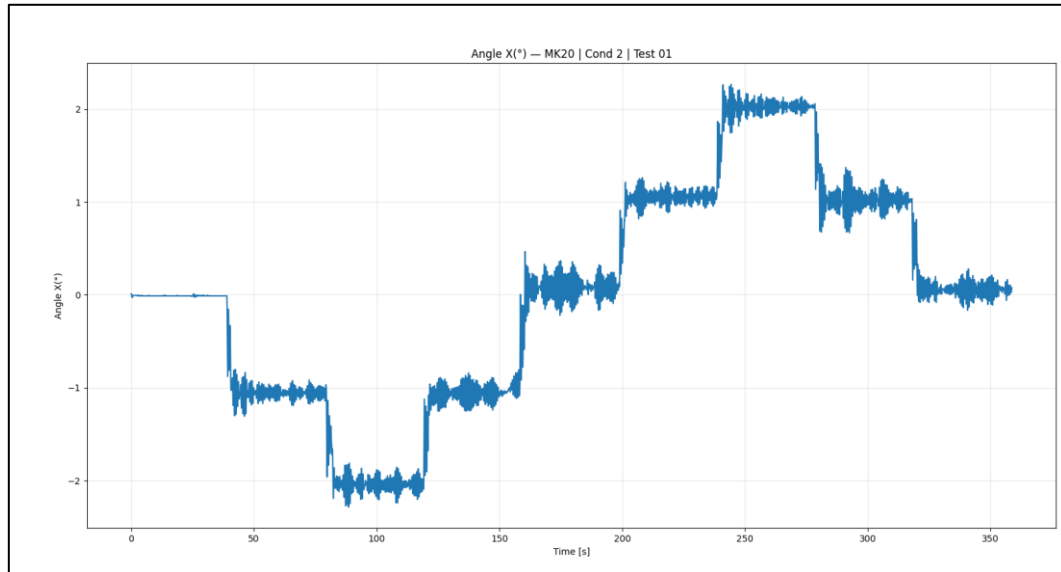


Figura 49

Señal representativa de oscilación libre de modelo MK20 Condición 2.

**Figura 50**

Señal representativa de oscilación libre de modelo MK08 Condición 1.

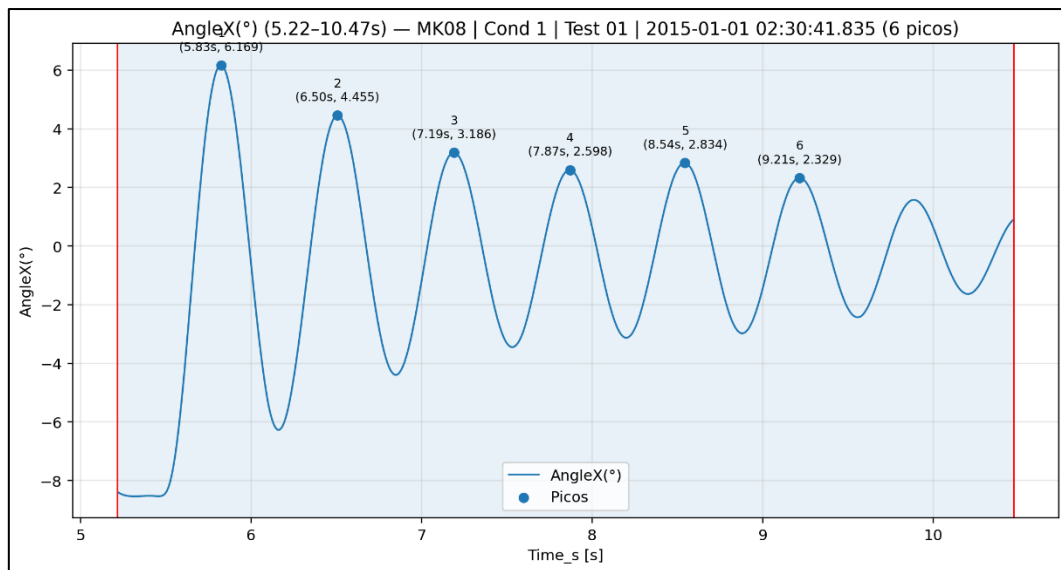
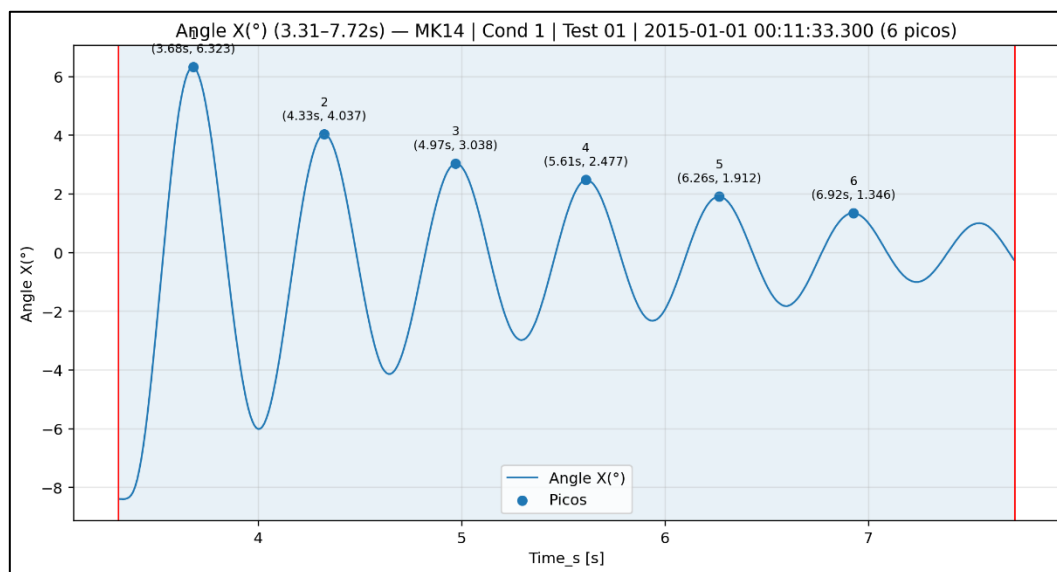


Figura 51

Señal representativa de oscilación libre de modelo MK14 Condición 1.

**Figura 52**

Señal representativa de oscilación libre de modelo MK20 Condición 1.

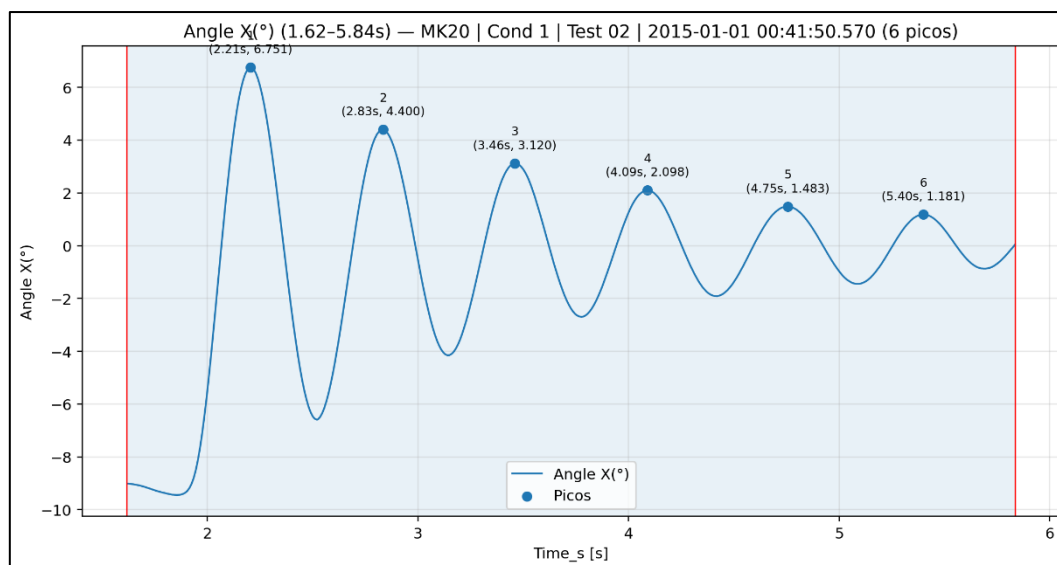
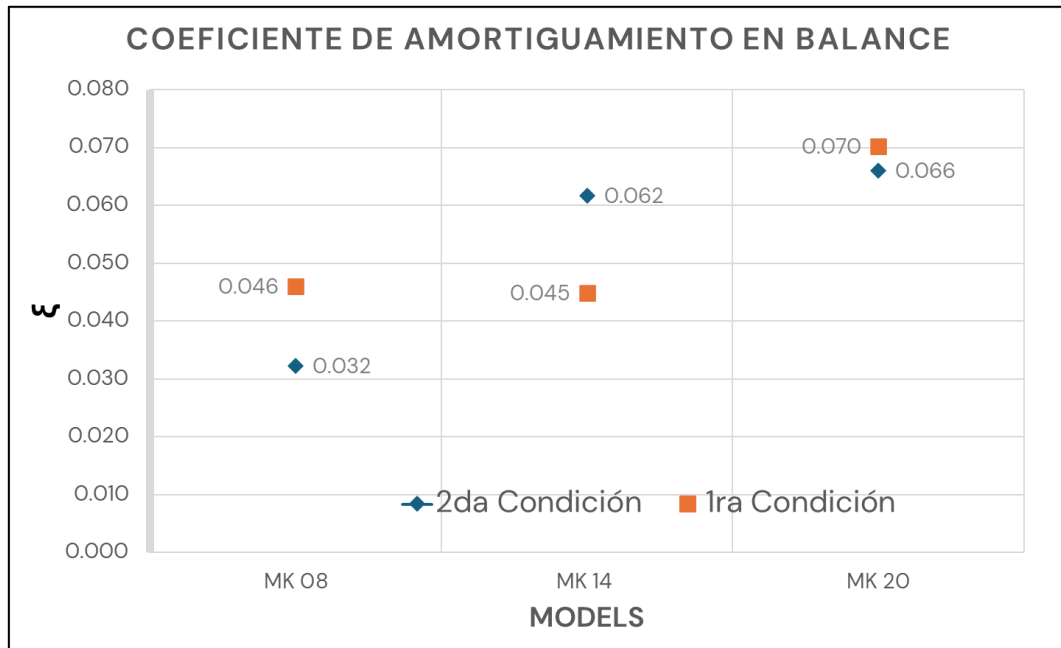


Figura 53

Comportamiento del coeficiente de amortiguamiento en balance.

**Figura 54**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm,

Condición 1.

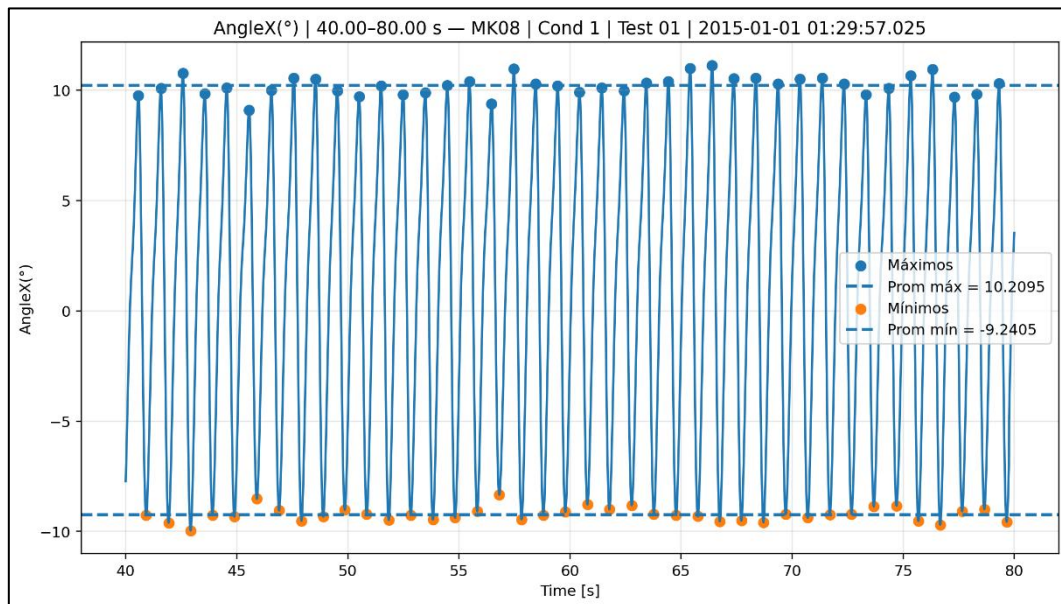
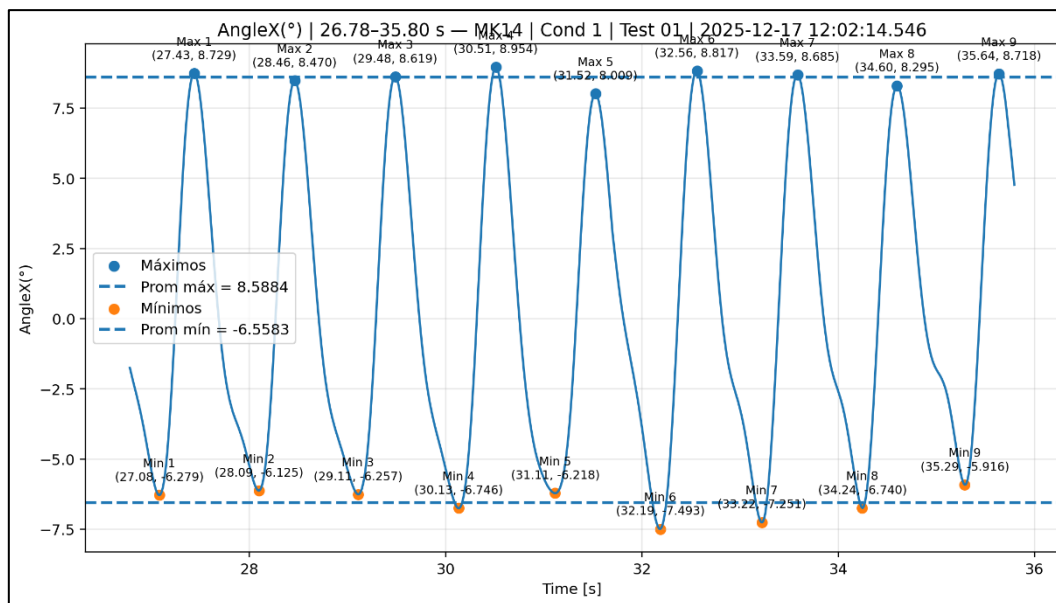


Figura 55

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.

**Figura 56**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.

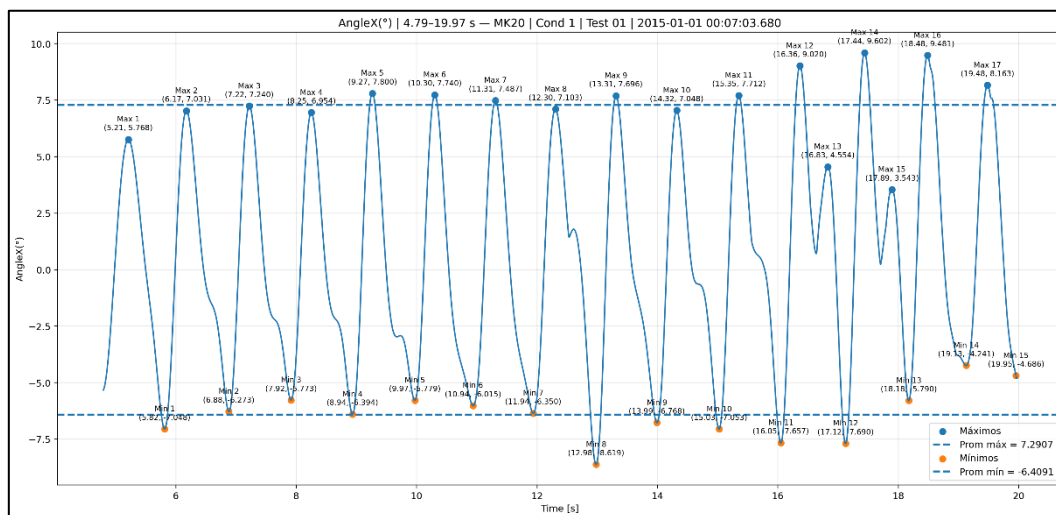
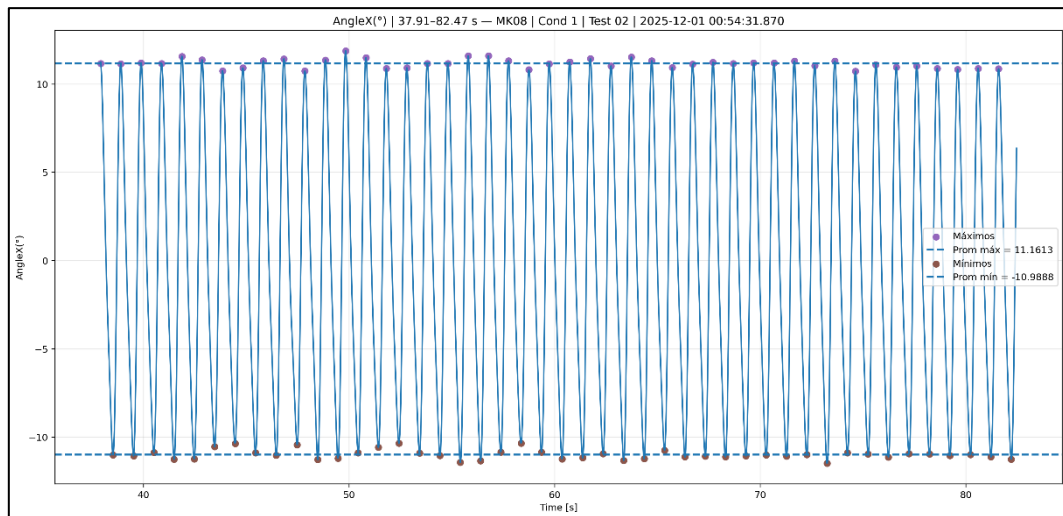


Figura 57

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 11 mm, Condición 1.

**Figura 58**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 11 mm, Condición 1.

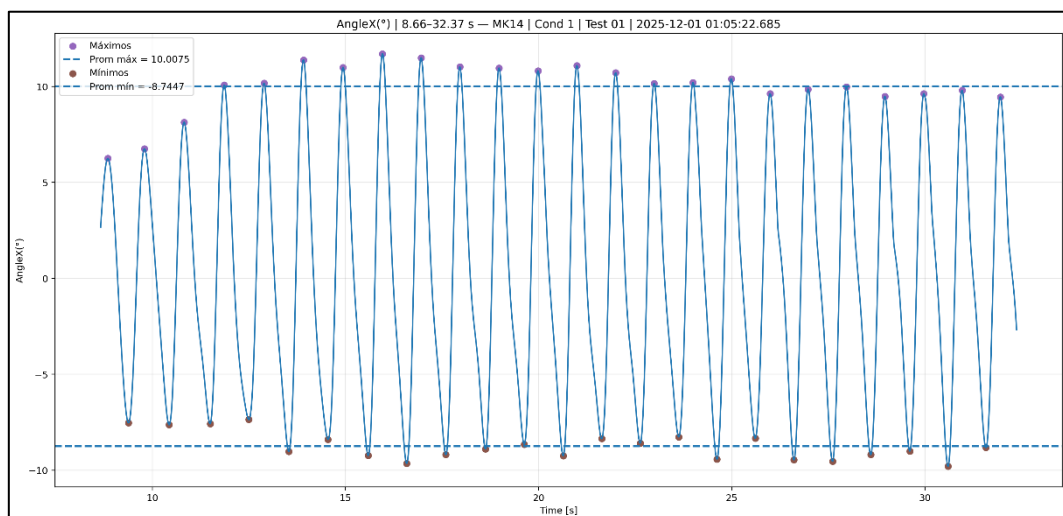
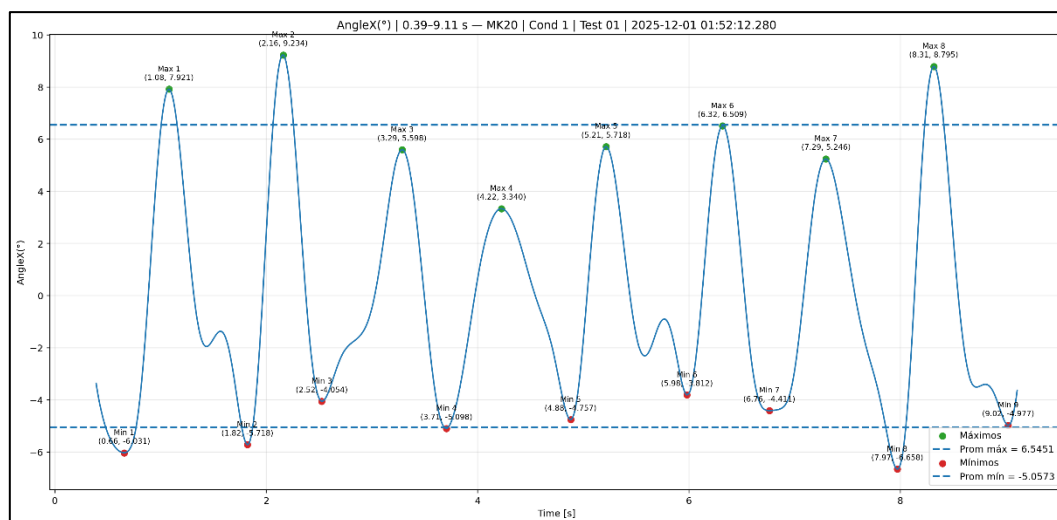


Figura 59

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1 Hz, desplazamiento shaker: 11 mm, Condición 1.

**Figura 60**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.

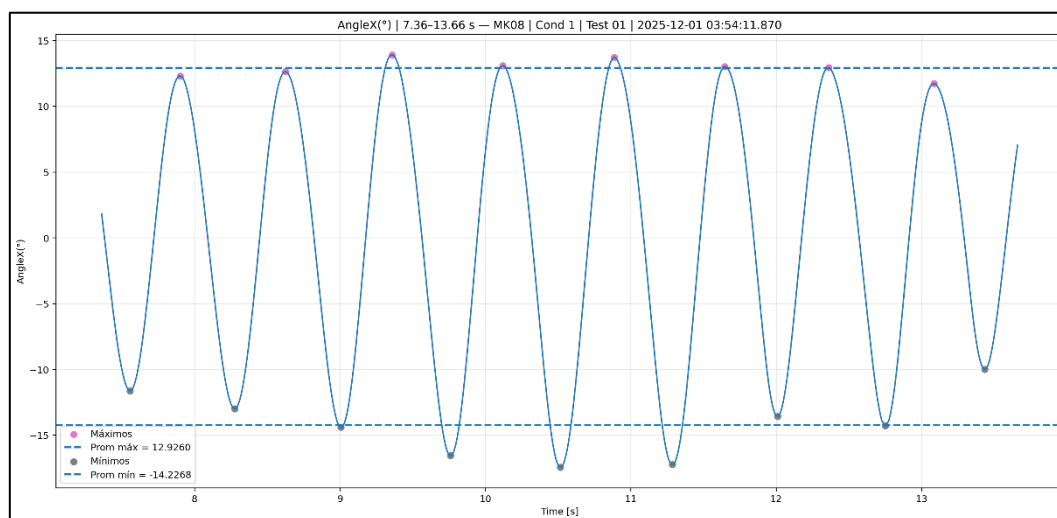
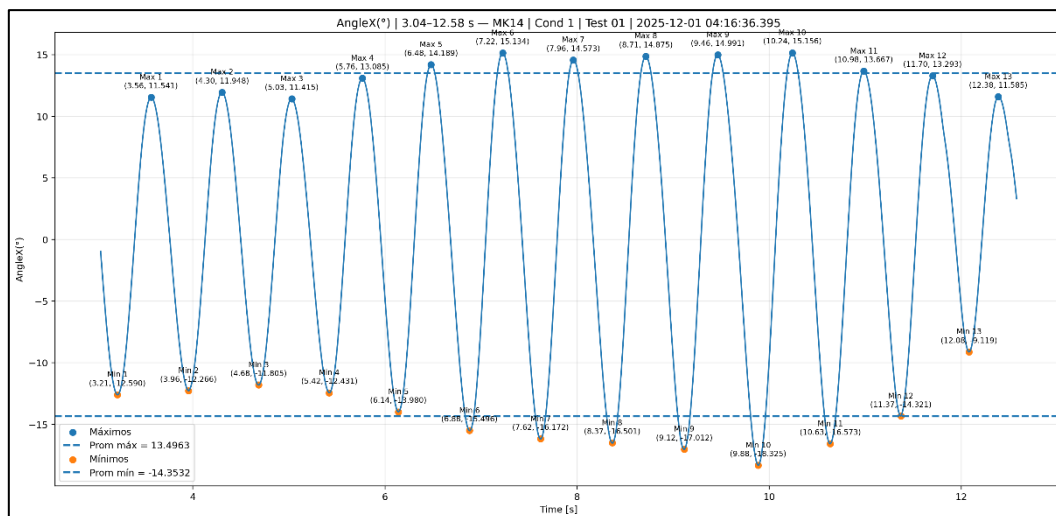


Figura 61

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.

**Figura 62**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 8 mm, Condición 1.

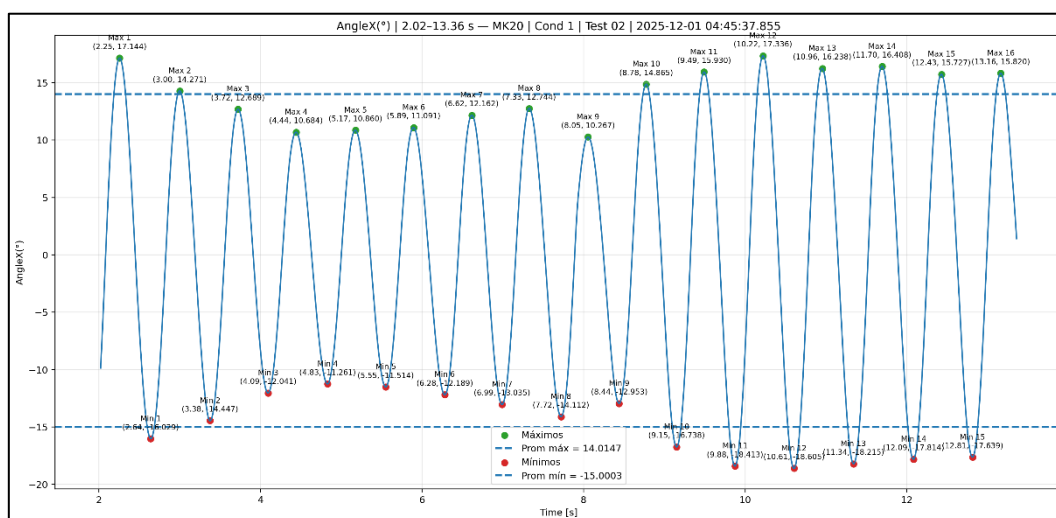
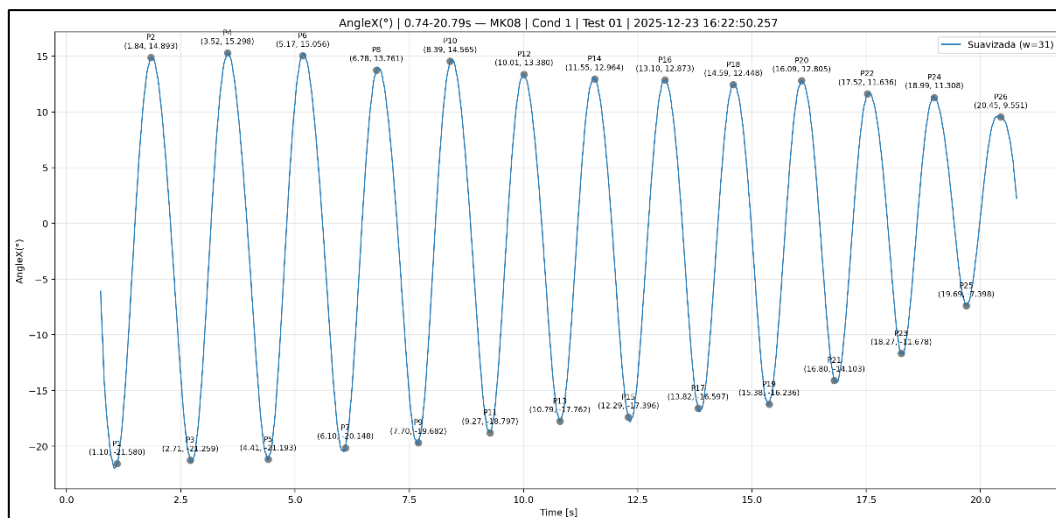


Figura 63

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

**Figura 64**

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

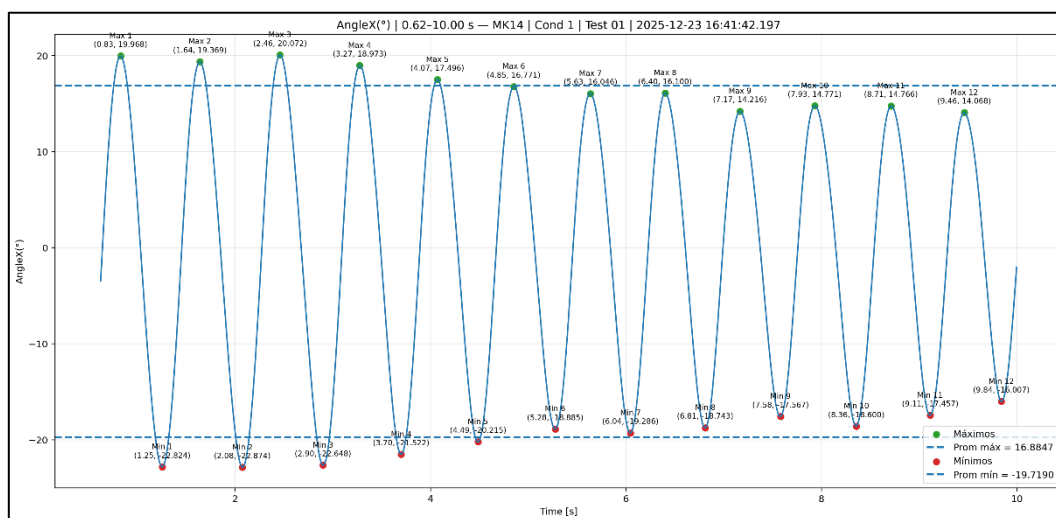
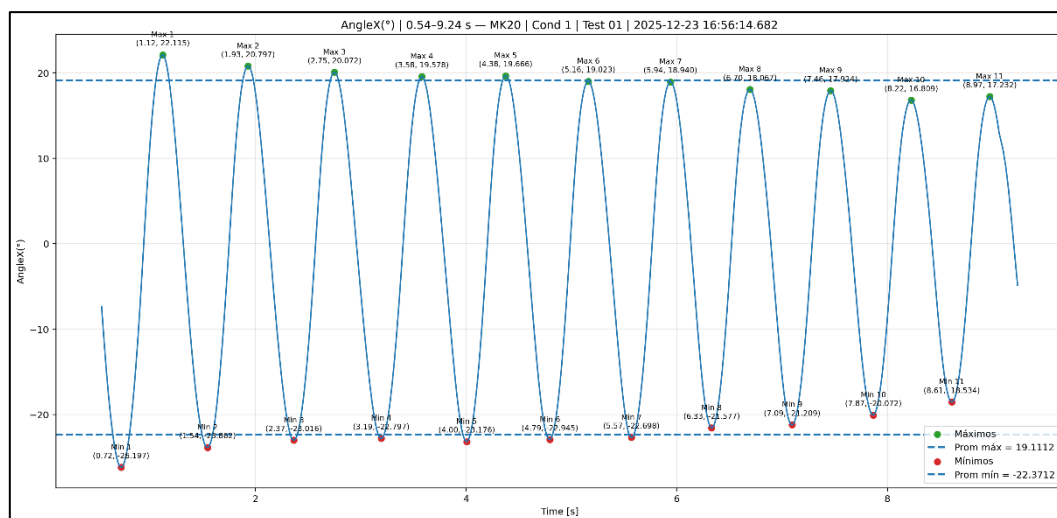


Figura 65

Señal representativa de oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

**Figura 66**

Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

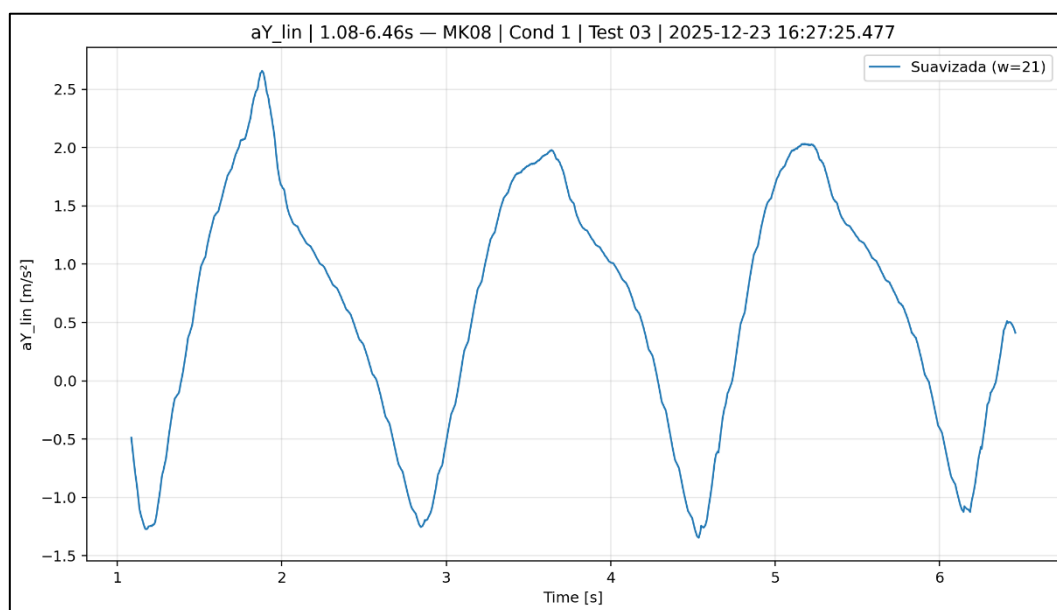
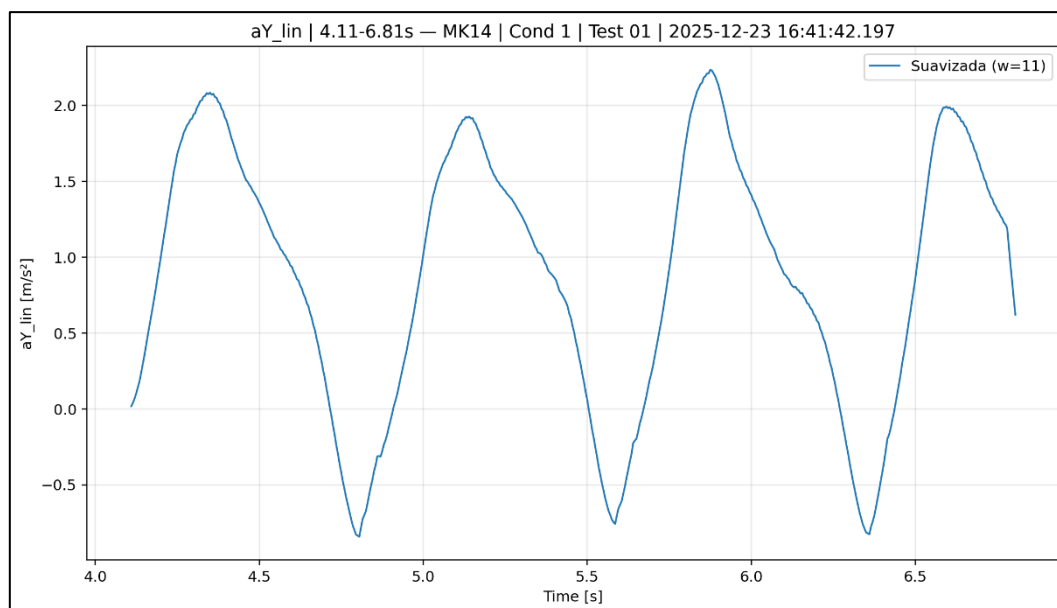


Figura 67

Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

**Figura 68**

Señal representativa de aceleración en ladeo para oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

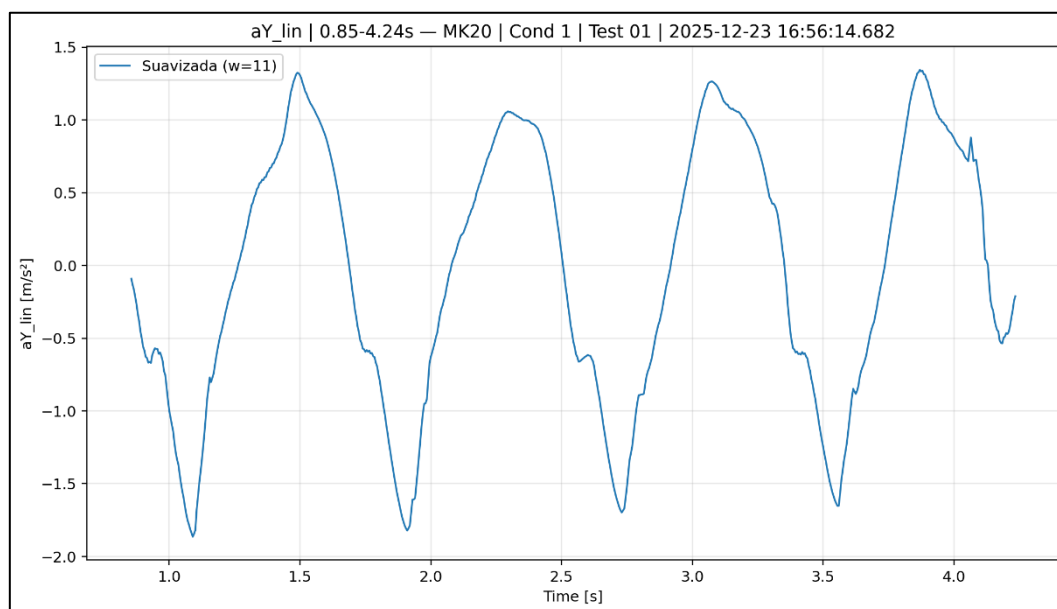
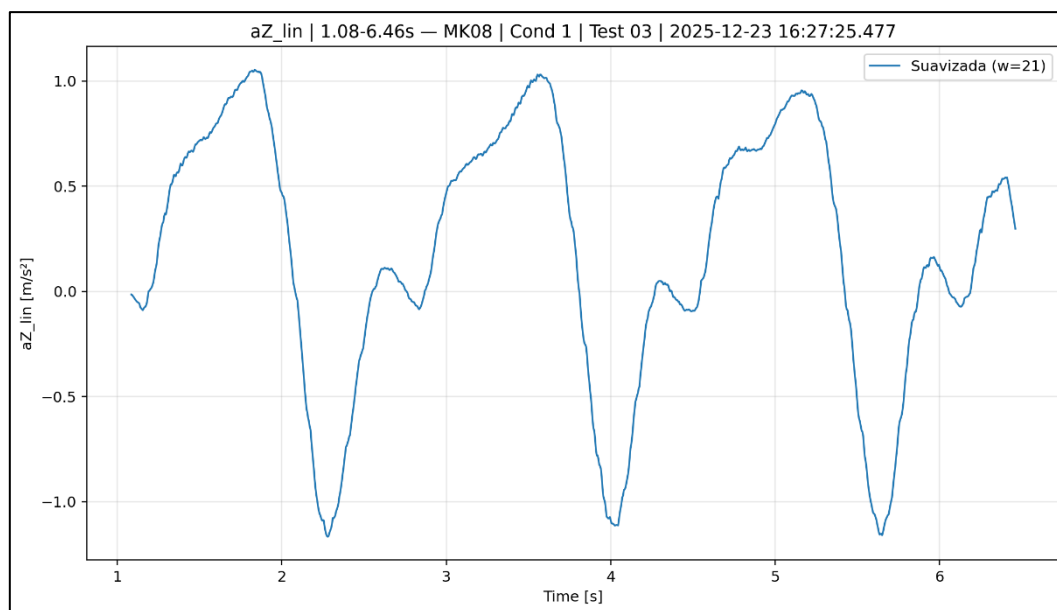


Figura 69

Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK08, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

**Figura 70**

Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK14, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.

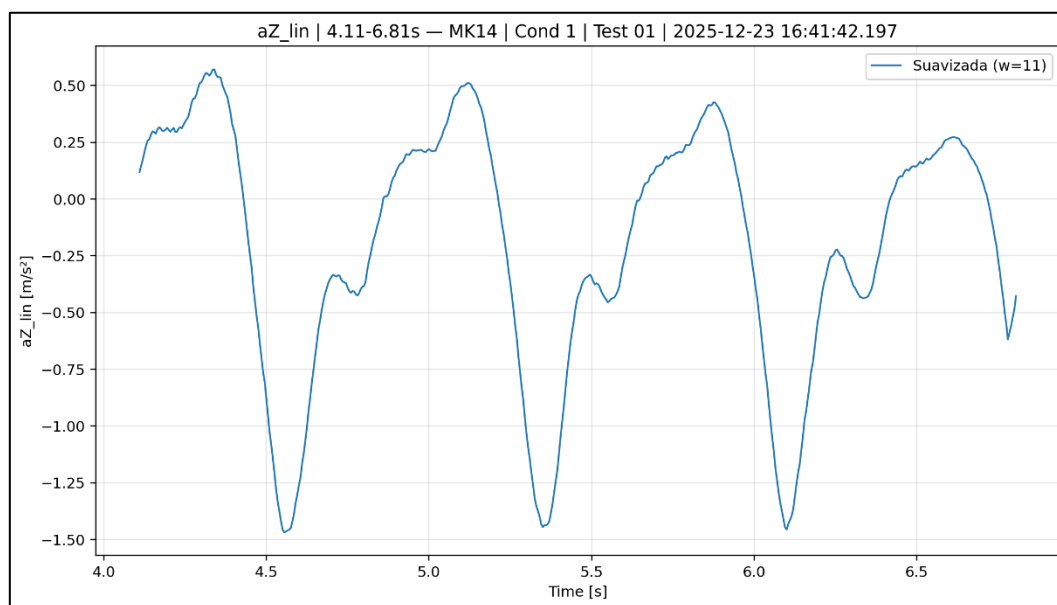
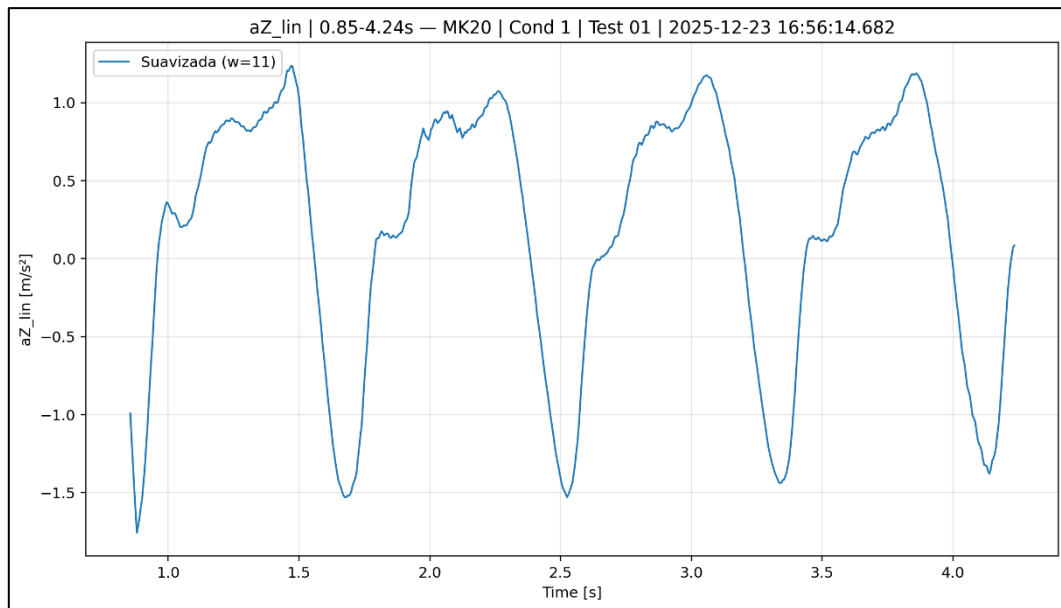


Figura 71

Señal representativa de aceleración en levantamiento para oscilación forzada modelo MK20, frecuencia: 1.5 Hz, desplazamiento shaker: 12 mm, Condición 1.



Apéndice D: Procesamiento de datos.

Figura 72

Interfaz general de programa usado para procesamiento de datos. Elaboración propia.

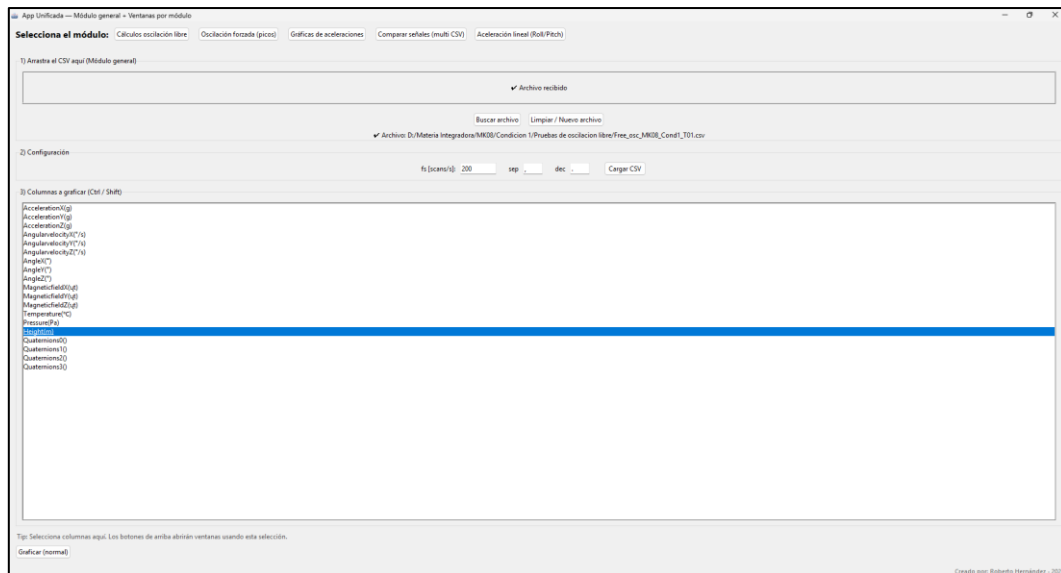
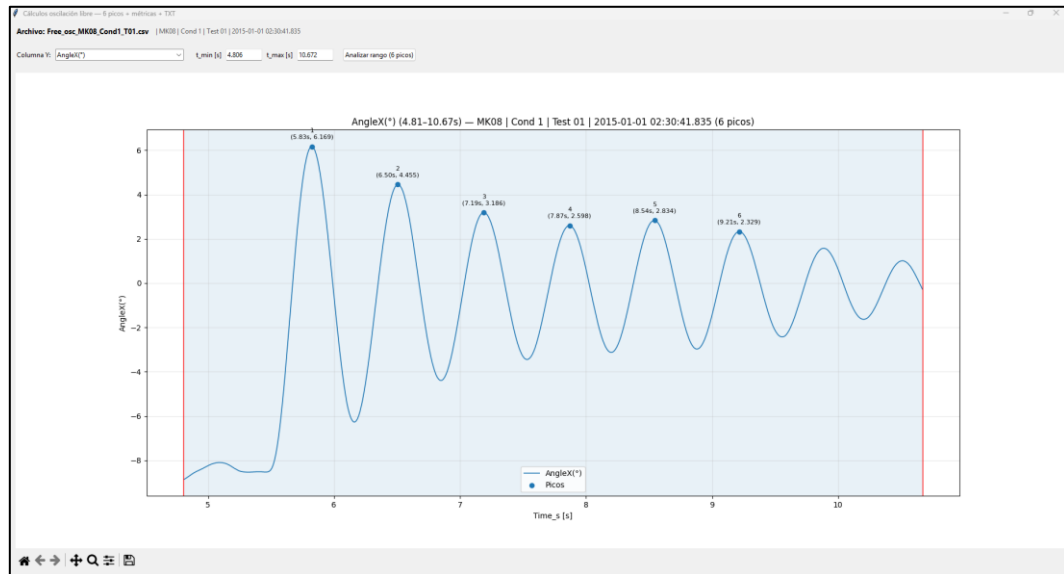


Figura 73

Modulo de cálculos de oscilación libre.

**Figura 74**

Cálculos realizados a partir de señal de oscilación libre.

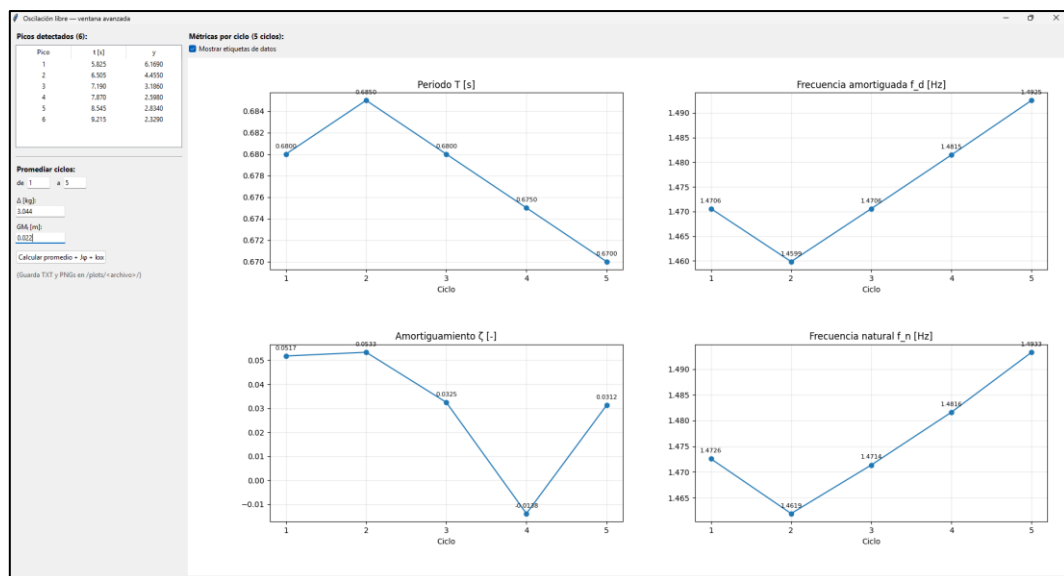


Figura 75

Resultados obtenidos de cálculo de oscilación libre en programa de Python.

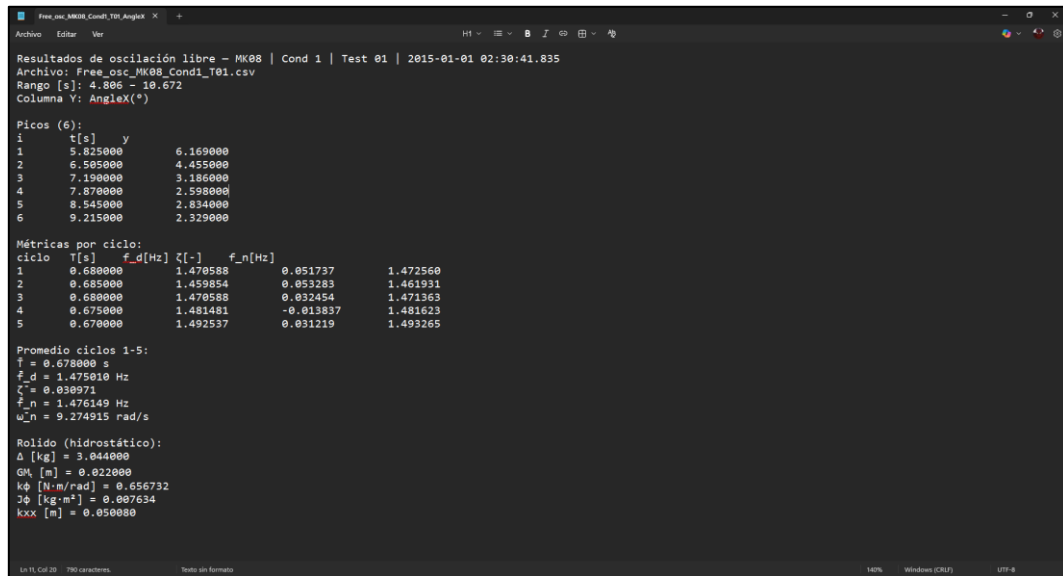


Figura 76

Modulo de oscilación forzada en programa en Python.

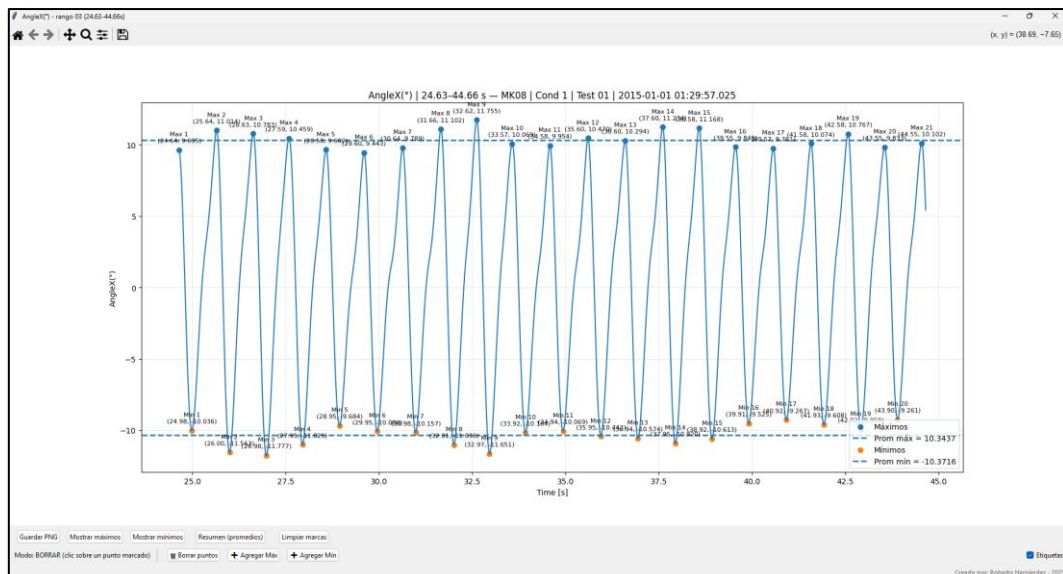


Figura 77

Modulo de comparación de señales en programa de Python.

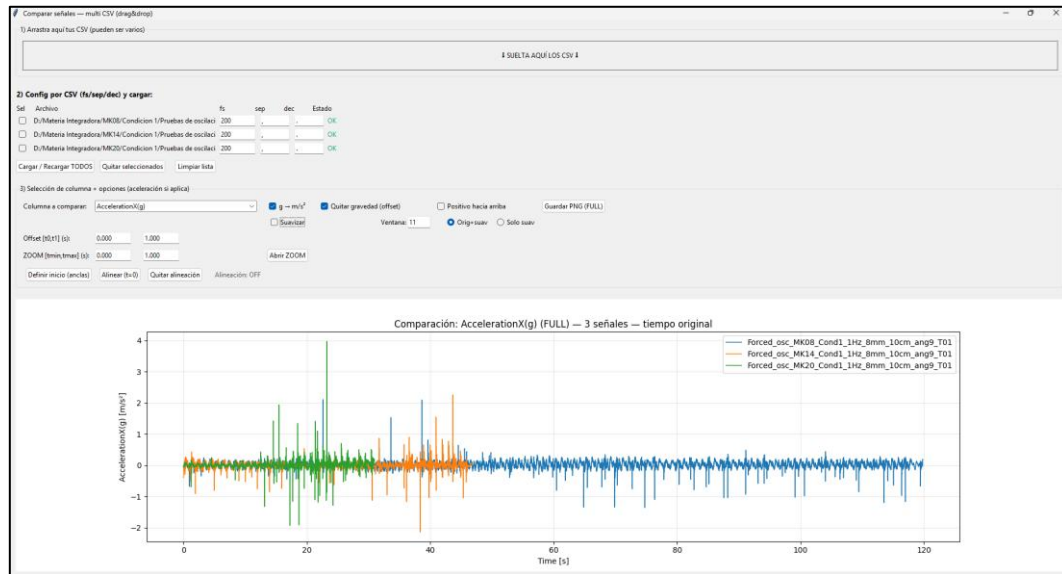
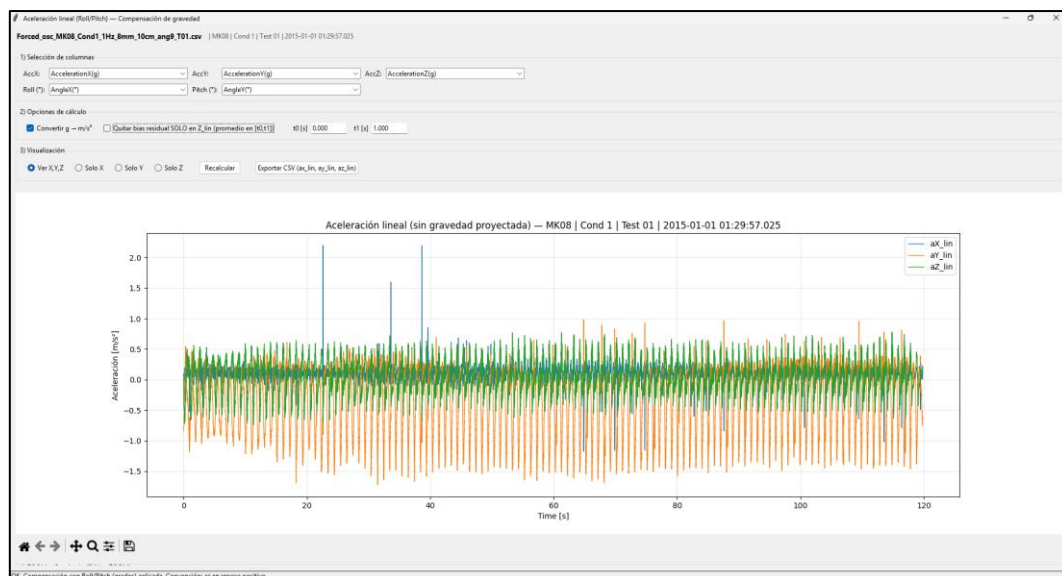


Figura 78

Modulo de cálculos de aceleración lineal en Python.



Apéndice E: Calibración y especificaciones del sensor.

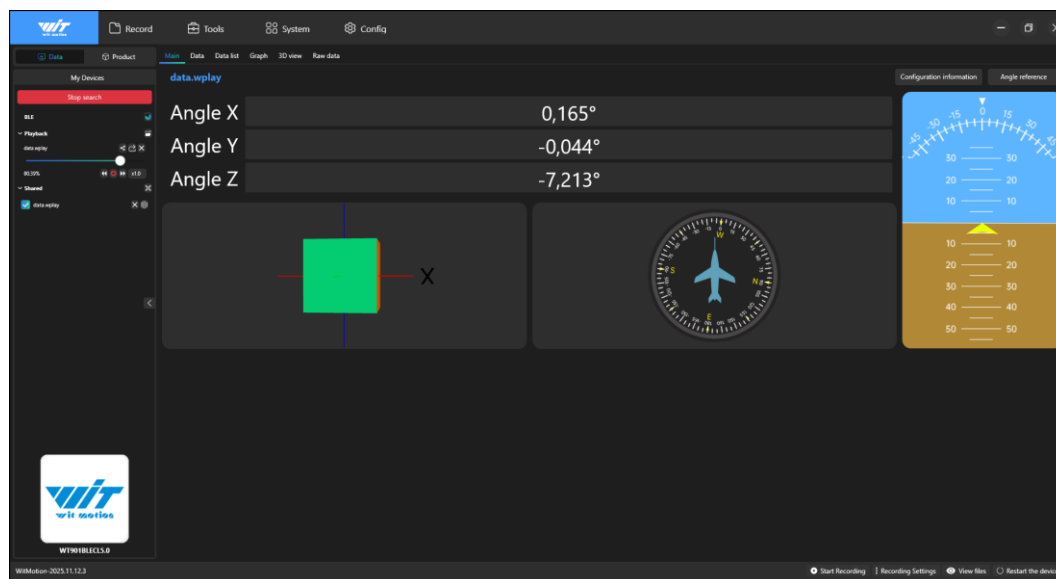
Figura 79

Parámetros del acelerómetro.

Parameters	Condition	Typical value
Measuring range		±16g
Resolution ratio	±16g	0.0005(g/LSB)
RMS noise	Bandwidth=100Hz	0.75~1mg-rms
Static zero drift	Place horizontally	±20~40mg
Temperature drift	-40°C ~ +85°C	±0.15mg/°C
Bandwidth		5~256Hz
Gyroscope parameters		
Parameters	Condition	Typical value
Measuring range		±2000°/s
Resolution ratio	±2000°/s	0.061(°/s)/(LSB)
RMS noise	Bandwidth=100Hz	0.028~0.07(°/s)-rms
Static zero drift	Place horizontally	±0.5~1°/s
Temperature drift	-40°C ~ +85°C	±0.005~0.015 (°/s)/°C
Bandwidth		5~256Hz
Magnetometer parameters		
parameters	Condition	Typical value
Measuring range		±2Gauss
Resolution ratio	±2Gauss	0.0667mGauss/LSB
Pitch and roll angle parameters		
parameters	Condition	Typical value
Measuring range		X:±180°
		Y:±90°
Inclination accuracy		0.2°
Resolution ratio	Place horizontally	0.0055°
Temperature drift	-40°C ~ +85°C	±0.5~1°
Heading angle parameter		
parameters	Condition	Typical value
Measuring range		Z:±180°
heading accuracy	9-axis algorithm, magnetic field calibration, dynamic/static	1° (Without interference from magnetic fields) 【1】
	6-axis algorithm, static	0.5° (Dynamic integral cumulative error exists) 【2】
Resolution ratio	Place horizontally	0.0055°

Figura 80

Interfaz de programa del sensor inalámbrico.

**Figura 81**

Configuración de frecuencia y banda ancha de muestreo de sensor inalámbrico.

