

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Simulación numérica de embarcaciones interislas de Galápagos en condición sin propulsión sometidas a olas transversales.

INGE - 3065

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Ignacio Sebastián Chinchin Martínez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Hernán Chinchin y Mónica Martínez, por el amor incalculable, apoyo incondicional y las enseñanzas más importantes que he podido recibir. A mi hermana Anthonela, por ser mi mejor amiga y compañera de toda mi vida. A cada uno de mis amigos y familiares, incluidos aquellos que me han guiado desde el cielo, por aportar a la persona que soy.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a cada una de las personas que formaron parte de mi etapa universitaria, tanto compañeros como maestros. Al PhD. José R. Marín, por su incansable vocación de enseñanza y su apoyo a realizar este proyecto.

Declaración Expresa

Yo Ignacio Sebastián Chinchin Martínez 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/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique 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, 11 de febrero del 2026.

Ignacio Chinchin

Evaluadores

José María Rodríguez Lamchang, MSc.

Profesor de Materia

José Rolando Marín López, PhD.

Tutor de proyecto

Resumen

En función de los incidentes asociados a condiciones de oleaje que han involucrado a embarcaciones interislas en las Islas Galápagos, el presente proyecto desarrolla un modelo numérico para analizar su comportamiento dinámico frente a olas transversales. Para evaluar la posibilidad de zozobra se ha considerado el instante en que el nivel de agua alcanza el borde superior de cubierta. Las simulaciones numéricas se desarrollan mediante la integración en el tiempo del sistema de ecuaciones que describe los movimientos acoplados de ladeo, levantamiento y balance, aplicando el método de Runge – Kutta de cuarto orden. Se consideraron tres lanchas de 12 m de eslora con diferentes ángulos de astilla muerta, así como tres condiciones de carga para representar la variación del número de pasajeros a bordo. Además, se analizan condiciones de oleaje regular y oleaje deslizante mediante una serie de Fourier para su representación significativa. Los resultados evidencian una correcta implementación del acoplamiento en el modelo numérico, con respuestas asimétricas que presentan picos secundarios entre los valores máximos y mínimos de ladeo, levantamiento y balance. Asimismo, se observa que la geometría y la condición de carga influyen de manera significativa en los valores de francobordo instantáneo, alcanzando condiciones bajo las cuales se incrementa el riesgo de embarque de agua en cubierta.

Palabras Clave: lanchas interislas, simulación numérica, movimiento acoplado, integración en tiempo, zozobra.

Abstract

Based on incidents associated with wave conditions involving inter-island vessels in the Galápagos Islands, the present study develops a numerical model to analyze their dynamic behavior under beam seas. To assess the possibility of capsizing, the instant at which the water level reaches the upper edge of the deck is considered. The numerical simulations are performed through time integration of the system of equations describing the coupled motions of roll, heave, and pitch, using a fourth-order Runge–Kutta method. Three 12 m-long craft with different deadrise angles are considered, along with three loading conditions to represent variations in the number of passengers on board. In addition, regular wave conditions and sliding waves are analyzed, the latter being represented through a Fourier series. The results demonstrate a correct implementation of motion coupling in the numerical model, with asymmetric responses exhibiting secondary peaks between the maximum and minimum values of roll, heave, and pitch. Furthermore, hull geometry and loading condition are shown to significantly influence instantaneous freeboard values, leading to conditions under which the risk of water shipping on deck increases.

Keywords: inter-island vessels, numerical simulation, coupled motions, time-domain integration, capsizing.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VI
Simbología	VIII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del Problema	5
1.4 Objetivos	6
<i>1.4.1 Objetivo General</i>	6
<i>1.4.2 Objetivos Específicos</i>	6
1.5 Marco Teórico	6
<i>1.5.1 Perfil de la ola incidente</i>	9
<i>1.5.2 Método de Runge – Kutta de 4to Orden</i>	10
Capítulo 2	13
2. Metodología.	14
2.1 Condiciones del oleaje de las Islas Galápagos	14
2.2 Implementación de la integración en tiempo.	15
2.3 Evaluación del modelo numérico	17
2.4 Análisis de resultados.	18
Capítulo 3	19
3. Resultados y análisis.	20
3.1 Características oceanográficas en locaciones de incidentes.	21
3.2 Convergencia temporal de la simulación.	22

3.2.1 Respuesta de ladeo de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.	22
3.2.2 Respuesta de levantamiento de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.	24
3.2.3 Respuesta de balance de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.	25
3.2 Influencia de la condición de carga y geometría de la embarcación en la respuesta dinámica frente a oleaje del día de siniestro en las Islas Galápagos.	26
3.2.1 Movimiento acoplado de la Lancha Interislas con 8° de astilla muerta.	26
3.2.2 Movimiento acoplado de la Lancha interislas con 14° de astilla muerta.	29
3.2.3 Movimiento acoplado de la Lancha interislas con 20° de astilla muerta.	30
3.3 Comparación de la respuesta de la lancha interislas frente a oleaje regular y oleaje tipo rompiente.	34
3.3.1 Descripción de las condiciones de oleaje analizadas.	34
3.3.2 Criterio de evaluación del embarque de agua en cubierta.	35
3.3.3 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 1 en ola regular y ola no lineal asimétrica.	35
3.3.4 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 2 bajo oleaje regular y oleaje asimétrico.	37
3.3.5 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 3 bajo oleaje regular y oleaje asimétrica.	39
Capítulo 4.	43
4. Conclusiones y recomendaciones.	44
4.1 Conclusiones.	44
4.1.1 Principales características de los estados de mar en zonas de incidentes.	44
4.1.2 Modelo numérico de integración en tiempo.	44
4.1.3 Respuesta de las embarcaciones interislas y posibilidad de zozobra.	45
4.2 Recomendaciones.	45
Referencias.	47
Apéndices.	49

Índice de figuras

Figura 1 <i>Locación de incidentes de embarcaciones en las Islas Galápagos. (Marín et al., 2025)</i>	4
Figura 2 <i>Movimientos y rotaciones de la embarcación. (Fossen, 2011).</i>	7
Figura 3 <i>Profundidad de rompimiento. (Robertson et al., 2013)</i>	10
Figura 4 <i>Vista de las Islas Galápagos. (Nullschool Technologies Inc., n.d.)</i>	15
Figura 5 <i>Diagrama de flujo general del código de programación.</i>	16
Figura 6 <i>Escenarios posibles de la interacción de la embarcación con la ola incidente.</i>	18
Figura 7 <i>Localizaciones de incidentes asociados a condiciones de oleaje.</i>	22
Figura 8 <i>Ladeo (sway) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta.</i>	23
Figura 9 <i>Levantamiento (heave) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta.</i>	24
Figura 10 <i>Balance (roll) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta.</i>	25
Figura 11 <i>Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	27
Figura 12 <i>Resultado de Balance – Lancha 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	28
Figura 13 <i>Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	29
Figura 14 <i>Resultado de Balance – Lancha 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	30
Figura 15 <i>Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	31
Figura 16 <i>Resultado de Balance – Lancha 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.</i>	32
Figura 17 <i>Perfil de oleaje de las condiciones analizadas.</i>	35
Figura 18 <i>Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha de 8° astilla muerta.</i>	36
Figura 19 <i>Oleaje asimétrico: 0.73m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 8° astilla muerta.</i>	37
Figura 20 <i>Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 14° astilla muerta.</i>	38

Figura 21 Oleaje asimétrico: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 14° astilla muerta.....	38
Figura 22 Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha de 20° astilla muerta.....	39
Figura 23 Oleaje deslizante: 0.73m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 20° astilla muerta.....	40
Figura 24 Francobordo instantáneo de babor – Lancha interislas con 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	49
Figura 25 Francobordo Instantáneo de estribor – Lancha interislas con 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	49
Figura 26 Francobordo instantáneo de babor - Lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	50
Figura 27 Francobordo instantáneo de estribor - Lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	50
Figura 28 Francobordo instantáneo de babor - Lancha interislas con 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	51
Figura 29 Francobordo instantáneo de estribor - Lancha interislas con 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.	51

Índice de tablas

Tabla 1 Cambios de variable para las ecuaciones de movimiento.	11
Tabla 2 Características principales de la lancha interislas utilizada.	20
Tabla 3 Configuración de casos de simulación	20
Tabla 4 Resumen de las condiciones meteorológicas y oceánicas de los incidentes en las Islas Galápagos. (Nullschool Technologies Inc., n.d.)	21
Tabla 5 Comparación de resultados de ladeo en $t = 3.5$ [s].	23
Tabla 6 Comparación de resultados de levantamiento en $t = 604$ [s].	25
Tabla 7 Comparación de resultados de balance en $t = 603$ [s].	26
Tabla 8 Resumen de resultados de ladeo, levantamiento y balance frente a ola regular del primer incidente.	33
Tabla 9 Parámetros de las condiciones de oleaje analizadas.	34
Tabla 10 Coeficientes de la Serie de Fourier.	34

Tabla 11 <i>Resumen de resultados del francobordo instantáneo para las condiciones analizadas.</i>	
.....	41

Simbología

η_2	Desplazamiento de ladeo (sway)
η_3	Desplazamiento de levantamiento (heave)
η_4	Rotación de balance (roll)
$\dot{\eta}_2$	Velocidad de ladeo
$\dot{\eta}_3$	Velocidad de levantamiento
$\dot{\eta}_4$	Velocidad angular de balance
$\ddot{\eta}_2$	Aceleración de ladeo
$\ddot{\eta}_3$	Aceleración de levantamiento
$\ddot{\eta}_4$	Aceleración angular de balance
M	Masa total de la embarcación
I_{44}	Momento de inercia respecto al eje de balance
Z_g	Altura del centro de gravedad respecto a la línea de flotación
g	Aceleración de la gravedad
M_{a33}	Masa añadida de ladeo
M_{a44}	Masa añadida en levantamiento
I_{a44}	Inercia añadida en balance
ζ_{22L}	Amortiguamiento lineal en ladeo
ζ_{22N}	Amortiguamiento no lineal en ladeo
ζ_{33L}	Amortiguamiento lineal en levantamiento
ζ_{33N}	Amortiguamiento no lineal en levantamiento
ζ_{44L}	Amortiguamiento lineal en balance
ζ_{44N}	Amortiguamiento no lineal en balance
η	Elevación de la superficie libre de la ola
$\partial\eta/\partial y$	Pendiente de la ola

R_{33} Fuerza restauradora de levantamiento

R_{44} Momento restaurador de balance

K_{moor} Rigidez del sistema de amarre

$\dot{v}$ Aceleración impuesta por la ola en ladeo

$\dot{w}$ Aceleración impuesta por la ola en levantamiento

Capítulo 1

1.1 Introducción

El estudio del comportamiento dinámico de embarcaciones ha impulsado el desarrollo de diversos métodos teóricos y numéricos para la predicción del movimiento en conjunto con factores externos relacionados a la interacción con el medio ambiente. En la década de 1970, se estableció el método de franjas, basado en teoría de flujo potencial, para predecir el movimiento del barco en cinco grados de libertad considerando la acción de las olas. Sin embargo, para el análisis del movimiento de balance este método encuentra limitaciones por la influencia de los efectos viscosos para la amortiguación (Kawahara et al., 2011). Posteriormente, para considerar adecuadamente las interacciones tridimensionales entre las diferentes secciones y los efectos de la velocidad de avance en la condición de contorno de superficie libre, fue necesario desarrollar métodos de paneles tridimensionales. (Fonseca & Guedes Soares, 1998). Las cuales reflejan la tendencia hacia un análisis hidrodinámico más completo de las embarcaciones, incorporando de manera explícita los distintos elementos que intervienen en su interacción con el oleaje.

La inclusión de movimientos acoplados en la simulación de la respuesta de una embarcación ante oleaje permite obtener un modelo más representativo de las condiciones reales de operación. El profesor Fukuzo Tasai (Tasai, 1971) concluyó, a partir de su investigación sobre el movimiento acoplado de ladeo, guiñada y balance en olas de cresta corta, que en las curvas de amplitud para las traslaciones se presentan cambios en el comportamiento de las gráficas, baches y crestas, cerca de la condición de resonancia para balance como consecuencia del acoplamiento de dicho movimiento.

De manera similar, Solomon Yim y Tongchate Nakhata (Yim et al., 2005), en su estudio sobre el acople no lineal de los movimientos de ladeo, levantamiento y balance en barcasas, señalan que el movimiento de ladeo presenta una influencia limitada sobre el levantamiento. No obstante, para barcasas sin amarres en mar abierto y expuestas a olas transversales, el efecto del acoplamiento entre estos movimientos no puede considerarse despreciable. En conjunto, estos

estudios subrayan la importancia de considerar el acoplamiento entre movimientos para comprender la dinámica real de las embarcaciones.

Bajo este contexto, en una región como las islas Galápagos, donde el transporte interislas depende en su mayoría de embarcaciones menores, la exposición continua a condiciones oceánicas adversas, sumada a prácticas operativas poco seguras como el exceso de pasajeros y las fallas de propulsión, incrementa la posibilidad de incidentes marítimos en la zona. Estas circunstancias evidencian la necesidad de estudiar el comportamiento dinámico de estas embarcaciones interislas bajo características de oleaje propio de las islas Galápagos.

1.2 Descripción del Problema

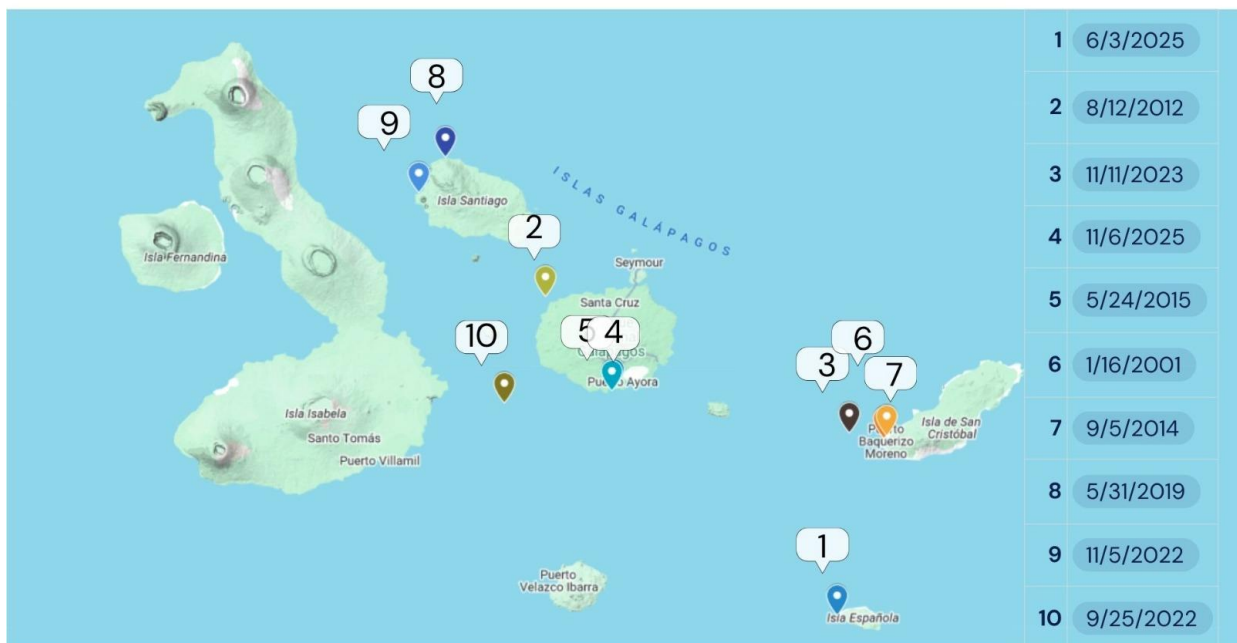
A nivel mundial, cada año se reportan numerosos incidentes marítimos atribuibles a diversas causas, y Ecuador no es ajeno a esta realidad. Durante el período comprendido entre 2014 y 2021, un total de 21 173 incidentes marítimos fueron registrados en la Unión Europea, con un promedio anual de 2 647 eventos (European Maritime Safety Agency, 2022). En el contexto nacional, entre 2021 y 2022 se contabilizaron 37 siniestros marítimos, la mayoría de los cuales ocurrieron en Galápagos (15), Guayaquil (11) y Posorja (8). Además, del total de incidentes reportados, 16 casos se relacionan con hundimientos o inundaciones, dejando como resultado tres embarcaciones hundidas debido al mal clima (Dirección Nacional de Espacios Acuáticos, 2021). Estas cifras demuestran que, a pesar de contar con un número muy por debajo de incidentes en comparación con otras regiones, los eventos ocurridos en Ecuador representan un riesgo considerable por el impacto en diversos sectores sobre todo el turístico.

Las Islas Galápagos se encuentran en constante exposición a condiciones marítimas severas que contribuyen significativamente a incidentes que involucran a embarcaciones. En junio del presente año, se reportó el rescate de 28 personas tras el hundimiento de la lancha “Unión II” en el sector de Tortuga Bay, isla Santa Cruz (El Telégrafo, 2025). Este accidente se suma a otros siniestros ocurridos en los últimos años, en donde destaca el naufragio de las

embarcaciones “Millenium” y “Queen Evolution”, ocurridos a 50 millas de la isla San Cristóbal y, a dos millas de Puerto Baquerizo Moreno, respectivamente (Primicias, 2023). Con el fin de identificar la ubicación de estos eventos, Marín et al, elaboraron un mapa que registra las fechas y localizaciones de varios incidentes marítimos en el archipiélago, el cual se muestra en la Figura 1. (Marín et al., 2025). Estos hechos evidencian la urgencia de profundizar en el estudio de las condiciones físicas y dinámicas que inciden en la seguridad de la navegación en el archipiélago.

Figura 1

Locación de incidentes de embarcaciones en las Islas Galápagos. (Marín et al., 2025)



En el archipiélago de Galápagos existe una limitada disponibilidad de estudios técnicos que aborden la respuesta dinámica de las embarcaciones interislas. La falta de información detallada sobre este aspecto operativo dificulta la implementación de medidas preventivas y el diseño de protocolos de navegación segura. Por ello, resulta necesario desarrollar estudios numéricos que permitan describir con mayor precisión la respuesta de estas embarcaciones bajo condiciones de oleaje característico de la región.

1.3 Justificación del Problema

Los incidentes marítimos ocurridos en las Islas Galápagos representan una amenaza significativa para el desarrollo sostenible del archipiélago, al afectar directamente sectores clave como el turismo, el transporte y la conservación ambiental. En el ámbito económico, el transporte marítimo constituye un pilar esencial: entre los meses de enero y mayo de 2022, este sector generó ingresos aproximados de 14 millones de dólares, mientras que entre enero y junio del mismo año se movilizaron cerca de 140 mil pasajeros desde la isla Santa Cruz hacia Isabela, San Cristóbal y Floreana, mediante aproximadamente 6 mil viajes de transporte público (Observatorio de Turismo de Galápagos, 2022). Estas cifras reflejan la alta dependencia económica y social de las islas; y la necesidad de una operación segura de las embarcaciones interinsulares.

Los incidentes marítimos no solo comprometen la seguridad de las personas y la estabilidad económica de los operadores, sino que también generan riesgos ambientales considerables. El desprendimiento de restos estructurales y el manejo inadecuado de combustibles pueden provocar contaminación en ecosistemas de alta fragilidad. Un boletín de la (Armada del Ecuador, 2025) reporta, por ejemplo, el reflotamiento de una embarcación encallada desde marzo en la Isla Española, para lo cual se aplicaron estrictos protocolos de protección ambiental. Aun así, el prolongado tiempo de encallamiento y los materiales propios de la nave representan potenciales impactos negativos sobre el entorno marino.

En este contexto, el análisis del comportamiento dinámico de embarcaciones interislas bajo condiciones de oleaje característico de las Islas Galápagos puede brindar la posibilidad de conocer límites de seguridad antes de la zozobra. Para predecir las cargas hidrodinámicas y los movimientos del buque, se pueden utilizar ensayos con modelos, pruebas a escala real o cálculos numéricos (Myat Thu et al., 2015), esta última presentándose como la mejor opción al tener limitaciones de instalación y acceso a embarcaciones reales para su estudio. De estas

simulaciones numéricas, realizar predicciones del movimiento de los buques en el dominio del tiempo brinda la oportunidad de ampliar el rango de movimientos considerados más allá de las restricciones tradicionales de pequeña amplitud (Ballard et al., 2003). Por lo tanto, el desarrollo de un estudio numérico orientado a comprender la respuesta dinámica de las embarcaciones interislas frente al oleaje contribuye no solo a reducir el riesgo de incidentes y pérdidas económicas, sino también a preservar la integridad ambiental del archipiélago.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar simulaciones numéricas de los movimientos acoplados de ladeo, levantamiento y balance en embarcaciones interislas de Galápagos sometidas a olas transversales en condición sin propulsión, utilizando integración en tiempo para el análisis de su comportamiento dinámico.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las principales características de los estados de mar en las zonas donde han ocurrido incidentes en las Islas Galápagos utilizando bases de datos meteorológicos y oceánicos públicos.
2. Implementar el modelo numérico de integración en tiempo de los movimientos acoplados de ladeo, levantamiento y balance utilizando el método de Runge - Kutta de cuarto orden.
3. Analizar la respuesta de las embarcaciones interislas en condiciones reales de estado de mar para la evaluación de la posibilidad de zozobra.

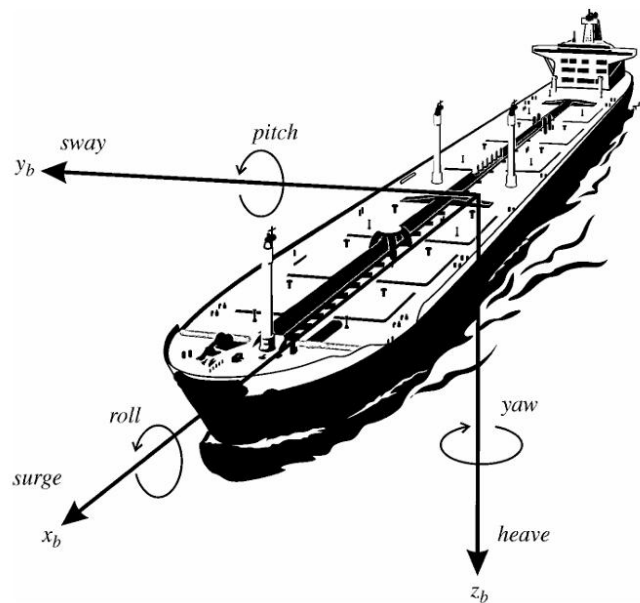
1.5 Marco Teórico

La dinámica de un cuerpo flotante puede describirse mediante seis grados de libertad, que comprenden tres movimientos de translación: avance (surge), ladeo (sway), levantamiento (heave); y tres movimientos de rotación: balance (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw), como

se presenta en la Figura 2. Los movimientos resultantes se ven influenciados tanto por las características geométricas del casco como por las condiciones externas de oleaje y viento (Bhattacharyya, 1978) que actúan como fuerzas sobre el sistema.

Figura 2

Movimientos y rotaciones de la embarcación. (Fossen, 2011).



En hidrodinámica es habitual suponer una superposición lineal, de modo que las fuerzas debidas al viento y las olas pueden tratarse como fuerzas generalizadas que pueden añadirse directamente a las ecuaciones de movimiento no lineales (Fossen, 2012). Sin embargo, la inclusión de efectos no lineales permite investigar los movimientos de embarcaciones con formas de casco con características tales como proas acampanadas, popas sobresalientes, etc., y movimientos con amplitudes fuera de los límites de la teoría lineal tradicional (Ballard et al., 2003).

Estudios previos han demostrado la relevancia de incluir movimientos acoplados en el análisis del comportamiento de la embarcación en su interacción con olas. Una investigación numérica y experimental acerca del acople no lineal en barcasas con olas transversales menciona que el escenario más peligroso se produce si la embarcación queda expuesta a olas transversales,

lo que puede provocar grandes amplitudes de ladeo, levantamiento y balance, con posibilidad de vuelco (Yim et al., 2005). Las ecuaciones de movimiento están basadas en la segunda ley de Newton que establece que, para los modos de traslación y rotación, las fuerzas actuando sobre el cuerpo son iguales a las razones de cambio de movimiento lineal y angular (Lewis, 1988), como se muestra a continuación (J.M.J. Journée & W.W. Massie, 2001).

$$F = \frac{d}{dt} (mU), \quad U \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.1)$$

$$M = \frac{d}{dt} (H), \quad H[Nms] \quad (1.2)$$

Las ecuaciones (1.1) y (1.2), se la puede expandir para los movimientos de ladeo (η_2), levantamiento (η_3) y balance (η_4). (Yim et al., 2005),

$$M\ddot{\eta}_2 + M_{a22} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) (\ddot{\eta}_2 - \dot{v}) + M_{a33} \sin\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) (\ddot{\eta}_2 - \dot{v}) + \zeta_{22L}\dot{\eta}_2 + \zeta_{22N}\dot{\eta}_2|\dot{\eta}_2| - M\dot{\eta}_4\dot{\eta}_3 -$$

$$M(z_g \cos \eta_4)\dot{\eta}_4 + R_{33} \sin\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + K_{moor}\eta_2 = 0 \quad (1.3)$$

$$M\ddot{\eta}_3 + M_{a33} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) (\ddot{\eta}_3 - \dot{w}) + M_{a22} \sin\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) (\ddot{\eta}_3 - \dot{w}) + \zeta_{33L}\dot{\eta}_3 + \zeta_{33N}\dot{\eta}_3|\dot{\eta}_3| - M\dot{\eta}_4\dot{\eta}_2 -$$

$$M(z_g \cos \eta_4)\eta_4^2 + Mg + R_{33} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) = 0 \quad (1.4)$$

$$I_{44}\ddot{\eta}_4 + I_{a44} \left(\ddot{\eta}_4 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + \zeta_{44L} \left(\ddot{\eta}_4 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + \zeta_{44N} \left(\ddot{\eta}_4 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) \left|\ddot{\eta}_4 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right| + M(z_g \cos \eta_4)\dot{\eta}_4\dot{\eta}_3 -$$

$$M(z_g \cos \eta_4)\ddot{\eta}_2 + R_{44} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) - Mg z_g \sin \eta_4 = 0 \quad (1.5)$$

Estas ecuaciones de traslación para ladeo (1.3) y levantamiento (1.4) dependen de la masa total de la embarcación (M), las masas añadidas debido a la interacción con el agua (Ma), los coeficientes lineales y no lineales de amortiguamiento (ζ_L, ζ_N), la distancia desde el centro de gravedad hasta el centro de balance (z_g), la ecuación de la ola en conjunto con su pendiente ($\eta, \partial\eta/\partial y$), la fuerza de restauración (R_{33}) y una fuerza restauradora por el sistema de amarre (K_{moor}). Esta última, responde a la metodología experimental desarrollada en la investigación

titulada “*Coupled nonlinear barge motions: Part I: Deterministic models development, identification and calibration*” (Yim et al., 2005), en donde incluyen un sistema de fondeo para limitar el movimiento de ladeo de la embarcación, sin embargo, para el análisis planteado en este trabajo este término no se vería implicado en el desarrollo del modelo de simulación numérica.

La ecuación de balance (1.5), además de los términos que comparte con las ecuaciones de traslación, se cuenta con el momento de restauración (R_{44}), la inercia del barco (I_{44}) y la inercia añadida (I_{a44}). Mismas que son calculadas respecto al eje de balance, definido como el eje transversal que pasa por el centro de balance, el cual constituye el origen del sistema de referencia para el modelo desarrollado por Solomon Yim (Yim et al., 2005).

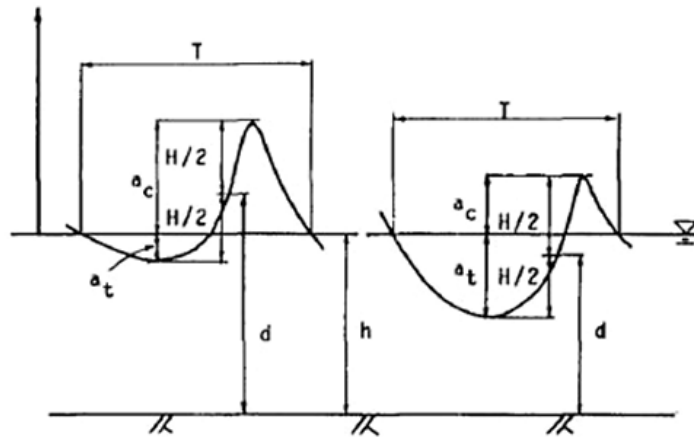
1.5.1 Perfil de la ola incidente

Dentro del análisis del comportamiento dinámico de las embarcaciones interislas sometidas a olas transversales, es importante definir el perfil de la ola incidente que influirá en el movimiento acoplado, con especial atención en olas rompientes. Sin embargo, debido a que no se puede considerar pendientes verticales en el perfil de la ola porque desembocarían en valores infinitos, véase las ecns. (1.1) – (1.3), en este estudio se considera la simulación de olas de sección diferente a las senoidales con alturas que responden a condiciones de rompimiento.

Robertson et al. (2013), en su trabajo titulado “*Breaking Waves: Review of characteristic relationships*”, presenta una descripción de la altura de rompimiento de la ola en función de la profundidad y pendiente del lecho marino, tal como se presenta en la Figura 3. En este trabajo se tomará este perfil y se lo aplicará a una embarcación para simular su respuesta.

Figura 3

Profundidad de rompimiento. (Robertson et al., 2013)



1.5.2 Método de Runge – Kutta de 4to Orden

Según los diferentes enfoques de las soluciones, la técnica de simulación numérica en el análisis del movimiento de embarcaciones se puede clasificar en dos: métodos en el dominio de la frecuencia y del dominio del tiempo. Para resolver las ecuaciones de movimiento, se puede utilizar el método del dominio de la frecuencia o el del dominio del tiempo. (Myat Thu et al., 2015). En el trabajo titulado “*Time domain simulation of symmetric ship motions in waves*” (Ballard et al., 2003), se presenta la predicción del movimiento de levantamiento y cabeceo en olas regulares mediante un modelo matemático en el dominio del tiempo mediante el uso del método de solución Runge – Kutta de cuarto orden en intervalos de tiempo de incremento fijo. El procedimiento de esta herramienta de análisis numérico se presenta a continuación (Burden & Faires, 2010).

$$y' = f(t, y) \quad (1.6)$$

$$y(t_0) = \alpha \quad (1.7)$$

$$t_i = t_0 + h \quad (1.8)$$

$$k_1 = hf(t_i, y_i) \quad (1.9)$$

$$k_2 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right) \quad (1.10)$$

$$k_3 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right) \quad (1.11)$$

$$k_4 = hf(t_i + h, y_i + k_3) \quad (1.12)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (1.13)$$

Considerando que el objetivo es aproximar el valor de la función que resuelve la ecuación diferencial de primer orden (1.6) que cuenta con una condición inicial (1.7), se establece un punto inicial y el valor de la función en este punto (1.8), mientras que para el incremento de tiempo se mantiene un paso fijo (1.9). Para avanzar con la aproximación, se calculan cuatro estimaciones para la pendiente $f(t, y)$ utilizando las ecuaciones (1.10) a (1.13) y la combinación lineal se suma al valor anterior para encontrar la nueva aproximación (1.14). El proceso se repite de manera iterativa hasta cubrir el intervalo de tiempo definido.

Para la aplicación de este método las ecuaciones de movimiento (1.3) a (1.5), originalmente formuladas como ecuaciones diferenciales de segundo orden, se expresan como un sistema equivalente de seis ecuaciones diferenciales de primer orden, correspondientes a los movimientos de ladeo, levantamiento y balance. A continuación, se presentan los cambios de variable empleados en este trabajo.

Tabla 1

Cambios de variable para las ecuaciones de movimiento.

Movimiento	Variable original	Cambio de variable	Derivada
Ladeo	η_2	u_1	$\dot{u}_1 = \dot{\eta}_1 = u_2$
	$\dot{\eta}_2$	u_2	$\dot{u}_2 = \ddot{\eta}_2$
Levantamiento	η_3	u_3	$\dot{u}_3 = \dot{\eta}_3 = u_4$
	$\dot{\eta}_3$	u_4	$\dot{u}_4 = \ddot{\eta}_3$
Balance	η_4	u_5	$\dot{u}_5 = \dot{\eta}_4 = u_6$
	$\dot{\eta}_4$	u_6	$\dot{u}_6 = \ddot{\eta}_4$

Las derivadas $\dot{u}_2$, $\dot{u}_4$ y $\dot{u}_6$, que corresponden a las aceleraciones de ladeo, levantamiento y balance, se calcularían usando las ecuaciones de movimiento acopladas. Con el cambio de variables, las ecuaciones de movimiento 1.3 a 1.5 podrían ser reescritas de la siguiente manera.

$$M\ddot{u}_2 + M_{a22}\cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)(\dot{u}_2 - \dot{v}) + M_{a33}\sin\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right)(\dot{u}_2 - \dot{v}) + \zeta_{22L}u_2 + \zeta_{22N}u_2|u_2| - Mu_6u_4 - M(z_g\cos u_5)\dot{u}_6 + R_{33}\sin\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) = 0 \quad (1.14)$$

$$M\ddot{u}_4 + M_{a33}\cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)(\dot{u}_4 - \dot{w}) + M_{a22}\sin\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right)(\dot{u}_4 - \dot{w}) + \zeta_{33L}u_4 + \zeta_{33N}u_4|u_4| - Mu_6u_2 - M(z_g\cos u_5)(u_5)^2 + Mg + R_{33}\cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) = 0 \quad (1.15)$$

$$I_{44}\ddot{u}_6 + I_{a44}\left(\dot{u}_6 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + \zeta_{44L}\left(\dot{u}_6 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + \zeta_{44N}\left(\dot{u}_6 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right)\left|\dot{u}_6 - \frac{\partial\eta}{\partial y}\right| + M(z_g\cos u_5)u_6u_4 - M(z_g\cos u_5)\dot{u}_2 + R_{44}\cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) - Mgz_g\sin u_5 = 0 \quad (1.16)$$

Capítulo 2

2. Metodología.

La metodología adoptada en este proyecto se basó en desarrollar una simulación numérica en el tiempo de las ecuaciones acopladas de movimiento de ladeo, levantamiento y balance, orientada a evaluar el comportamiento dinámico de las embarcaciones interislas de Galápagos. La excitación corresponde la acción de olas tipo “peaked” de costado en condición sin propulsión. El análisis tomó a la embarcación de manera bidimensional, es decir con sección transversal constante para determinar la posibilidad de zozobra, esto es, que el nivel de agua alcance instantáneamente la cubierta de costado, bajo estados de mar característicos del archipiélago.

Para el modelo numérico se desarrolló un código de programación usando lenguaje Python que permitió la inclusión de condiciones oceanográficas propias de la región, el manejo de las características geométricas de las embarcaciones interislas. El proceso iterativo integra en tiempo el sistema de ecuaciones de movimiento acoplado dentro del rango de tiempo seleccionado para el análisis. Los datos relacionados a las olas incidentes provienen de diversas fuentes de datos meteorológicos en bases de datos públicas en las fechas que ocurrieron los incidentes. Las dimensiones de los modelos corresponden a algunas embarcaciones interislas que se diferencian principalmente por contar con diferentes ángulos de astilla muerta. Esto permitió evaluar el efecto de la interacción entre el oleaje incidente y la geometría de la embarcación en escenarios reales de operación.

2.1 Condiciones del oleaje de las Islas Galápagos

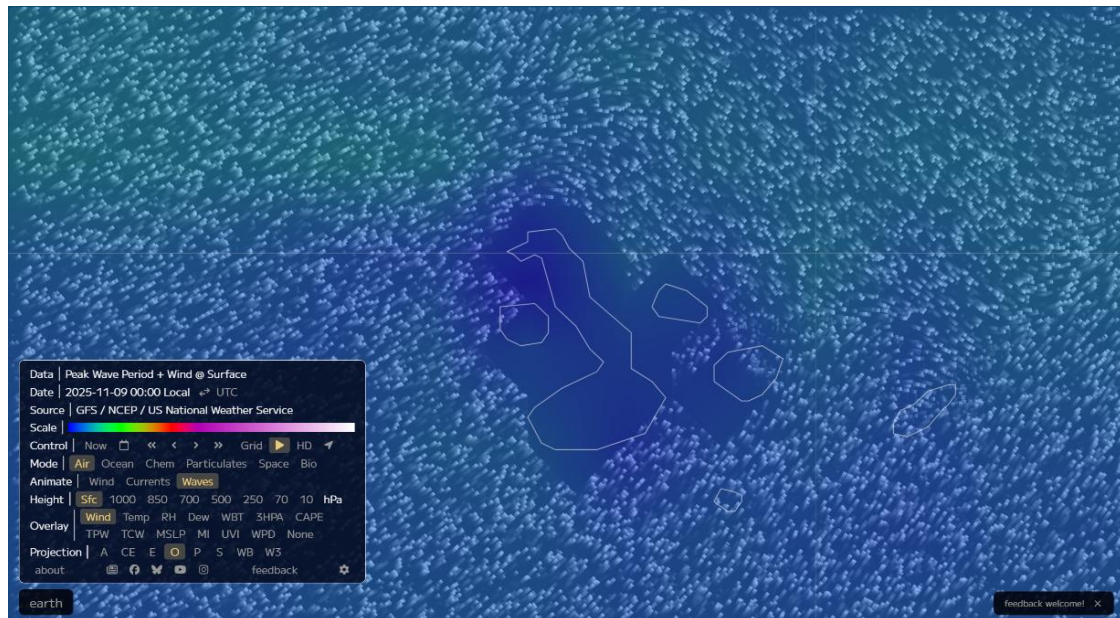
Durante los últimos años, el problema del oleaje ha cobrado mayor relevancia debido al incremento del tráfico marino en las islas, generando no sólo daños materiales sino también riesgos para la seguridad de las personas. Como sucedió en junio del 2014, donde los fuertes oleajes provocaron que dos embarcaciones de pesca artesanal se hundieran y otras dos quedarán dañadas (Jácome, 2022).

Con el fin de representar condiciones de oleaje reales, se utilizaron bases de datos públicas con información meteorológica y oceánica como Earth Nullschool (Nullschool Technologies Inc., n.d.; disponible en: <https://earth.nullschool.net>), Figura 4, que permitió para la fecha en la cual se desarrollaron los incidentes, obtener ciertos parámetros tales como:

1. Altura significativa de la ola.
2. Periodo de la ola, y
3. Velocidad y dirección del oleaje.

Figura 4

Vista de las Islas Galápagos. (Nullschool Technologies Inc., n.d.)

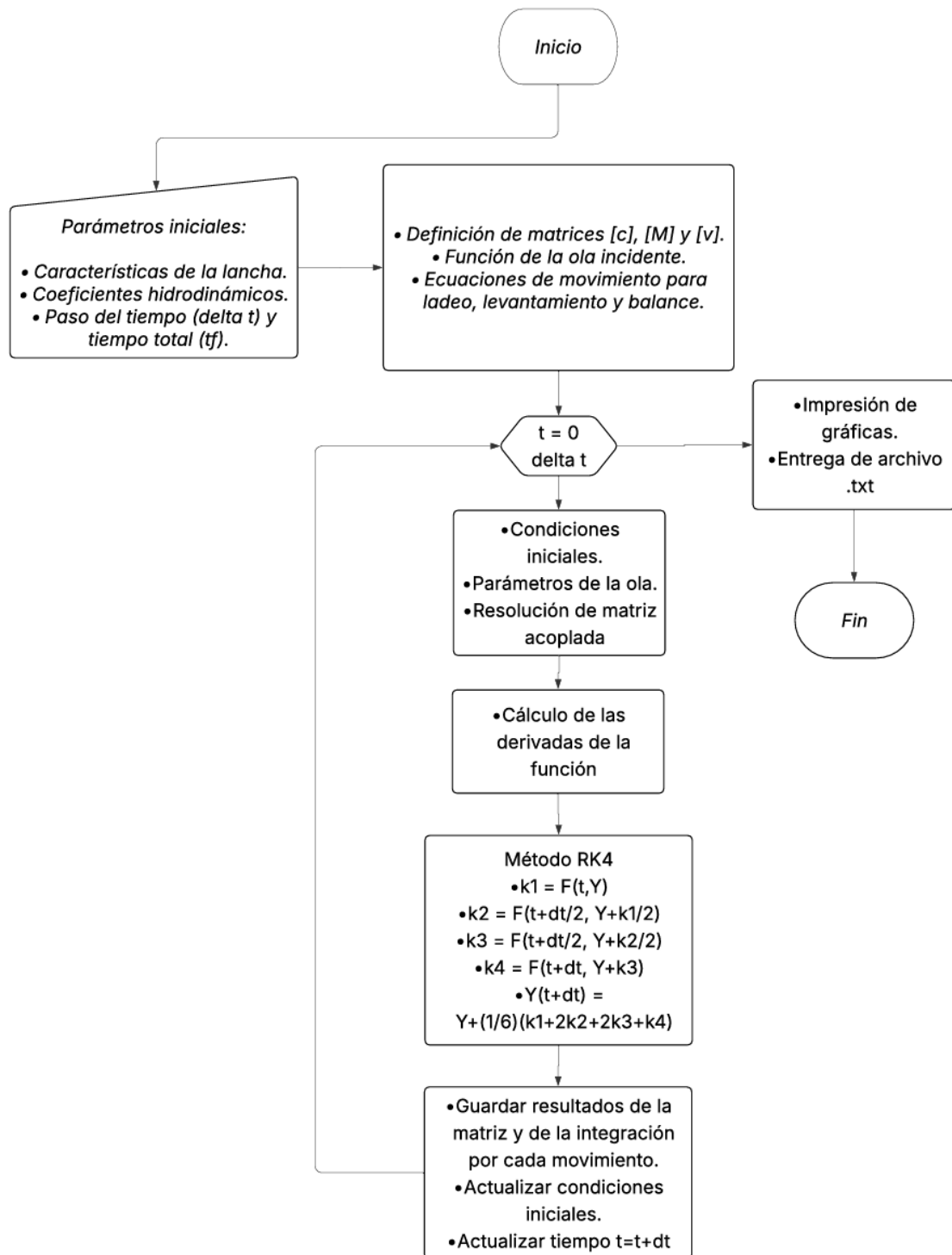


2.2 Implementación de la integración en tiempo.

El código para el modelo numérico se desarrolló con Python como lenguaje de programación y mediante dos entornos de trabajo: Spyder y PyCharm. Esto por la facilidad de visualizar la declaración de variables y la posibilidad de incorporar una amplia variedad de librerías para incluir imágenes, matrices y funciones que aportan eficientemente al desarrollo del presente proyecto. De manera general el proceso que desarrolla el programa se presenta en la Figura 5.

Figura 5

Diagrama de flujo general del código de programación.



Dentro del código de programación se cuentan con algunos pasos relevantes, empezando por ingresar las condiciones iniciales del sistema acoplado. En el presente trabajo se tomaron las condiciones iniciales de desplazamiento, rotación y velocidad como si partiera del reposo y se integró en tiempo hasta alcanzar el equilibrio dinámico.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.1)$$

A continuación, se estructura en forma matricial el sistema de ecuaciones de movimiento, ecuación 2.2, considerando las ecuaciones 1.14 a 1.16. Esto permite obtener las aceleraciones instantáneas que servirán para actualizar los valores de las velocidades. Las velocidades instantáneas actualizan los desplazamientos mediante el método de Runge – Kutta de cuarto orden.

$$[M_{ij}]\{\ddot{u}_i\} = -\{B_i\} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} M + M_{a22} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + M_{a33} \operatorname{sen}\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) & 0 & -M(z_g \cos u_5) \\ 0 & M + M_{a33} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + M_{a22} \operatorname{sen}\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) & 0 \\ -M(z_g \cos u_5) & 0 & I_{44} + I_{a44} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$B_1 = \zeta_{22L} u_2 + \zeta_{22N} u_2 |u_2| - M u_6 u_4 - M_{a22} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) (\dot{v}) - M_{a33} \operatorname{sen}\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) (\dot{v}) - R_{33} \operatorname{sen}\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) \quad (2.4)$$

$$B_2 = \zeta_{33L} u_4 + \zeta_{33N} u_4 |u_4| - M u_6 u_2 - M(z_g \cos u_5) (u_5)^2 - M g - R_{33} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) - M_{a22} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) (\dot{w}) - M_{a33} \operatorname{sen}\left(\left|\frac{\partial\eta}{\partial y}\right|\right) (\dot{w}) \quad (2.5)$$

$$B_3 = \zeta_{44L} \left(u_6 + \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + \zeta_{44N} \left(u_6 + \frac{\partial\eta}{\partial y}\right) \left|u_6 + \frac{\partial\eta}{\partial y}\right| + M(z_g \cos u_5) u_6 u_4 - R_{44} \cos\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) + M g z_g \operatorname{sen} u_5 - I_{a44} \left(-\frac{\partial\eta}{\partial y}\right) \quad (2.6)$$

2.3 Evaluación del modelo numérico

Debido a una escasez en resultados experimentales locales referentes a este tipo de análisis, se procedió con dos métodos de evaluación y verificación del comportamiento numérico de la simulación. En primer lugar, una verificación numérica interna en donde se buscó la

convergencia temporal. comparando resultados para diferentes intervalos de tiempo con la finalidad de verificar estabilidad y convergencia en los resultados.

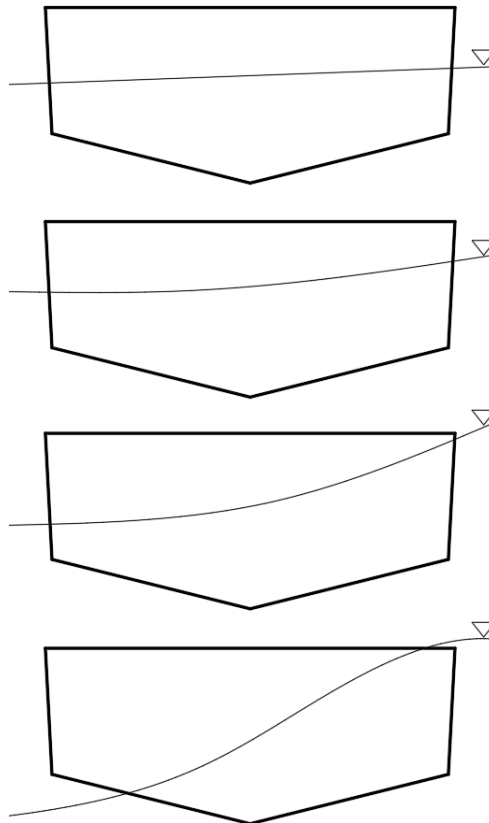
También se realizó una evaluación en las tendencias de los resultados frente a estudios previos aplicados a otras embarcaciones, como las barcas analizadas por Solomon Yim (Yim et al., 2005). Esto permitió verificar la coherencia del comportamiento dinámico obtenido.

2.4 Análisis de resultados.

Los resultados que se obtuvieron mediante curvas en función del tiempo describen los desplazamientos, la rotación en balance, la velocidad y la aceleración en las tres direcciones consideradas dentro del sistema de movimiento acoplado. El análisis trata de identificar las condiciones para que el nivel del agua alcance la cubierta al costado, que en este trabajo es considerado como zozobra, ver Figura 6.

Figura 6

Escenarios posibles de la interacción de la embarcación con la ola incidente.



Capítulo 3

3. Resultados y análisis.

Con base en los registros de siniestros de embarcaciones que se registraron en las Islas Galápagos, asociados a condiciones adversas de oleaje, se seleccionó para la simulación una lancha interislas representativa, con las siguientes características principales, Tabla 2.

Tabla 2

Características principales de la lancha interislas utilizada.

Eslora [m]	12.00
Manga [m]	3.45
Puntal [m]	1.50
Calado [m]	0.50
Desplazamiento [ton]	8.80

Con el objetivo de evaluar la influencia de distintas condiciones de carga y diferentes tipos de oleaje en el análisis de movimiento acoplado, se definieron los casos de simulación que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3

Configuración de casos de simulación

Lancha	Astilla muerta	Condiciones de carga	Oleaje
Lancha 1	8°	100%, 110%, 120% del desplazamiento original.	Ola de incidente, ola regular, oleaje “peaked”.
Lancha 2	14°	100%, 110%, 120% del desplazamiento original.	Ola de incidente, ola regular, oleaje “peaked”.
Lancha 3	20°	100%, 110%, 120% del desplazamiento original.	Ola de incidente, ola regular, oleaje oleaje “peaked”.

3.1 Características oceanográficas en locaciones de incidentes.

A partir de las embarcaciones que presentaron incidentes en las Islas Galápagos, Figura 1, se seleccionaron aquellas que se reportan ocasionadas por condiciones de oleaje adversos. Para estos casos, se recolectó información proveniente de bases de datos públicas con información meteorológica y oceanográfica, con el fin de caracterizar el estado de mar presente en las localizaciones donde ocurrieron, considerando la fecha en que fueron reportados. El resumen de la información obtenida se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4

*Resumen de las condiciones meteorológicas y oceánicas de los incidentes en las Islas Galápagos.
(Nullschool Technologies Inc., n.d.)*

Descripción	Incidente 1	Incidente 2	Incidente 3	Incidente 4
Altura [m]	0.48	0.97	0.99	1.07
Periodo [s]	5.1	12.6	12.0	13.5
Dirección de la ola [grados]	195°	195°	210°	195.0
Dirección del viento [grados]	165°	180°	165°	165.0
Velocidad del viento [km/h]	18	20	20	22
Dirección de la corriente [grados]	270°	295°	235°	265°
Velocidad de la corriente [m/s]	0.36	0.37	0.48	0.61

Figura 7

Localizaciones de incidentes asociados a condiciones de oleaje.



3.2 Convergencia temporal de la simulación.

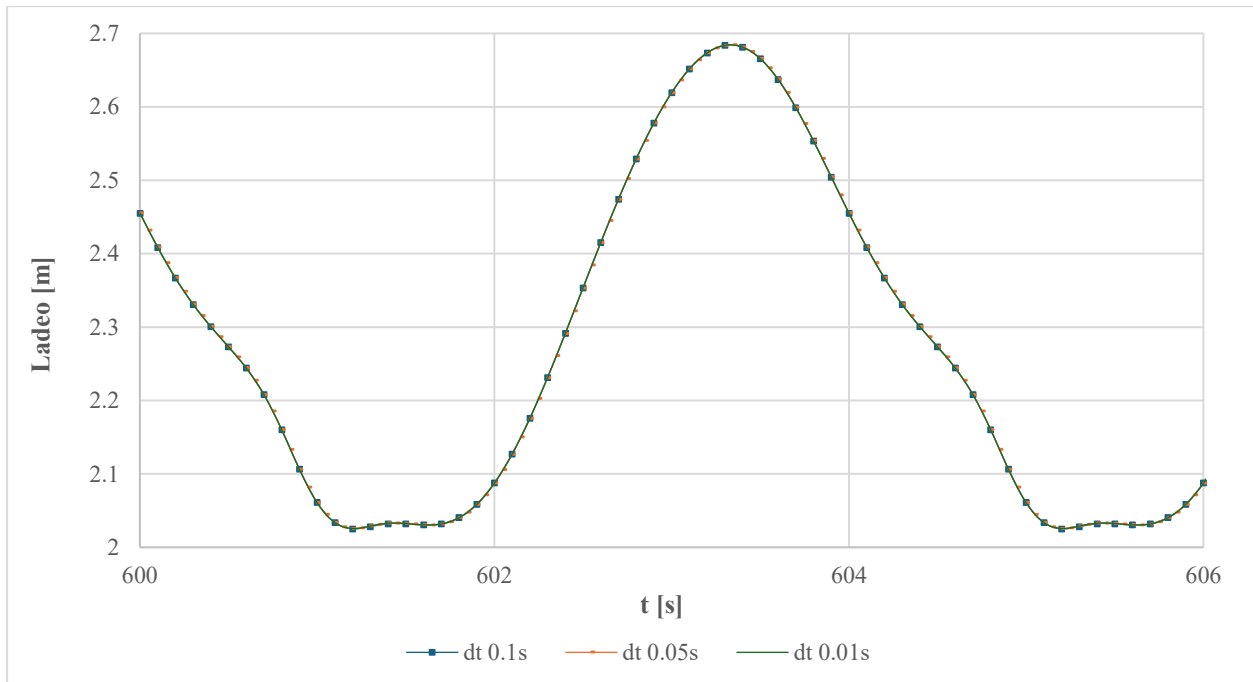
Con la finalidad de evaluar el paso de tiempo adecuado, para la simulación numérica mediante el método de Runge – Kutta de 4to orden. A continuación, se comparan los resultados obtenidos para ladeo, levantamiento y balance de tres simulaciones correspondientes a una ola incidente regular, con amplitud de 0.5 m y un periodo de 4 s, con distintos pasos de tiempo.

3.2.1 Respuesta de ladeo de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.

La Figura 8 muestra la comparación de la respuesta de ladeo obtenida mediante la simulación numérica empleando tres intervalos de tiempo distintos: 0.1, 0.05, 0.01 segundos. Se comparan los resultados en el intervalo entre $t [s] = 600$ y $t [s] = 606$, considerando que para este tiempo los resultados alcanzan estabilidad dinámica. Se observa que las curvas correspondientes a los distintos pasos de tiempo se superponen en gran parte del intervalo sin presentar diferencias significativas ni en amplitud ni la fase de la respuesta acoplada.

Figura 8

Ladeo (sway) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta.

**Tabla 5**

Comparación de resultados de ladeo en $t = 3.5$ [s].

Paso de tiempo [s]	Ladeo [m]	Diferencia [%]
$\Delta t: 0.1$	2.6656	0.0
$\Delta t: 0.01$	2.6656	-
$\Delta t: 0.05$	2.6657	3.75E-03

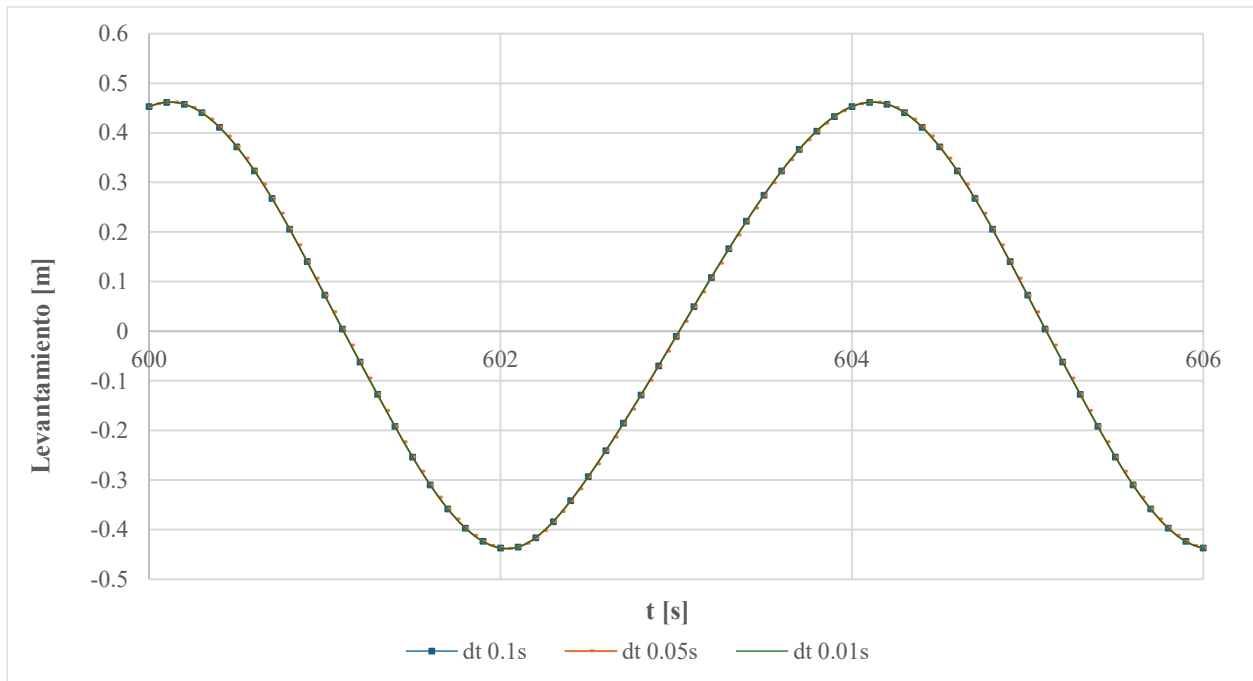
La Tabla 5 presenta los valores de ladeo obtenidos en el instante de tiempo $t = 3.5$ s para los tres diferentes pasos de tiempo. Con $\Delta t = 0.1$ segundos, la respuesta es igual a la calculada con el segundo $\Delta t = 0.01$ segundos, mientras que la solución correspondiente a $\Delta t = 0.05$ segundos presenta una diferencia relativa del orden de 10^{-3} . Lo que confirma que con este último refinamiento la respuesta ha alcanzado una convergencia temporal.

3.2.2 Respuesta de levantamiento de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.

La Figura 9 muestra la respuesta de levantamiento para una lancha interislas con 8° de astilla muerta, obtenida al emplear distintos pasos de tiempo. Al igual de los resultados para ladeo, las tres curvas se encuentran superpuestas en gran parte del intervalo analizado, con una amplitud muy similar y sin diferencia de fase en ninguna de las curvas.

Figura 9

Levantamiento (heave) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta.



La Tabla 6 presenta un resumen con los valores obtenidos de levantamiento para los tres distintos pasos de tiempo evaluados en $t = 604\text{ s}$. Las diferencias relativas de los refinamientos de tiempo más pequeños, tomando como referencia la respuesta de $\Delta t = 0.1\text{ s}$, se encuentran en orden de 10^{-2} . Confirmando que la solución numérica presenta una adecuada convergencia temporal sin introducir variaciones significativas al aumentar el refinamiento del paso de tiempo.

Tabla 6

Comparación de resultados de levantamiento en $t = 604$ [s].

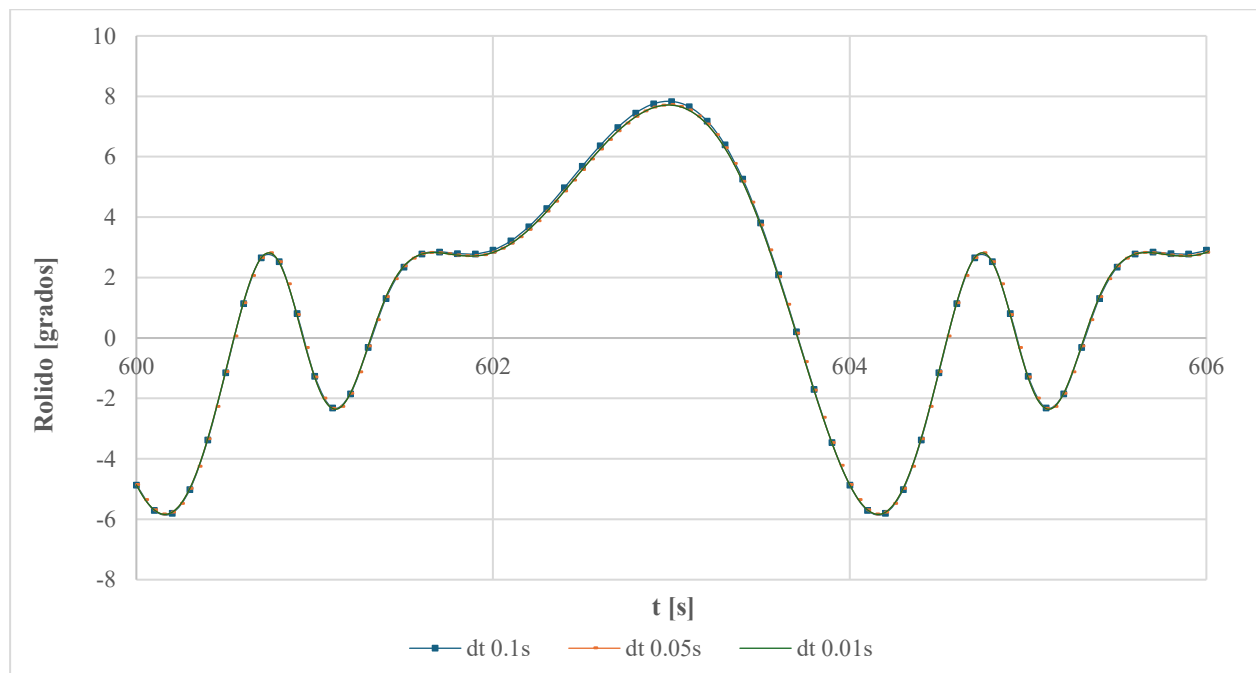
Paso de tiempo [s]	Levantamiento [m]	Diferencia [%]
$\Delta t: 0.1$	0.4531	6.62E-02
$\Delta t: 0.01$	0.4528	-
$\Delta t: 0.05$	0.4529	2.21E-02

3.2.3 Respuesta de balance de la lancha interislas con 8° de astilla muerta.

Las curvas presentadas en la Figura 10 corresponden a los resultados para la respuesta de balance obtenida para los tres distintos pasos de tiempo analizados. A pesar de conservar un comportamiento similar durante gran parte del intervalo de análisis, se observa una diferencia pequeña pero perceptible cuando las curvas alcanzan el valor máximo de balance, con ángulos cercanos a los 8° de escora.

Figura 10

Balance (roll) en olas regulares de amplitud 0.5 m y periodo de 4s. – Lancha 8° de astilla muerta



La Tabla 7 muestra la diferencia relativa entre los resultados obtenidos para los pasos de tiempo al evaluarlos en $t = 603$ s, evidenciando que, de los movimientos acoplados analizados, el

balance es el que presenta mayor discrepancia entre las respuestas. Tomando como referencia la respuesta obtenida con $\Delta t = 0.01\text{s}$, se observa que existe una diferencia relativa del 1.61% al compararlo con el valor obtenido de $\Delta t = 0.1\text{s}$. Mientras, esta diferencia disminuye a un orden de 10^{-1} al utilizar un paso de tiempo de $\Delta t = 0.05\text{ s}$, lo que permite concluir que este último presenta una adecuada convergencia temporal de la respuesta de balance.

Tabla 7

Comparación de resultados de balance en $t = 603\text{ [s]}$.

Paso de tiempo [s]	Balance [grados]	Diferencia [%]
$\Delta t: 0.1$	7.8323	1.61
$\Delta t: 0.01$	7.7063	-
$\Delta t: 0.05$	7.7177	1.49E-01

En función de los resultados obtenidos para los tres movimientos de ladeo, levantamiento y balance que forman parte del análisis, se optó por realizar las simulaciones usando un paso de tiempo de $\Delta t = 0.05\text{ s}$. Esta elección se fundamenta en la baja discrepancia que presentaron las respuestas al compararlas con un refinamiento temporal más pequeño, así como en la reducción del costo computacional requerido para ejecutar las distintas corridas del programa de movimiento acoplado.

3.2 Influencia de la condición de carga y geometría de la embarcación en la respuesta dinámica frente a oleaje del día de siniestro en las Islas Galápagos.

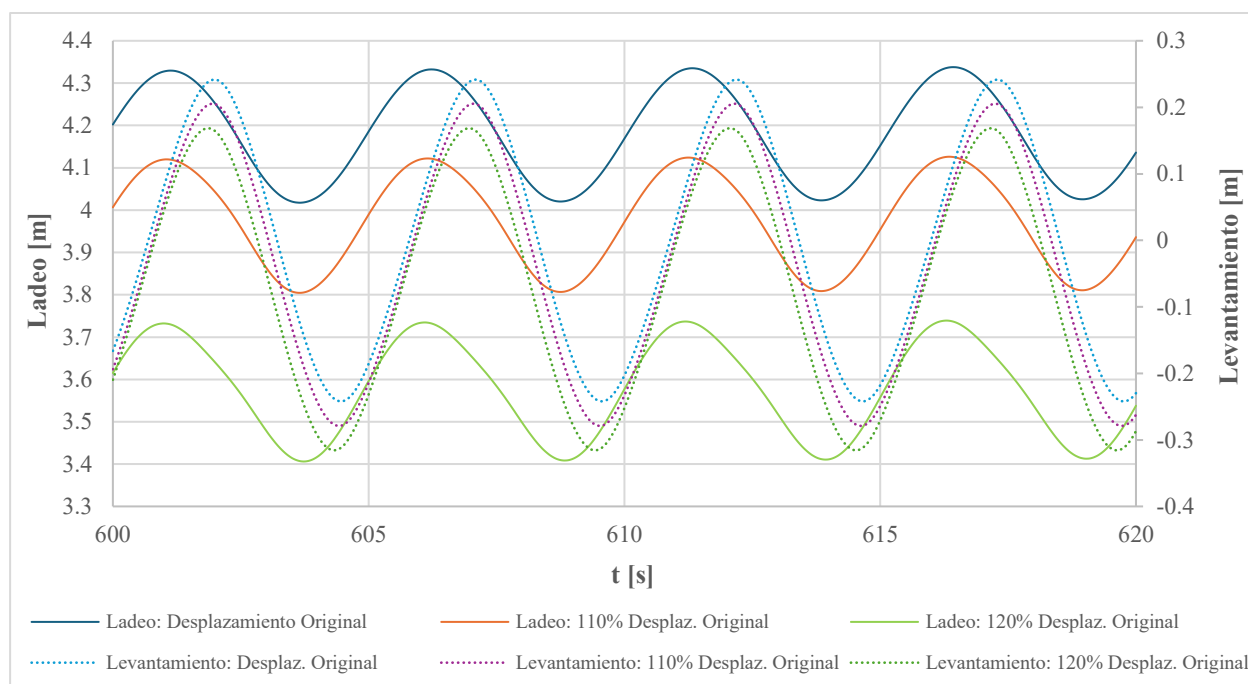
3.2.1 Movimiento acoplado de la Lancha Interislas con 8° de astilla muerta.

En la Figura 11 se presentan de manera conjunta las respuestas de ladeo y levantamiento de la lancha interislas con 8° de astilla muerta para tres condiciones de carga. Las curvas muestran un comportamiento temporal similar, con la ocurrencia de máximos y mínimos en

instantes de tiempo cercanos. Sin embargo, se evidencia un desfase entre ambos movimientos, lo cual indica la presencia de un acoplamiento dinámico en las respuestas de la embarcación.

Figura 11

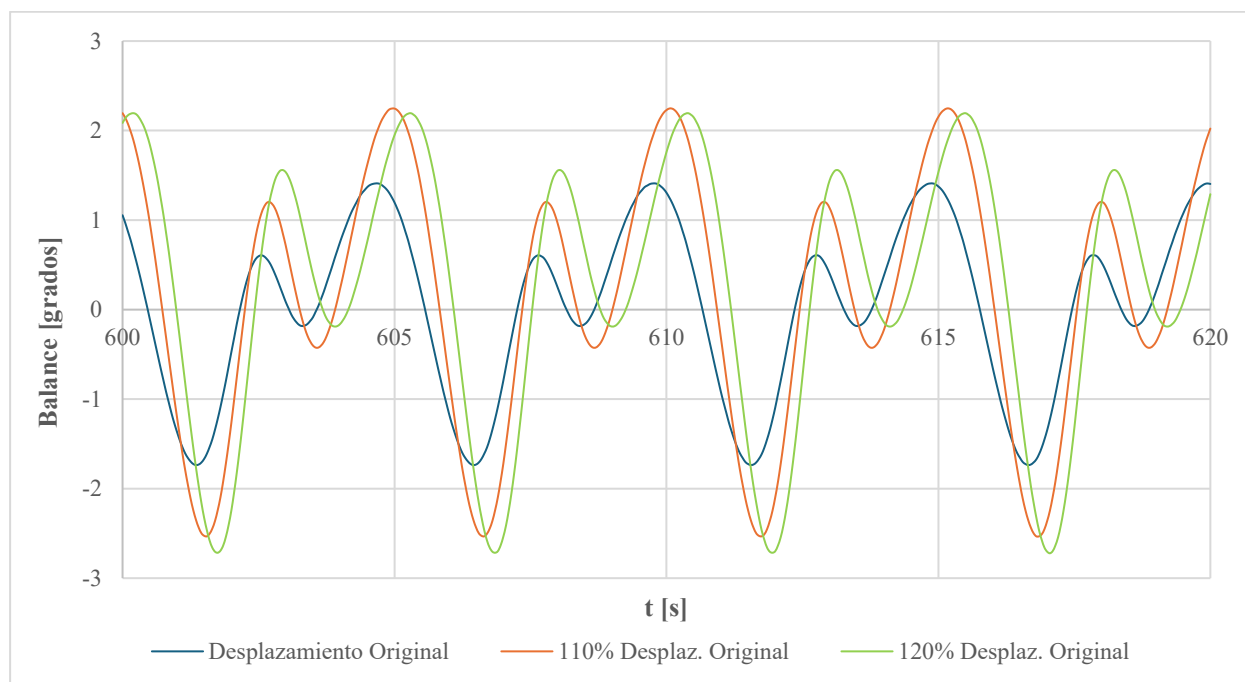
Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.



El incremento de la condición de carga produce una reducción en los valores máximos de ambos desplazamientos lineales. En ladeo, la disminución en relación con la condición de desplazamiento original es de alrededor de 0.6 m con el 120% de desplazamiento y aproximadamente 0.4 m en comparación con la condición de carga correspondiente al 110% de desplazamiento. Por su parte, el levantamiento disminuye de manera más moderada, alcanzando diferencias inferiores a 0.1 [m] entre la condición más ligera y la de mayor desplazamiento. Este comportamiento puede asociarse al aumento de la inercia lateral del sistema, que atenúa la respuesta de la embarcación frente a la ola de costado.

Figura 12

Resultado de Balance – Lancha 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.



En la Figura 12 se presentan las respuestas de balance correspondientes a las condiciones de carga mencionadas. Los resultados muestran un comportamiento oscilatorio no estrictamente sinusoidal, con asimetrías entre los picos positivos y negativos de la gráfica. Esto evidencia una clara influencia del acoplamiento dinámico con los movimientos de ladeo y levantamiento.

En lo que corresponde a la influencia del desplazamiento en la respuesta, el balance presenta una elevada sensibilidad frente a variaciones en esta condición, observándose un incremento en la amplitud del movimiento al aumentar el desplazamiento, con valores máximos cercanos a los 3° de escora. Lo que pone en evidencia que, para embarcaciones con bajo ángulo de astilla muerta, el desplazamiento representa un parámetro relevante en la estabilidad dinámica.

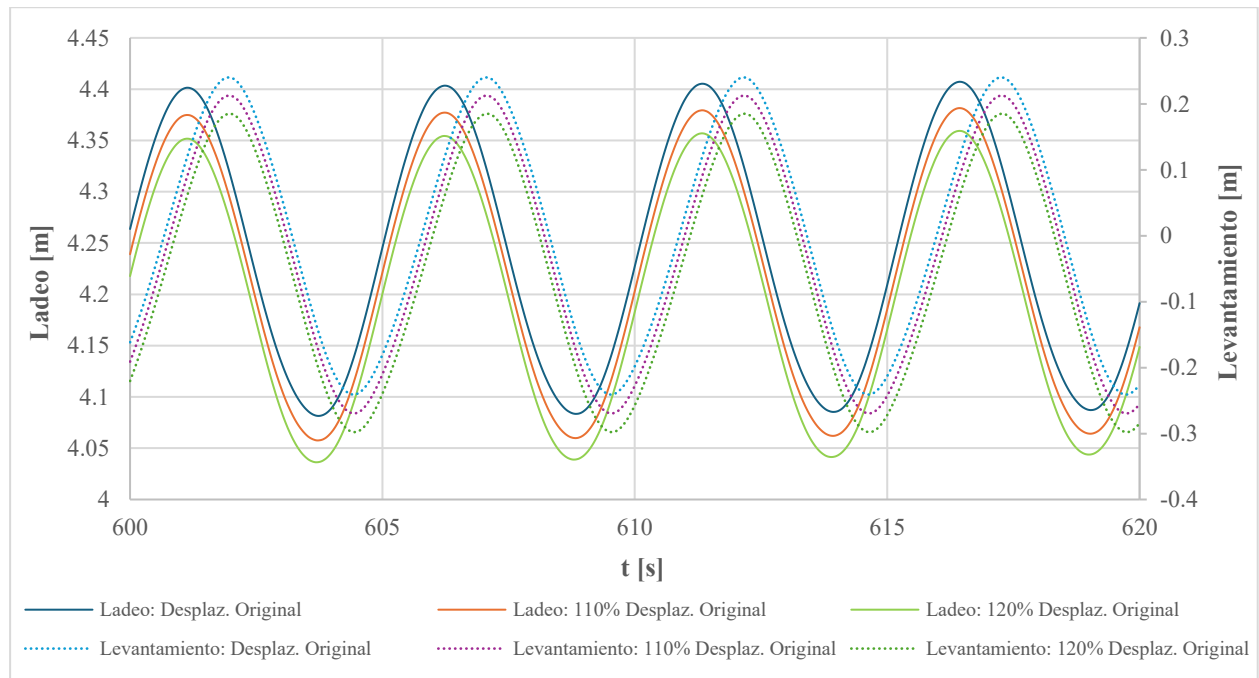
3.2.2 Movimiento acoplado de la Lancha interislas con 14° de astilla muerta.

En la Figura 13 se presentan las respuestas tanto de ladeo como levantamiento de la lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo tres condiciones de carga diferentes. A diferencia de los resultados obtenidos para la lancha con menor ángulo de astilla muerta, el movimiento de ladeo muestra una menor sensibilidad frente a variaciones de desplazamiento al presentar valores mucho más cercanos entre sí.

En lo que respecta al levantamiento, se observa que, a medida que aumenta el desplazamiento los valores máximos de respuesta disminuyen hasta aproximadamente 0.04 m, mientras que el hundimiento se incrementa alcanzando valores mínimos cercanos a -0.3 m. Asimismo, se mantiene un desfase entre ambos movimientos, lo que confirma la presencia de acoplamiento dinámico, aunque con una respuesta más amortiguada debido al mayor ángulo de astilla muerta del casco.

Figura 13

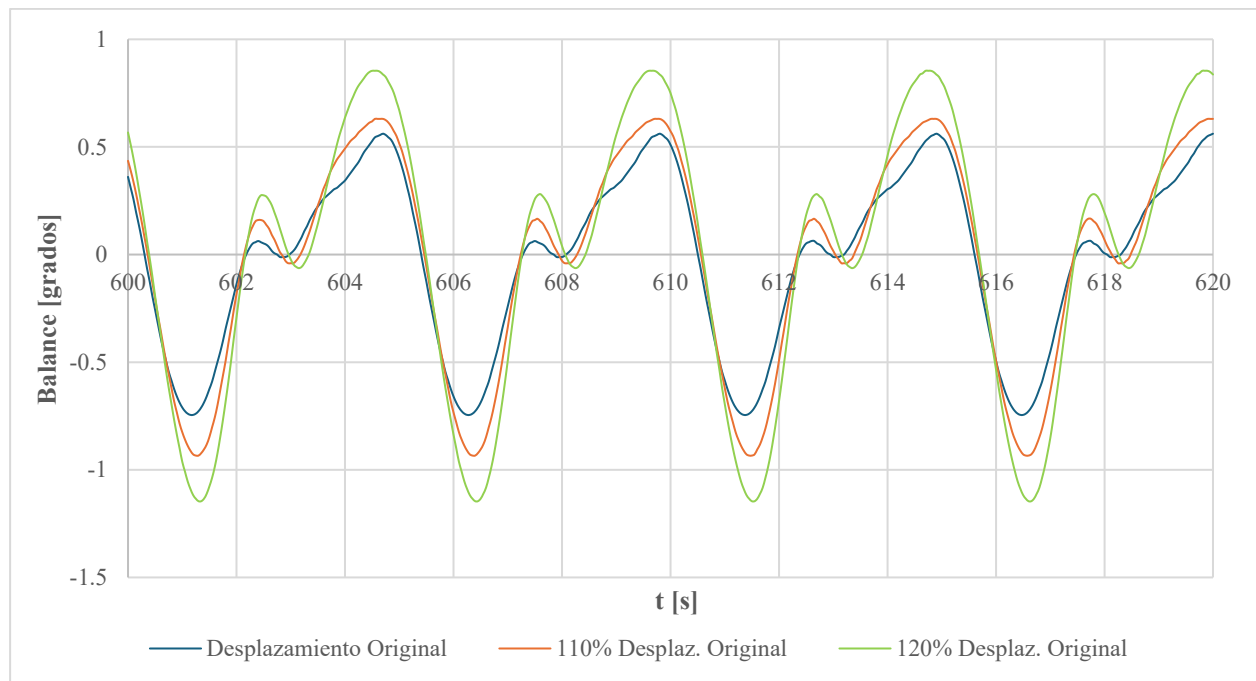
Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.



En la Figura 14 se presentan las respuestas de balance de la lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo tres condiciones de carga diferentes. En este caso, la amplitud del movimiento se reduce de forma significativa, manteniéndose por debajo de 1.5° de escora para todas las condiciones de carga. Evidenciando una mejora en la estabilidad transversal respecto a la embarcación con 8° de astilla muerta.

Figura 14

Resultado de Balance – Lancha 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.



Además, si bien el aumento en el desplazamiento produce un aumento en los picos máximos de la respuesta, las diferencias entre condiciones de carga son menos pronunciadas, indicando una menor sensibilidad de la respuesta frente a variaciones en la carga. Este comportamiento demuestra que un mayor ángulo de astilla muerta contribuye a una mayor capacidad de amortiguamiento del ángulo de balance.

3.2.3 Movimiento acoplado de la Lancha interislas con 20° de astilla muerta.

La Figura 15 presenta las respuestas de ladeo y levantamiento de la lancha con mayor ángulo de astilla muerta dentro del análisis bajo tres condiciones de carga distintas. De las

curvas, se observa que las amplitudes de ladeo presentan una diferencia muy pequeña a medida que el desplazamiento aumenta hasta llegar a la condición de 120%. En cuanto a los resultados de levantamiento, aunque es más evidente la variación en los valores máximos, esta diferencia no sobrepasa los 0.07 m, comportamientos que responden a una baja influencia de la condición de carga sobre estos movimientos para la embarcación.

Figura 15

Resultado de ladeo y levantamiento – Lancha 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.

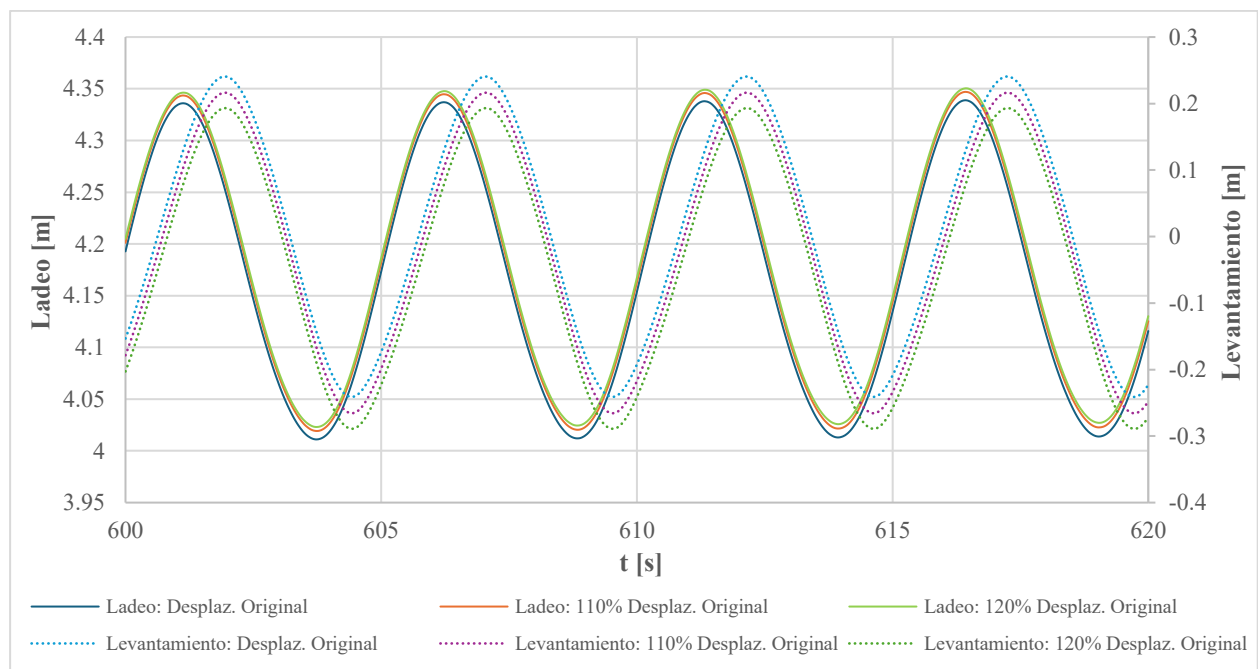
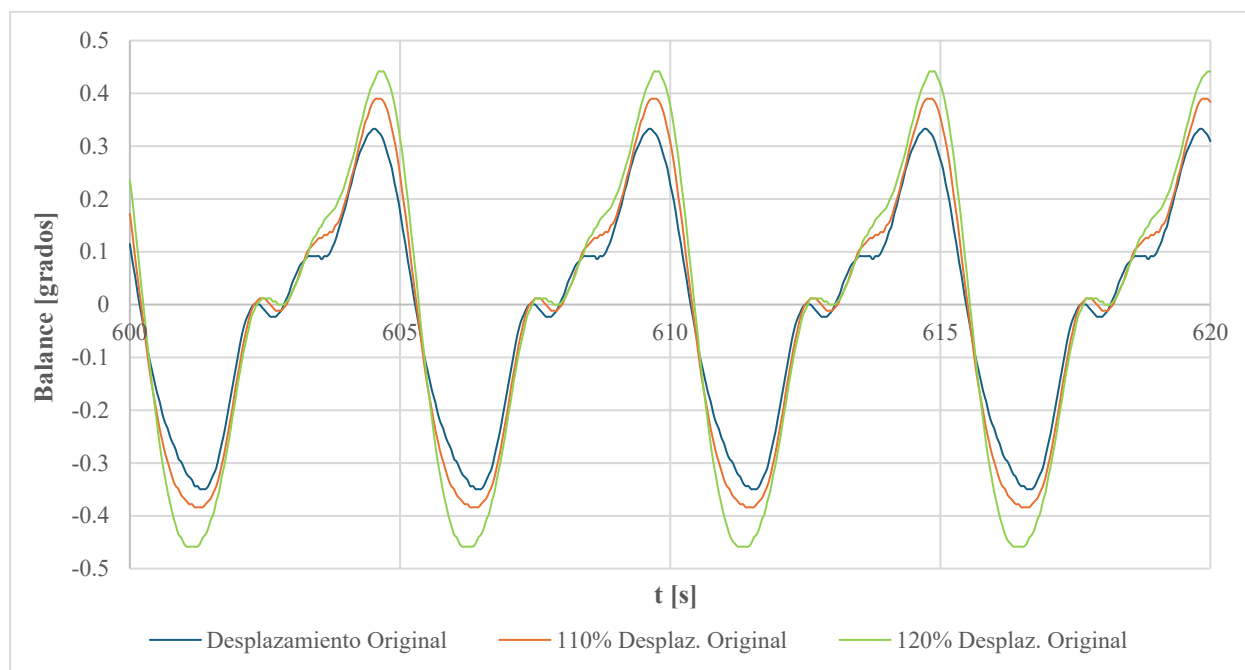


Figura 16

Resultado de Balance – Lancha 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del primer incidente.



De la misma manera, la Figura 16 muestra los ángulos de balance que registra la lancha interislas con 20° de astilla muerta. Este movimiento se encuentra oscilando entre valores de 0.5 grados tanto para estribor como para babor, siendo las menores amplitudes dentro de las configuraciones analizadas. A pesar de que el incremento del desplazamiento genera aumentos leves en los picos de respuesta, la diferencia entre la condición más pesada y ligera se sitúa en alrededor de 0.7 grados. La presencia de asimetrías en la señal y de un comportamiento no estrictamente sinusoidal en los picos de la señal de balance, se reafirma la presencia de acoplamiento dinámico entre los tres movimientos transversales considerados en el análisis.

El análisis comparativo de las tres lanchas interislas en función de los resultados presentes en la Tabla 8, con ángulos de astilla muerta de 8°, 14° y 20°, permite identificar una disminución sistemática en la amplitud de los movimientos acoplados a medida que incrementaba la astilla muerta del casco. Mientras que la lancha con menor ángulo presenta respuestas más amplificadas y sensibles al desplazamiento, las configuraciones con mayor astilla

muerta exhiben un comportamiento más amortiguado y estable, particularmente en el movimiento de balance. Estos resultados ponen de manifiesto el rol determinante de la geometría del casco en la estabilidad transversal dinámica.

Tabla 8

Resumen de resultados de ladeo, levantamiento y balance frente a ola regular del primer incidente.

Astilla Muerta	Condición de Carga	Valor	Ladeo [m]	Levantamiento [m]	Balance [grados]
8°	Desplazamiento Original	Max.	4.369	0.242	1.776
		Min	-0.151	-0.242	-1.742
8°	Desplazamiento Original	Max.	4.150	0.205	2.584
		Min	-0.145	-0.279	-2.538
8°	Desplazamiento Original	Max.	3.765	0.169	3.328
		Min	-0.141	-0.316	-2.721
14°	Desplazamiento Original	Max.	4.429	0.240	0.934
		Min	-0.154	-0.241	-0.751
14°	Desplazamiento Original	Max.	4.407	0.212	1.060
		Min	-0.148	-0.270	-0.940
14°	Desplazamiento Original	Max.	4.388	0.185	1.209
		Min	-0.143	-0.298	-1.146
20°	Desplazamiento Original	Max.	4.349	0.241	0.573
		Min	-0.152	-0.241	-0.355
20°	Desplazamiento Original	Max.	4.359	0.216	0.630
		Min	-0.149	-0.266	-0.384
20°	Desplazamiento Original	Max.	4.365	0.193	0.670
		Min	-0.146	-0.289	-0.464

3.3 Comparación de la respuesta de la lancha interislas frente a oleaje regular y oleaje tipo rompiente.

3.3.1 Descripción de las condiciones de oleaje analizadas.

Con el propósito de evaluar la influencia del tipo de oleaje en la respuesta dinámica de las lanchas interislas, se realizó un análisis comparativo de los resultados del movimiento acoplado bajo oleaje regular y oleaje asimétrico, representativo de una ola rompiente. La definición de las alturas de ola para ambas condiciones se estableció a partir de los datos oceanográficos correspondientes a las fechas en los que se registraron los incidentes, con el fin de garantizar condiciones de excitación comparables. La ola rompiente se la representó con una serie de Fourier truncada de cinco términos para usar el mismo esquema de integración en tiempo.

Tabla 9

Parámetros de las condiciones de oleaje analizadas.

Oleaje regular		Oleaje asimétrico			
Altura [m]	1.00	Altura [m]	0.65	0.73	0.82
Periodo [s]	4.00	Periodo [s]	4.00	4.00	4.00

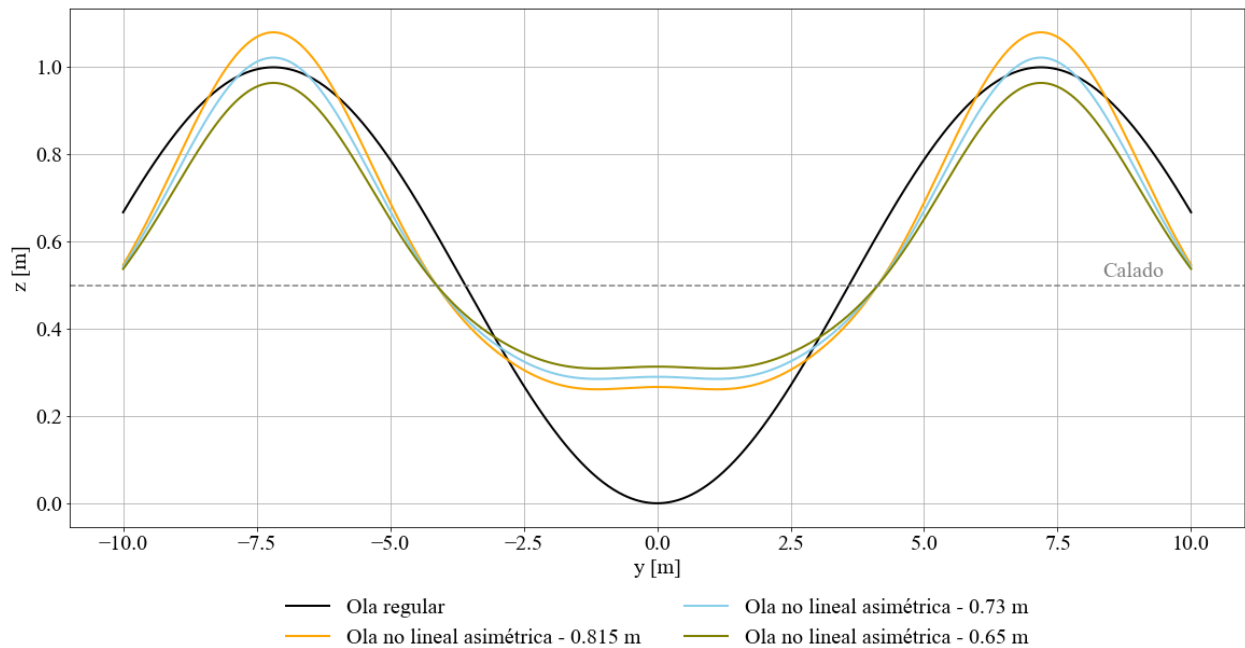
Tabla 10

Coeficientes de la Serie de Fourier – Oleaje asimétrico de 0.73 m.

A0 [m]	0.0334	-	-
A1 [m]	0.3468	B1 [m]	7.2863E-08
A2 [m]	0.1296	B2 [m]	-4.8663E-08
A3 [m]	0.0200	B3 [m]	1.26E-08
A4 [m]	0.0065	B4 [m]	-5.4975E-09
A5 [m]	0.0018	B5 [m]	-1.9512E-09

Figura 17

Perfil de oleaje de las condiciones analizadas.



3.3.2 Criterio de evaluación del embarque de agua en cubierta.

Para evaluar el potencial ingreso de agua en cubierta, se analizó la diferencia de altura entre la superficie libre del agua y la cubierta en el costado de babor y estribor, definido como francobordo instantáneo. Francobordo con valores de cero o negativos indican que el agua alcanza o supera la altura de la cubierta, esto es ingreso de agua a las lanchas interislas.

Dentro de la simulación numérica, el código evalúa esta diferencia de altura y, en caso de identificar instantes de tiempo en los cuales la elevación de la ola sobrepase la cubierta, la simulación se detiene automáticamente. En ese momento, el programa indica que se ha alcanzado una condición de embarque de agua, almacena y devuelve las respuestas de movimiento, velocidades y aceleraciones del sistema hasta ese instante.

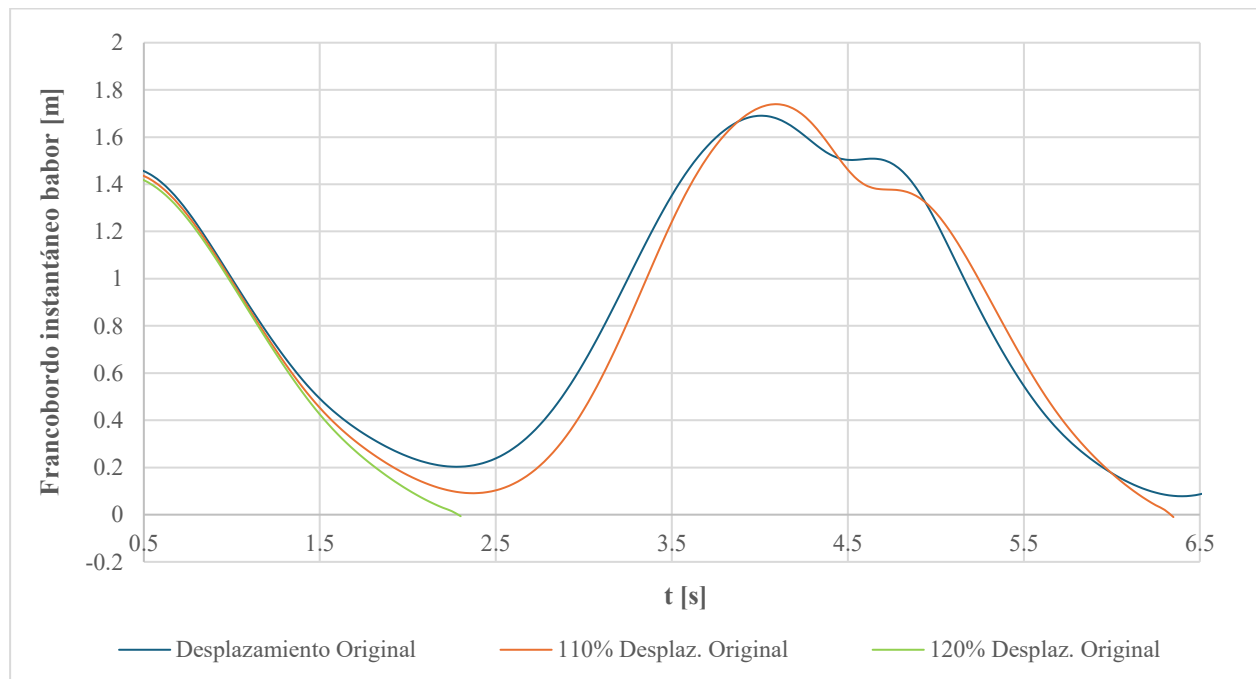
3.3.3 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 1 en ola regular y ola no lineal asimétrica.

Los resultados del francobordo instantáneo de la lancha interislas 1 para oleaje regular de 1 m de altura, Figura 18, muestran una variación considerable entre las distintas condiciones de

carga. Para el desplazamiento original con las olas golpeando la lancha por el lado de babor, el francobordo en este costado se mantiene positivo durante todo el intervalo de simulación, indicando que la superficie de la ola no alcanza a la altura de la cubierta. Sin embargo, para las condiciones de mayor desplazamiento, 110% y 120% respectivamente, el francobordo instantáneo en babor alcanza valores cercanos a cero llegando incluso a valores negativos, lo que representa el inicio de un embarque de agua dentro de la Lancha 1, caracterizada por un ángulo de 8° de astilla muerta.

Figura 18

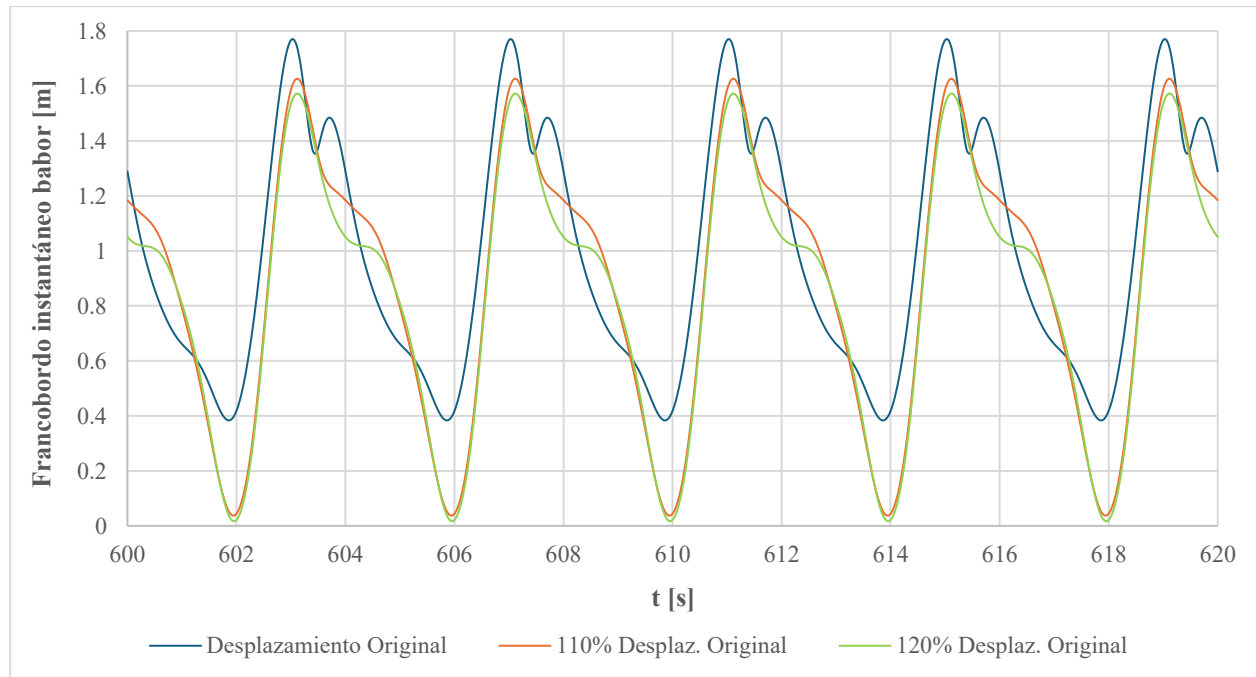
Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha de 8° astilla muerta.



Por su parte, la respuesta bajo oleaje asimétrico, Figura 19, evidencia un comportamiento más irregular y asimétrico del francobordo instantáneo, con descensos más pronunciados en los valores mínimos. Esta condición refleja un mayor acoplamiento dinámico entre el movimiento de la embarcación y la excitación del oleaje incidente, generando un escenario más adverso, al concentrar una mayor energía en los picos máximos de respuesta.

Figura 19

Oleaje asimétrico: 0.73m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 8° astilla muerta.



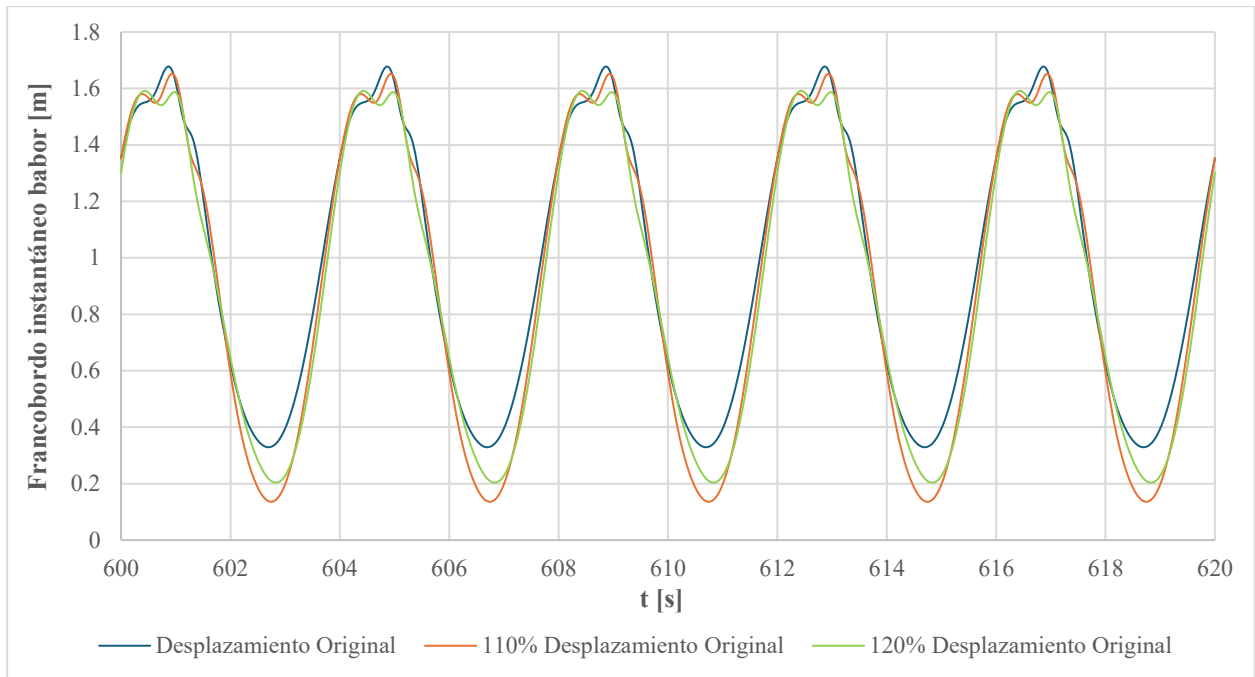
3.3.4 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 2 bajo oleaje regular y oleaje asimétrico.

La Figura 20 muestra el francobordo instantáneo en babor de la lancha con 14° de astilla muerta bajo oleaje regular, considerando tres condiciones de carga. La señal de la respuesta presenta un comportamiento periódico, con ligeras asimetrías en los valores máximos, lo que evidencia una influencia del acoplamiento dinámico en la interacción entre la altura de la cubierta y la superficie del agua.

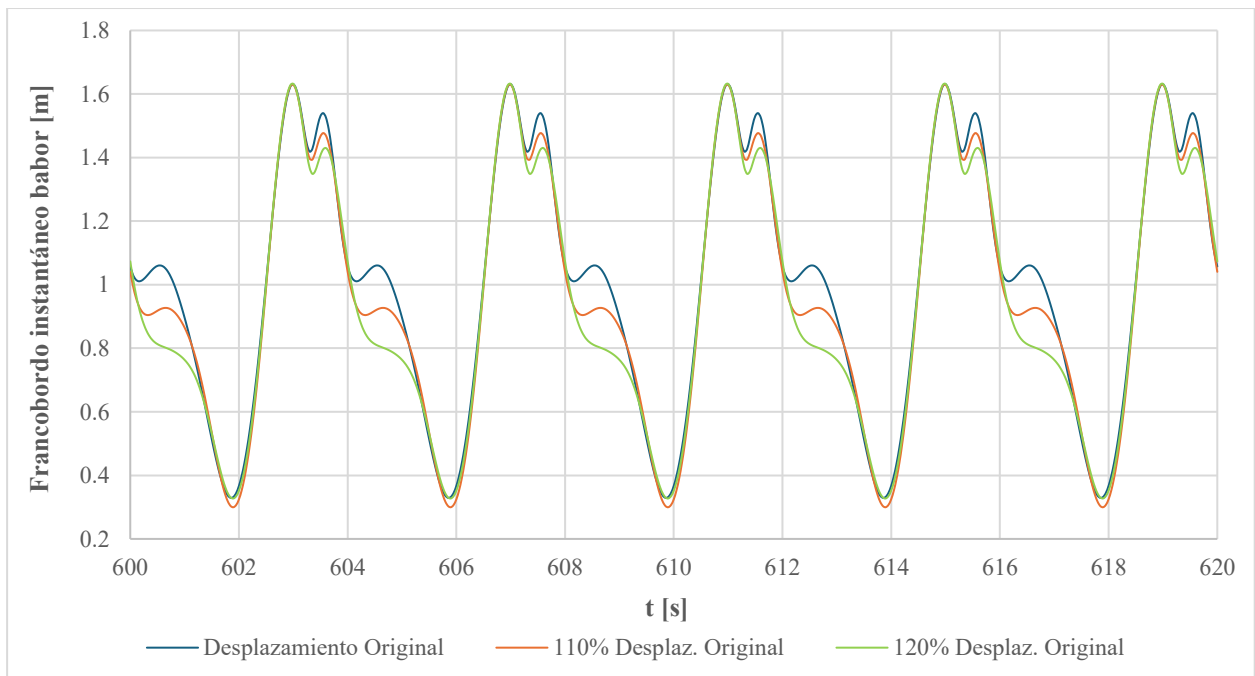
El incremento del desplazamiento produce una disminución de los valores máximos del francobordo instantáneo, de alrededor de 0.15 m entre las condiciones de menor y mayor desplazamiento. De manera particular, la condición de carga del 110% presenta los valores mínimos más bajos, comportamiento que puede asociarse a la combinación de efectos dinámicos del acoplamiento entre los movimientos de ladeo, levantamiento y balance, consistente con la naturaleza no lineal del sistema.

Figura 20

Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 14° astilla muerta.

**Figura 21**

Oleaje asimétrico: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 14° astilla muerta.



La Figura 21 presenta la respuesta del francobordo instantáneo bajo oleaje asimétrico en tres condiciones de carga distintas. En comparación con la respuesta obtenida para oleaje regular, esta señal tiene un carácter más irregular y asimétrico, con mayores fluctuaciones entre los

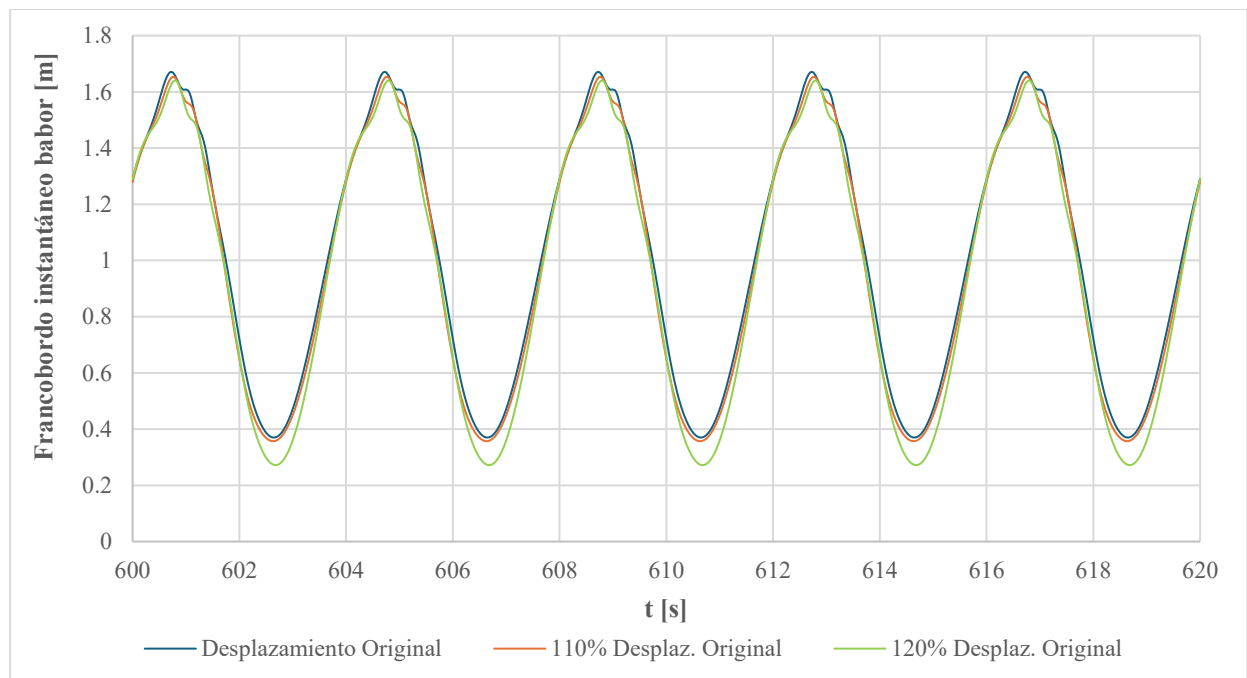
valores máximos y mínimos en cada ciclo de movimiento. A pesar de tratarse de una condición más exigente, el francobordo se mantiene positivo para todas las condiciones de desplazamiento, registrando valores mínimos superiores a los registrados en oleaje regular.

3.3.5 Francobordo instantáneo de la lancha interislas 3 bajo oleaje regular y oleaje asimétrica.

En la Figura 22 se presentan los resultados del francobordo instantáneo bajo oleaje regular. Similar a los resultados anteriores para las anteriores dos lanchas, la respuesta presenta un comportamiento periódico, con valores comprendidos entre aproximadamente 0.2 m y 1.7 m. Sin embargo, en torno a los valores máximos, la irregularidad de la señal disminuye de manera considerable, lo que evidencia que un mayor ángulo de astilla muerta contribuye a una respuesta más favorable bajo este tipo de oleaje.

Figura 22

Oleaje regular: 1m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha de 20° astilla muerta.

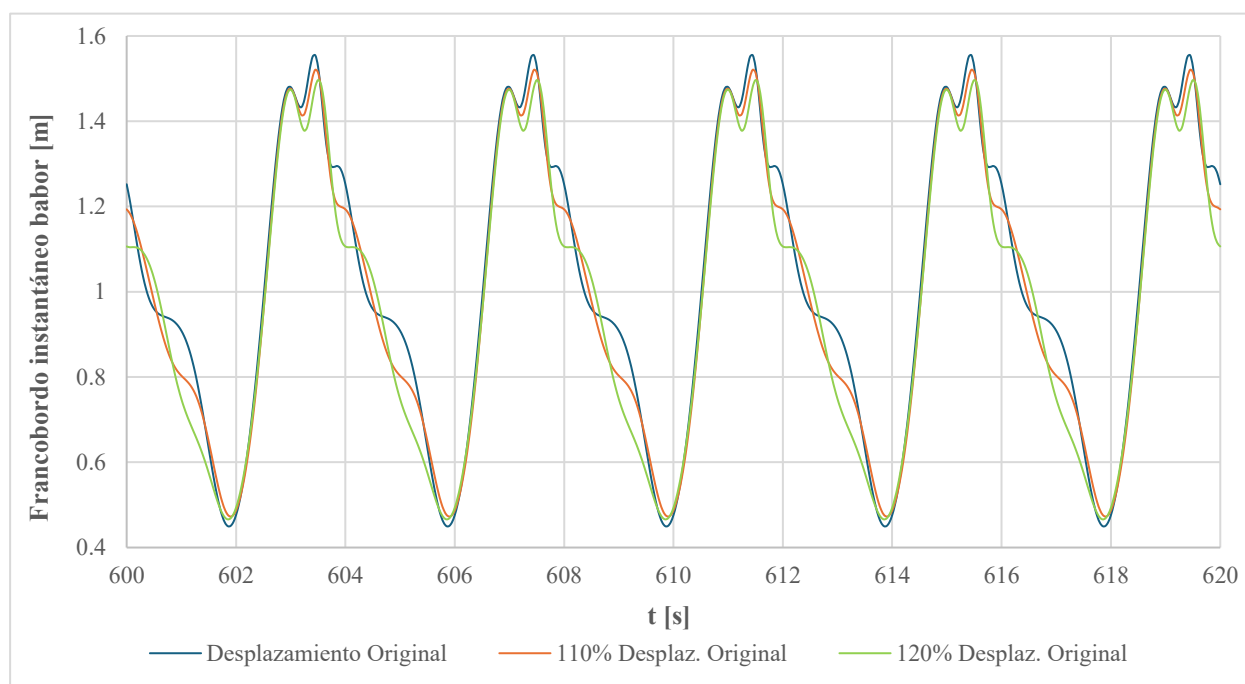


La Figura 23 presenta los resultados correspondientes al francobordo instantáneo bajo oleaje no lineal asimétrico. En comparación con las embarcaciones de menor ángulo de astilla muerta, las fluctuaciones entre los picos máximos y mínimos se encuentran notablemente

suavizadas. Asimismo, esta configuración presenta el francobordo mínimo más elevado y seguro entre las tres embarcaciones analizadas, alcanzando valores superiores a 0.47 m incluso en la condición de desplazamiento más alta. Lo que evidencia la ventaja de esta geometría al reducir de forma significativa la posibilidad de embarque de agua en cubierta.

Figura 23

Oleaje deslizante: 0.73m de altura - Francobordo instantáneo en babor de lancha 20° astilla muerta.



El análisis comparativo de los valores de francobordo instantáneo para las tres lanchas interislas, véase Tabla 11, con ángulos de astilla muerta de 8°, 14° y 20°, evidencia una relación directa entre la geometría del casco, la condición de carga y el riesgo de embarque de agua. A medida que aumenta la astilla muerta, se observa una mayor reserva de francobordo mínimo, reflejando un comportamiento más favorable frente a las excitaciones por oleaje transversal. La lancha con 8° de astilla muerta presenta los valores más bajos de francobordo mínimo, particularmente al incrementarse la condición de carga, lo que indica una mayor susceptibilidad al embarque de agua en cubierta. Por el contrario, las configuraciones de 14° y 20° muestran una reducción en la variabilidad del francobordo, manteniendo valores mínimos más elevados y estables tanto en oleaje regular como deslizante. Estos resultados confirman que el aumento del

ángulo de astilla muerta contribuye a mejorar la respuesta dinámica transversal de la embarcación, reduciendo las condiciones críticas asociadas a la pérdida de francobordo instantáneo.

Tabla 11

Resumen de resultados del francobordo instantáneo para las condiciones analizadas.

Lancha	Tipo de Oleaje	Condición de Carga	Valor	Francobordo instantáneo [m]
8° astilla muerta	Ola regular	Desplazamiento Original	Max.	0.077
			Min	1.720
8° astilla muerta	Ola regular	110% Desplazamiento Original	Max.	-0.010
			Min	1.739
8° astilla muerta	Ola regular	120% Desplazamiento Original	Max.	-0.007
			Min	1.442
8° astilla muerta	Ola asimétrica	Desplazamiento Original	Max.	0.373
			Min	1.769
8° astilla muerta	Ola asimétrica	110% Desplazamiento Original	Max.	0.036
			Min	1.757
8° astilla muerta	Ola asimétrica	120% Desplazamiento Original	Max.	0.017
			Min	1.708
14° astilla muerta	Ola regular	Desplazamiento Original	Max.	0.274
			Min	1.677
14° astilla muerta	Ola regular	110% Desplazamiento Original	Max.	0.136
			Min	1.651
14° astilla muerta	Ola regular	120% Desplazamiento Original	Max.	0.204
			Min	1.592
14° astilla muerta	Ola asimétrica	Desplazamiento Original	Max.	0.329
			Min	1.730
14° astilla muerta	Ola asimétrica	110% Desplazamiento Original	Max.	0.228
			Min	1.723

14° astilla muerta	Ola asimétrica	120% Desplazamiento Original	Max.	0.201
			Min	1.712
20° astilla muerta	Ola regular	Desplazamiento Original	Max.	0.370
			Min	1.670
20° astilla muerta	Ola regular	110% Desplazamiento Original	Max.	0.338
			Min	1.653
20° astilla muerta	Ola regular	120% Desplazamiento Original	Max.	0.272
			Min	1.640
20° astilla muerta	Ola asimétrica	Desplazamiento Original	Max.	0.381
			Min	1.660
20° astilla muerta	Ola asimétrica	110% Desplazamiento Original	Max.	0.350
			Min	1.665
20° astilla muerta	Ola asimétrica	120% Desplazamiento Original	Max.	0.322
			Min	1.671

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones.

Se analizó el comportamiento dinámico transversal de embarcaciones interislas de Galápagos considerando el acoplamiento de ladeo, levantamiento y balance mediante simulación numérica con integración en tiempo usando el método de Runge – Kutta de cuarto orden. Se consideraron diferentes condiciones de desplazamiento, geometría del casco y oleaje incidente, con el objetivo de analizar la respuesta de las embarcaciones y la posibilidad de que ocurran situaciones de zozobra, donde la ola supere el costado de cubierta.

4.1 Conclusiones.

4.1.1 Principales características de los estados de mar en zonas de incidentes.

El análisis de bases de datos meteorológicas y oceanográficas públicas permitió caracterizar los principales estados de mar de las Islas Galápagos. De manera particular, la obtención de los parámetros del oleaje correspondiente a las localidades y fechas en las que se registraron incidentes permitió incorporar a la simulación numérica condiciones representativas del entorno real de operación. En consecuencia, los resultados obtenidos pueden usarse para calcular la respuesta de las embarcaciones interislas frente a estados de mar propios de la zona de interés.

4.1.2 Modelo numérico de integración en tiempo.

Se desarrolló e implementó un modelo numérico capaz de calcular la respuesta dinámica transversal de embarcaciones interislas mediante el método de Runge – Kutta de cuarto orden. El código de programación demostró la correcta inclusión del acoplamiento entre los movimientos de ladeo, levantamiento y balance, así como consistencia física al presentar un comportamiento periódico una vez alcanzada la convergencia temporal. Esto permitió evaluar diferentes condiciones de oleaje, considerando tanto olas incidentes regulares como olas asimétricas, ampliando el alcance del análisis.

4.1.3 Respuesta de las embarcaciones interislas y posibilidad de zozobra.

Los resultados obtenidos evidencian la influencia significativa del ángulo de astilla muerta y del tipo de oleaje incidente en la amplitud de la respuesta dinámica acoplada. En particular, el oleaje no lineal asimétrico genera respuestas más severas en términos de francobordo instantáneo, caracterizadas por máximos irregulares y transiciones entre picos con reconocibles fluctuaciones.

Además, se observó que la embarcación con mayor ángulo de astilla muerta presenta los mayores valores de francobordo instantáneo, lo que demuestra una ventaja operativa de este tipo de geometría en condiciones de oleaje regular y oleaje no lineal. Sin embargo, debido a las diferencias en la altura entre la ola regular y la ola no lineal asimétrica consideradas en la simulación numérica, la condición que alcanza la zozobra corresponde a la embarcación con 8° de ángulo de astilla muerta expuesta a una ola incidente regular.

4.2 Recomendaciones.

4.2.1 Coeficientes hidrostáticos.

Dentro del análisis sobre la influencia de la condición de carga en los resultados del movimiento acoplado, se recomienda realizar un ajuste en cuanto a los parámetros hidrostáticos de la embarcación. Al incluir variaciones en el centro de gravedad, posibles ángulos de escora y calados por cada condición de carga, el programa podría desarrollar un análisis más completo con condiciones de carga ajustadas de manera integral. Asegurando que los resultados obtenidos respondan a un rango más amplio de operación de las lanchas interislas de Galápagos.

4.2.2 Amortiguamiento no lineal.

El amortiguamiento no lineal tiene una relevancia significativa en la respuesta dinámica del movimiento de balance. Por lo cual, se recomienda profundizar en formulaciones teóricas del amortiguamiento que dependen de la velocidad y la velocidad angular de la embarcación. La

inclusión de este análisis lograría ajustar la señal de respuesta de la embarcación, contribuyendo a la evaluación con mejor precisión de la posibilidad de zozobra.

4.2.3 Validación experimental.

Se recomienda complementar el modelo numérico desarrollado con ensayos experimentales para validar y complementar la respuesta dinámica obtenida mediante el código de programación. La experimentación permitiría identificar las frecuencias naturales de los movimientos de ladeo, levantamiento y balance para cada embarcación, así como estimar de forma más representativa los coeficientes de amortiguamiento lineal y no lineal. Además, estos parámetros se podrían incluir dentro de la simulación numérica, permitiendo reducir el margen de error entre los resultados numéricos y el comportamiento real de las embarcaciones interislas.

Referencias

- [1] Armada del Ecuador. (2025). *Boletín Armada*.
- [2] Ballard, E. J., Hudson, D. A., Price, W. G., & Temarel, P. (2003). Time Domain Simulation of Symmetric Ship Motions In Waves. *The International Journal of Maritime Engineering*, 145(a2), 1. <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2003.a2.22031>
- [3] Bhattacharyya, Rameswar. (1978). *Dynamics of marine vehicles*. Wiley.
- [4] Burden, R., & Faires, J. D. (2010). *Numerical Analysis* (Brooks Cole, Ed.).
- [5] Dirección Nacional de Espacios Acuáticos. (2021). *Informe de Siniestros Marítimos*.
- [6] El Telégrafo. (2025, June 11). *Armada del Ecuador rescató a 28 personas tras hundimiento de lancha en Galápagos*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/nacionales/44/armada-del-ecuador-rescato-28-personas-hundimiento-lancha-galapagos>.
- [7] European Maritime Safety Agency. (2022). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents*.
- [8] Fonseca, N., & Guedes Soares, C. (1998). Time-Domain Analysis of Large-Amplitude Vertical Ship Motions and Wave Loads. *Journal of Ship Research*, 42(2), 139–153. <https://doi.org/10.5957/jsr.1998.42.2.139>
- [9] Fossen, T. I. (2012). How to incorporate wind, waves and ocean currents in the marine craft equations of motion. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 9(PART 1), 126–131. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00022>
- [10] Fossen, T. I. . (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley.
- [11] Jácome, E. (2022). Analysis of Extreme Wave Conditions in the Galápagos Archipelago. *Revista Politecnica*, 50(1), 7–14. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.01>
- [12] J.M.J. Journée, & W.W. Massie. (2001, January). *Offshore Hydromechanics*. https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/OffshoreHydromechanics_Journee_Massie.Pdf. <http://www.shipmotions.nl>.
- [13] Kawahara, Y., Maekawa, K., & Ikeda, Y. (2011). *A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Method and its Limitation*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1482-3_26
- [14] Lewis, E. V. . (1988). *Principles of naval architecture: Vol. III*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.

- [15] Marín, J., Marín, M. J., Hernández, R., & Chinchin, I. (2025). *Small Craft Capsizing in the Galápagos Islands: Linking Vessel Stability, Wave Climate, and Coastal Morphology*.
- [16] Myat Thu, A., Ei Htwe, E., & Htay Win, H. (2015). Mathematical Modeling of a Ship Motion in Waves under Coupled Motions. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 2(12). www.ijeas.org
- [17] Nullschool Technologies Inc. (n.d.). *Earth*. <https://Earth.Nullschool.Net/>. Retrieved October 29, 2025, from <https://earth.nullschool.net/>
- [18] Observatorio de Turismo de Galápagos. (2022). *Estadísticas Turismo Galápagos*.
- [19] Primicias. (2023, October 20). *Rescatan a siete tripulantes de barco que naufragó en Galápagos*. <https://www.primicias.ec/noticias/sucesos/naufragio-barco-galapagos-guayaquil-rescate/>.
- [20] Robertson, B., Hall, K., Zytner, R., & Nistor, I. (2013). Breaking waves. In *Coastal Engineering Journal* (Vol. 55, Issue 1). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1142/S0578563413500022>
- [21] Tasai, F. (1971). On the Sway, Yaw and Roll Motions of a Ship in Short Crested Waves. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, 19(62), 1–36. <https://doi.org/10.5109/7172170>
- [22] Yim, S. C. S., Nakhata, T., Bartel, W. A., & Huang, E. T. (2005). Coupled nonlinear barge motions, Part I: Deterministic models development, identification and calibration. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 127(1), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.1854700>

Apéndices

Figura 24

Francobordo instantáneo de babor – Lancha interislas con 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

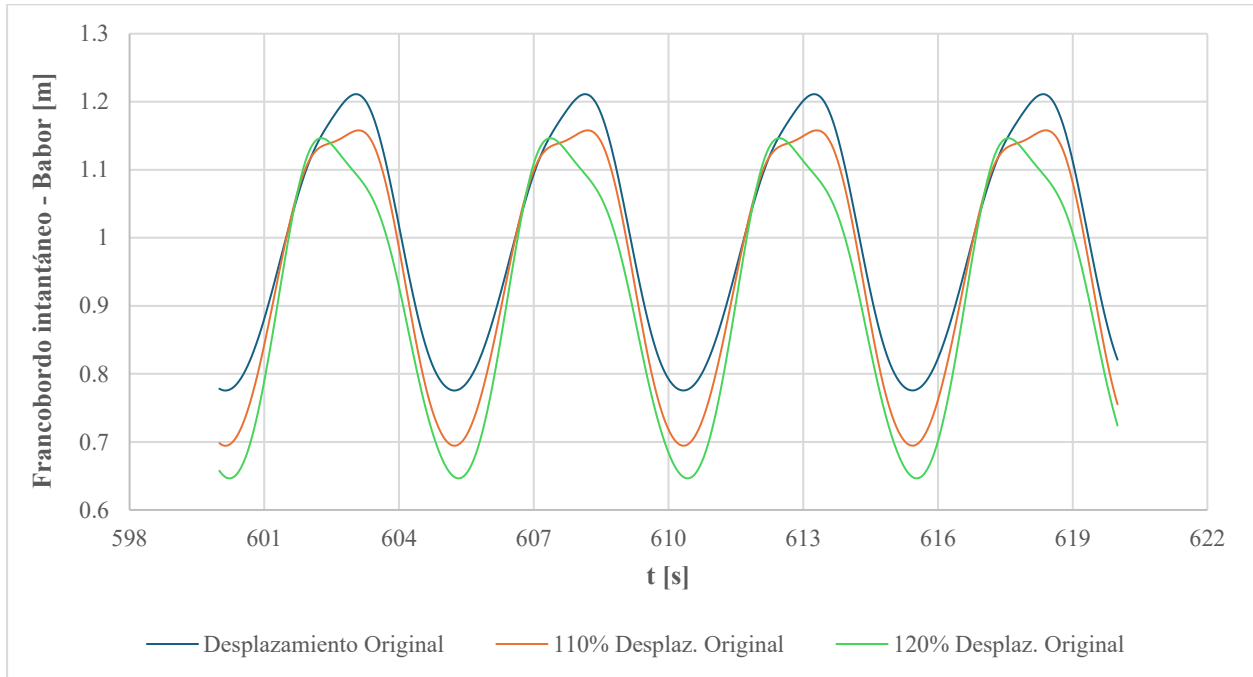


Figura 25

Francobordo Instantáneo de estribor – Lancha interislas con 8° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

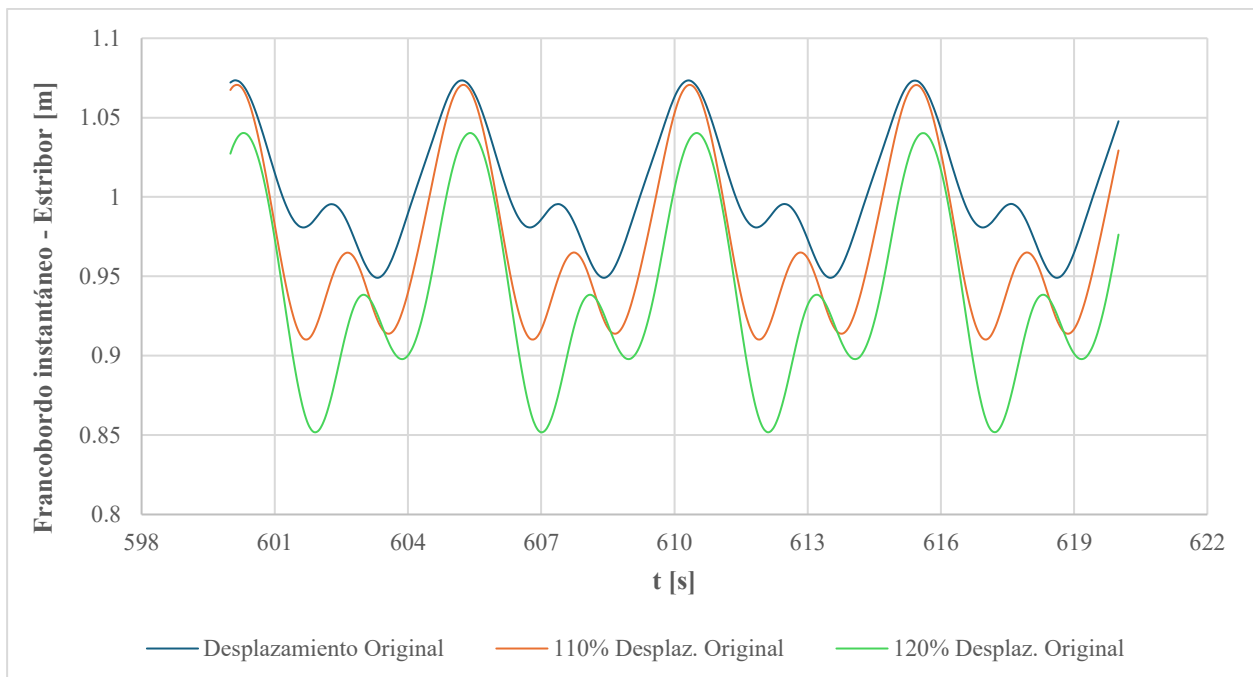
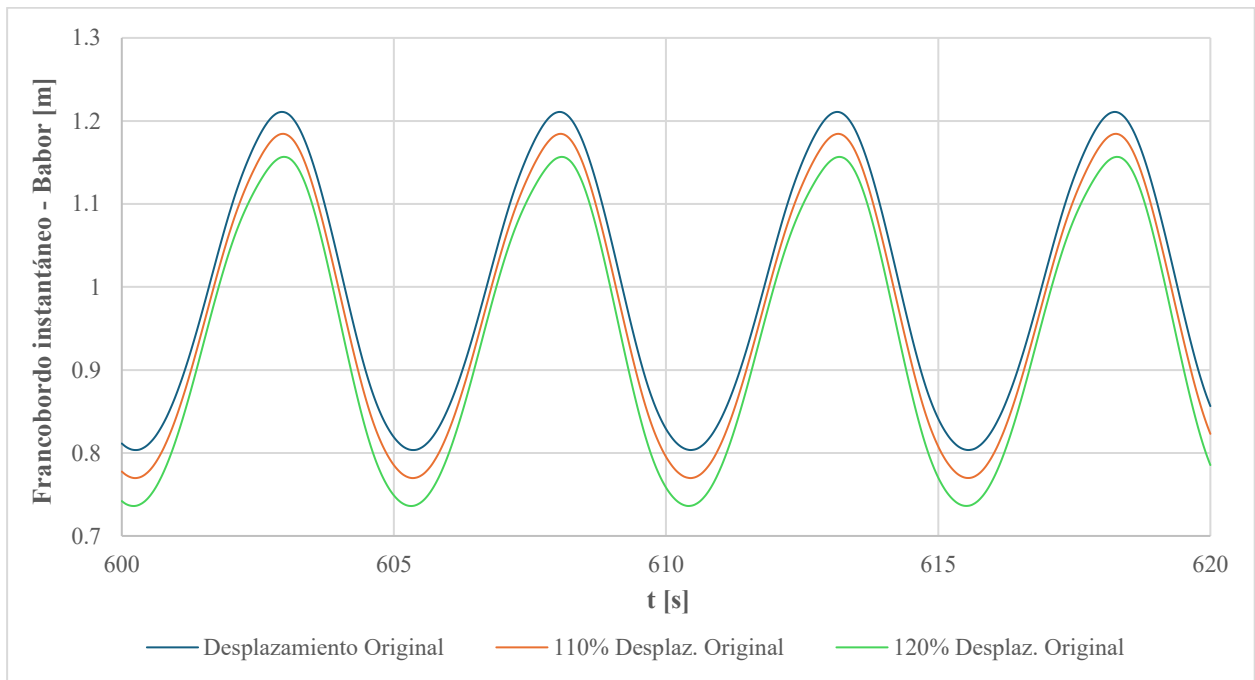


Figura 26

Francobordo instantáneo de babor - Lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

**Figura 27**

Francobordo instantáneo de estribor - Lancha interislas con 14° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

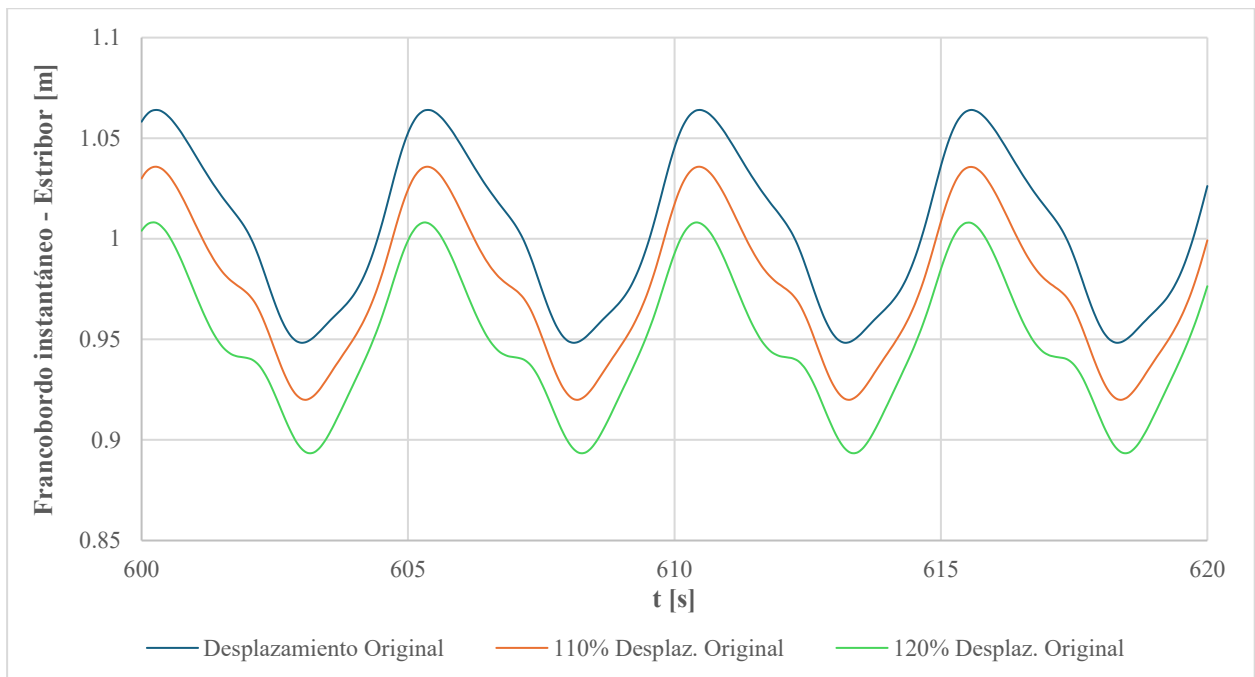
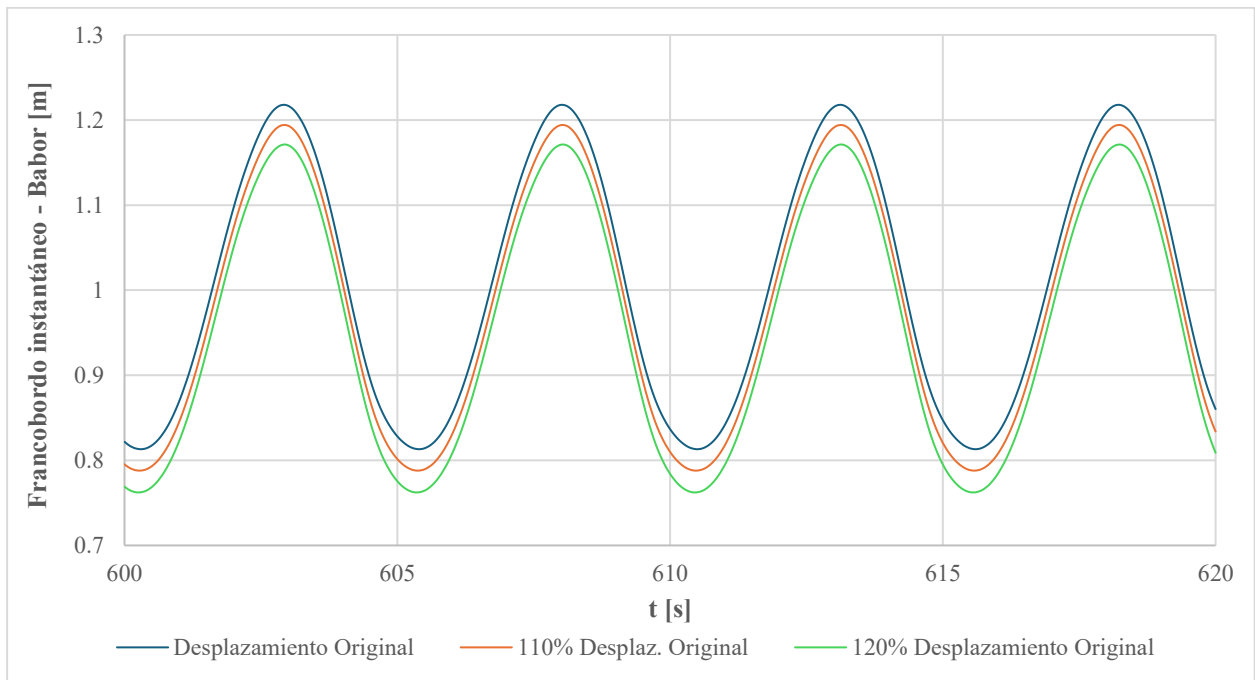


Figura 28

Francobordo instantáneo de babor - Lancha interislas con 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

**Figura 29**

Francobordo instantáneo de estribor - Lancha interislas con 20° de astilla muerta bajo condición de oleaje regular del Incidente 1.

