

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis preliminar del comportamiento dinámico y seguridad de embarcaciones

rápidas en las interislas Galápagos

INGE-2647

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Yarib Alejandro Alarcón Rubio

Axel Kleber Cedeño Parra

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi padre
Kleber Cedeño y a mi madre Angela Parra
por el incondicional apoyo recibido
durante todos estos años invertidos en
lograr esta meta

Axel Cedeño.

Dedicatoria

Para todos aquellos que alguna vez se sintieron inferiores porque eran buenos para el arte, pero no para las ciencias exactas.

Yarib Alarcón

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todos los profesores de la carrera Ingeniería Naval por impartirme sus conocimientos y en especial a José Rolando Marín por toda la ayuda brindada para lograr terminar el presente proyecto

Axel Cedeño

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, Oswaldo y Silvia, por su amor incondicional y su constante apoyo. A mis hermanos, Aldair, Shamira y Denisse, por ser mi fuente de motivación. A mi abuela Julia quien siempre está pendiente de nosotros, sus nietos, brindándonos su cariño y cuidado. También quiero agradecer a todos mis maestros, quienes me han guiado y compartido su conocimiento a lo largo de esta carrera, y a mis amigos, quienes han hecho de este camino algo aún más especial.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a José Marín, por su dedicación y empeño durante el desarrollo de este proyecto.

Yarib Alarcón

Declaración Expresa

Nosotros Yarib Alejandro Alarcón Rubio y Axel Kleber Cedeño Parra acordamos y reconocemos 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 nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que 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 los autor/es 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 septiembre del 2024.

Yarib Alarcón

Axel Cedeño

Evaluadores

María Tadea Quintuña Rodríguez, MSc.

Profesor de Materia

José Rolando Marín López, PhD.

Tutor de proyecto

Resumen

Debido a diversos incidentes de embarcaciones menores ocurridos en la Islas Galápagos y que son de dominio público, en este proyecto se estudia a nivel preliminar la estabilidad estática y dinámica de lanchas rápidas. Se aplicaron los criterios porpoising, chine walking y KG Dinámico, se evaluó la condición de Dead-Ship, cuando las lanchas pierden propulsión. Se realizaron 3 experimentos a las lanchas: inclinación, balance de rolido, y decremento logarítmico. Se implementó el método simplificado de Ikeda para determinar el coeficiente de amortiguamiento. Los resultados indican que la Lancha 0075 no tiene afinidad con el Criterio Dead-Ship; es estable en chinewalking, la Lancha 1132 podría sufrir del modo de falla Dead-Ship en las 3 Condiciones de carga consideradas; se encuentra en el límite de chine walking. La Lancha 1202 es propensa a sufrir incidentes en su tercera condición de carga; Tiene inestabilidad por chinewalking. Se concluye que las lanchas rápidas son estables en porpoising y por sus formas no tienen buena afinidad con Dead-Ship ni con el método simplificado de Ikeda y se recomienda llevar a cabo controles del coeficiente de amortiguamiento. Finalmente, los apéndices ayudan a reducir el KG dinámico a altas velocidades.

Palabras Clave: Porpoising, Amortiguamiento, Ikeda, Inestabilidad

Abstract

Due to ship incidents which happened in the Galapagos Islands. The dynamic and static behavior of high-speed crafts is studied with the objective of determining the load conditions that may lead them to capsize. They were applied the criteria of Porpoising, Chine walking, maximum dynamic KG and Dead-Ship, which were programmed through python language. 3 experiments were performed to the ships: incline, roll balance and logarithmic decrement. The simplified Ikeda's method was implemented to determine the damping coefficient. The results show that the craft 0075 does not have affinity with Dead-Ship but it is stable in Chine Walking, the craft 1132 may suffer from Dead-Ship in any of the three considered loading conditions, but it is on the limit in Chine Walking. The vessel 1202 may suffer from Dead-Ship in the third loading condition and it has instability in Chine Walking. It is concluded that the crafts are stable in porpoising and due to their forms, do not have good performance neither with Dead-Ship nor with the simplified Ikeda's method and it is recommended to carry out controls of the damping coefficient and the weight of the ship because they are very important for the accuracy of stability analysis. Finally, the stabilizers help to reduce the dynamic KG at high speed.

Keywords: Porpoising, Damping coefficient, Simplified Ikeda's method, Dead-Ship

Índice general

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4 MARCO TEÓRICO	6
<i>Nota. Adaptado de (Blount & Codega, 1992)</i>	8
1.4.1 <i>Inestabilidad dinámica longitudinal</i>	8
1.4.2 <i>Inestabilidad dinámica transversal</i>	9
1.4.3 <i>Condición Dead-ship</i>	11
CAPÍTULO 2.....	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PORPOISING.....	14
2.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL CHINE WALKING.....	16
<i>NOTA. OBTENIDO DE (LEWANDOWSKI, 1998)</i>	17

2.3	CONDICIÓN DEAD-SHIP	17
2.4	IMPLEMENTACIÓN EN LENGUAJE PYTHON	18
2.5	OBTENCIÓN DE DATOS Y SELECCIÓN DE MUESTRAS.....	19
2.5.1	<i>Obtención de parámetros básicos de estabilidad</i>	20
2.5.2	<i>Condiciones para analizar</i>	21
2.6	RESULTADOS A OBTENER	22
2.7	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	23
CAPÍTULO 3.....		25
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
3.1	CONDICIONES DE CARGA PARA ANÁLISIS DINÁMICO.....	27
3.1.1	<i>Análisis de Porpoising</i>	27
3.1.2	<i>Análisis de KG Dinámico</i>	30
3.1.3	<i>Análisis de Chine Walking</i>	32
3.2	ANÁLISIS DE DEAD-SHIP	33
CAPÍTULO 4.....		42
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
4.1	CONCLUSIONES.....	43
4.1.1	<i>Patrones de accidentes</i>	43
4.1.2	<i>Inestabilidades dinámicas</i>	43
4.1.3	<i>Vulnerabilidad por Dead-Ship</i>	44
4.1.4	<i>Económico</i>	44
4.2	RECOMENDACIONES	44
4.2.1	<i>Patrones de accidentes</i>	44
4.2.2	<i>Inestabilidades dinámicas</i>	45
4.2.3	<i>Vulnerabilidad por Dead-Ship</i>	45
4.2.4	<i>Económico</i>	45
BIBLIOGRAFÍA.....		46
APENDICES		49

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GMt	Altura metacéntrica transversal
GZ	Brazo Adrizante
HSC	Lancha rápida
KG	Altura vertical del centro de gravedad
KMT	Distancia vertical desde la quilla al metacentro
LCG	Centro de gravedad longitudinal
LWL	Longitud de la línea de agua
OMI	Organización Marítima Internacional
VPN	Valor presente neto

Simbología

C_L	Coefficiente de sustentación
CUNO	Número cúbico
C_v	Coefficiente de velocidad
B	Manga
β	Ángulo de astilla muerta
D	Puntal
ε	Coefficiente de amortiguamiento adimensional
Df	Fuerza de arrastre
Δ	Desplazamiento
g	Aceleración de la gravedad
K_{xx}	Radio de giro
L	Eslora
N	Fuerza normal
ρ	Densidad
T	Calado
τ	Angulo de trimado
∇	Volumen de desplazamiento
V	Velocidad

Índice de figuras

Figura 1 Fuerzas actuantes sobre una embarcación planeadora	6
Figura 2 Tipos de inestabilidades	7
Figura 3 Límites de porpoising para cascos prismáticos de planeo.....	9
Figura 4 KG/b en función del ángulo de astilla muerta.....	11
Figura 5 Sucesión de eventos de falla de estabilidad en condición "dead-ship"	12
Figura 6 Ángulos de astilla muerta efectivos para embarcaciones planeadoras a un ángulo de rolido.....	17
Figura 7 Resultados respecto a los 3 primeros objetivos específicos	23
Figura 8 Plano de líneas de forma de las lanchas. Lancha 1 (Izq), Lancha 2 (centro), Lancha 3 (der).....	26
Figura 9 Lancha 1 Condición 50%	28
Figura 10 Lancha 2 Condición 50%	29
Figura 11 Lancha 3 Condición 50%	30
Figura 12 Regimen de Chine Walking	33
Figura 13 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la condición 1	37
Figura 14 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la condición 1	37
Figura 15 Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 3 en las tres condiciones	38
Figura 16 Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 1 en la primera condición contrastando los brazos escorantes por acción del viento.....	39
Figura 17 Espectro de elevación de la ola obtenido mediante el código implementado	49
Figura 18 Espectro de elevación de la ola	49
Figura 19 Función de la pendiente efectiva de la ola obtenida mediante el código implementado.....	50

Figura 20 Función de la pendiente efectiva de la ola	50
Figura 21 Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la primera condición.....	51
Figura 22 Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 3 en la primera condición.....	51
Figura 23 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la primera condición.....	52
Figura 24 <i>Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la primera condición</i>	52
Figura 25 Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la primera condición	53
Figura 26 Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la primera condición	53
Figura 27 Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la primera condición	54
Figura 28 Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la primera condición.....	54
Figura 29 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la segunda condición.....	55
Figura 30 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición	55
Figura 31 Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición.....	56
Figura 32 Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición.....	56
Figura 33 Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición	57
Figura 34 Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la segunda condición	57
Figura 35 Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la segunda condición	58
Figura 36 Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la segunda condición.....	58
Figura 37 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la tercera condición	59

Figura 38 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición	59
Figura 39 Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición	60
Figura 40 Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición.....	60
Figura 41 Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición	61
Figura 42 Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la tercera condición.....	61
Figura 43 Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la tercera condición	62
Figura 44 Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la tercera condición.....	62
Figura 45 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la primera condición.....	63
Figura 46 Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la primera condición.....	63
Figura 47 Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la primera condición	64
Figura 48 Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la primera condición	64
Figura 49 Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la primera condición	65
Figura 50 Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la primera condición.....	65
Figura 51 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la segunda condición.....	66
Figura 52 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición	66
Figura 53 Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición.....	67
Figura 54 Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición.....	67
Figura 55 Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición	68

Figura 56 Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la segunda condición	68
Figura 57 Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la segunda condición	69
Figura 58 Espectro efectivo relativo del movimiento de rolo de la Lancha 3 en la segunda condición.....	69
Figura 59 Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la tercera condición	70
Figura 60 Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición	70
Figura 61 <i>Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición.....</i>	71
Figura 62 <i>Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición</i>	71
Figura 63 <i>Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición</i>	72
Figura 64 <i>Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la tercera condición.....</i>	72
Figura 65 <i>Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la tercera condición.....</i>	73
Figura 66 <i>Espectro efectivo relativo del movimiento de rolo de la Lancha 3 en la tercera condición.....</i>	73
Figura 67 <i>Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 1 en las tres condiciones</i>	74
Figura 68 <i>Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 2 en las tres condiciones</i>	74
Figura 69 <i>Lancha 1 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados.....</i>	75
Figura 70 <i>KG Dinámico sin Apéndices Lancha 1 Condición 100%.....</i>	75
Figura 71 <i>KG Dinámico con Apéndices Lancha 1 Condición 100%</i>	76
Figura 72 <i>Lancha 1 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados.....</i>	76
Figura 73 <i>KG Dinámico sin Apéndices Lancha 1 Condición 50%.....</i>	77
Figura 74 <i>KG Dinámico con Apéndices Lancha 1 Condición 50%.....</i>	77

Figura 75 Lancha 1 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados 78

Figura 76 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 1 Condición 10% 78

Figura 77 KG Dinámico con Apéndices Lancha 1 Condición 10%..... 79

Figura 78 Lancha 2 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados 79

Figura 79 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 100% 80

Figura 80 KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 100%..... 80

Figura 81 Lancha 2 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados 81

Figura 82 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 50% 81

Figura 83 KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 50%..... 82

Figura 84 Lancha 2 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados 82

Figura 85 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 10% 83

Figura 86 KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 10%..... 83

Figura 87 Lancha 3 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados 84

Figura 88 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 100% 84

Figura 89 KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 100%..... 85

Figura 90 Lancha 3 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados 85

Figura 91 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 50% 86

Figura 92 KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 50%..... 86

Figura 93 Lancha 3 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados 87

Figura 94 KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 10% 87

Figura 95 KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 10%..... 88

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros obtenidos para los cálculos	21
Tabla 2 Tabla para corrección de avalúo por años de servicio	24
Tabla 3 Dimensiones principales de las lanchas utilizadas.....	26
Tabla 4 Condiciones de carga para análisis dinámico	27
Tabla 5 KG dinámico sin apéndices	31
Tabla 6 KG Dinámico incluyendo apéndices	32
Tabla 7 Condiciones de carga según las lanchas	34
Tabla 8 Parámetros de entrada para las 3 lanchas en las 3 condiciones	34
Tabla 9 Resultados del parámetro C para las 3 lanchas en las 3 condiciones.....	35
Tabla 10 Condición 100% Chine Walking	88
Tabla 11 Condición 50% Chine Walking	89
Tabla 12 Condición 10% Chine Walking	89
Tabla 13 Cálculo de datos para Chine Walking.....	90

Capítulo 1

1. Introducción

Navegar a alta velocidad en presencia de olas representa un gran peligro debido a la posibilidad de accidentes o siniestros en el entorno marino. El moderno barco de planeo de alto rendimiento está expuesto principalmente a estados de mar donde la superficie del agua tiene altas amplitudes, lo que puede producir daños estructurales y pérdidas de control (Savitsky & Brown, 1976). Además, es posible que en ciertas situaciones debido a altas velocidades se puede llegar a una inestabilidad dinámica de la lancha con probabilidad de zozobra. Por lo que evaluar la seguridad a altas velocidades es de mucho interés.

El diseño de embarcaciones de planeo ha sido un desafío constante en la ingeniería naval, especialmente cuando estas van a operar en mar abierto, por ejemplo, entre las Islas Galápagos. La respuesta del barco de planeo a las olas es un problema complejo. La respuesta a las aceleraciones y al movimiento son, en general, funciones no lineales de la altura de las olas (Fridsma, 1969). Debido a la alta velocidad, el alto nivel de no linealidad, la naturaleza transitoria de las cargas y respuestas, y la naturaleza estocástica de las ondas y respuestas, modelar naves de planeo en olas es muy difícil, tanto numérica como experimentalmente (Rosén et al., 2020). Por otro lado, los conceptos de brazo adrizante y altura metacéntrica no tienen aplicación cuando hay sustentación dinámica, ya que las contribuciones estática y dinámica son muy diferentes y deben calcularse por separado y combinarse (Lewandowski, 2004), lo que complica en gran medida un estudio analítico. En resumen, el modelado numérico y experimental, además del estudio analítico de naves de planeo en entornos de olas es una tarea muy compleja, por lo que muy comúnmente se desarrollan estos análisis utilizando expresiones obtenidas de estudios experimentales previos sobre el comportamiento de embarcaciones rápidas.

1.1 Descripción del Problema

Los accidentes en lanchas rápidas en las Islas Galápagos son motivo de preocupación, especialmente cuando se consideran las recientes incidentes en la región. Uno de los casos más impactantes fue el naufragio de la lancha “*Angy*” de 12.75 metros de eslora, resultando en 4 víctimas fatales (Redacción Plan V, 2022). Además, en otro incidente por fuerte oleaje la lancha Humberta sufrió un siniestro mientras navegaba en la Reserva Marina de las Galápagos (Buro Galápagos, 2024). A esto se suma el naufragio de la lancha “*Queen Evolution*”, que llevaba a bordo 29 pasajeros. Afortunadamente, no hubo pérdidas humanas; sin embargo, durante las acciones para mantenerla a flote, la lancha de la Armada que cumplía labores de rescate también se hundió (Tagle, 2023). La falta de medidas adecuadas para garantizar la seguridad en las lanchas rápidas resalta las precarias condiciones en que operan algunas embarcaciones que tiene graves consecuencias para la seguridad de la vida y el turismo de la región.

En dos de los incidentes mencionados, las lanchas “*Queen Evolution*” y la de la Capitanía sufrieron siniestros “debido al fuerte oleaje”, lo que provocó que las embarcaciones se elevaran y, al caer, la fuerza resultante fisuró sus cascos, ocasionando finalmente su hundimiento. Una situación similar se presentó con la lancha “*Humberta*”, que se volcó debido a las condiciones de gran oleaje. Por otro lado, la lancha “*Angy*” enfrentó daños en sus tres motores fuera de borda, dejándola a la deriva. La combinación del oleaje y el pánico de los pasajeros hizo que todos se trasladaran hacia popa, lo que resultó en una entrada de agua y el inicio del naufragio.

La creciente demanda de viajes más rápidos ha llevado a los propietarios de lanchas a incrementar la potencia y el número de los motores, pasando de dos a tres y hasta cuatro. Sin embargo, este exceso de potencia conlleva un incremento en peso y el incremento en velocidad que podría ser inapropiada para el transporte de pasajeros. Es fundamental que el

casco esté diseñado para proporcionar estabilidad a la embarcación, pero es posible que los diseños locales no sean adecuados para soportar tanto peso de los motores. Esto explica por qué los cascos se fisuran y lamentablemente, se producen estos trágicos accidentes (Vega, 2023).

1.2 Justificación del Problema

Una de las principales fuentes de ingreso para Ecuador proviene del turismo en las Islas Galápagos generando más de 143 millones de dólares anuales (Velasquí López, 2019). Gracias a su gran reconocimiento a nivel mundial, el turismo en esta región se ha incrementado en los últimos años. Muchos extranjeros llegan a disfrutar de los paisajes mágicos de las Galápagos. Sin embargo, en los últimos años se han registrado accidentes en embarcaciones rápidas que prestan servicio interislas, como el Angy, Queen Evolution, Humberta y en algunas embarcaciones de la Armada del Ecuador. Estos incidentes han resultado en varamientos, naufragios y, lamentablemente, en la pérdida de vidas humanas. Desafortunadamente, estos no son los únicos casos, dado que no todos los casos llegan a la prensa ecuatoriana.

Debido a limitaciones técnicas y de presupuesto, parece que no se han podido desarrollar estudios que expliquen cuáles son los fenómenos físicos que provocan los accidentes en las embarcaciones rápidas de la región insular. Una vez que se conozcan, se podría establecer recomendaciones y regulaciones de navegación más estrictas por las autoridades del sector como indica el código internacional de seguridad de embarcaciones rápidas: “Los límites de la operación segura, los procedimientos de manipulación especiales y cualquier restricción operativa serán examinados y desarrollados como resultado de ensayos a escala real realizados simulando posibles fallas del equipo” (HSC Code, 2008). Además de los posibles fenómenos físicos complejos involucrados en la dinámica, existe una falta de conocimiento técnico por parte de los propietarios de embarcaciones rápidas. Muchos de

ellos buscan una mayor velocidad para reducir el tiempo de trayecto entre islas, llegando a incrementar la potencia de las embarcaciones, que ya tienen un diseño establecido. A grandes velocidades, los golpes con las olas producen fuertes efectos dinámicos, influyendo considerablemente en los accidentes. Los cuales necesitan ser estudiados, ya que estos comportamientos podrían ayudar a establecer condiciones de operación seguras (Fridsma, 1971).

Debido a que en una reunión personal con el Capitán Arias de la Armada del Ecuador se mencionó que, según los informes, ciertos accidentes de embarcaciones ocurrían cuando estas no se encontraban en movimiento (Arias, 2024). Se analizará, por tanto, la condición en la que una embarcación rápida se encuentra en “dead-ship”, que se presenta cuando una embarcación se encuentra sin potencia de trabajo en sus motores, es decir, cuando estos están apagados, ya sea porque no están funcionando o debido a algún otro motivo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar a nivel preliminar el comportamiento de las embarcaciones rápidas en las Galápagos aplicando resultados experimentales disponibles y criterios de estabilidad para la mejora de la seguridad en la navegación entre islas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Examinar la información de accidentes de embarcaciones rápidas proporcionada por organismos gubernamentales para alcanzar una visión de los posibles patrones de los accidentes en las islas Galápagos.
- Analizar la respuesta dinámica de embarcaciones rápidas en las olas irregulares de la región Insular utilizando formulaciones obtenidas a partir de resultados experimentales de estudios previos.

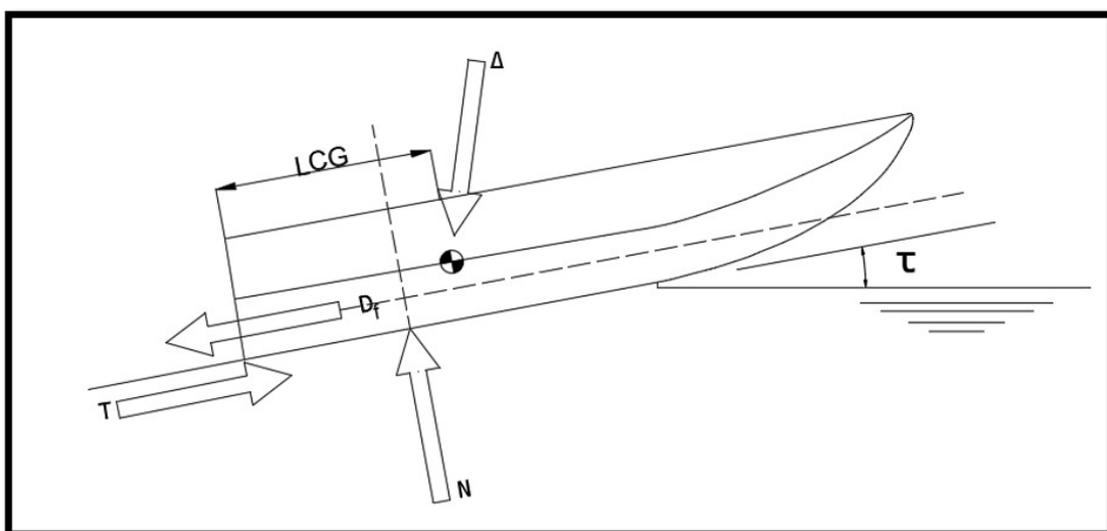
- Analizar la estabilidad de las embarcaciones rápidas que navegan en las interislas Galápagos cuando pierden su potencia principal mediante criterios de estabilidad modernos de la OMI.
- Estimar provisionalmente el beneficio económico a partir de seguros marítimos para la absolución por pérdida absoluta de la inversión.

1.4 Marco teórico

Las fuerzas que actúan en una embarcación en régimen de planeamiento son presentadas en la siguiente ilustración: la fuerza de empuje generada por la hélice propulsora (T), la fuerza de arrastre friccional generada por efectos viscosos asumida tangencial al fondo (D_f), el peso de la embarcación (Δ) y la fuerza normal que resulta de integrar la presión hidrodinámica sobre el fondo (N) y que contrarresta el peso, tales fuerzas se visualizan en la Figura 1. Como resultado del equilibrio de estas fuerzas se alcanza un ángulo de trimado representado por τ . Nótese que, debido a la sustentación dinámica, la fuerza de boyantes puede despreciarse. (Savitsky, 1964)

Figura 1

Fuerzas actuantes sobre una embarcación planeadora



Nota. Adaptado de (Savitsky, 1964)

La dinámica de una embarcación en planeo se ve afectada por varios tipos de inestabilidades, que a su vez dependen de factores como la carga, la posición del centro de gravedad, la velocidad y las características geométricas del casco. Los tipos más comunes de inestabilidad (Blount & Codega, 1992) incluyen en el movimiento de rolido, que ocurre cuando la embarcación comienza a oscilar lateralmente y la fuerza restauradora del casco no es suficiente para devolverla a una posición estable. También se puede presentar inestabilidad en el plano vertical, que sucede cuando la proa del barco sube y baja repetidamente, generando un movimiento oscilatorio en el plano longitudinal. Este fenómeno es particularmente peligroso, a altas velocidades, cuando la lancha experimenta desviaciones descontroladas en el plano horizontal, dificultando mantener un curso recto como se presenta en la siguiente ilustración, las inestabilidades mencionadas se pueden ver en la Figura 2. Si estos factores no se controlan adecuadamente, pueden comprometer seriamente la seguridad y maniobrabilidad de la embarcación (Blount & Codega, 1992).

Figura 2

Tipos de inestabilidades

	Hydrostatic <----->	Hydrodynamic		
	Displacement	Semi-Displacement	Planing	
	Increasing Froude Number ----->			
Transverse	Transverse Hydrostatics GMT ≤ 0	Loss of GMT due to wave effect	Roll Inestability Non-Zero Heel Non-Oscillatory	Chine Walking” Dynamic Roll Oscillation
				
Longitudinal	Longitudinal Hydrostatics GML 0	Loss of GML due to wave effect	Trim Inestability Bow-Drop Non-Oscillatory	“Porpoisings” Dynamic Pitch -Heave Oscillation
				
Combined	Combined GMT ≤ 0 GML ≤ 0	Combined Wave Effect	Broach Non-Oscillatory	“Corkscrew” Pitch-Yaw-Roll Oscillation
				

Nota. Adaptado de (Blount & Codega, 1992)

1.4.1 Inestabilidad dinámica longitudinal

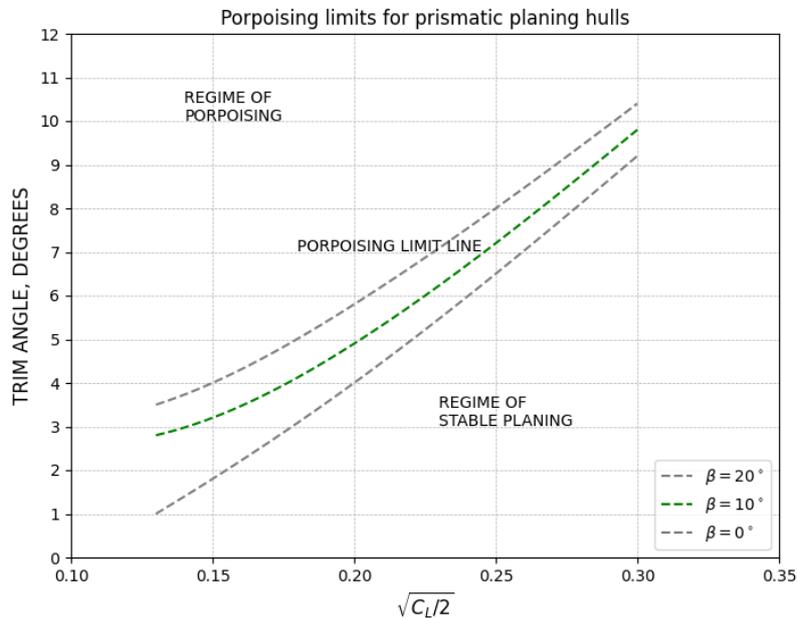
La inestabilidad longitudinal denominada porpoising ha sido responsable de muchos accidentes serios de botes, y en un punto, fue considerada un fenómeno desconocido y misterioso (Savitsky, 1964). Debido al constante aumento de velocidad este fenómeno que puede causar un problema importante en el diseño de embarcaciones rápidas, definido como las oscilaciones combinadas en levantamiento y cabeceo de amplitud sostenida o creciente que ocurre al planear en aguas tranquilas (Savitsky, 1964). Tal fenómeno ocurre cuando el sistema se vuelve inestable en las proximidades del punto de equilibrio (Hamada & Maki, 2024). En la Figura 3 se presenta un gráfico que presenta zonas de planeo estable e inestable que se relaciona con el ángulo de trimado dinámico y el coeficiente de sustentación para distintos ángulos de astilla muerta. El coeficiente de sustentación se define la ecuación 1.1, que se muestra a continuación.:

$$C_{L\beta} = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho v^2 b^2} \quad (1.1)$$

Donde Δ representa el peso en lb, ρ es la densidad de masa del agua en w/g, w es el peso específico del agua en pcf (pounds per cubic feet), g es la aceleración de la gravedad en ft/sec², v es la velocidad horizontal de superficie de planeo en fps, b es la manga de superficie de planeo en ft.

Figura 3

Límites de porpoising para cascos prismáticos de plano



Nota. Adaptado de (Savitsky, 1964)

1.4.2 Inestabilidad dinámica transversal

Las medidas tradicionales de estabilidad transversal involucran la altura metacéntrica GM y la variación del brazo adrizante GZ. Sin embargo, en ellas no interviene el movimiento dinámico, siendo los centros de fuerza dinámico e hidrostáticos diferentes. Entonces para un análisis dinámico debe referirse al momento total restaurador, que contiene los efectos de fuerzas hidrodinámicas e hidrostáticas sobre el casco, así como los efectos de apéndices y de acoplamiento con los otros movimientos (Lewandowski, 1997).

En un análisis de estabilidad tradicional, donde el único grado de libertad considerado es el rolido, la inestabilidad se presenta cuando el momento restaurador en rolido se reduce a cero o se vuelve a negativo. Sin embargo, en el caso de momentos acoplados, la situación es diferente sin, ya que el rolido puede ser inducidos por otros movimientos de la embarcación (Lewandowski, 1997).

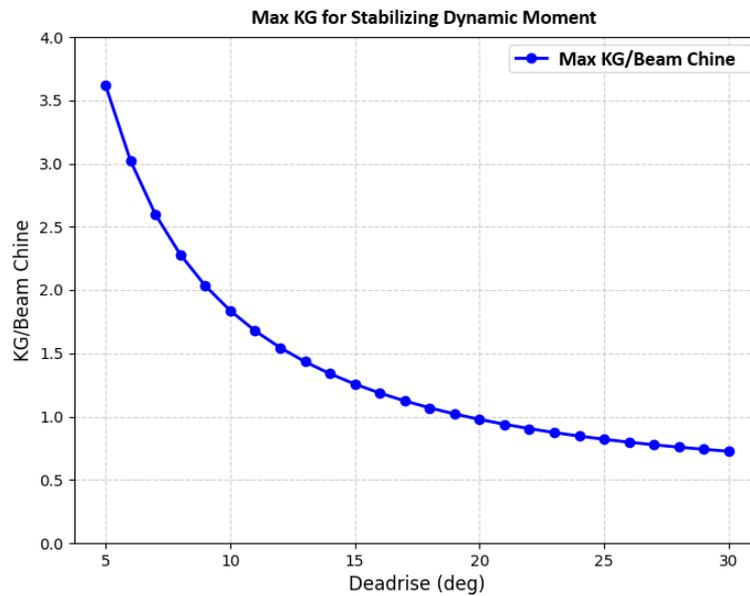
Las embarcaciones rápidas pueden presentar características de inestabilidad que dependen de la velocidad. Mientras que estas inestabilidades pueden tomar muchas formas una de ellas es conocida como Chine walking. Este comportamiento ocurre cuando las fuerzas dinámicas son significativas al compararlas con las fuerzas de boyantez (Blount & Codega, 1992). Este fenómeno incluye oscilaciones de rolido que además de la velocidad están asociadas con el planeo de una embarcación cuyo casco tiene china.

$$\left(\frac{KG}{b}\right)_{MAX} = \frac{0.8\pi}{8 \sin \beta \cos \beta} \quad (1.2)$$

La ecuación 1.2 representa el valor máximo de la altura del centro de gravedad (KG) en la relación al ancho de la embarcación (b) para asegurar la estabilidad en rolido de una embarcación planeadora. Esta fórmula se basa en el análisis del momento de restauración en rolido, donde se considera el ángulo de astilla muerta (β) para evaluar cómo las fuerzas de sustentación y el brazo de palanca afectan la estabilidad. Los factores $\sin\beta$ y $\cos\beta$ capturan la influencia de este ángulo de sustentación, que pueden estabilizar o desestabilizar el rolido. Sin embargo, lo interesante ocurre cuando debido a efectos dinámicos, el valor máximo de KG se reduce, lo que indica que la estabilidad puede verse comprometida en determinadas condiciones. (Lewandowski, 1998)

Figura 4

KG/b en función del ángulo de astilla muerta



Nota. Adaptado de (Lewandowski, 1998)

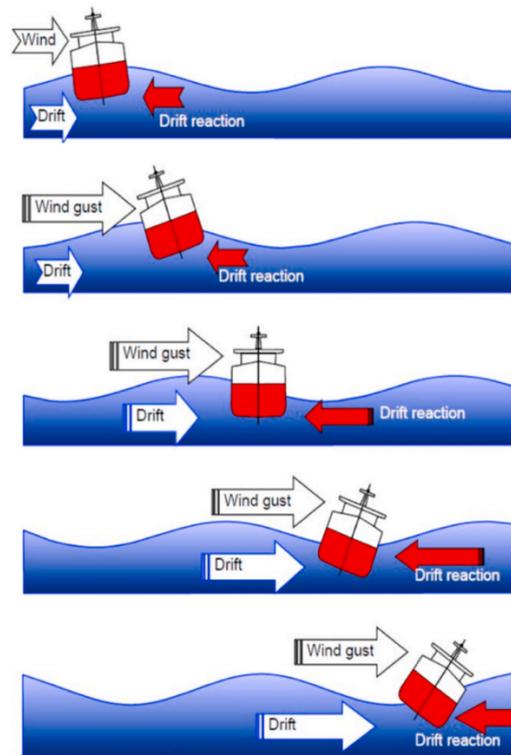
La Figura 4 ilustra visualmente como el máximo valor de KG cambia con respecto a diferentes ángulos de astilla muerta. Además, se observa que a medida que el ángulo de astilla muerta aumenta, el valor máximo de KG/b permitido para mantener la estabilidad disminuye. Esto indica que a mayores ángulos de astilla muerta se reduce la estabilidad en rolido debido a una menor efectividad en la sustentación dinámica del casco. (Lewandowski, 1998)

1.4.3 Condición *Dead-ship*

En el modo de falla conocido como condición “dead-ship” de la OMI, el criterio meteorológico considera una variedad de elementos que pueden tener un impacto en la capacidad del buque para operar con seguridad en el mar. Altura de la ola, velocidad del viento, y estado del mar son algunos de estas variables (Shin & Chung, 2021).

Figura 5

Sucesión de eventos de falla de estabilidad en condición "dead-ship"



Nota. Adaptado de (Shin & Chung, 2021)

En la Figura 5 se presentan los eventos que llevan a una falla debido a la condición “Dead-Ship”. Donde primero una embarcación pierde su potencia y empieza a recibir las olas desde su costado, por lo que el buque se encuentra en rolado en olas y a la deriva debido al viento. Luego, se produce una ráfaga de viento repentina cuando el buque se escoraba en la dirección opuesta al viento. El barco empieza a oscilar bajo la combinación de las olas y la acción del viento. La velocidad de la oscilación y la reacción producida comienzan a aumentar. Entonces, el barco continúa oscilando en dirección del viento, mientras que la velocidad de la oscilación y la reacción continúan aumentando y generando un momento de escora adicional. Finalmente, el buque ha alcanzado un ángulo máximo de escora en la dirección del viento, el cual es probablemente el instante en el que falla la estabilidad (Shin & Chung, 2021).

Capítulo 2

2. Metodología

Mediante el uso de programación en lenguaje Python se implementaron las formulaciones para evaluar los fenómenos de inestabilidad dinámica conocidos como *porpoising*, *chine Walking*, *KG dinámico máximo*. Los datos utilizados en el programa provinieron de información referente a las formas de las lanchas y a medidas relacionadas con el movimiento como puede ser la velocidad. Por otro lado, existe información específica sobre las lanchas que sufrieron incidentes en las Galápagos es confidencial y no está disponible para el público porque se determinaron empíricamente.

Conociendo que las inestabilidades dinámicas más frecuentes en este tipo de embarcaciones ocurren tanto en el plano transversal como en el longitudinal, debido a las oscilaciones de roldo y a las oscilaciones de cabeceo y levantamiento, respectivamente. Un punto crítico es la pérdida de potencia de la embarcación, momento en el cual esta se vuelve vulnerable al impacto de las olas, lo que requirió analizar la estabilidad mediante los criterios de estabilidad de nueva generación, enfocándose así en el modo de falla Dead-Ship por la OMI. Estos factores fueron considerados fundamentales para el análisis correcto del comportamiento dinámico de las embarcaciones.

Se consideraron diferentes Condiciones de carga y un rango de velocidades a lo largo del cual las embarcaciones podrían operar para el caso dinámico, por otro lado, para el caso estático se consideraron distintas Condiciones de ubicación de pasajeros y número de los mismos, para abarcar todas las situaciones reales posibles que se dan en un viaje interislas.

2.1 Breve descripción del Porpoising

De forma general, se puede afirmar que para evitar el fenómeno del porpoising, el ángulo de trimado dinámico de la embarcación debe ser menor que el ángulo de trimado límite a un valor de coeficiente de sustentación respectivo, y considerando el ángulo de astilla muerta.

Como parte del análisis de estabilidad dinámica longitudinal se utilizará la formulación propuesta para determinar el coeficiente de sustentación, además de la formulación para determinar el ángulo de trimado para superficies sin astilla muerta, que se muestra en la ecuación 2.1

$$C_{L_0} = \tau^{1.1} \left[0.012\lambda^{1/2} + \frac{0.0055\lambda^{5/2}}{C_v^2} \right] \quad (2.1)$$

Donde:

τ es el ángulo de trimado

λ es una relación entre la longitud mojada promedio y la manga definida mediante la ecuación 2.2:

$$\lambda = \frac{L_k + L_c}{2b} \quad (2.2)$$

C_v es un coeficiente que depende la velocidad y que se define como:

L_k es la longitud mojada de la quilla

L_c es la longitud mojada de la china

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{gb}} \quad (2.3)$$

La ecuación 2.3 se utilizará de manera iterativa para determinar distintos valores de trimado considerando un rango de coeficientes de velocidad. Luego, para considerar coeficientes de sustentación en el caso de superficies con ángulos de astilla muerta se consideró la expresión de la ecuación 2.4:

$$C_{L\beta} = C_{L_0} - 0.0065C_{L_0}^{0.60} \quad (2.4)$$

Donde

$C_{L\beta}$ es el coeficiente de sustentación para una superficie con ángulo de astilla muerta

β es el ángulo de astilla muerta

C_{L0} es el coeficiente de sustentación de una plancha plana operando al mismo τ , λ , y C_v como en una superficie con ángulo de astilla muerta.

Luego, al haber determinado los parámetros necesarios se hace una revisión en la gráfica propuesta por (Savitsky, 1964) y que puede visualizarse en el apartado del marco teórico, lo cual puede ayudar a determinar de manera precisa si una lancha rápida puede sufrir de inestabilidad por porpoising.

2.2 Breve descripción del Chine Walking

Este cálculo se presenta en Lewandowsky, lo que se pretende es determinar el máximo valor de KG para que este criterio se cumpla. Para evitar el fenómeno del Chine Walking, el negativo de la suma de las contribuciones estáticas a_{1s} y dinámicas a_{1d} al coeficiente de restauración del balanceo junto con la sumatoria que depende de los apéndices debe ser mayor que cero. Para analizar la estabilidad dinámica transversal se aplicará el criterio de Chine Walking, que se muestra en la ecuación 2.5

$$-(a_{1s} + a_{1d} + \sum_i \Lambda_i \sin \tau \cos \phi_{ri}) > 0 \quad (2.5)$$

donde la sumatoria es tomada sobre el número de palas y apéndices. Por otro lado, a_{1s} se define como un parámetro que representa el componente estático del coeficiente de restauración de rolido y a_{1d} se define como la componente dinámica, que se muestra en la ecuación 2.6.

$$a_{1s} \approx 0.624 \left\{ -\rho g \frac{b^3}{48} (L_k + 3L_c) + (KG - \frac{b}{3} \tan \beta) \cdot \Delta_s \right\} \quad (2.6)$$

Donde el factor 0.624 refleja la reducción de sustentación estática debido al desplazamiento de la superficie libre alrededor del casco. Además, el KG es la altura vertical del centro de gravedad. Por su parte, a_{1d} corresponde a la razón de cambio y se muestra en la ecuación 2.7:

$$a_{1d} \approx \frac{K_d(\phi^*)}{\phi^*} (F_{d,port} - F_{d,stbd})_{\phi=0} \cdot \left(0.8 \frac{\pi b}{8 \cos \beta} - KG \sin \beta \right) \quad (2.7)$$

Donde ϕ^* es un ángulo de rolido pequeño y la fuerza dinámica actuando normal a la superficie con Angulo de astilla muerta en el lado de babor se define como indica la ecuación 2.8:

$$F_{d,port} = \frac{1}{2} \rho U^2 b^2 \left\{ \frac{\sin 2\tau}{2 \cos \beta_{e,port}} \left[\frac{\pi}{4} (1 - \sin \beta_{e,port}) \cos \tau \frac{\lambda_{port}}{1 + \lambda_{port}} + \frac{1.33}{4} \lambda_{port} \cos \tau \sin 2\tau \cos \beta_{e,port} \right] \right\} \quad (2.8)$$

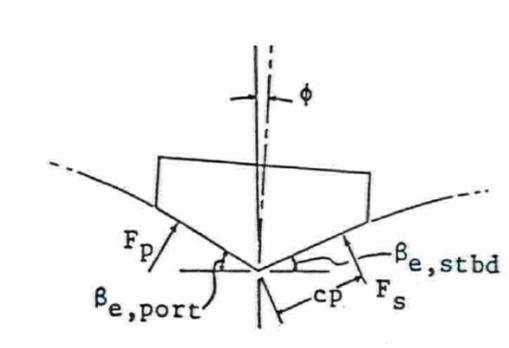
Donde U es la velocidad con la que avanza la embarcación que es estudiada, $\beta_{e,port}$ es el ángulo efectivo de astilla muerta en el lado de babor. Se puede visualizar tal ángulo en la Figura 6. Además de que se puede determinar mediante la ecuación 2.9:

$$\beta_{e,stbd} = \beta - \phi; \beta_{e,port} = \beta + \phi \quad (2.9)$$

Donde el ángulo ϕ es el ángulo de escora de la embarcación al momento de planear.

Figura 6

Ángulos de astilla muerta efectivos para embarcaciones planeadoras a un ángulo de rolido



Nota. Obtenido de (Lewandowski, 1998)

2.3 Condición Dead-ship

Para esta condición se aplica el procedimiento establecido por la OMI (). Cabe recalcar que el criterio de Dead-Ship tiene dos niveles de vulnerabilidad. El primero resume que una embarcación no será vulnerable al modo de falla por condición Dead-Ship si tiene la capacidad de soportar los efectos combinados de viento al costado y rolido, según lo definido

en el marco teórico. En esta ocasión se definirá el nivel de vulnerabilidad 2, el cual considera que una embarcación no será vulnerable al modo de falla por condición Dead-Ship según la ecuación 2.10:

$$C \leq R_{DS0} \quad (2.10)$$

Donde, según indica la ecuación 2.11

$$R_{DS0} = 0.06 \quad (2.11)$$

C es un índice de probabilidad a largo plazo que mide la vulnerabilidad de la embarcación a una falla de estabilidad en la condición de Dead-Ship basada en la probabilidad de ocurrencia de Condiciones medioambientales a corto plazo. C es calculado como un promedio obtenido de un conjunto Condiciones medioambientales a corto plazo, como se indica en la ecuación 2.12:

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{s,i} \quad (2.12)$$

Donde N es el número total de condiciones medioambientales. W_i es el factor de pesos para las Condiciones medioambientales a corto termino. $C_{s,i}$ puede tomar varios valores como 1 u otro determinado a partir de una expresión que depende de un parámetro del tiempo entre otros factores como el Angulo limite virtual a favor del viento o la altura metacéntrica residual, entre otros. Cabe recalcar que, aunque el primer nivel de vulnerabilidad de Dead Ship puede indicar si una embarcación es vulnerable el segundo nivel es mucho más detallado y por lo tanto más confiable, debido a ello, solo el segundo nivel fue implementado.

2.4 Implementación en lenguaje Python

Python fue seleccionado como el lenguaje de programación para este estudio debido a su versatilidad y la amplia gama de librerías matemáticas disponibles. Estas librerías permitieron realizar cálculos complejos y generar gráficos, facilitando así la visualización de los resultados. Además, el entorno de desarrollo integrado (IDE) PyCharm, que es gratuito

para la comunidad, ofreció un entorno completo con acceso a numerosas funciones avanzadas, lo cual facilitó significativamente el desarrollo y análisis. Esto convirtió a Python en una opción accesible, eficiente y práctica para abordar los objetivos del proyecto.

Se implementaron en el lenguaje de programación mencionado las formulaciones detalladas en las referencias relacionadas a Porpoising, KG dinámico y Dead-Ship, Chine Walking por otro lado fue calculado usando Microsoft Excel. Además, se utilizó información de embarcaciones con Condiciones similares a las que sufrieron incidentes en las islas Galápagos, lo cual se detalla en el siguiente subcapítulo. Los datos de dichas embarcaciones fueron evaluados mediante los programas implementados y que luego ayudaron a determinar si dichas embarcaciones podrían llegar a sufrir problemas debido a los fenómenos mencionados en este apartado. De tal manera, que se puedan tomar en consideración los resultados para prevenir que alguna otra lancha rápida llegue a sufrir situaciones similares, basados en lo obtenido en este estudio.

2.5 Obtención de Datos y Selección de Muestras

Luego de revisar la información de algunas fuentes, se seleccionaron 3 casos a ser analizados. Dado que las situaciones tanto dinámica como estática son distintas, se consideraron 3 situaciones distintas para cada caso.

Dado que no fue posible obtener las características de las lanchas rápidas que naufragaron en las Galápagos debido a que esta información es clasificada, se utilizó una lancha de la Armada como punto de partida para el estudio, además, mediante mediciones y experimentos, se obtuvo la información necesaria para el análisis.

Por su parte, también se realizaron pruebas que se detallan a continuación en la lancha disponible en el lago de la FIMCM en Espol. De igual manera, se modelaron los planos de líneas de formas de esta.

Finalmente, la tercera lancha que se utilizo es otra lancha rápida de la que existía información disponible, que, aunque no abarcaba todas las necesidades para el análisis sirvió bien como punto de partida. La información faltante se determinó con fórmulas empíricas.

A partir de aquí se conocerá a la lancha de la Espol como lancha 1, a la de la armada como lancha 2 y la restante sería lancha 3.

2.5.1 *Obtención de parámetros básicos de estabilidad*

Con el objetivo de determinar el valor del GMT, cuya expresión utilizada se muestra en la ecuación 2.13, y el peso de las lanchas se realizaron experimentos de inclinación y cálculos hidrostáticos, posteriores a haber realizado el respectivo levantamiento de planos. La prueba de inclinación consistió en realizar 8 movimientos de pesos conocidos midiendo la distancia que se movían dichos pesos, para determinar el momento escorante. Luego con el valor del calado previamente medido se obtenía el peso hidrostáticamente.

$$GM = \frac{w \cdot d}{W \tan \phi} \quad (2.13)$$

Donde $w \cdot d$ es el momento escorante producido al mover un peso, w , a bordo del barco transversalmente a través de una distancia, d . W es el desplazamiento de la embarcación. Φ es el ángulo de escora transversal.

Se realizó también pruebas de rolido para determinar el valor del periodo, cuya ecuación se muestra en 2.14, ya que conocido el GMT sirve para determinar el K_{xx} , mediante una expresión que brinda la IMO, para complementar los parámetros necesarios para los cálculos realizados. Finalmente, se realizó las pruebas de rolido también se pudo determinar el coeficiente de amortiguamiento.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K_{xx} \cdot \lambda^2}{g \cdot GMT}} \quad (2.14)$$

Donde K_{xx} es el radio de giro que se puede representar como un porcentaje de la manga y T es el periodo de rolo.

2.5.2 Condiciones para analizar

Para realizar los cálculos en este estudio, se analizaron diferentes condiciones en escenarios tanto estáticos como dinámicos. En el análisis dinámico, se consideraron tres condiciones: una al inicio del viaje, cuando la lancha salía del puerto con el número máximo de pasajeros y el tanque de combustible completamente lleno, otra cuando el tanque de combustible se encontraba a la mitad de su capacidad y otra al final del trayecto, al llegar a puerto con la mitad de la carga de pasajeros y 10% de combustible, simulando un viaje típico entre las islas del archipiélago de las Galápagos. Por otro lado, en el análisis estático se evaluaron tres escenarios distintos para simular posibles distribuciones de peso durante el trayecto. Estas condiciones incluyeron: la situación en la que todos los pasajeros estaban sentados en sus asientos, otra en la que los pasajeros se encontraban de pie y otra en la que se concentraban en la popa. El objetivo de este análisis estático fue contemplar todas las situaciones que podrían presentarse en caso de que la embarcación perdiera potencia y quedara sin propulsión por alguna razón, aclarando que este escenario no es dinámico y, por lo tanto, no involucra movimiento.

Tabla 1

Parámetros obtenidos para los cálculos

	Lancha 1			Lancha 2			Lancha 3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
GMT [m]	0.213	0.118	0.088	0.033	0.021	0.026	3.697	3.645	3.561
ζ	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.12	0.12	0.12
T [s]	1.67	2.24	2.6	2.87	3.6	3.23	1.7	1.72	1.765

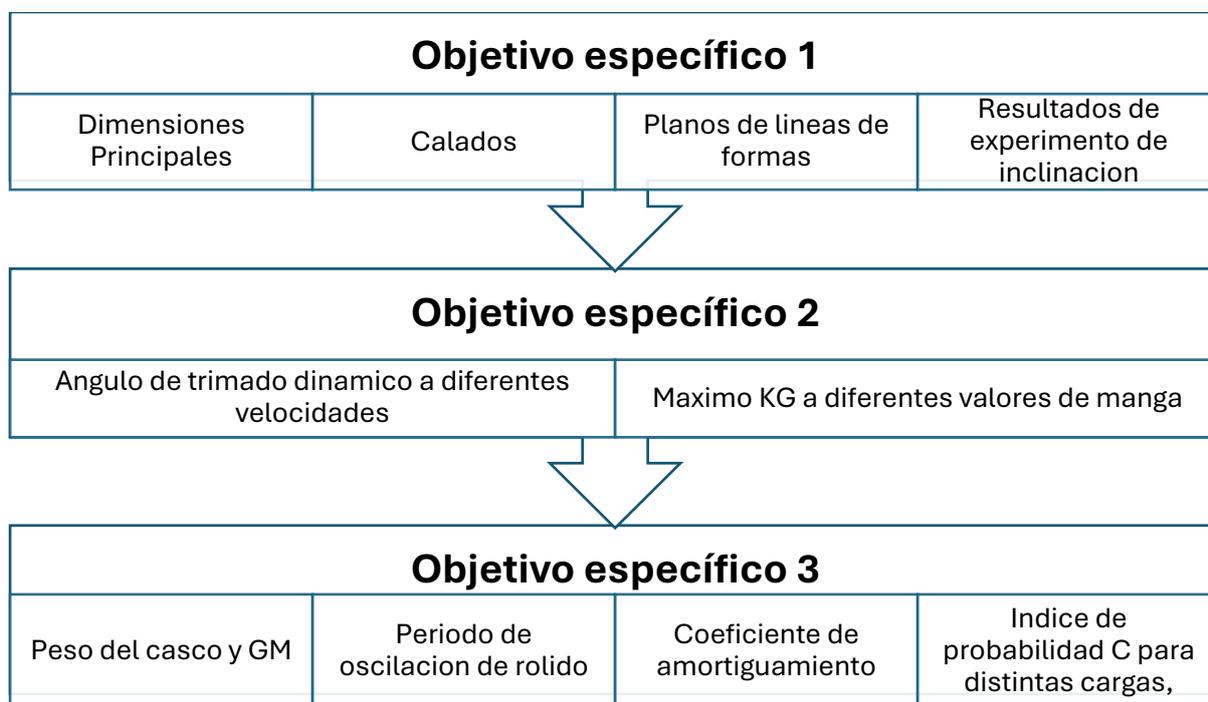
Los datos obtenidos en la Tabla 1 fueron obtenidos combinando el uso de las formulaciones previamente descritas y el software Maxsurf tanto en sus módulos modeler como stability, el cual fue usado también para determinar la curva de brazos adrizantes, GZ, necesaria para realizar el cálculo del modo de falla Dead-Ship.

2.6 Resultados a obtener

El primer objetivo específico, relacionado con la revisión de información, permitió encontrar ciertos patrones que se repetían cuando sucedían los ya mencionados incidentes. También incluyó la determinación de las dimensiones principales, los calados, el plano de líneas y los resultados del experimento de inclinación. El segundo objetivo específico, enfocado en el análisis del comportamiento dinámico, comprendió el cálculo del ángulo de trimado dinámico a distintas velocidades y la determinación del valor máximo de Kg bajo esas Condiciones. Finalmente, el tercer objetivo específico, vinculado a la condición de "Dead-Ship", incluyó el análisis del peso del casco y el GM, el período de oscilación en rolo, el coeficiente de amortiguamiento y el índice de probabilidad C en diferentes Condiciones de carga. Cabe recalcar que la condición "Dead-Ship", está diseñada según los estándares de la Organización Marítima Internacional (IMO) para embarcaciones mayores a 24 metros de eslora. Sin embargo, dado que en este estudio se analizaron embarcaciones menores a ese límite, se tomaron en cuenta precauciones adicionales para realizar un análisis que sea válido y aplicable en estas condiciones.

Figura 7

Resultados respecto a los 3 primeros objetivos específicos



Este análisis exhaustivo que se visualiza en la Figura 7 permitió evaluar la seguridad de las embarcaciones en situaciones reales de operación, considerando tanto la distribución de los pasajeros y el combustible como los diferentes escenarios de velocidad.

2.7 Análisis Económico

En Ecuador, el mercado de seguros marítimos contaba con varias aseguradoras y corredores especializados que ofrecían cobertura para embarcaciones comerciales. Las pólizas específicas para el casco y maquinaria de embarcaciones eran fundamentales, ya que ofrecía protección ante daños a la estructura de la embarcación o a componentes esenciales, como motores y equipos mecánicos, derivados de colisiones, encalladuras y otros riesgos comunes en la navegación.

Otras aseguradoras también incluían opciones de cobertura para embarcaciones comerciales y recreativas en algunos de sus productos. Estas aseguradoras, aunque no

siempre especializadas exclusivamente en el sector marítimo, ofrecían seguros que cubrían un rango más amplio de riesgos para embarcaciones en operaciones en los ríos, mares y costas ecuatorianas.

Para estimar la valuación de la embarcación y la prima a pagar por parte del armador de la lancha se utilizaron formulaciones obtenidas de (Flores Delgado, 2011), las cuales se detallan primero en la ecuación 2.15:

$$VT = V + (HP \times 60) \quad (2.15)$$

Donde VT es el valor total actual en USD, V es el valor del casco representado como 250 veces el número cubico, que se obtiene al multiplicar la eslora, la manda y el puntal, luego, HP es la potencia del motor fuera de borda en esa misma unidad.

Tabla 2

Tabla para corrección de avalúo por años de servicio

Años de operación	Valor total actual
0	VTA = VT x 1.000
1	VTA = VT x 0.955
2	VTA = VT x 0.910
3	VTA = VT x 0.86
4	VTA = VT x 0.82

Nota. Adaptada de (Flores Delgado, 2011)

Luego, la Tabla 2 muestra la devaluación del valor total de la embarcación durante 5 años y como calcularla.

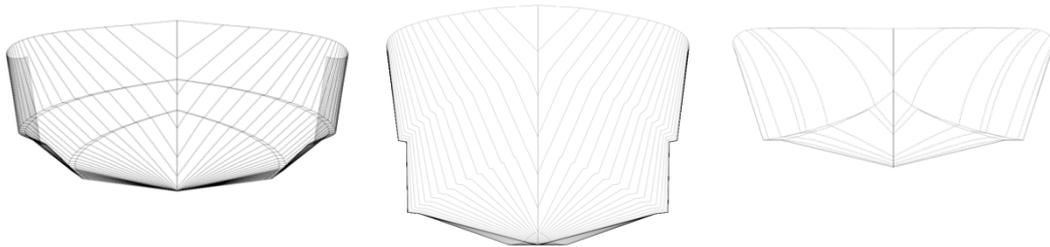
Capítulo 3

3. Resultados y análisis

A partir del levantamiento de planos de las lanchas, se realizó un modelado 3D en Rhinoceros, el cual fue exportado a Maxsurf Modeler.

Figura 8

Plano de líneas de forma de las lanchas. Lancha 1 (Izq), Lancha 2 (centro), Lancha 3 (der)



En la Figura 8 se presentan los planos de líneas de forma de las lanchas.

Tabla 3

Dimensiones principales de las lanchas utilizadas

	Lancha 1	Lancha 2	Lancha 3
Eslora [m]	7.5	11.32	12.02
Manga [m]	1.86	2.3	3.45
Puntal [m]	1.05	1.8	1.51
Calado [m]	0.358	1.013	0.515
Desplazamiento [ton]	2.6	15.64	8.9

La Tabla 3 muestra las principales dimensiones de las embarcaciones. El desplazamiento en cada situación se presenta en la condición de carga máxima, tanto de pasajeros como de combustible.

3.1 Condiciones de Carga para Análisis Dinámico

La situación dinámica presenta sus propias consideraciones a tomar en cuenta, tanto en relación con los parámetros que se usan como en las condiciones que se analizan.

Tabla 4

Condiciones de carga para análisis dinámico

Condiciones de Carga	Pasajeros	Combustible	Lancha	Lancha	Lancha
			1	2	3
Condición 1	100%	100%	X	X	X
	Sentados				
Condición 2	100%	50%	X	X	X
	Sentados				
Condición 3	100%	10%	X	X	X
	Sentados				

Para llevar a cabo el análisis dinámico de las embarcaciones, se utilizaron las condiciones especificadas en la Tabla 4. Estas Condiciones se aplicaron a cada uno de los modelos. Este enfoque permitió realizar una comparación más amplia y detallada de los fenómenos de Porpoising, Chine Walking y KG Dinámico entre los diferentes modelos, facilitando una evaluación más precisa de su comportamiento dinámico.

3.1.1 Análisis de Porpoising

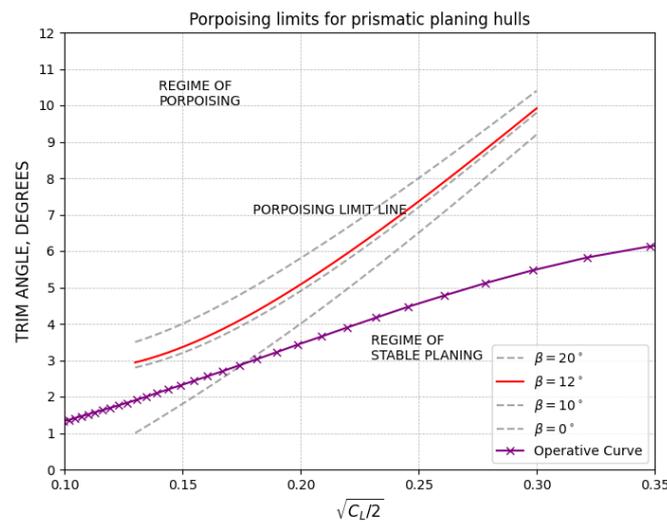
Savistky(1964) proporciona una gráfica detallada para analizar el comportamiento dinámico por porpoising, estableciendo límites de astilla muerta entre 0° a 20° . Según estas curvas, se estimó la astilla muerta de nuestras embarcaciones de 12° y 14° . En esta misma grafica nos muestra si la lancha se encuentra en el régimen de porpoising o en el régimen de planeo estable.

3.1.1.1 Lancha 1 al 50% de Capacidad de Tanques y Pasajeros Sentados. En

el análisis realizado se consideraron rangos de velocidad, que para el caso del fenómeno Porpoising, daba los siguientes resultados.

Figura 9

Lancha 1 Condición 50%



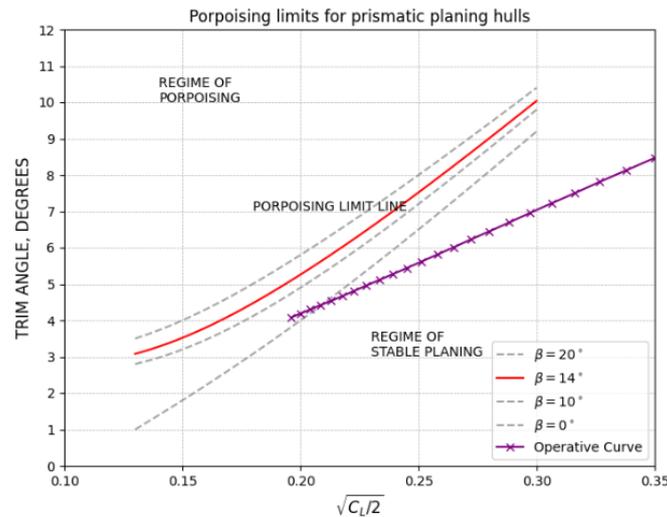
En la Figura 9 podemos observar la curva operativa cubre todo el rango de velocidades desde 1.94 a 97.2 nudos hasta la cual comienza y se mantiene dentro del régimen de planeo estable, por debajo de la línea límite de porpoising para este caso es de 12° de astilla muerta, sin embargo, al aumentar la velocidad, la curva operativa se acerca a los límites.

3.1.1.2 Lancha 2 al 50% de Capacidad de Tanques y Pasajeros Sentados. En

el caso de la segunda lancha, se presenta lo siguiente.

Figura 10

Lancha 2 Condición 50%

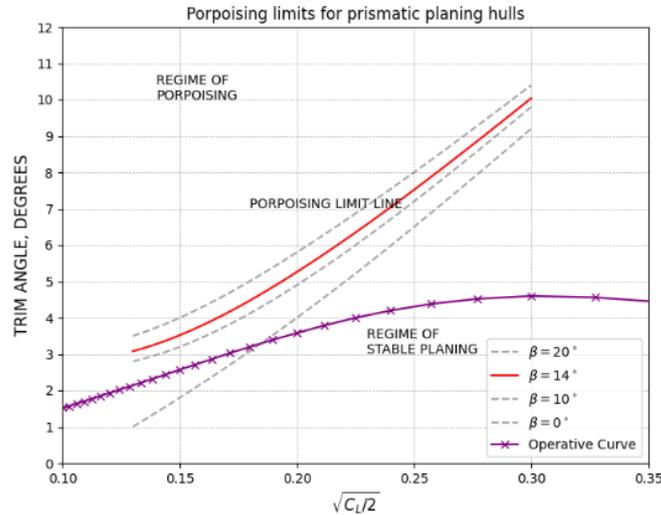


En la Figura 10 podemos observar que la curva operativa cubre un rango limitado, desde 38.87 a 97.2 nudos, pero permanece completamente dentro del régimen estable.

Tenemos un margen más amplio con respecto al límite de porpoising en este caso 14° de astilla muerta, podemos asegurar que este modelo es más estable.

3.1.1.3 Lancha 3 al 50% de Capacidad de Tanques y Pasajeros Sentados. En

el caso de la tercera lancha, se presenta lo siguiente.

Figura 11*Lancha 3 Condición 50%*

En la Figura 11 observamos que la curva operativa cubre todo el rango de velocidades desde 1.94 a 97.2 nudos, manteniéndose dentro del régimen estable. A diferencia del caso de la lancha de 1 la curva operativa no intenta sobrepasar el límite de porpoising.

3.1.2 Análisis de KG Dinámico

Lewandowsky (1998) proporciona una serie de ecuaciones para estimar el máximo KG dinámico estable para embarcaciones rápidas.

3.1.2.1 KG Dinámico sin inclusión de apéndices. Los apéndices, como timones y aletas estabilizadoras, influyen en la hidrodinámica del casco, afectando la distribución de las fuerzas inerciales y de amortiguamiento. Al omitir estos elementos, el análisis podría no reflejar con precisión el comportamiento dinámico real de la embarcación.

Tabla 5

KG dinámico sin apéndices

	Lancha 1	Lancha 2	Lancha 3
Condición 100%	2.60 m	3.20 m	3.74 m
Condición 50%	2.59 m	3.20 m	2.74 m
Condición 10%	2.58 m	3.20 m	2.74 m

Para los modelos analizados consideramos la situación donde estos apéndices y pala no existen por lo cual el momento generado por ellos es cero y solo se considera el valor del momento estático y dinámico de la embarcación. Pero en la Tabla 5 observamos que al no considerar estos momentos pues el valor del KG es demasiado alto llegando a duplicar el puntal de los modelos en cada una de las Condiciones de carga.

3.1.2.2 KG Dinámico incluyendo apéndices. Estas embarcaciones rápidas, tienen motores fuera de borda los cuales disponen de apéndices los cuales cambian el comportamiento del centro de gravedad y su estabilidad a medida que la embarcación acelera.

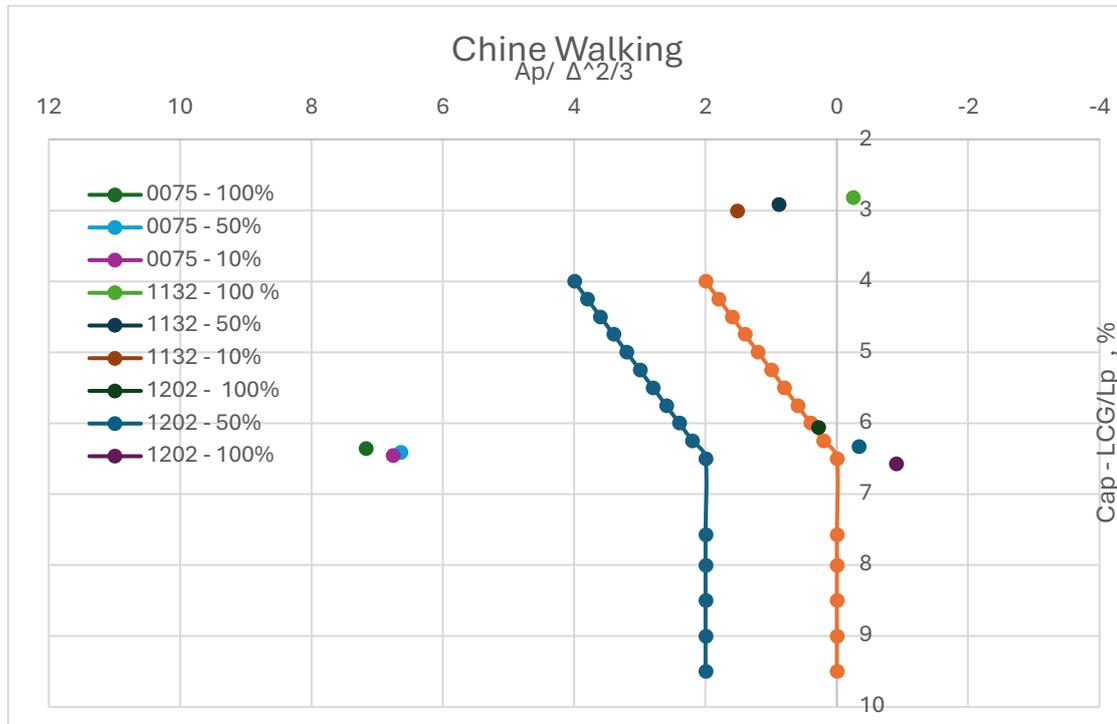
Tabla 6*KG Dinámico incluyendo apéndices*

	Lancha 0075	Lancha 1132	Lancha 1202
Condición 100%	1.16 m	1.54 m	1.62
Condición 50%	1.14 m	1.35 m	1.67 m
Condición 10%	1.14 m	1.25 m	1.70 m

Estos apéndices generan fuerzas que pueden estabilizar el KG dinámico llegando a reducirlo. Observamos en la Tabla 6 como varía el KG dinámico en función de las condiciones de carga operando entre 1.94 a 97.2 nudos. Las lanchas 1 y 2 muestran un comportamiento donde la estabilidad mejora al reducir la carga. Sin embargo, la Lancha 3 muestra un KG dinámico máximo elevado en condiciones de baja carga, lo que puede resultar bueno para la embarcación. Para la definición de los apéndices se consideró los valores establecidos en (Lewandosky, 1998). Dado que disponen de las posiciones (x, y, z) tanto para la pala como los brackets, se estimó un porcentaje en función del LCG, TCG y VCG, respectivamente. Este porcentaje se multiplicó por cada centro de gravedad en cada condición, permitiendo así estimar las posiciones de la pala y brackets de cada lancha analizada.

3.1.3 Análisis de Chine Walking

El trabajo de (Blount & Codega, 1992) propone una forma de evaluación de la inestabilidad tipo chine Walking. La siguiente gráfica se divide en 3 secciones de estabilidad, cuando el cociente del área proyectada de fondo A_p y el peso volumétrico se encuentra en un rango de 2 a 12 se encuentra en el régimen estable, en un rango de 2 a 0 se encuentra en el límite de inestabilidad dinámica transversal y en un rango de 0 a -4 no encontramos en la zona de probable inestabilidad dinámica transversal.

Figura 12*Regimen de Chine Walking*

La Figura 12 muestra que la lancha 1 se encuentra en el rango de 8 a 6 dentro del régimen estable, en todas sus Condiciones de carga permanece en el régimen estable, por lo que es menos propensa a experimentar chine walking, incluso en condiciones dinámicas extremas. La Lancha 2, se encuentra en el rango de 2 a 0 dentro del límite de inestabilidad dinámica transversal, esto implica que dentro de las Condiciones operativas la lancha podría transicionar hacia un comportamiento inestable por lo que se encuentra en un rango crítico. La Lancha 3 se encuentra en la región de 0 a -4 en probable inestabilidad dinámica transversal, siendo altamente susceptible a experimentar chine walking, debido a un centro de gravedad elevado o distribución subóptima que favorecen la inestabilidad.

3.2 Análisis de Dead-Ship

Con respecto al análisis estático realizado mediante Dead-Ship, se consideraron las condiciones descritas en la Tabla 7.

Tabla 7*Condiciones de carga según las lanchas*

Condiciones de Carga	Pasajeros	Combustible	Lancha 7.50 m	Lancha 11.32 m	Lancha 12.02 m
Condición 1	100%	50%	X	X	X
	Sentados				
Condición 2	100%	50%	X	X	X
	Parados				
Condición 3	100 % Popa	50%	X	X	X

Para analizar las 3 embarcaciones, se consideraron varios parámetros de ingreso en el programa de evaluación de Dead-Ship, los cuales se describen en la Tabla 8.

Tabla 8*Parámetros de entrada para las 3 lanchas en las 3 condiciones*

Condiciones	Lancha 1			Lancha 2			Lancha 3		
	C 1	C 2	C 3	C 1	C 2	C 3	C 1	C 2	C 3
GM [m]	0.213	0.118	0.088	0.033	0.021	0.026	1.806	1.755	1.675
AL [m2]	3.86	3.86	4.10	6.70	6.70	6.86	8.9	8.9	9.3
Z [m]	0.44	0.44	0.45	0.802	0.802	0.802	0.669	0.669	0.668
Amortiguamiento [1/s]	0.15	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.34	0.34	0.340
Ángulo de inundación [°]	28	28	18	26	26	24	23	23	15
Frecuencia N. [rad/s]	3.76	3.76	3.76	2.19	2.19	2.19	3.79	3.79	3.79

Obteniendo los siguientes valores de índice de probabilidad C para cada condición.

Tabla 9

Resultados del parámetro C para las 3 lanchas en las 3 condiciones

	Lancha 1			Lancha 2			Lancha 3		
Valor máximo	C 1	C 2	C 3	C 1	C 2	C 3	C 1	C 2	C 3
0.06	0.99	0.99	0.99	0.2354	0.5049	0.5128	0.01956	0.04697	0.4174

Al revisar los valores de la Tabla 9 se nota que con respecto a la lancha 1 los valores del porcentaje obtenidos son muy elevados, estando prácticamente en el límite alcanzable. La lancha 1 opera en un lago que no cuenta con olas, además las condiciones de viento que se presentan ahí no son comparables con las alturas significativas de ola y periodos considerados en el análisis de la OMI, lo que desemboca en que el valor del índice de probabilidad a largo termino C resulte en esos valores tan altos. La condición que se cumple es que el brazo de escora medio por acción del viento supera los valores del brazo adrizante de la embarcación en las 3 condiciones. Además, se puede atribuir tal situación al hecho de que se esté aplicando un método de análisis para embarcaciones con eslora menor al mínimo para cual se recomienda aplicar el criterio del modo de falla por Dead-Ship, según la OMI, el cual es de 24 m de eslora.

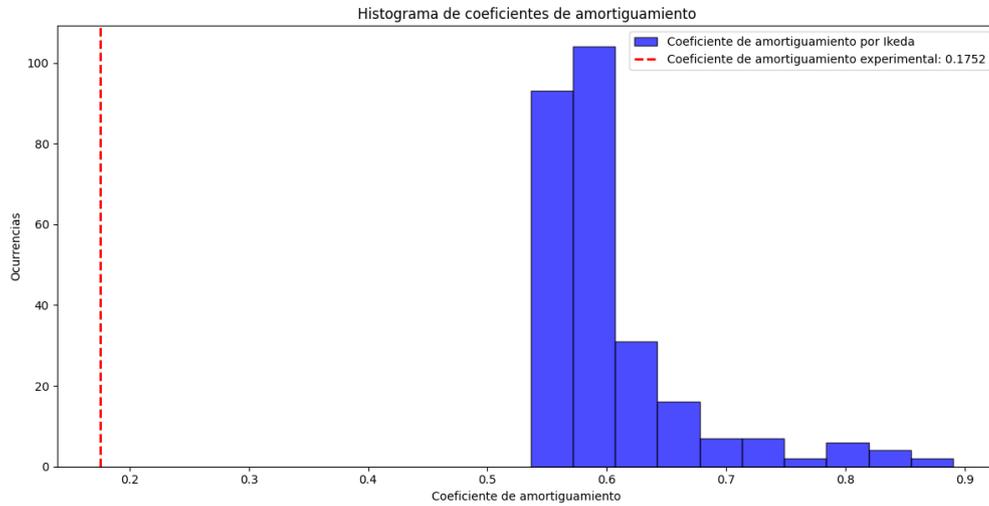
En el caso de los resultados de la Lancha 2, se encuentra que la lancha es propensa a sufrir una falla por modo Dead-Ship en las 3 Condiciones, aunque como se evidencia la condición 3 es la condición en la que se encuentra más expuesta a sufrir de este modo de falla. Se podría atribuir esta situación a que la embarcación probablemente se encuentra sobrecargada de peso, además de que la mayoría de los pesos considerados en las 3 Condiciones de carga se encuentran hacia popa, lo que sin duda termina influyendo en el ángulo de trimado de la lancha.

En los resultados de la Lancha 3 que se pueden ver en la tabla 13, se puede notar que la embarcación puede sufrir de la falla de modo Dead-Ship en la tercera condición, que es cuando los pasajeros se encuentran en popa, puede influir el hecho de que, al estar los pasajeros en popa, el ángulo de trimado aumenta lo cual termina influyendo en la estabilidad transversal de la lancha.

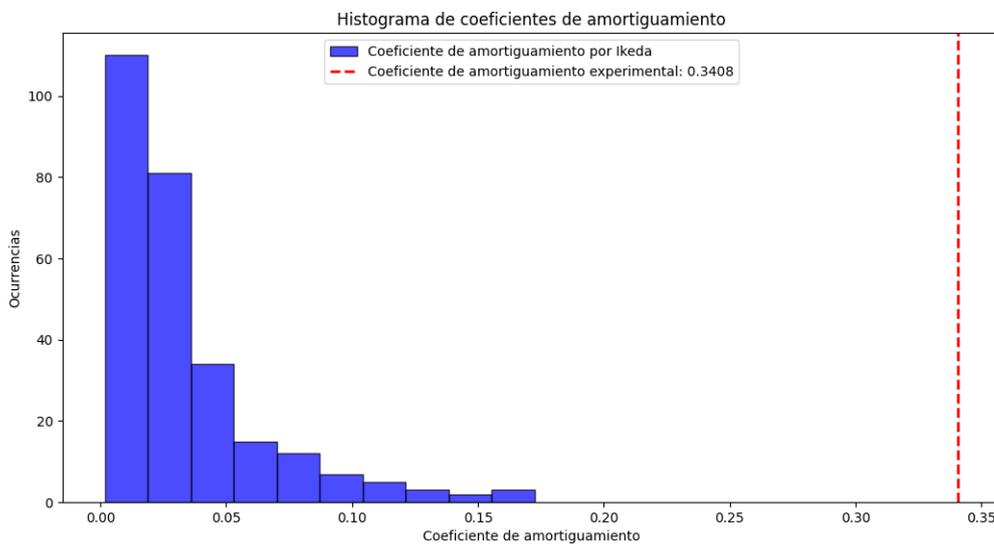
Otro factor que tiene gran influencia en los resultados obtenidos es el hecho de que el factor de amortiguamiento que se está estudiando, utilizando el método simplificado de Ikeda de acuerdo con (Kawahara et al., 2009). Sin embargo, este método está diseñado para embarcaciones con dimensiones mayores de acuerdo con los rangos de aplicabilidad de uno de los coeficientes que se calculan en dicho método el cual establece $2.5 B/d < 4.5$. Aunque, en las lanchas usadas los valores de B/d son 5.32, 2.39 y 6.83 para las lanchas 1, 2 y 3 respectivamente. De manera que este método no es aplicable a ninguna de las lanchas analizadas. En la Figura 13 y Figura 14 se grafican los histogramas de los valores del coeficiente de amortiguamiento que se emplean para evaluar estabilidad de las lanchas. Además, se incluye el valor obtenido en la primera parte de este proyecto y se nota que los resultados distan en sus valores.

Figura 13

Coefficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la condición 1

**Figura 14**

Coefficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la condición 1

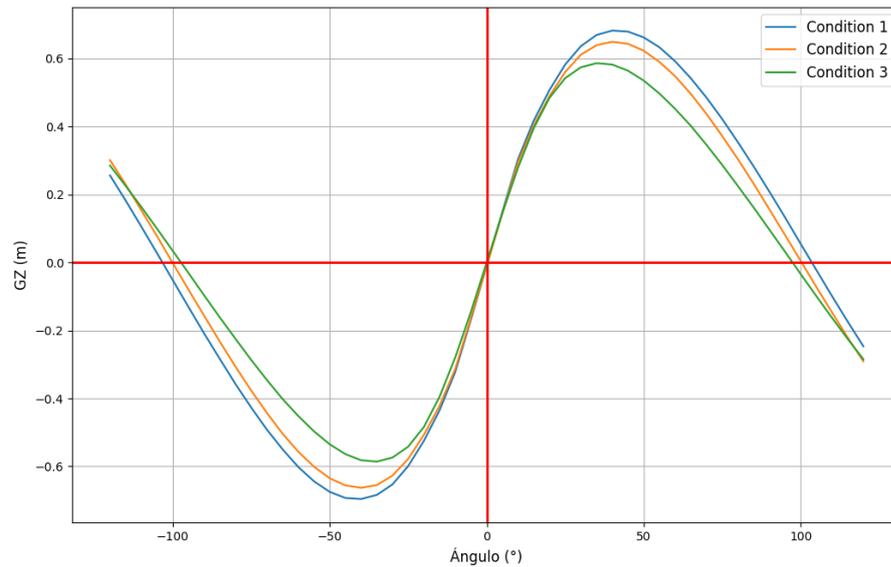


Se evidencia la diferencia entre los valores encontrados por el método simplificado de Ikeda utilizando el código y los valores de amortiguamiento obtenidos experimentalmente en las lanchas 2 y 3. Tal diferencia definitivamente tiene influencia en los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran las gráficas de los brazos adrizantes, GZ, en las 3 condiciones consideradas para la lancha 3.

Figura 15

Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 3 en las tres condiciones

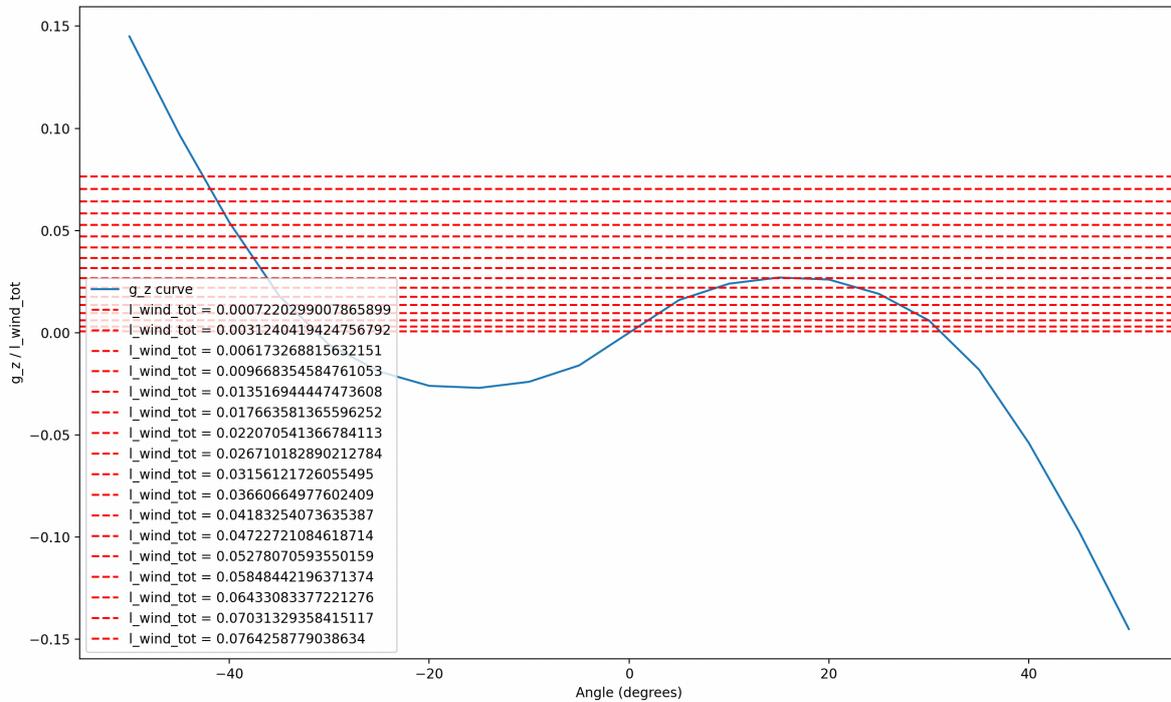


La Figura 15 muestra los gráficos de la curva adrizante de la lancha 3, las cuales fueron obtenidas analizando la condición de estabilidad a grandes ángulos usando el software Maxsurf en su modulo Stability. Se evidencia la diferencia de valor máximo GZ que tienen las 3 condiciones. La condición 1 contaría con mayor estabilidad que las otras 2 debido a que cuenta con mayor área bajo la curva GZ, lo cual se evidencia en la tabla 8.

Sin embargo, en la Figura 16 se muestra una comparación en cuanto a los brazos escorantes con respecto de la curva de brazos adrizantes.

Figura 16

Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 1 en la primera condición contrastando los brazos escorantes por acción del viento



Los brazos escorantes calculados son mayores que el valor máximo de la curva GZ, lo cual impide que el cálculo pueda ser terminado mediante el código, así que simplemente se sigue el método del segundo nivel de vulnerabilidad según la IMO.

En la sección de anexos se encuentra las gráficas generadas por el código implementado para las lanchas 2 y 3 en las 3 condiciones de carga analizadas.

3.3 Análisis económico

Se calcularon los valores totales de la lancha 3 a lo largo de 5 años de vida útil, así como la prima anual a pagar a la aseguradora, equivalente al 3% del valor total cada año. Los valores se detallan en la Tabla 10

Tabla 10*Resultados del análisis económico*

Análisis económico	Año	Año	Año	Año	Año
	Operacional	Operacional	Operacional	Operacional	Operacional
	1	2	3	4	5
Valor de lancha 3 [\$]	28087	26823	25559	24155	23031
PRIMA [\$]	843	805	777	725	691
Compensación del Seguro [\$]	25278	24141	23003	21739	20728
Pérdida después del pago del seguro [\$]	3652	4330	4981	5566	6144

La Tabla 10 refleja la depreciación progresiva de la lancha 3 a lo largo de cinco años, con una reducción en su valor de 28,087 USD en el primer año a 23,031 USD en el quinto. Esta disminución afecta directamente la prima del seguro, que equivale al 3% del valor anual y disminuye de 843\$ a 691\$ en el mismo período. A pesar de que el seguro ofrece una compensación en caso de siniestro, esta también se reduce con el tiempo, pasando de 25,278 USD en el primer año a 20,728 USD en el quinto, en proporción de depreciación del activo.

El aumento de la pérdida después del pago del seguro, que aumenta de 3,652 USD a 6,144 USD a medida que avanza la vida útil de la lancha. Esto sugiere que, con el tiempo, el porcentaje no cubierto por la aseguradora se vuelve más significativo, lo que incrementa el

riesgo financiero para el propietario. En consecuencia, es importante el riesgo financiero para el propietario. En consecuencia, es importante evaluar estrategias para mitigar estas pérdidas, como renegociar la prima del seguro o considerar planes de mantenimiento que extiendan la vida útil del activo.

En términos económicos, la relación entre la depreciación del valor de la lancha 3, la reducción de cobertura del seguro y el aumento de las pérdidas netas indica que la inversión en este tipo de embarcaciones requiere una planificación cuidadosa. A medida que el activo envejece, se vuelve menos rentable y más costoso de mantener lo que podría justificar la necesidad de reemplazo o mejoras estructurales para optimizar su uso a largo plazo.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Se estudió la estabilidad dinámica y estática de lanchas rápidas en Galápagos aplicando criterios como porpoising, chine walking, Kg dinámico y Dead-Ship. Se realizaron pruebas de inclinación, rolido y amortiguamiento, usando el método de Ikeda. El objetivo fue, determinar si las lanchas serian vulnerables o no a los fenómenos analizados. Además, también se trata de verificar la aplicabilidad del método de Ikeda para lanchas rápidas. Finalmente, se deseaba verificar que tan confiable son los resultados obtenidos mediante el cálculo de la condición Dead-Ship.

4.1 Conclusiones

4.1.1 Patrones de accidentes

Las lanchas rápidas utilizadas en el transporte interislas en las Islas Galápagos presentan ciertos riesgos debido a las limitaciones en la aplicabilidad de criterios convencionales para evaluar su estabilidad y seguridad. Debido a que existe falta de registros de información relevante a la estabilidad de la embarcación en algunos casos, y en el resto de casos muchas veces la información que existe no es confiable. Por otro lado, de la revisión de las fuentes consultadas se obtuvo que algunos incidentes ocurrían cuando las embarcaciones estaban sin potencia.

4.1.2 Inestabilidades dinámicas

El comportamiento dinámico de las lanchas rápidas es un factor clave en su seguridad operacional. En este sentido, la lancha 1 se caracteriza por una gran estabilidad a velocidades bajas y medias. Sin embargo, a altas velocidades y con ángulos de trimado mayores a 10 grados, se aproxima al régimen de porpoising, lo que podría generar inestabilidad dinámica. En contraste, la lancha 2 muestra un comportamiento más seguro en estas condiciones, ya que su curva operativa se mantiene alejada del límite de porpoising, lo que indica un diseño adecuado para la navegación a alta velocidad. Por otro lado, la lancha 3 sigue un patrón

similar al de la lancha 1, presentando estabilidad en un amplio rango de velocidades, pero podría requerir ajustes para operar con mayor seguridad en escenarios más exigentes. Estos hallazgos subrayan la importancia de las características geométricas y la correcta distribución de pesos para garantizar la estabilidad dinámica transversal en embarcaciones de planeo.

4.1.3 Vulnerabilidad por Dead-Ship

Se concluye que las embarcaciones menores a 24 metros de eslora no tienen una buena afinidad con el segundo nivel de vulnerabilidad del criterio del modo de falla Dead-Ship. Aparte, las lanchas rápidas no cumplen con las restricciones necesarias para la aplicabilidad del método simplificado de Ikeda para determinar el coeficiente de amortiguamiento.

4.1.4 Económico

El análisis refleja una relación inversa entre el valor de la lancha y la cobertura del seguro, lo que genera pérdidas crecientes para el propietario. Esta situación subraya la necesidad de una planificación financiera adecuada. El envejecimiento del activo reduce su rentabilidad y aumenta el riesgo económico. Por tanto, considerar estrategias de renovación o reemplazo es crucial para mantener la viabilidad económica de la inversión, garantizando un balance positivo entre costos operativos y beneficios a largo plazo.

4.2 Recomendaciones

4.2.1 Patrones de accidentes

Se recomienda llevar registros confiables de información de las embarcaciones para evitar tener que incurrir en formulaciones empíricas, que aunque han sido de mucha ayuda en este proyecto, proveen valores que no necesariamente son exactos o siquiera cercanos a los valores reales de cada lancha.

4.2.2 Inestabilidades dinámicas

Es fundamental investigar a fondo los tipos de motores fuera de borda utilizados, ya que es necesario conocer los apéndices que posee y sus posiciones exactas. Estos elementos juegan un papel crucial en el cálculo del KG dinámico, y su omisión puede resultar en una sobreestimación del valor máximo. Además, en el análisis de la inestabilidad dinámica transversal, es esencial optimizar la distribución de pesos, ya que estos valores influyen directamente en la probabilidad de experimentar este tipo de inestabilidad.

4.2.3 Vulnerabilidad por Dead-Ship

Es recomendable revisar la implementación usada con el método simplificado de Ikeda para encontrar la forma de adaptarlo para lanchas rápidas. Este ajuste permitiría obtener cálculos más precisos y resultados más coherentes con las condiciones reales de las embarcaciones, ayudando a mejorar el análisis de inestabilidades.

También es importante llevar un control minucioso de varios parámetros como el peso y el periodo de rolido, por lo que se recomienda realizar las pruebas de rolido necesaria para determinar dichos parámetros, también se podría considerar realizar pruebas de decremento logarítmico, para determinar valores experimentales de coeficiente de amortiguamiento.

4.2.4 Económico

Dado el aumento de las pérdidas netas a medida que la lancha 3 envejece, es fundamental implementar estrategias para reducir el riesgo financiero. Una opción es negociar las primas del seguro, buscando descuentos por fidelidad o reducción de riesgo. También se recomienda realizar un mantenimiento preventivo que prolongue la vida útil del activo y disminuya su depreciación. Evaluar periódicamente el valor residual de la lancha permitirá tomar decisiones acertadas sobre su reemplazo antes de que los costos de mantenimiento superen los beneficios operativos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, I. (2024). *Comunicación Personal*.
- Blount, D. L., & Codega, L. T. (1992). Dynamic Stability of Planing boats. *Marine Technology*, 29(1), 4–12.
- Buro Galapagos. (2024, September 26). *Por fuerte oleaje, lancha de pesca Humberta sufrió un siniestro mientras navegaba en la Reserva Marina de Galápagos*. Facebook Post. <https://www.facebook.com/100063804105435/posts/990877806382347/?mibextid=WC7FNe&rdid=fgkwVwSiK3eo9r8b>
- Flores Delgado, E. E. (2011). *La Importancia del Peritaje Marítimo en Buques de Pesca Artesanal para Armadores y Compañías de Seguros en el Ecuador*.
- Fridsma, G. (1969). *A systematic study of the rough-water performance of planing boat*.
- Fridsma, G. (1971). *A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats*.
- Hamada, S., & Maki, A. (2024). Linear and nonlinear analyses of the porpoising dynamics of high-speed planing craft using full-scale trial data. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 29(1), 93–104. <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00972-3>
- HSC Code. (2008). *International Code of Safety for High-Speed Craft Instructions for the Guidance of Surveyors*.
- Josipovic, A. :, Promoteur, M., & Rigo, P. (2023). *Application of the Second Generation Intact Stability Criteria in Freeboard assessment*. <https://lib.uliege.be><https://matheo.uliege.be>
- Kawahara, Y., Maekawa, K., & Ikeda, Y. (2009). *A SIMPLE PREDICTION FORMULA OF ROLL DAMPING OF CONVENTIONAL CARGO SHIPS ON THE BASIS OF IKEDA'S METHOD AND ITS LIMITATION*.
- Lewandowski, E. M. (1997). Transverse Dynamic Stability of Planing Craft. In *Marine Technology* (Vol. 34, Issue 2).

- Lewandowski, E. M. (1998). *The Transverse Dynamic Stability of Hard-chine Planing Craft* (Issue 2).
- Lewandowski, E. M. (2004). *THE DYNAMICS OF MARINE CRAFT Maneuvering and Seakeeping* (Word Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Ed.; Vol. 22).
- Redacción Plan V. (2022, December 6). *Tragedia en Galápagos: el naufragio de la lancha Angy contado por las víctimas*. Plan V Hacemos Periodismo.
<https://planv.com.ec/historias/sociedad/tragedia-galapagos-el-naufragio-la-lancha-angy-contado-victimas/>
- Rosén, A., Garne, K., Razola, M., & Begovic, E. (2020). Numerical modelling of structure responses for high-speed planing craft in waves. *Ocean Engineering*, 217.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107897>
- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic Design of Planing Hulls. *Marine Technology*, 1, 71–95.
- Savitsky, D., & Brown, P. W. (1976). Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water. *Marine Technology*, 13(4), 381–400.
- Shin, D. M., & Chung, J. (2021). Application of dead ship condition based on IMO second-generation intact stability criteria for 13K oil chemical tanker. *Ocean Engineering*, 238.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109776>
- Tagle, V. (2023, September 11). *Galápagos: naufragio una lancha de cabotaje con 29 personas a bordo*. Expreso. <https://www.expreso.ec/actualidad/galapagos-naufragio-lancha-cabotaje-28-personas-bordo-172756.html>
- Vega, F. (2023, October 17). *Lanchas Interislas de Galápagos: más velocidad, menos seguridad*. Bitácora Ambienta (BAM). <https://www.bitacoraec.com/post/lanchas-interislas-de-gal%C3%A1pagos-m%C3%A1s-velocidad-menos-seguridad>
- Velasteguí López, P. H. (2019). Las islas Galápagos del Ecuador como potencia turística. *ConcienciaDigital*, 2(1), 6–23. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v2i1.926>

APENDICES

Figura 17

Espectro de elevación de la ola obtenido mediante el código implementado

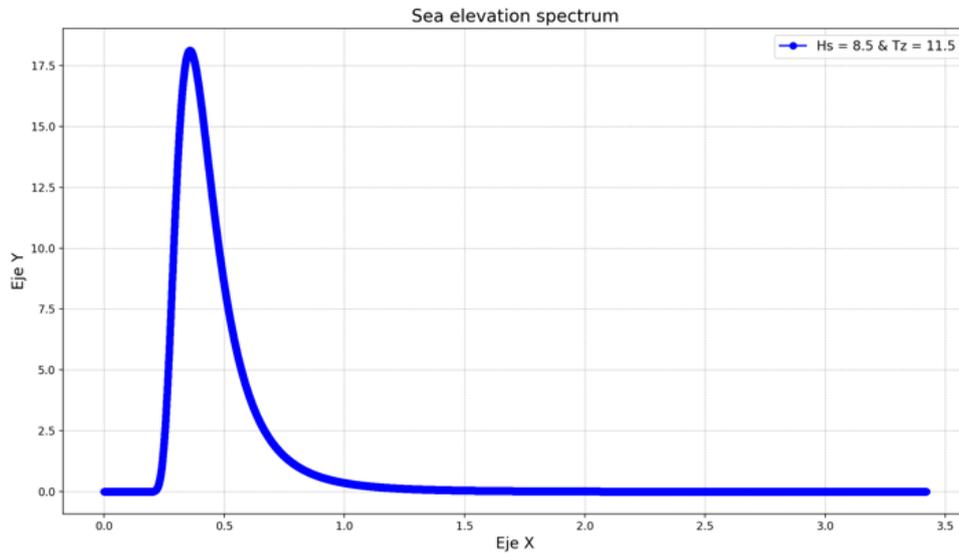
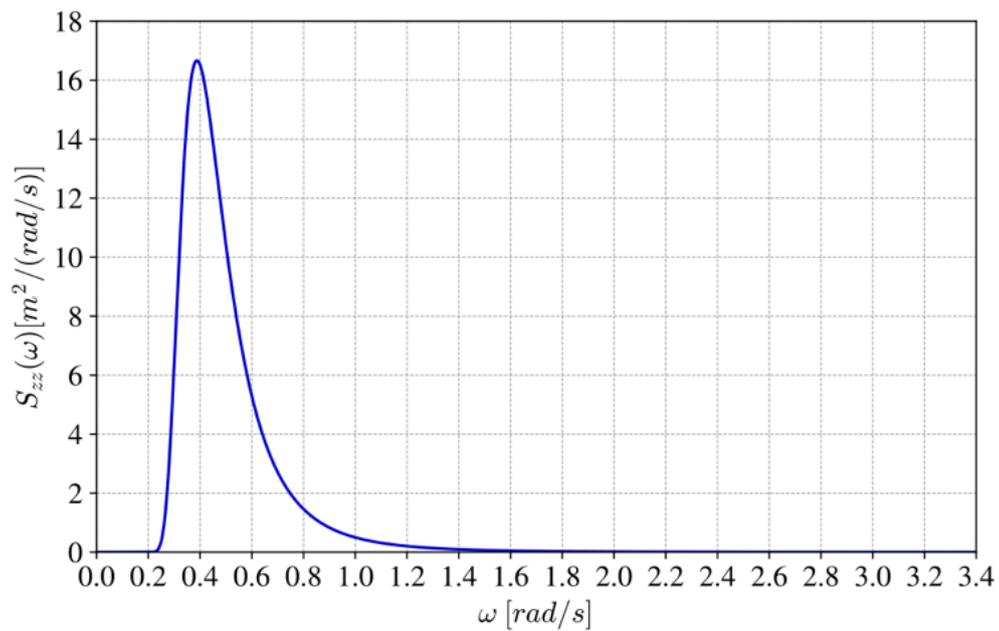


Figura 18

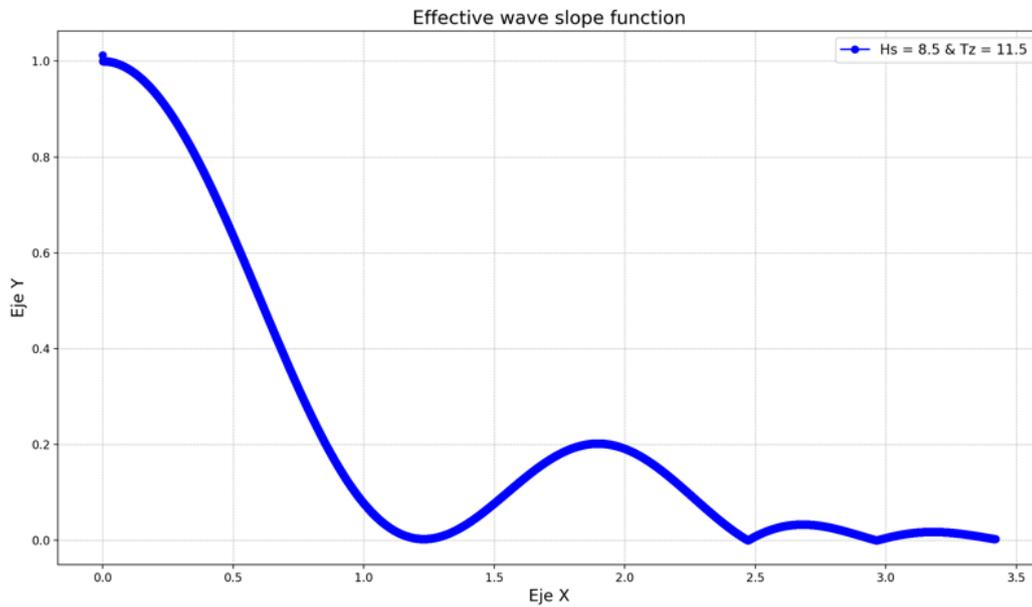
Espectro de elevación de la ola



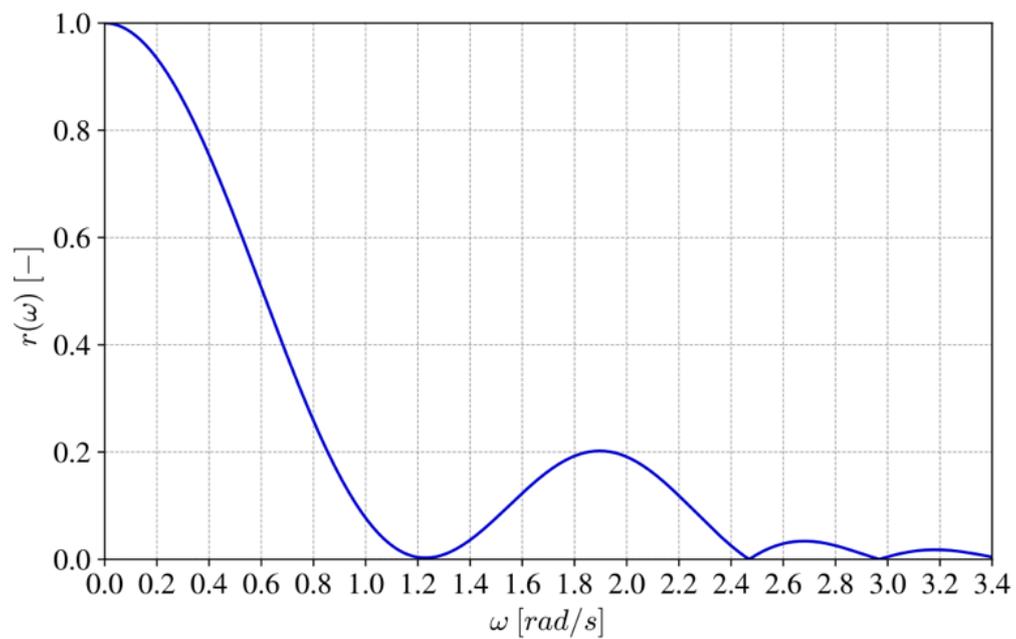
Nota. Adaptado de (Josipovic et al., 2023)

Figura 19

Función de la pendiente efectiva de la ola obtenida mediante el código implementado

**Figura 20**

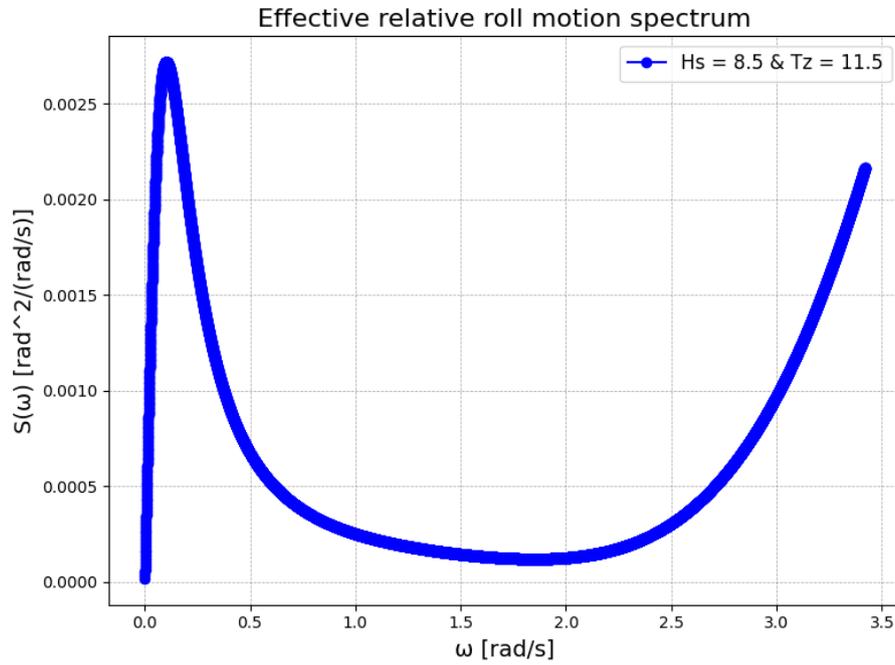
Función de la pendiente efectiva de la ola



Nota. Adaptada de (Josipovic et al., 2023)

Figura 21

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la primera condición

**Figura 22**

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 3 en la primera condición

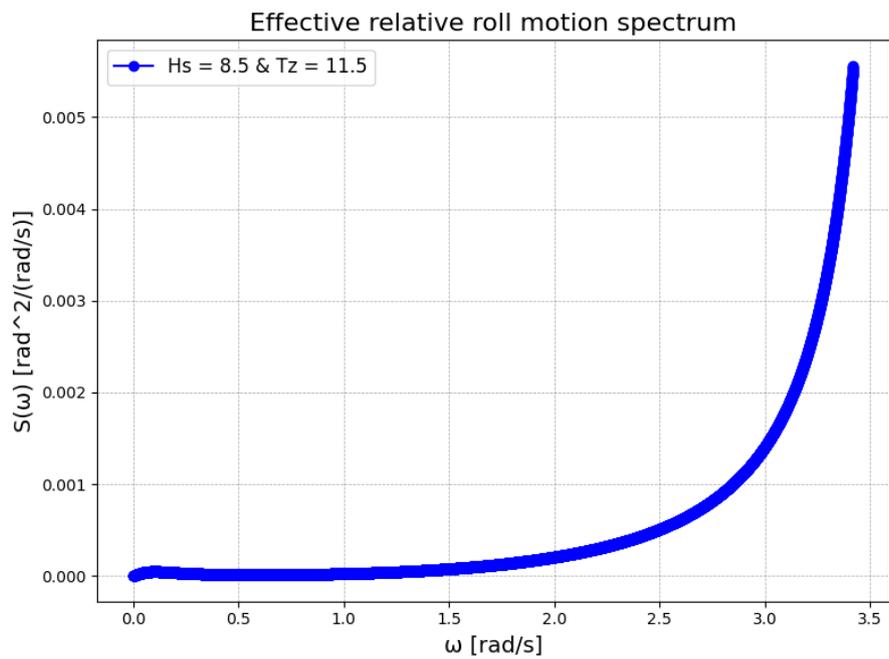
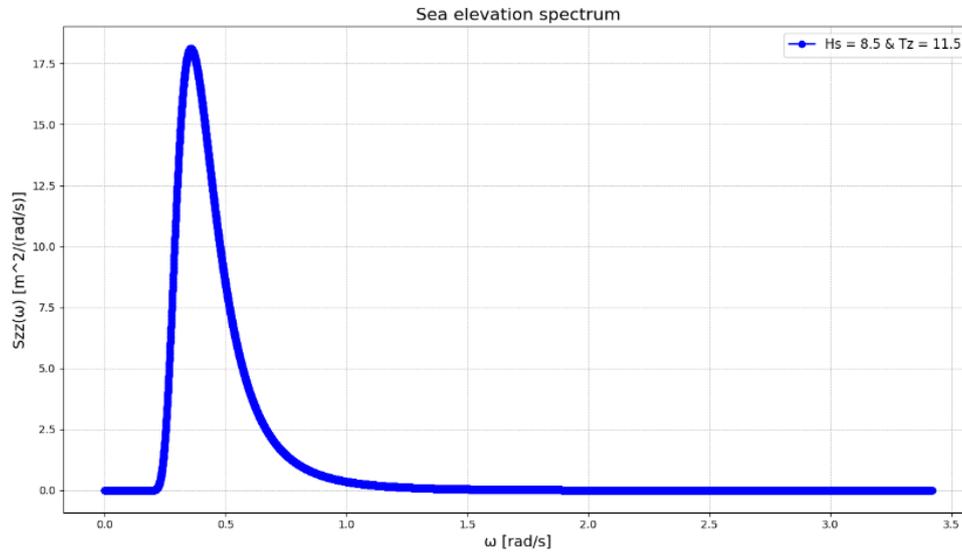


Figura 23

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la primera condición

**Figura 24**

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la primera condición

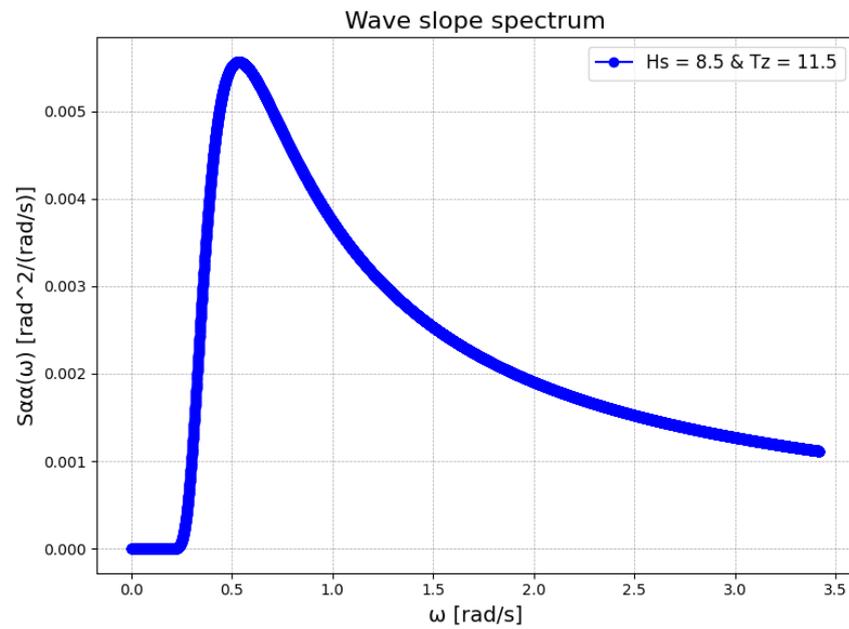
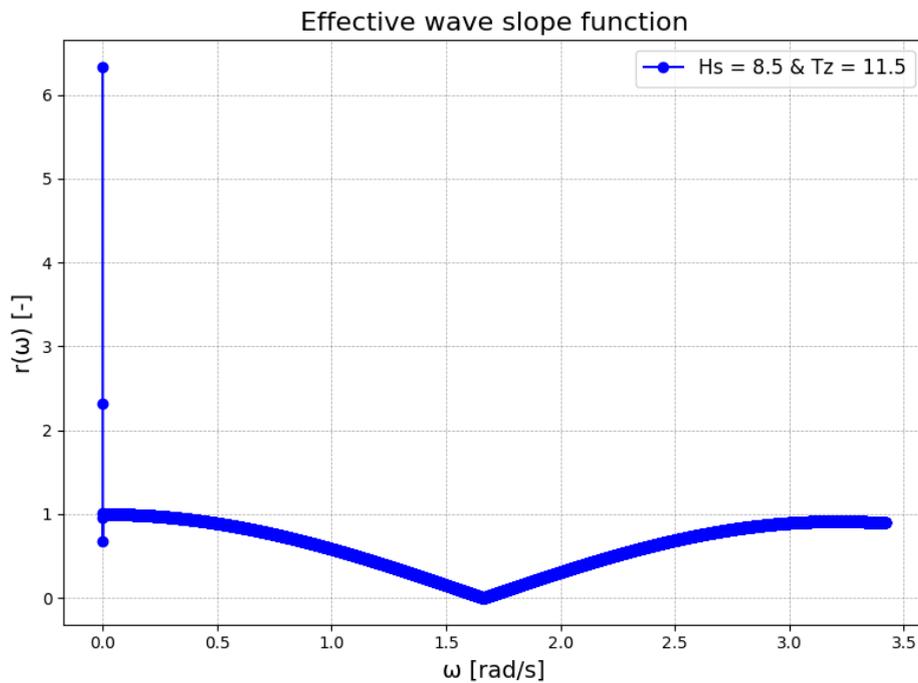


Figura 25

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la primera condición

**Figura 26**

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la primera condición

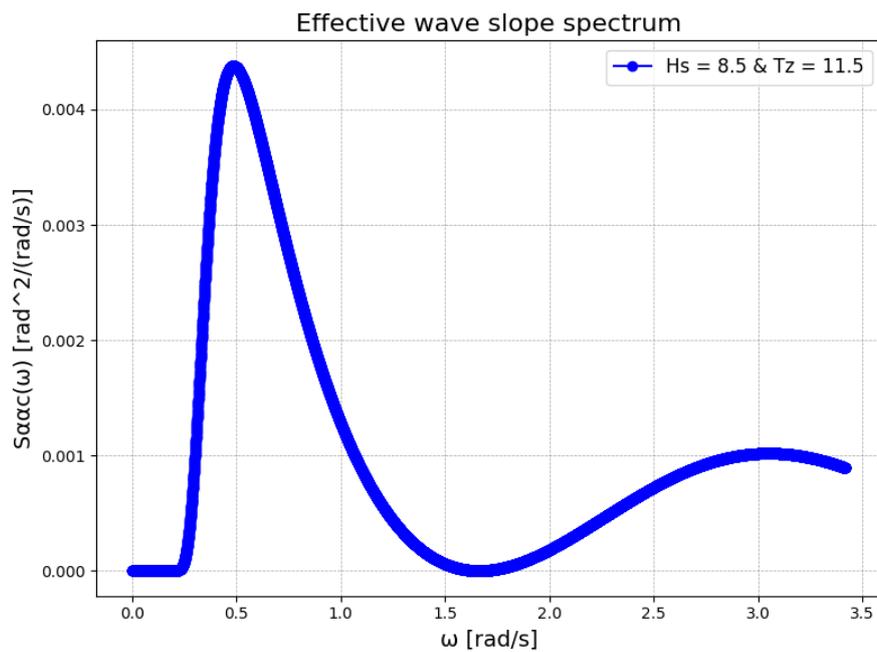
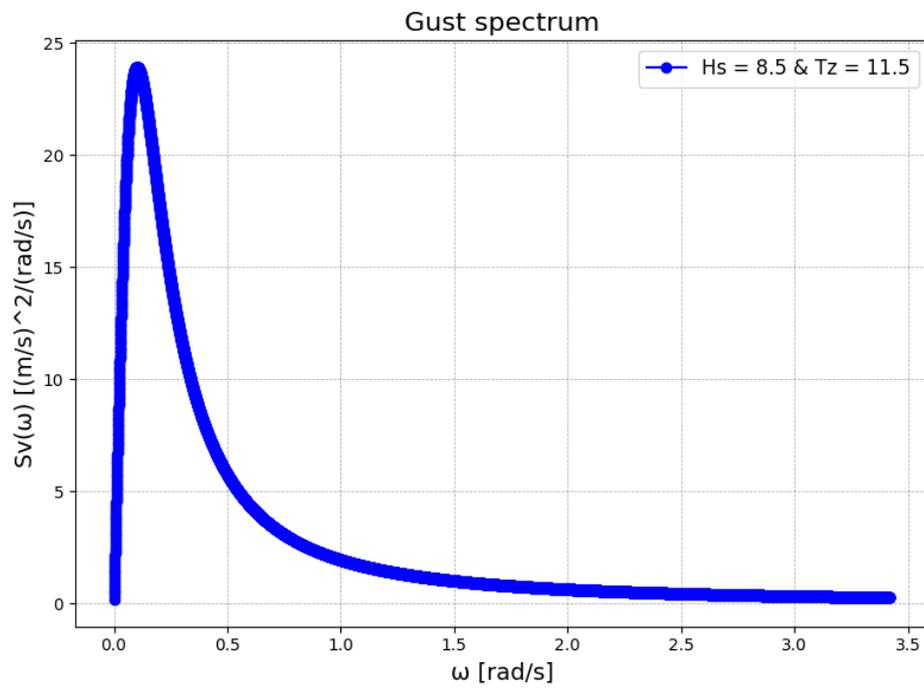


Figura 27

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la primera condición

**Figura 28**

Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la primera condición

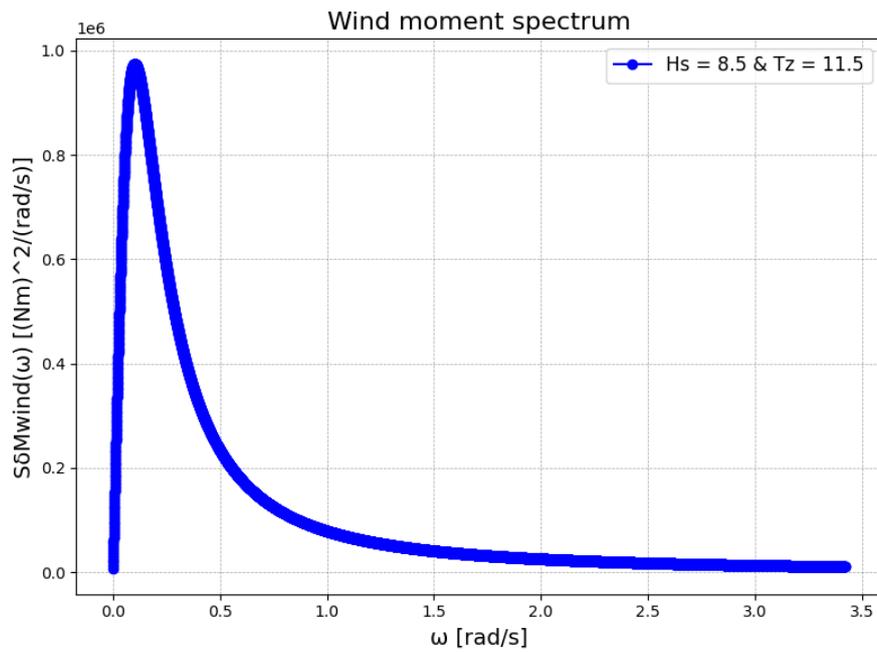
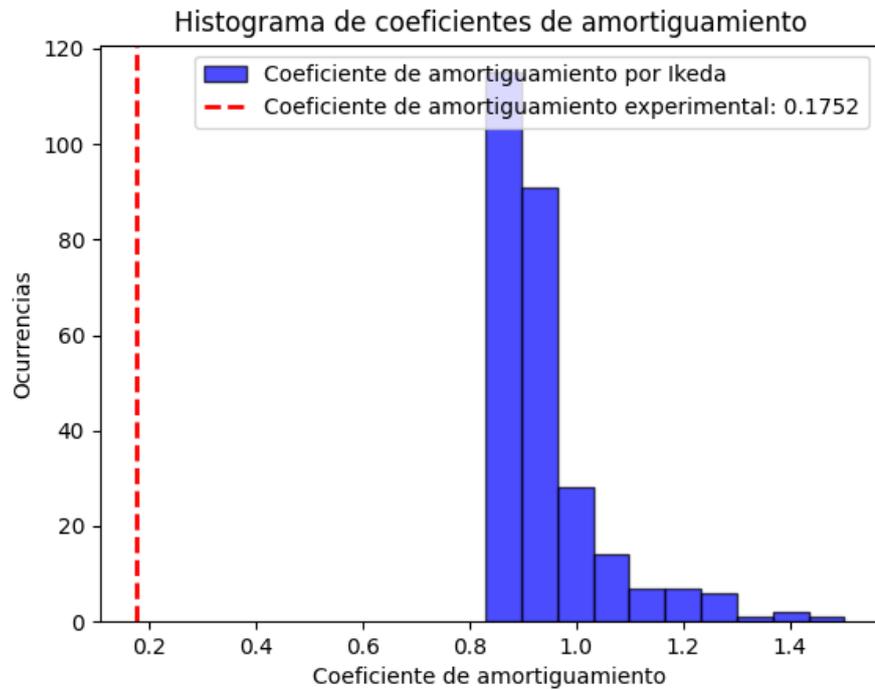


Figura 29

Coefficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la segunda condición

**Figura 30**

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición

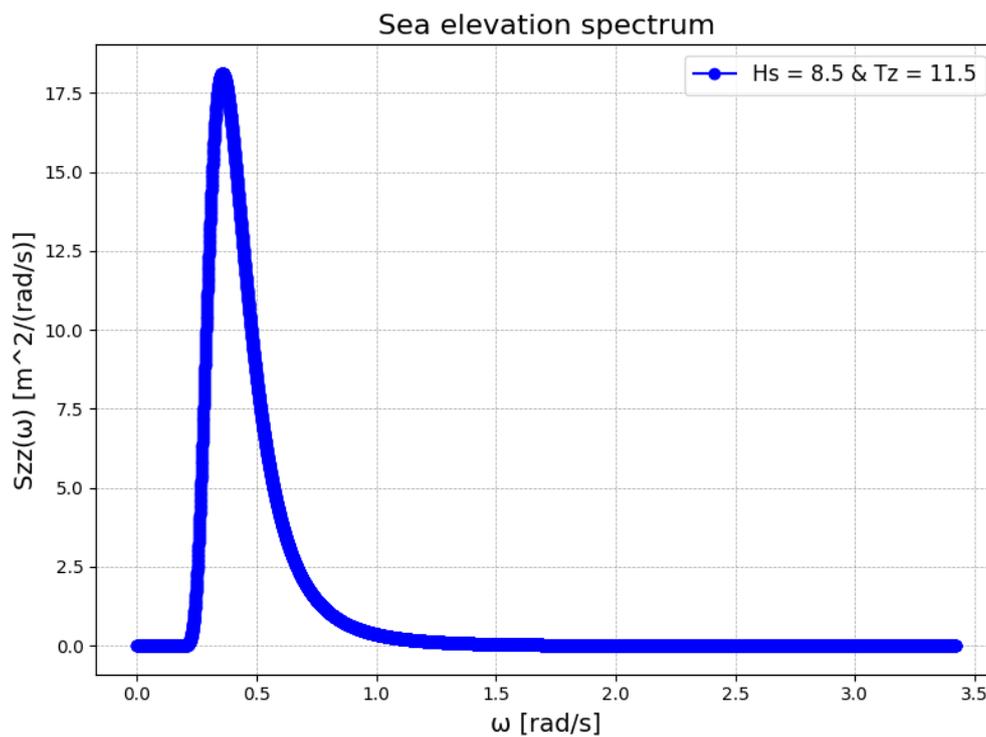
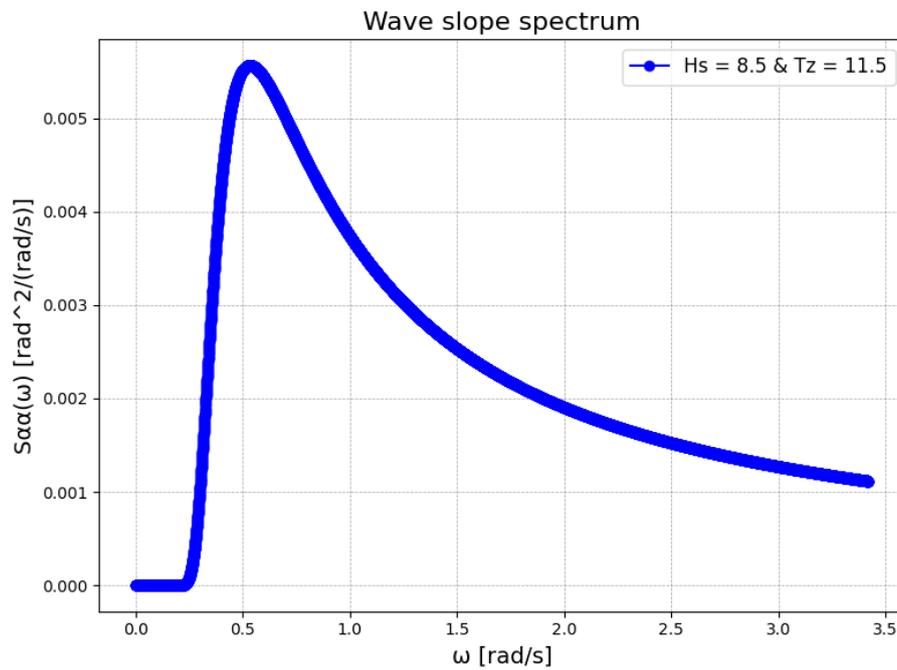


Figura 31

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición

**Figura 32**

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición

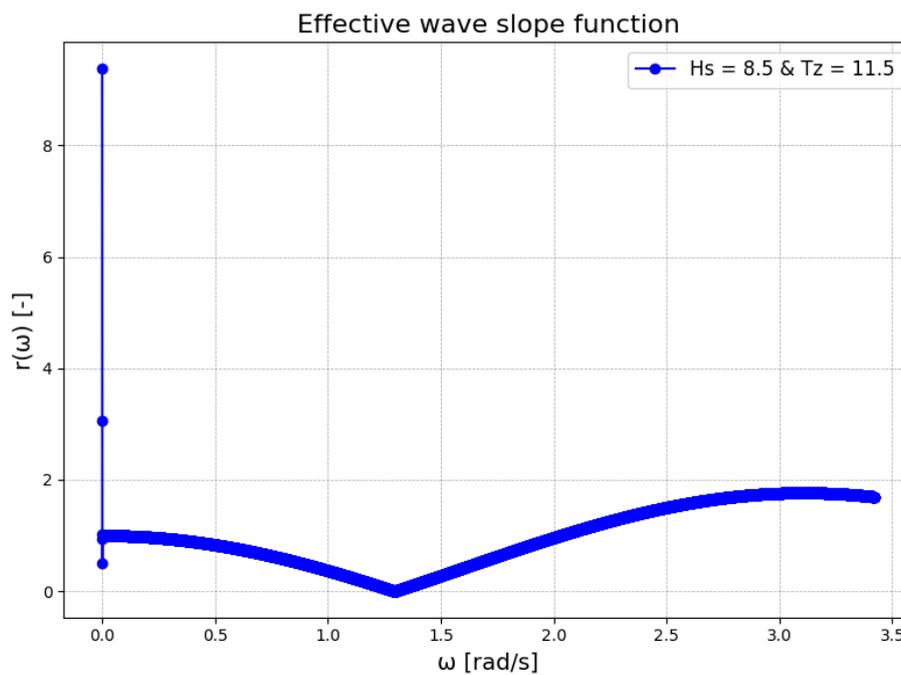
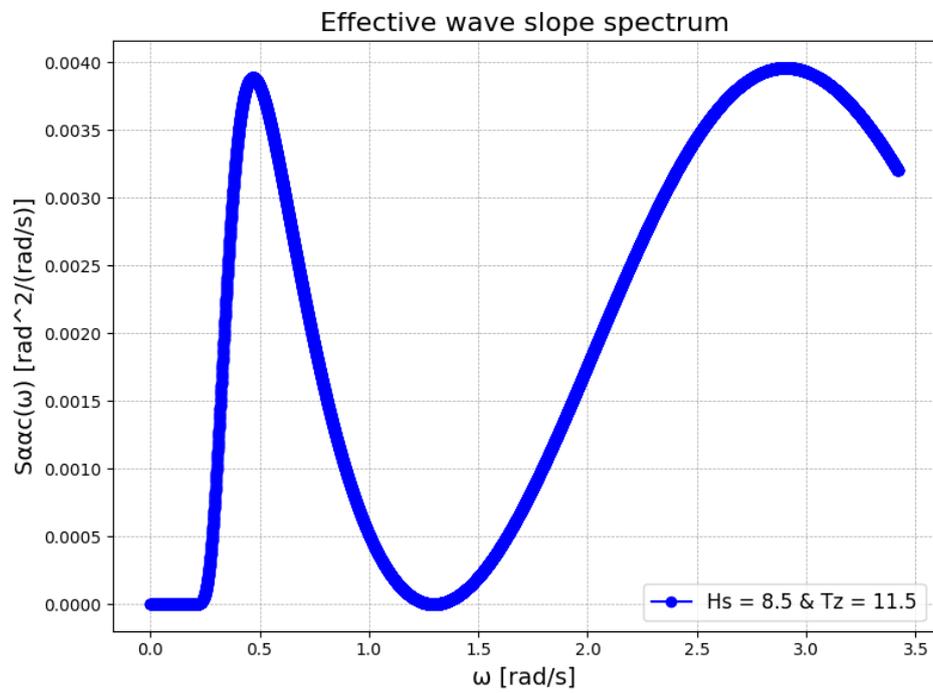


Figura 33

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la segunda condición

**Figura 34**

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la segunda condición

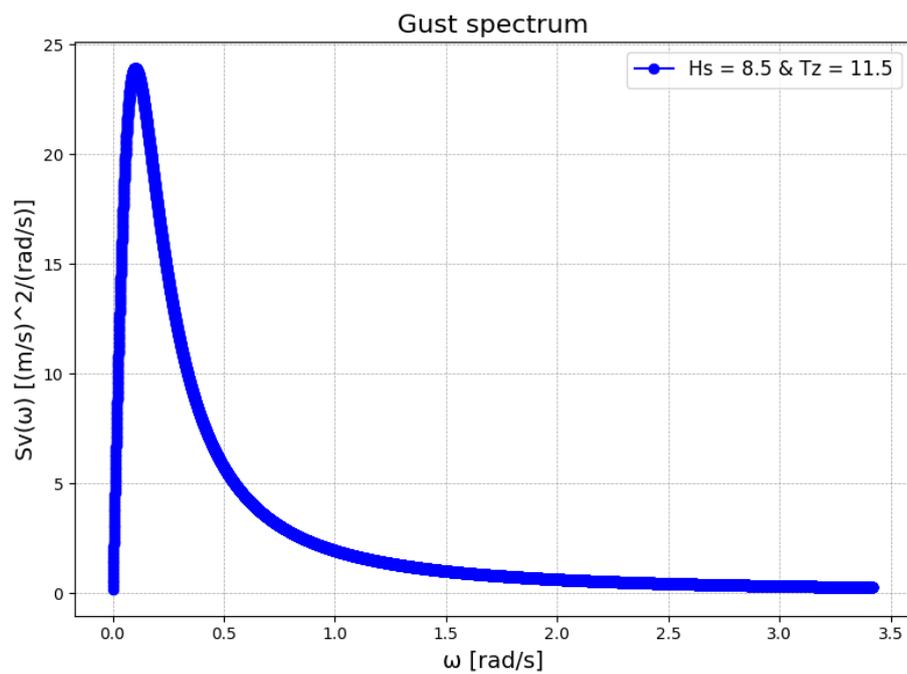
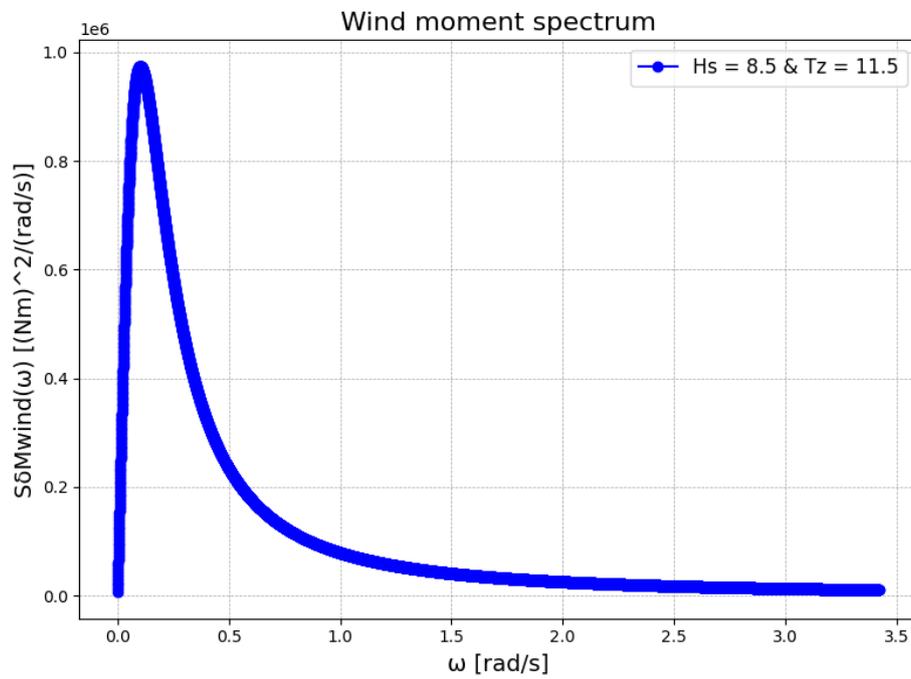


Figura 35

Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la segunda condición

**Figura 36**

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la segunda condición

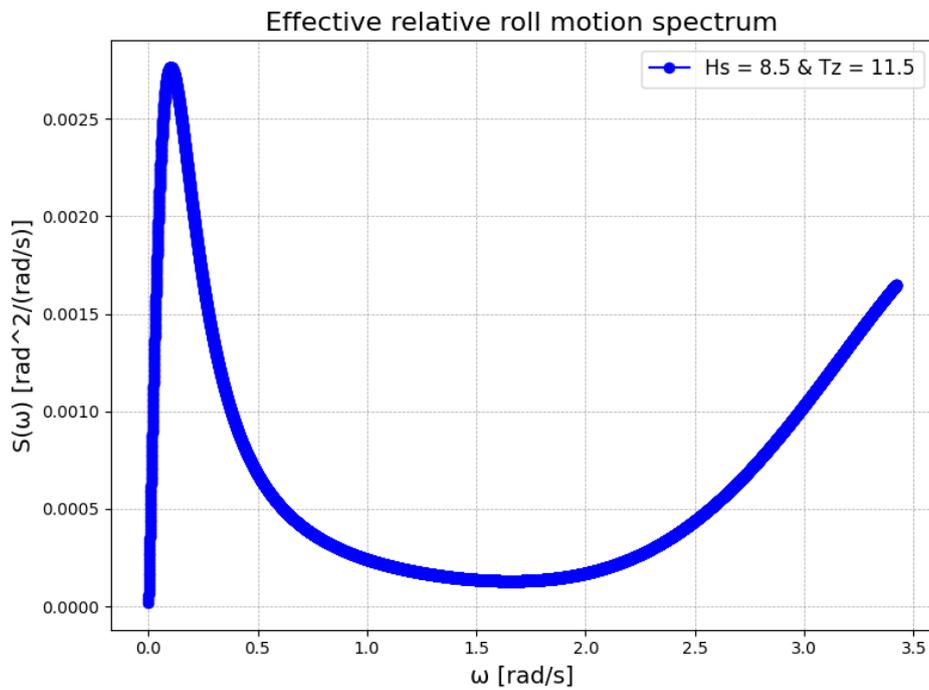
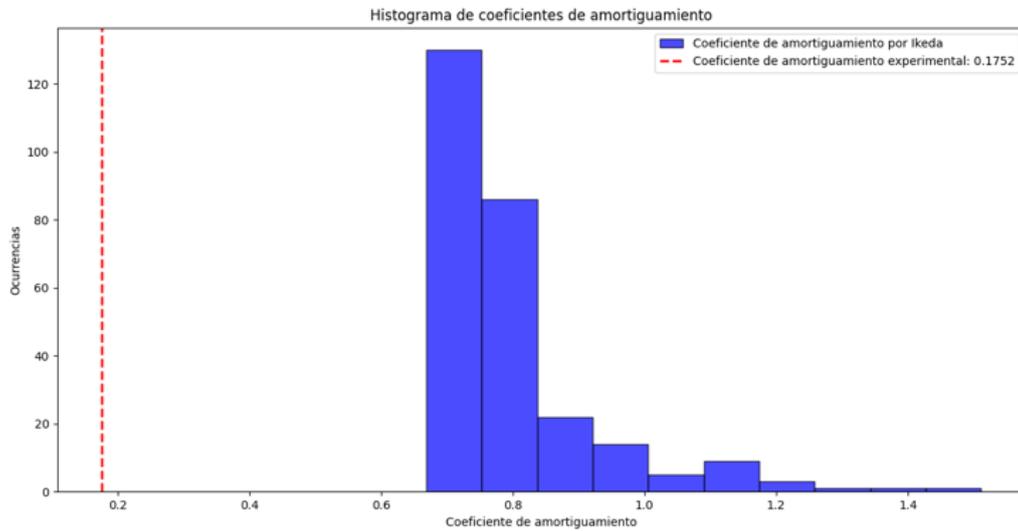


Figura 37

Coefficientes de amortiguamiento para la Lancha 2 en la tercera condición

**Figura 38**

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición

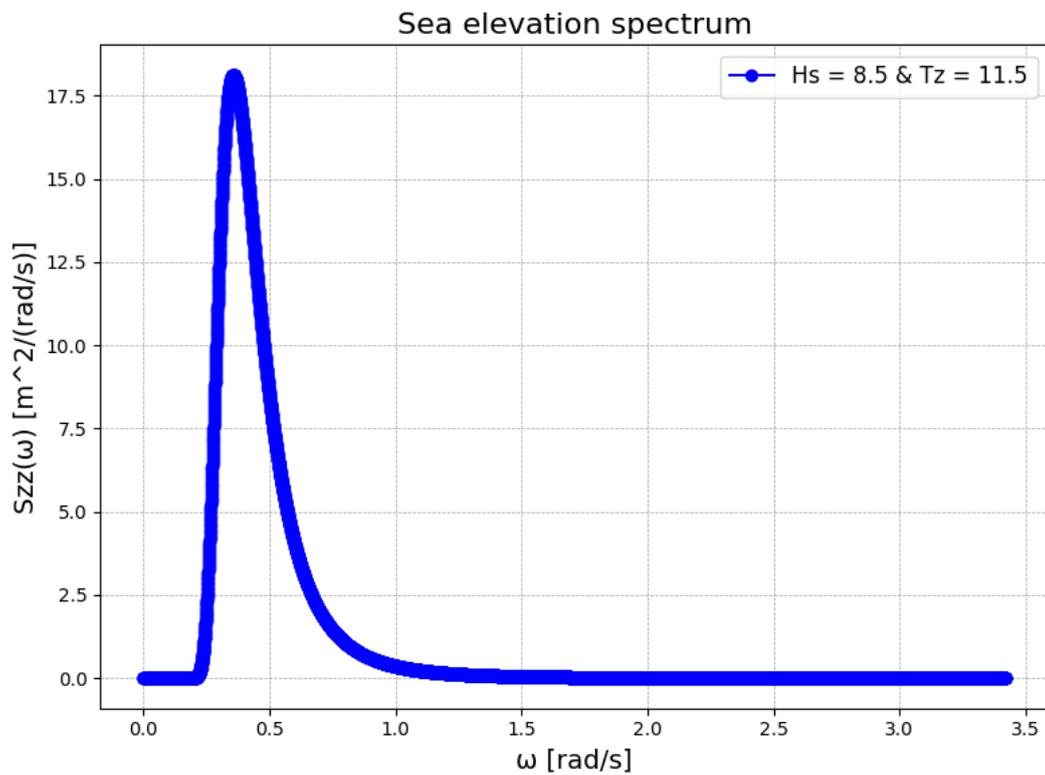
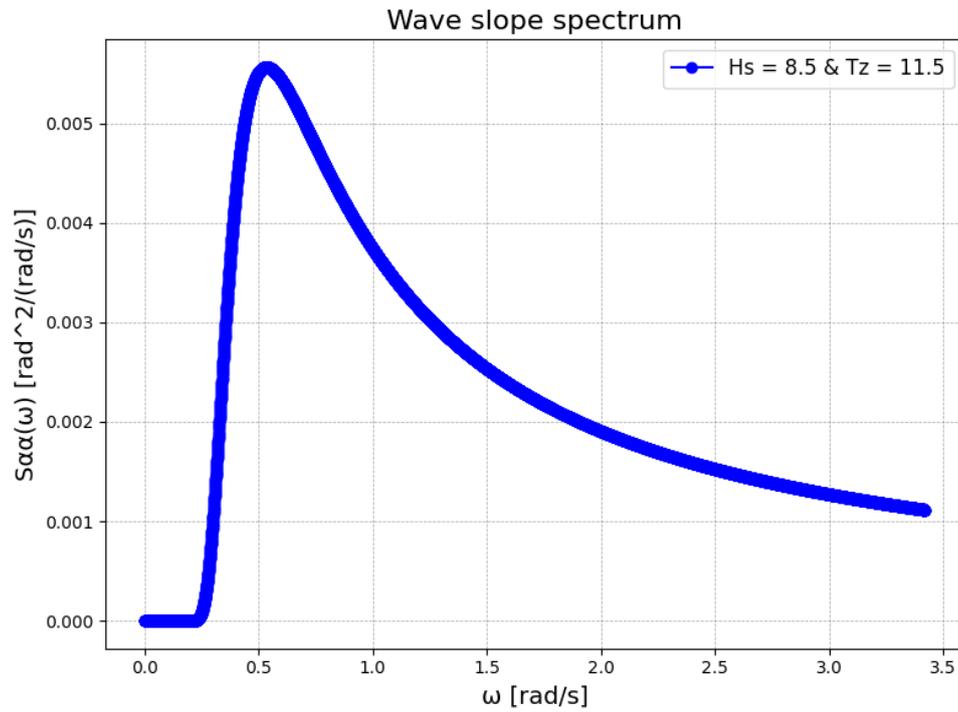


Figura 39

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición

**Figura 40**

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición

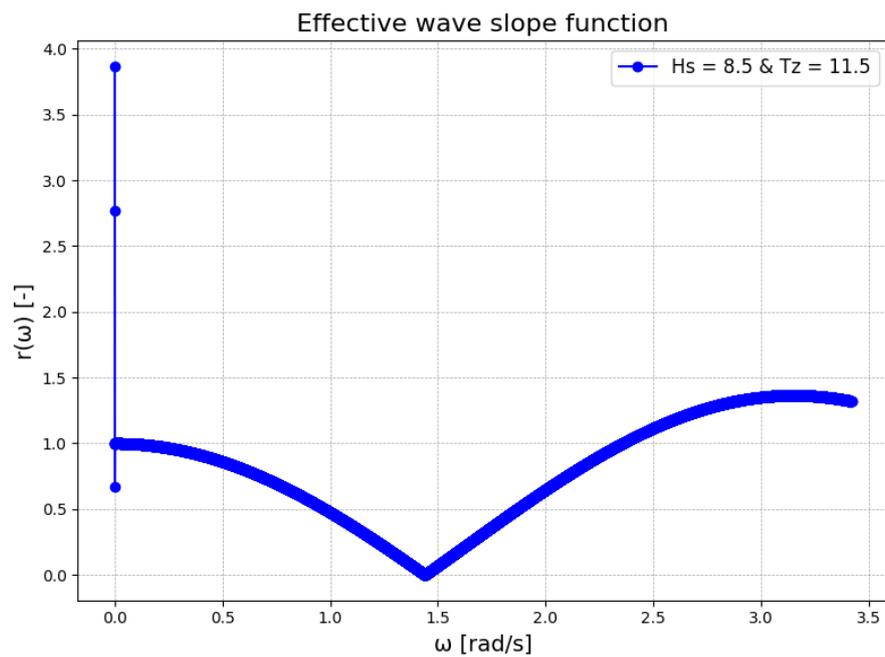
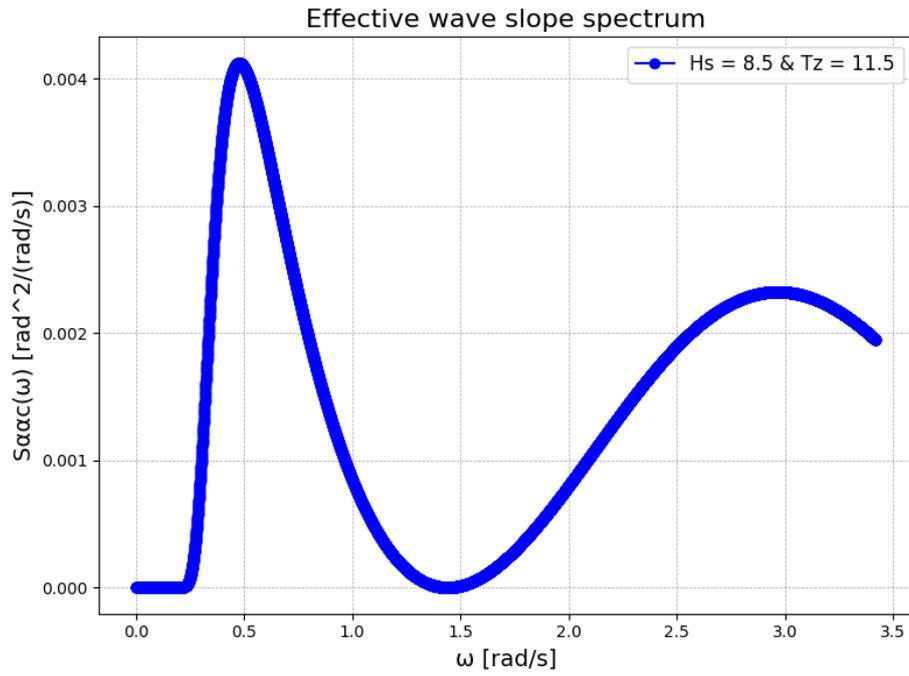


Figura 41

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 2 en la tercera condición

**Figura 42**

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 2 en la tercera condición

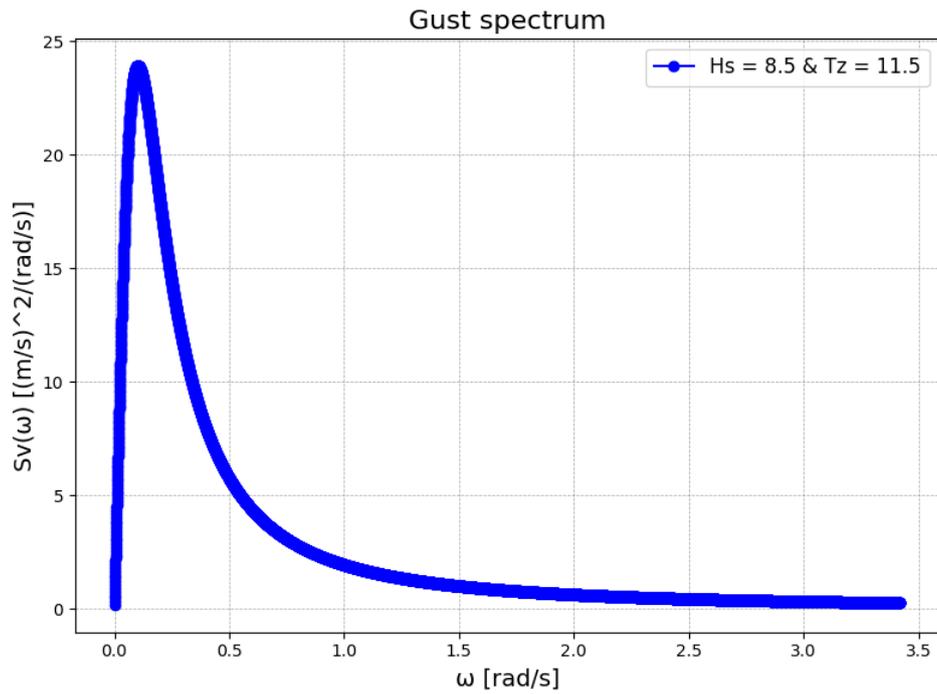
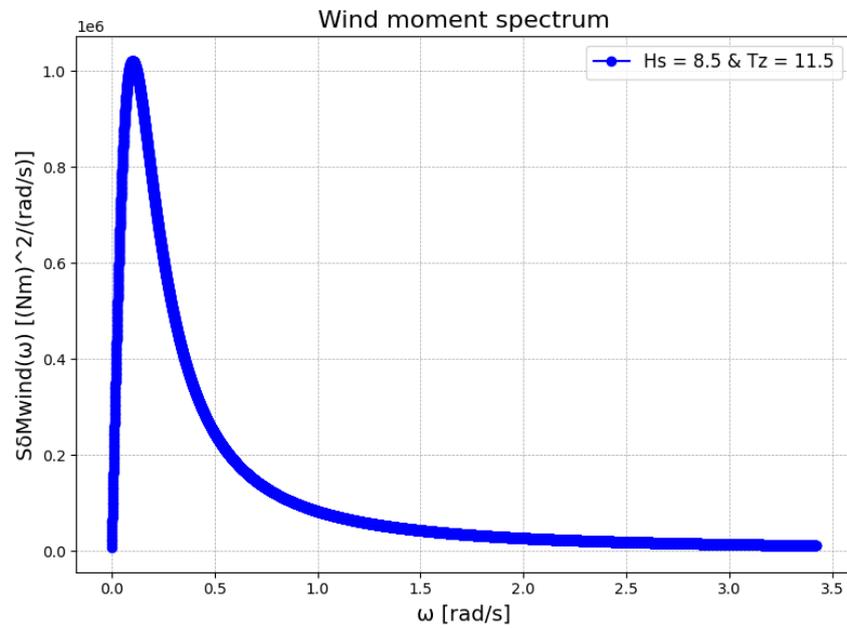


Figura 43

Espectro del momento del viento para la Lancha 2 en la tercera condición

**Figura 44**

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 2 en la tercera condición

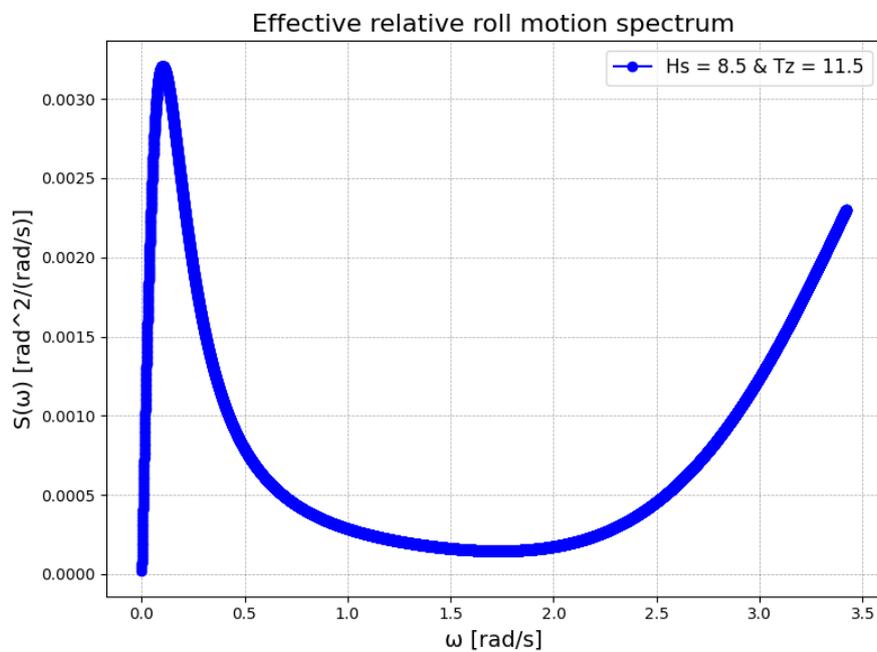
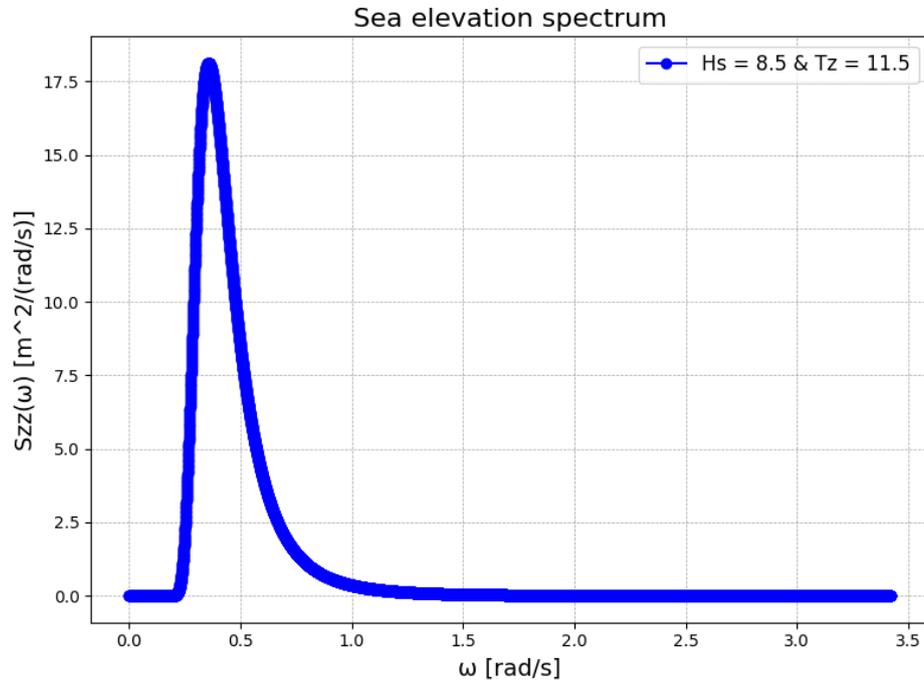


Figura 45

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la primera condición

**Figura 46**

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la primera condición

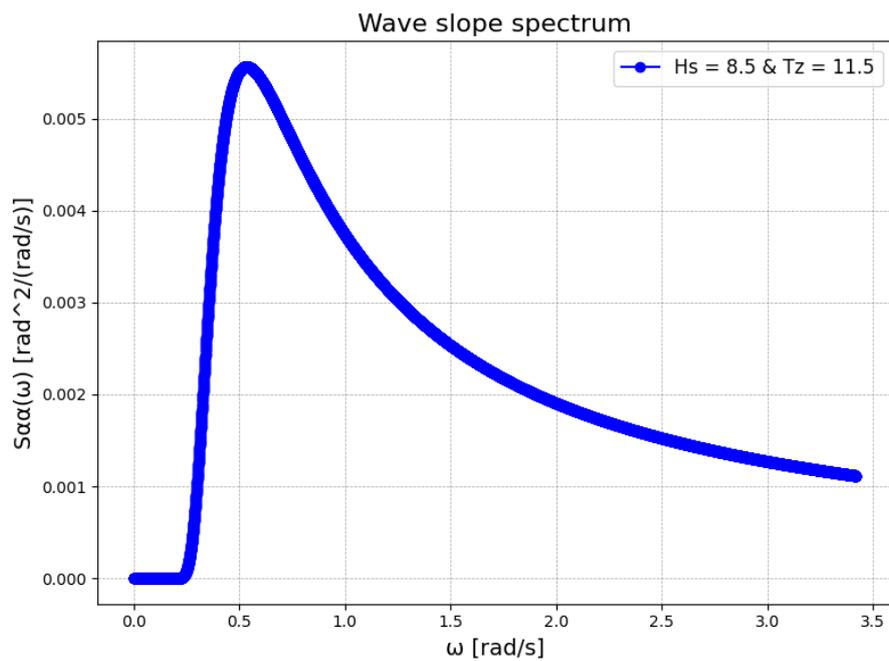
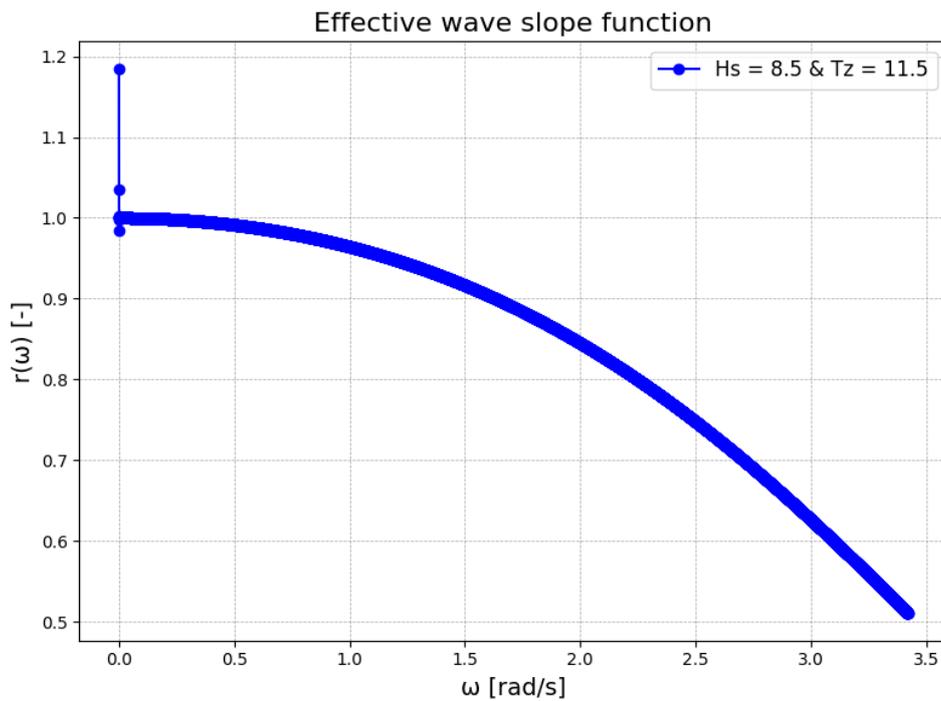


Figura 47

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la primera condición

**Figura 48**

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la primera condición

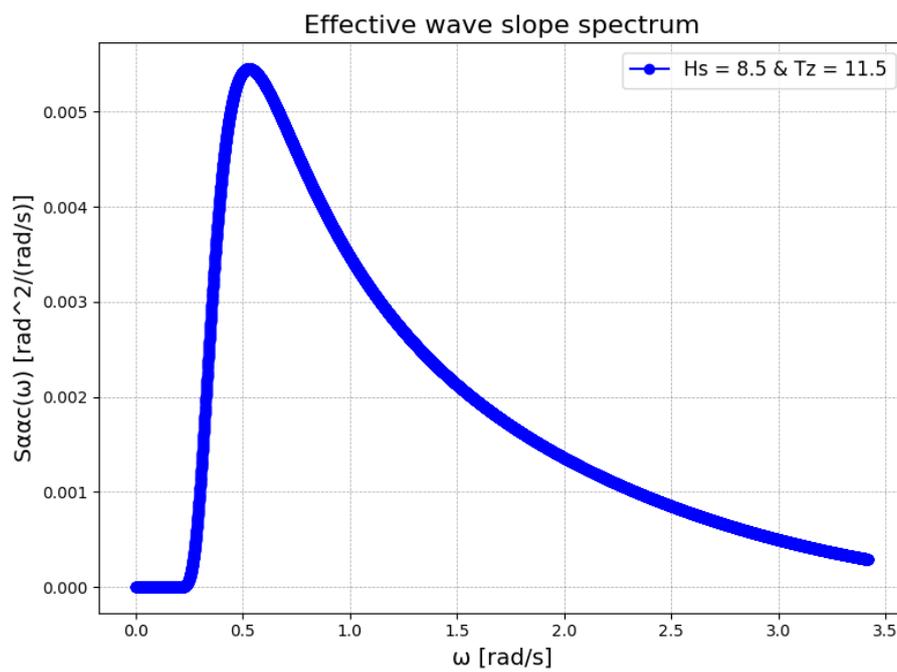
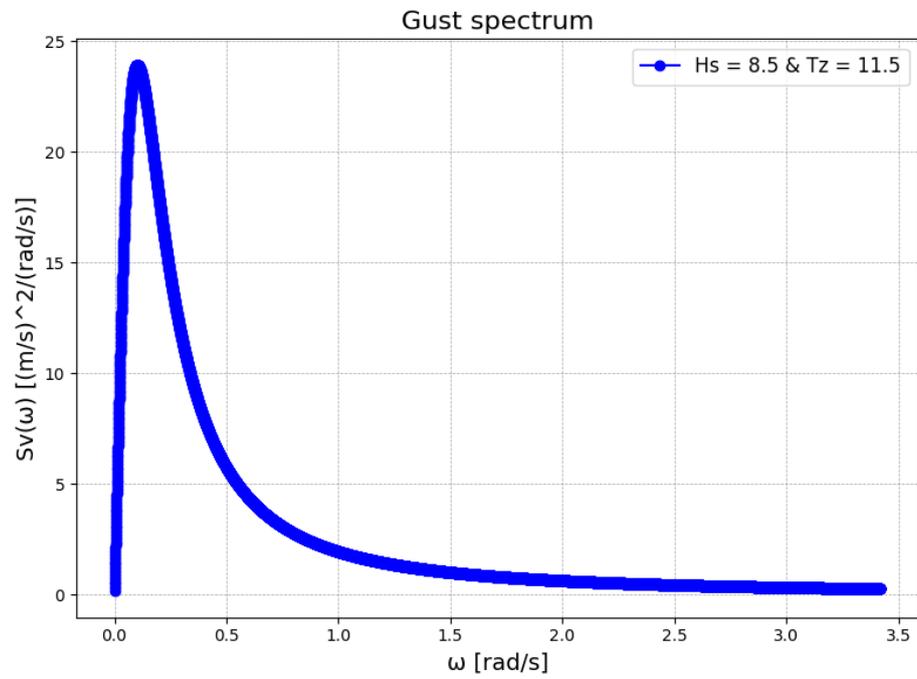


Figura 49

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la primera condición

**Figura 50**

Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la primera condición

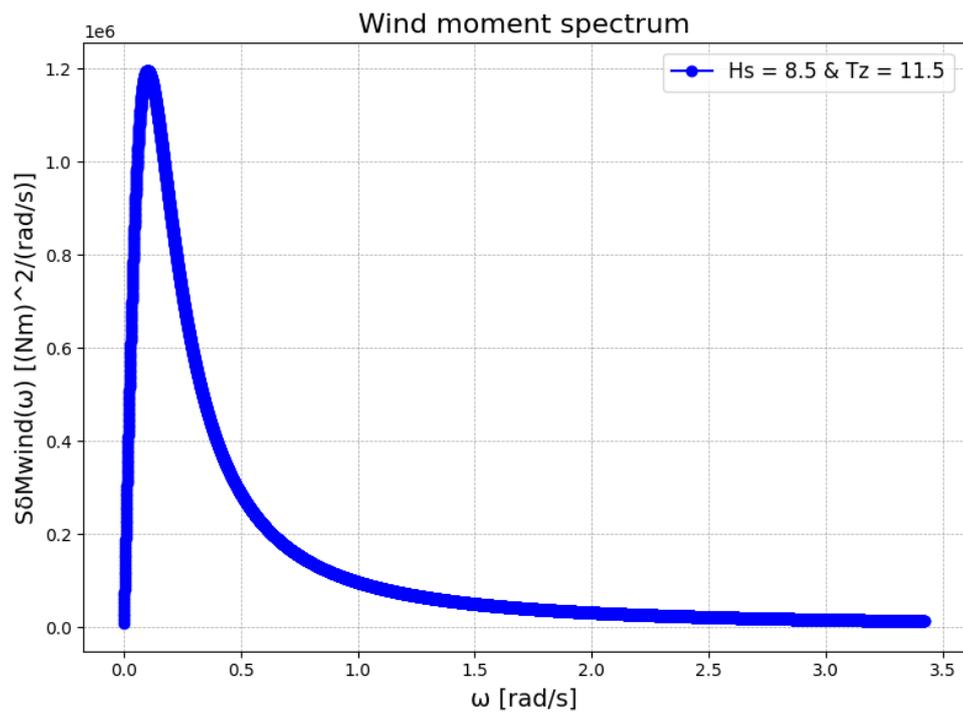
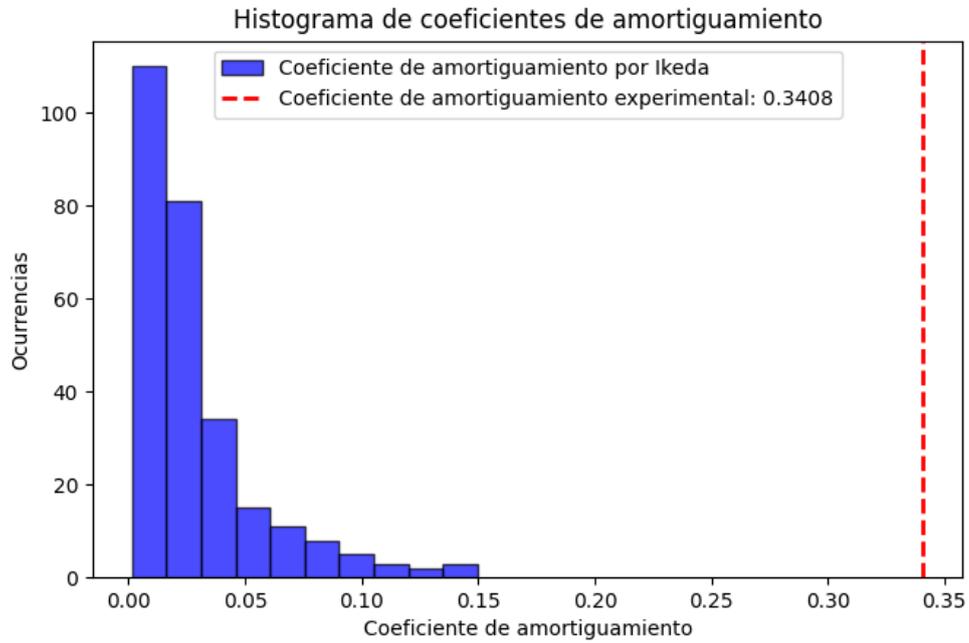


Figura 51

Coeficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la segunda condición

**Figura 52**

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición

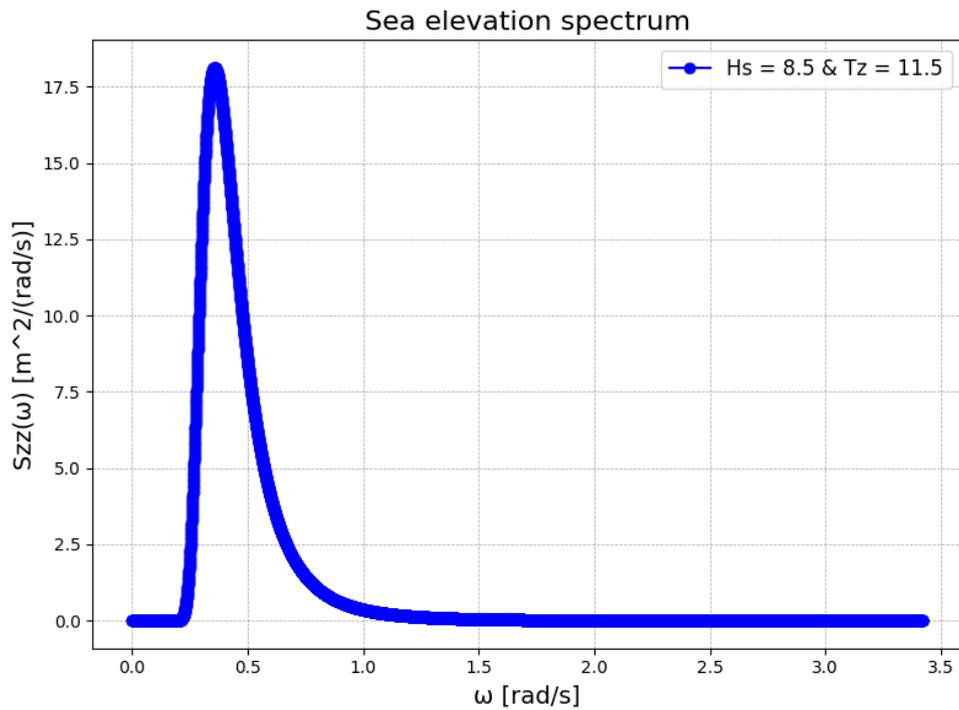
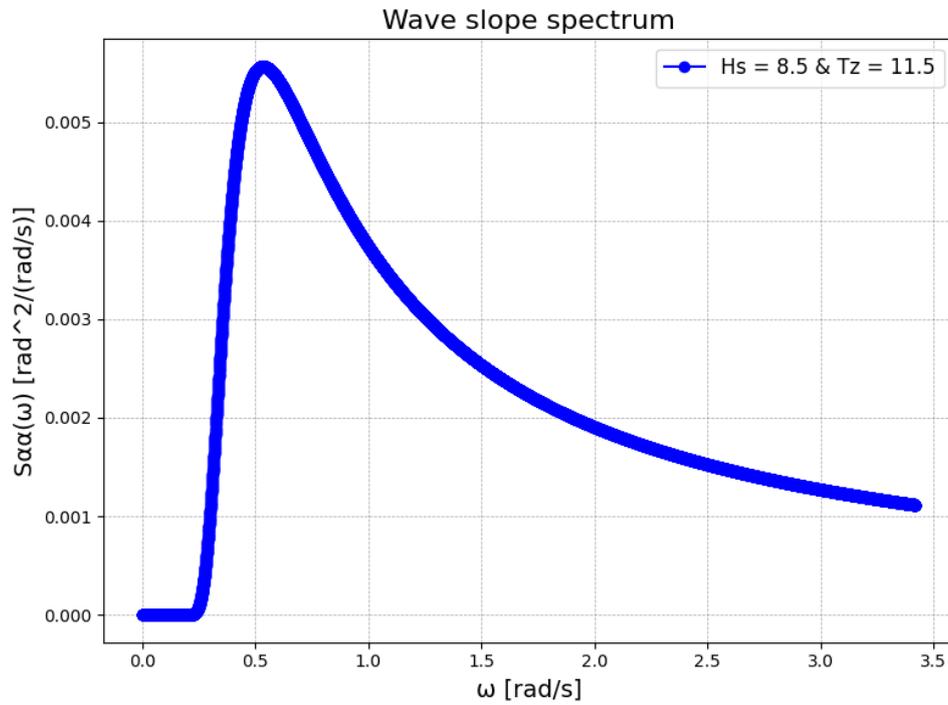


Figura 53

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición

**Figura 54**

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición

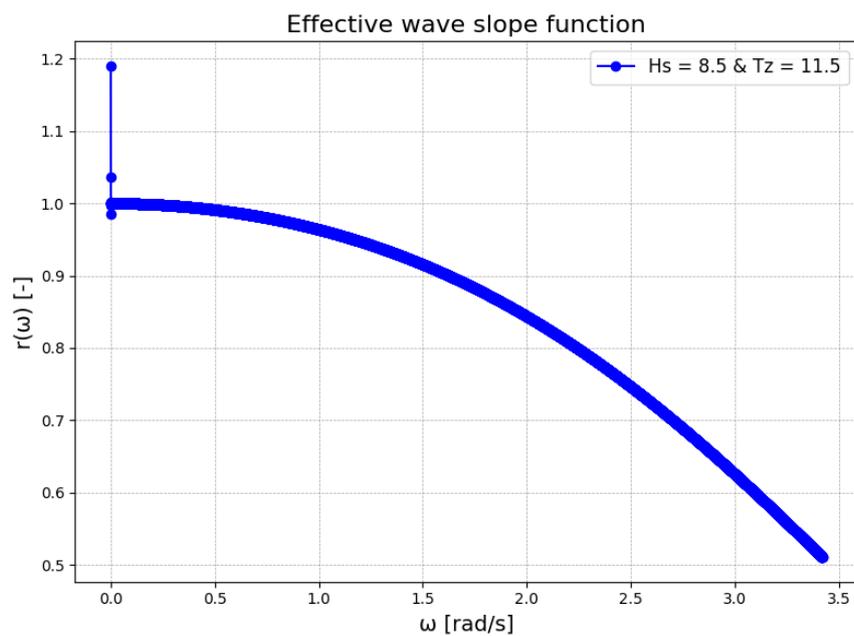
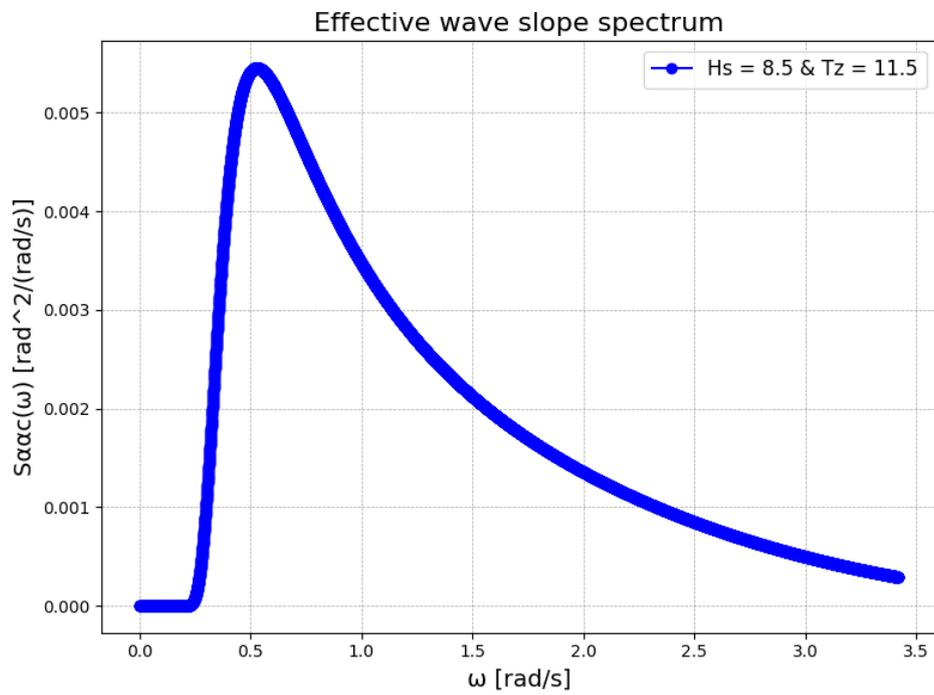


Figura 55

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la segunda condición

**Figura 56**

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la segunda condición

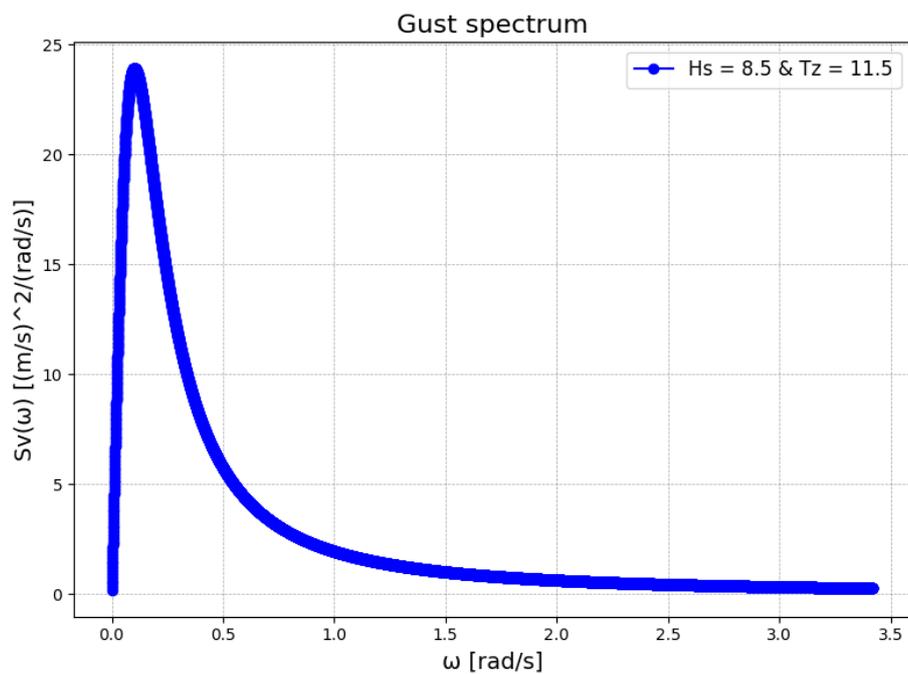
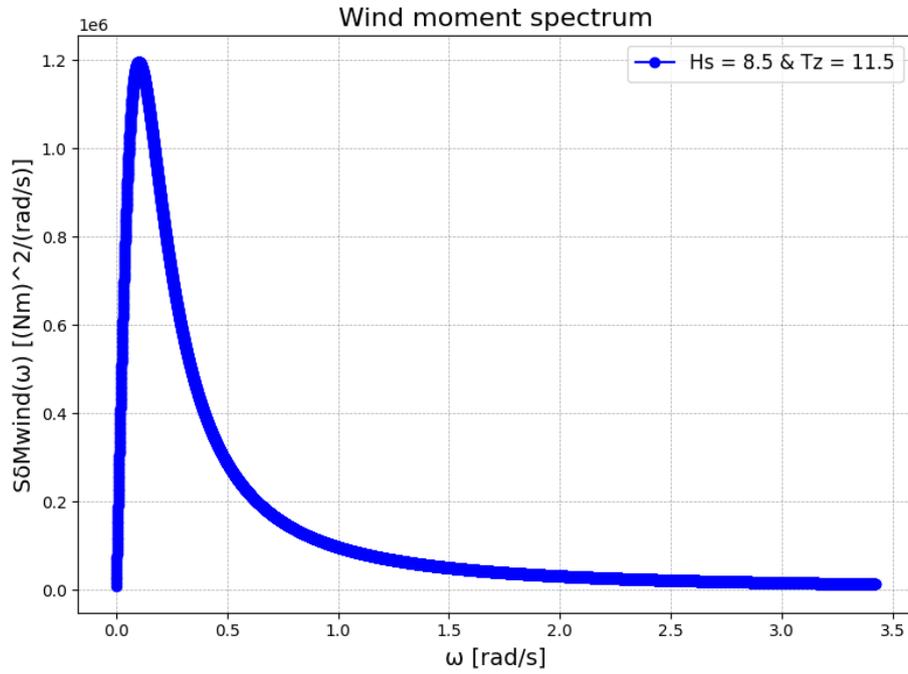


Figura 57

Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la segunda condición

**Figura 58**

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 3 en la segunda condición

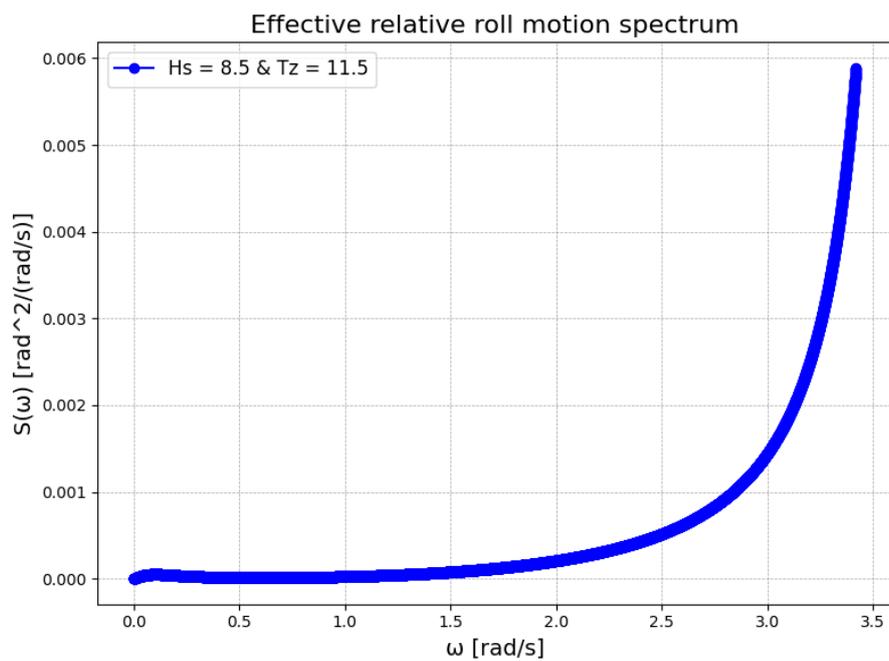
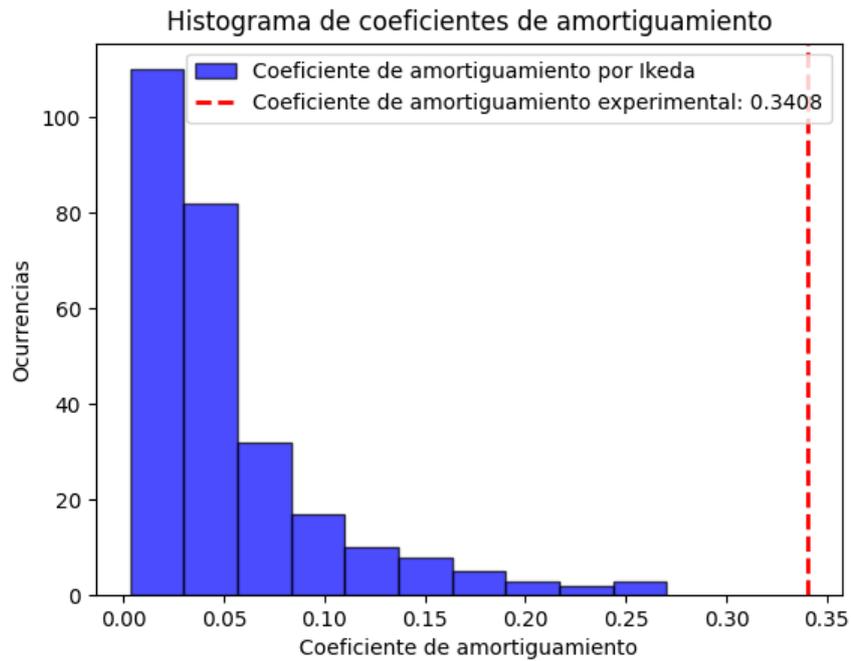


Figura 59

Coefficientes de amortiguamiento para la Lancha 3 en la tercera condición

**Figura 60**

Espectro de elevación de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición

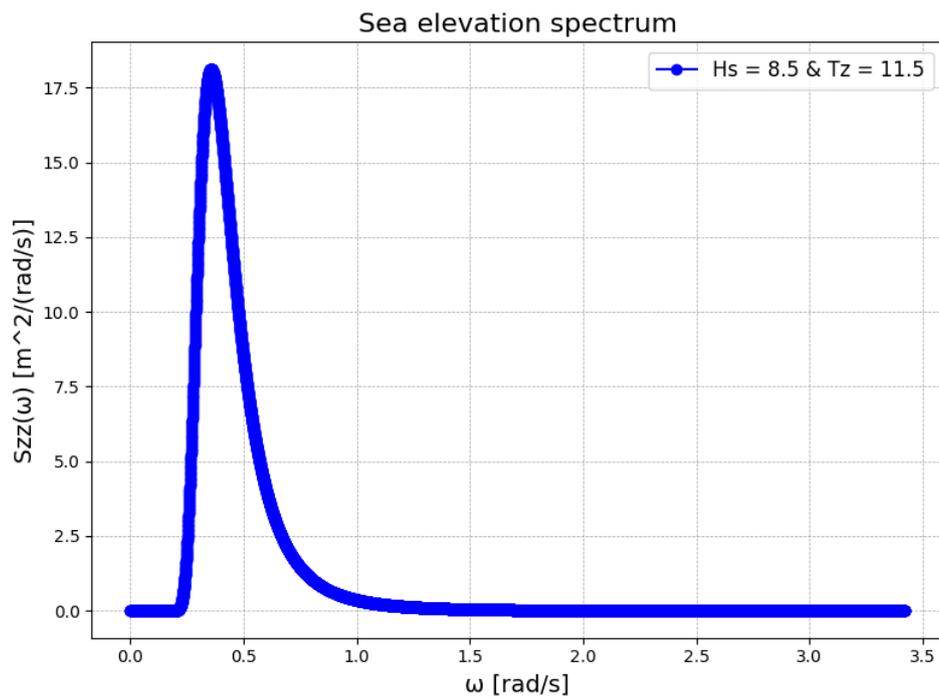
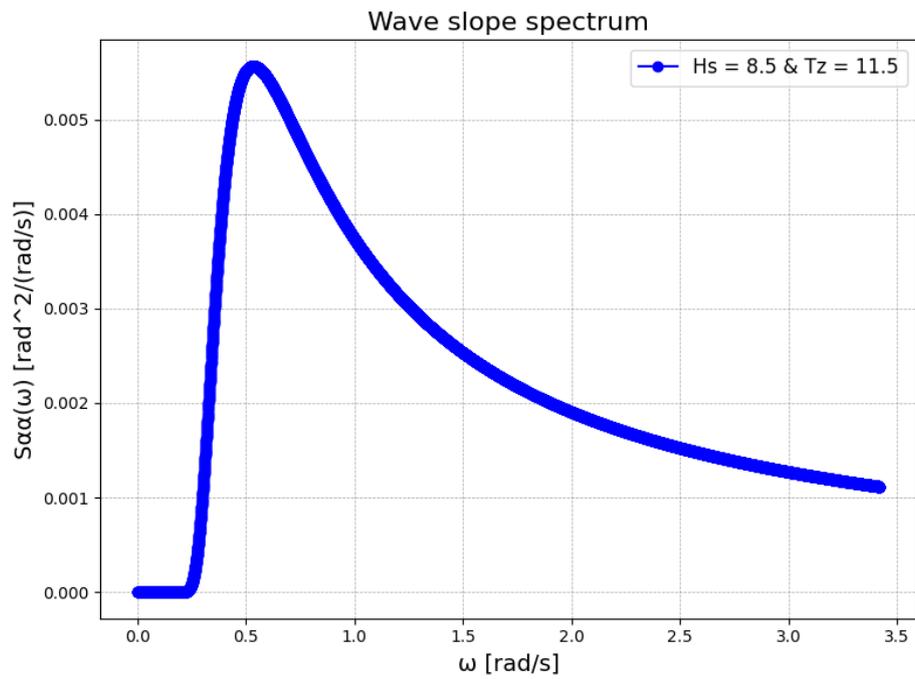


Figura 61

Espectro de pendiente de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición

**Figura 62**

Espectro de la función de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición

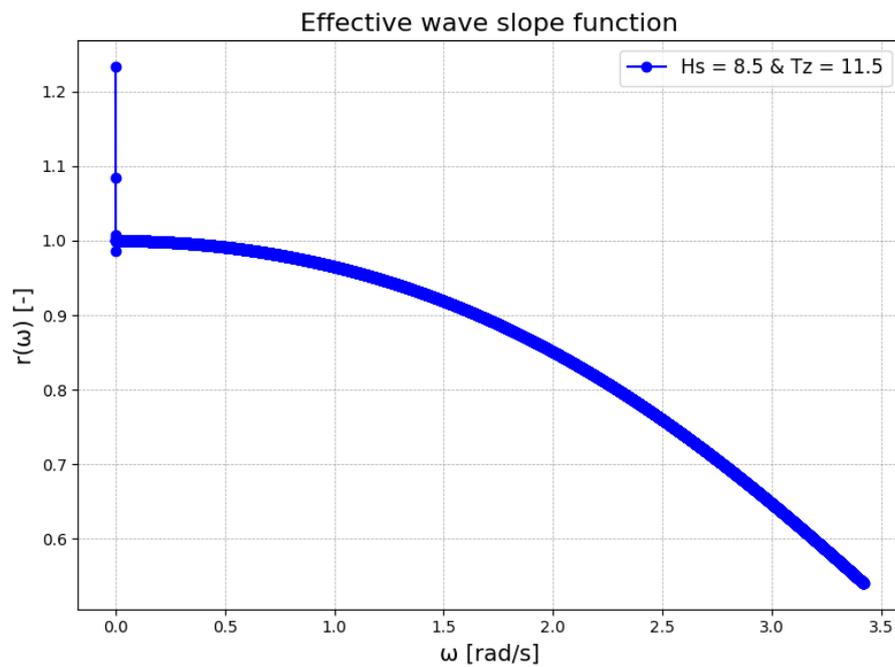
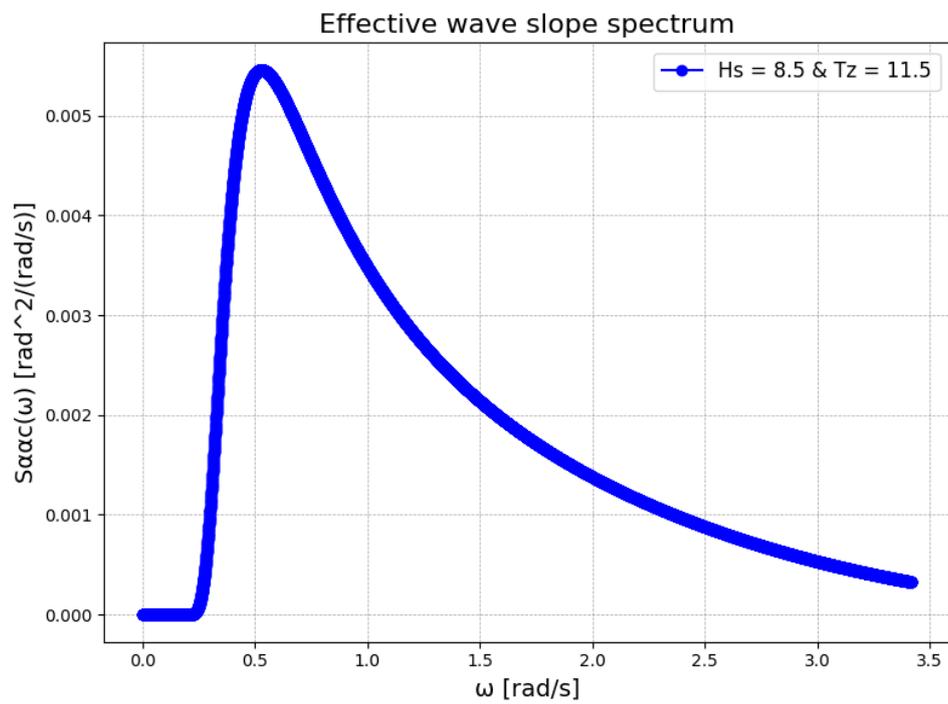


Figura 63

Espectro de la pendiente efectiva de la ola para la Lancha 3 en la tercera condición

**Figura 64**

Espectro de ráfaga de viento para la Lancha 3 en la tercera condición

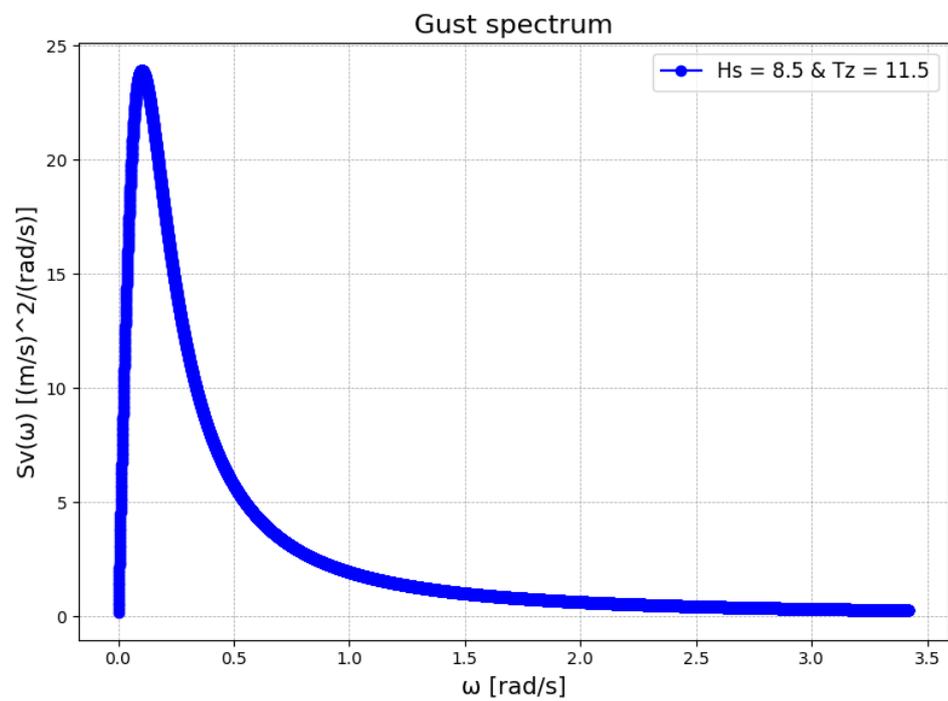
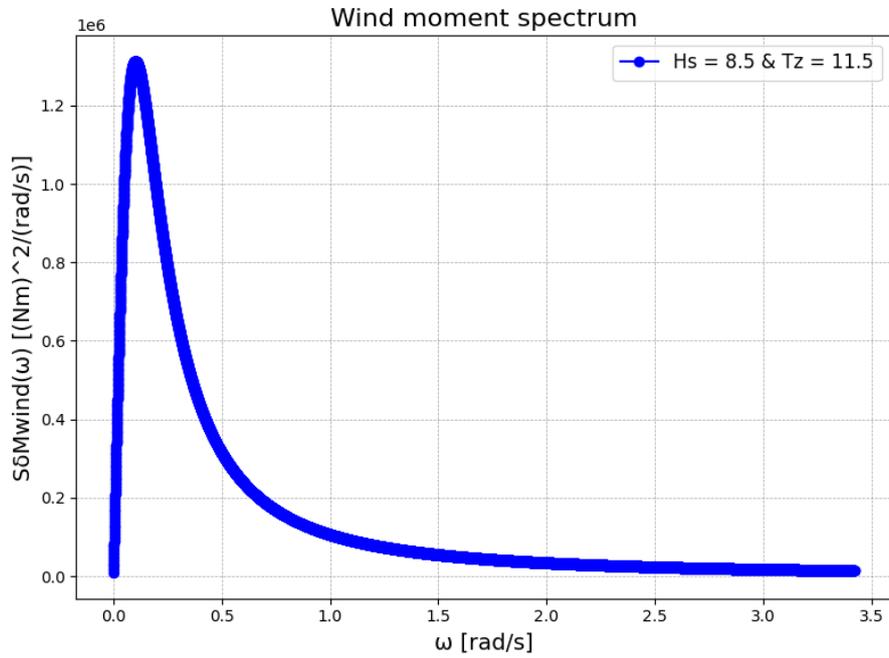


Figura 65

Espectro del momento del viento para la Lancha 3 en la tercera condición

**Figura 66**

Espectro efectivo relativo del movimiento de rolido de la Lancha 3 en la tercera condición

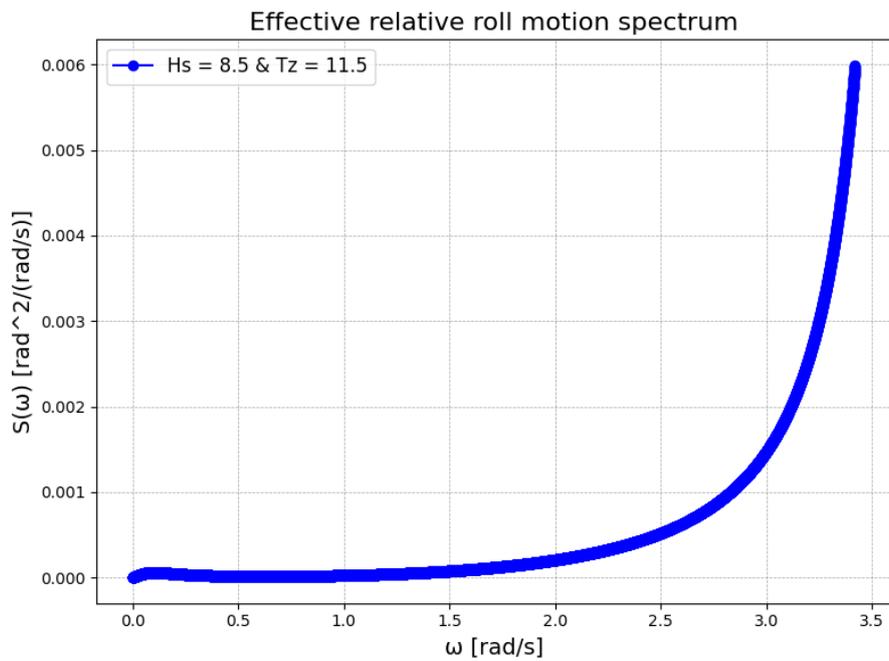
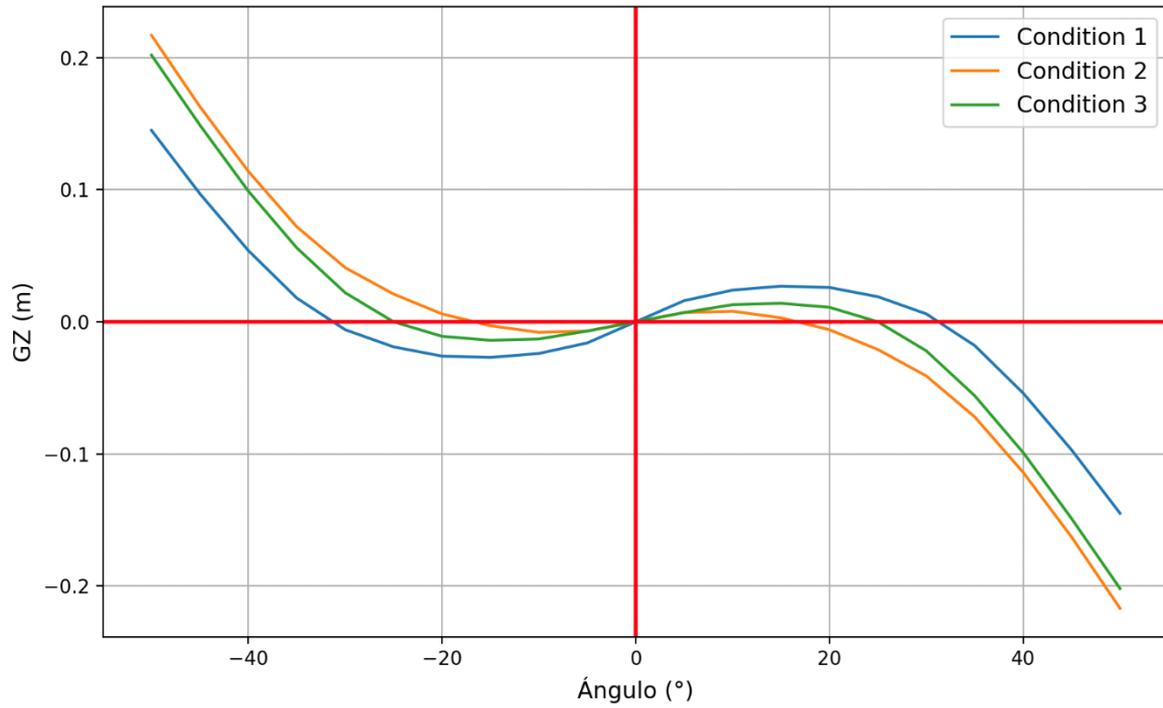


Figura 67

Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 1 en las tres condiciones

**Figura 68**

Curva de brazo adrizante GZ vs Ángulo de escora de la Lancha 2 en las tres condiciones

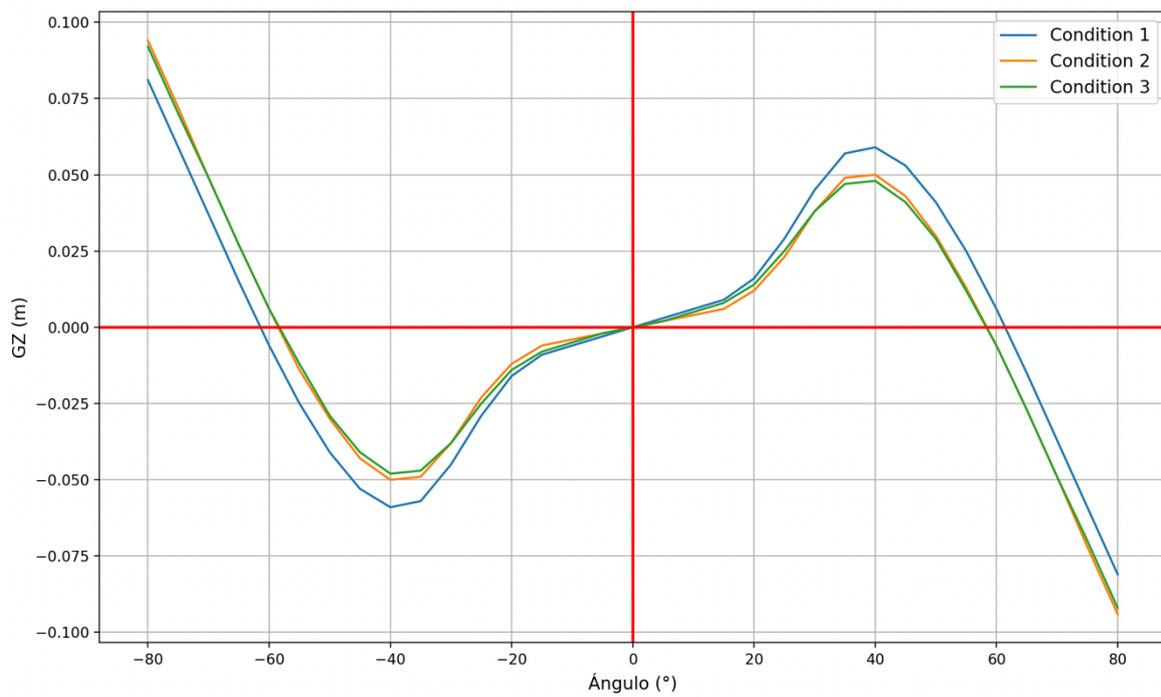


Figura 69

Lancha 1 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados

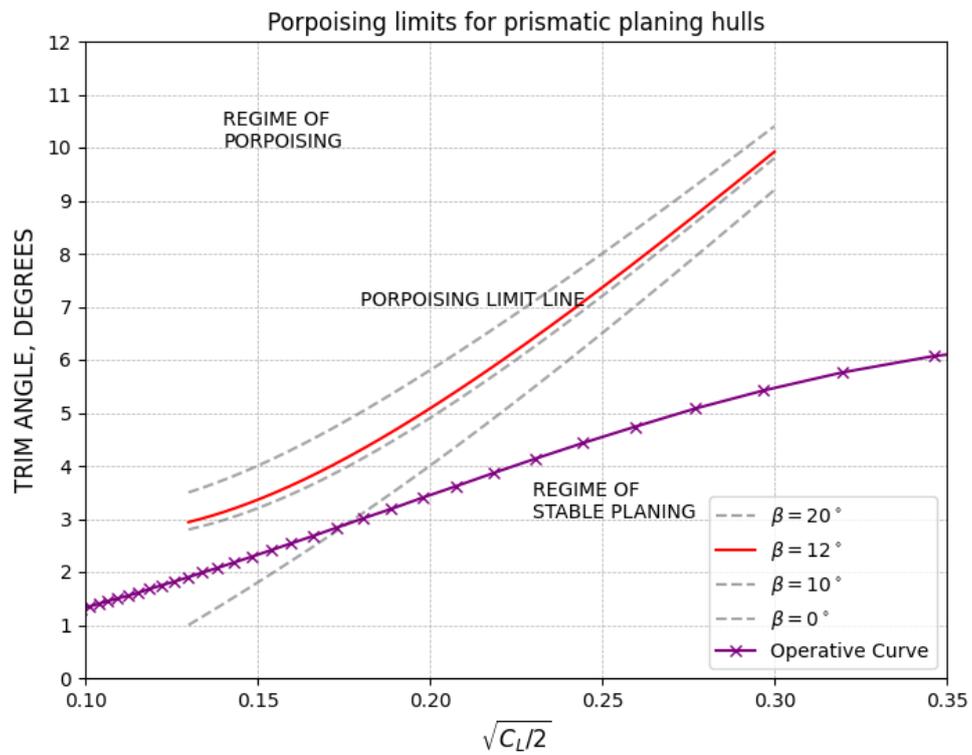


Figura 70

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 1 Condición 100%

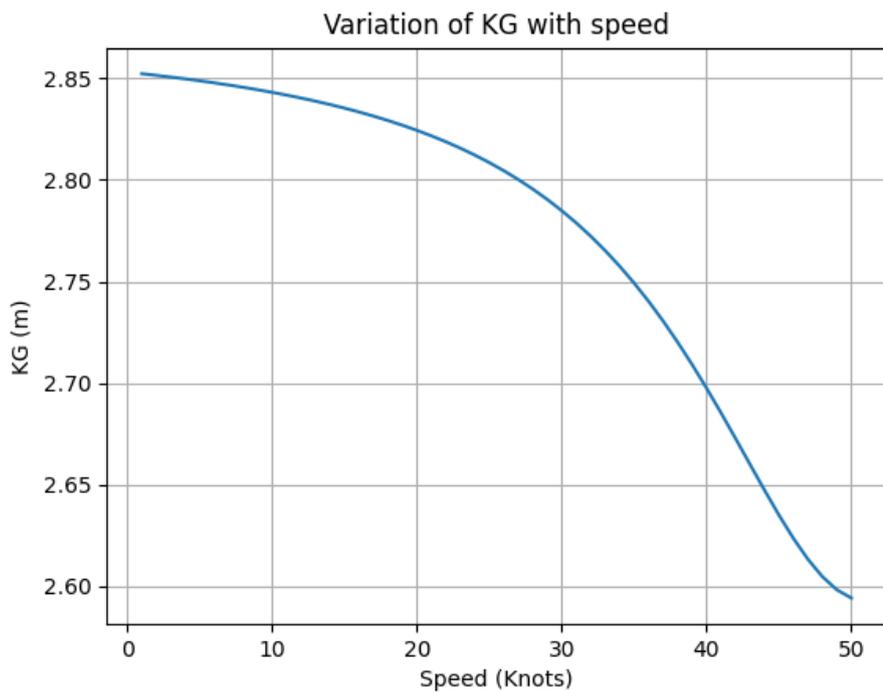


Figura 71

KG Dinámico con Apéndices Lancha 1 Condición 100%

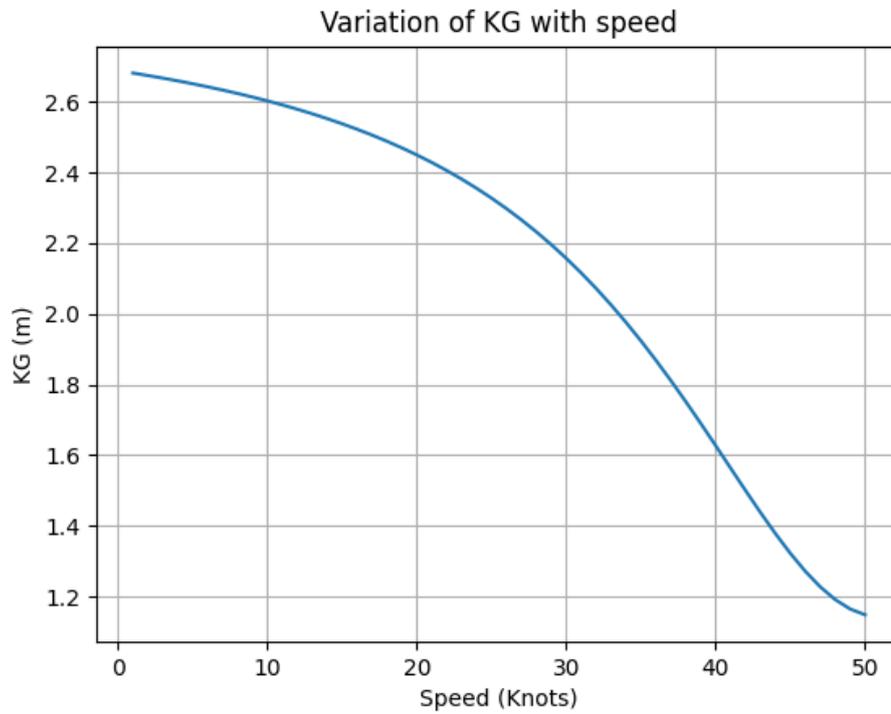


Figura 72

Lancha 1 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados

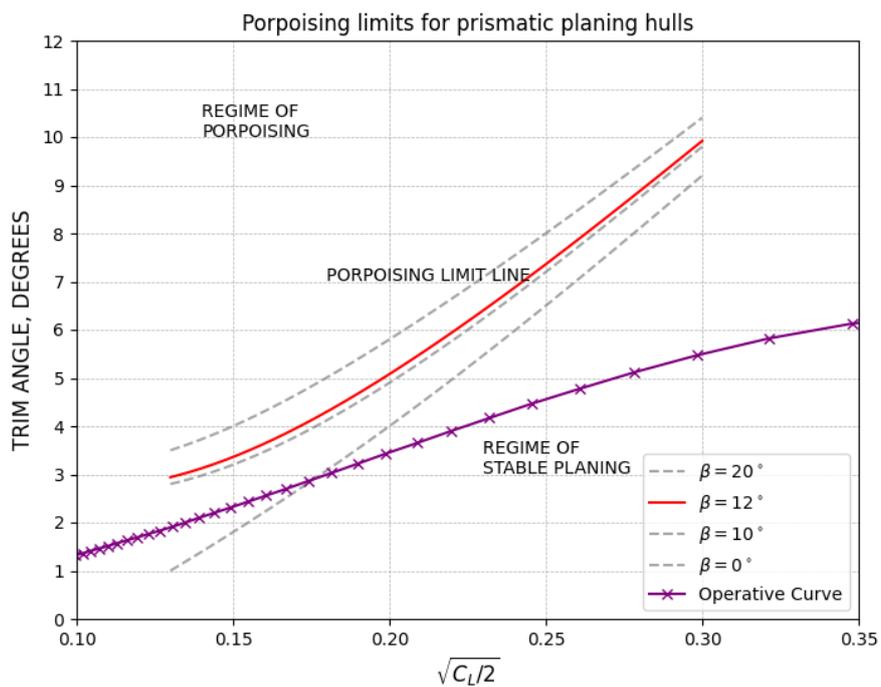
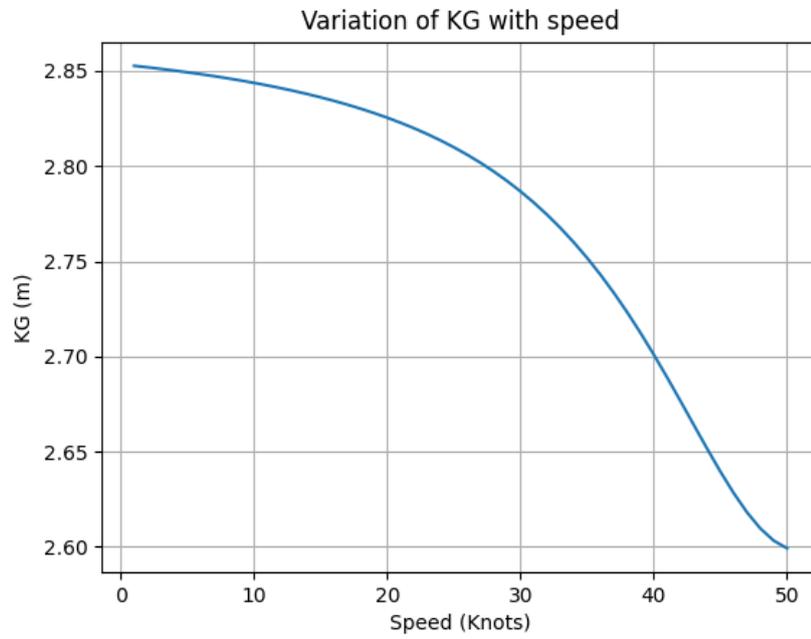


Figura 73

KG Dinámico sin Apendices Lancha 1 Condición 50%

**Figura 74**

KG Dinámico con Apendices Lancha 1 Condición 50%

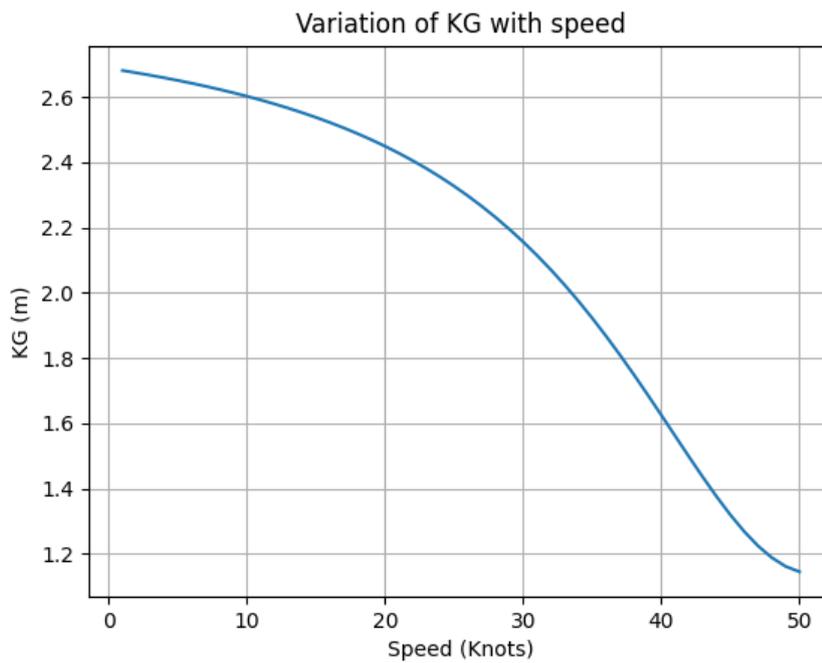


Figura 75

Lancha 1 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados

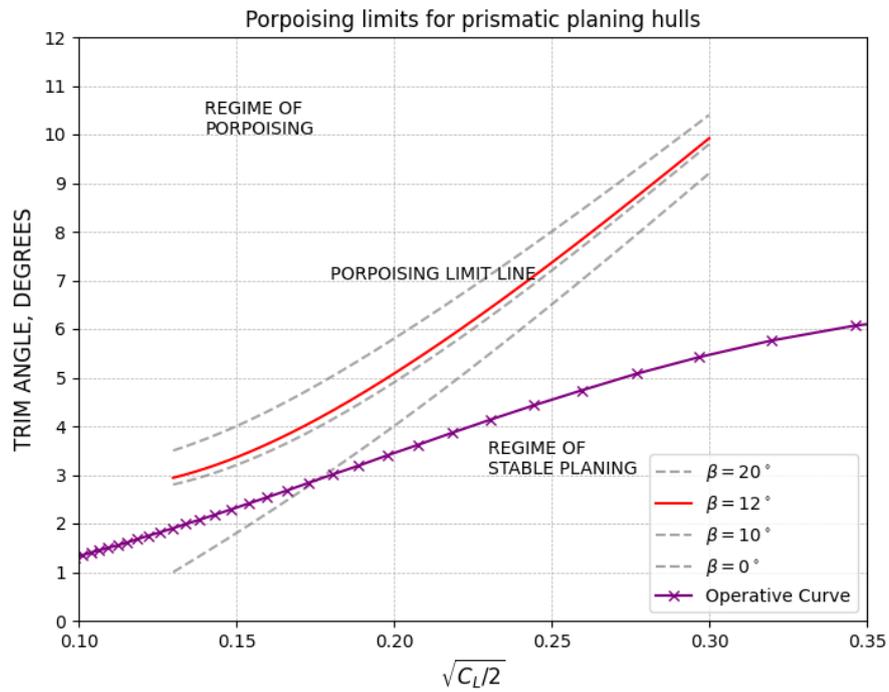


Figura 76

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 1 Condición 10%

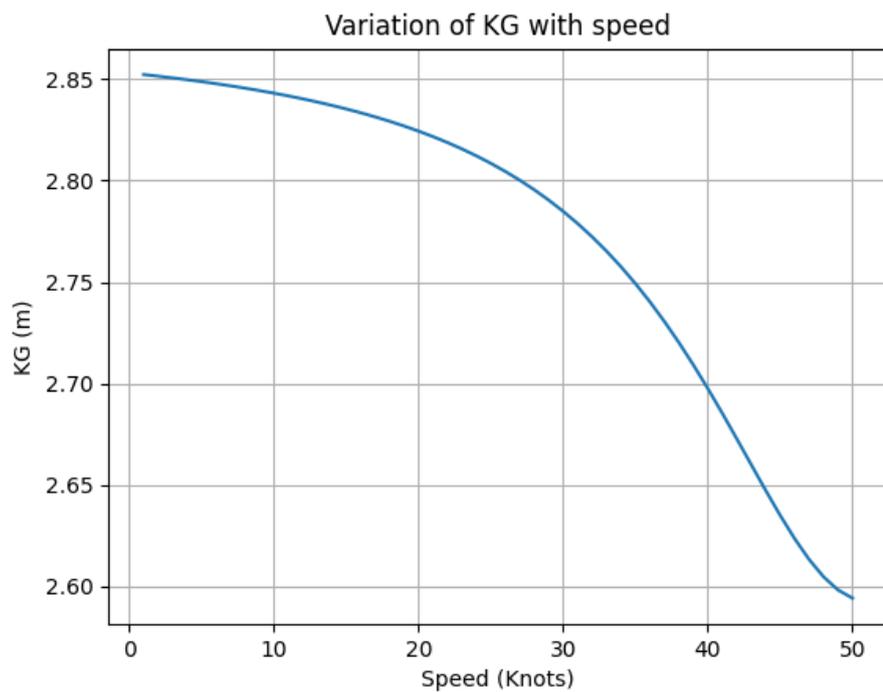


Figura 77

KG Dinámico con Apéndices Lancha 1 Condición 10%

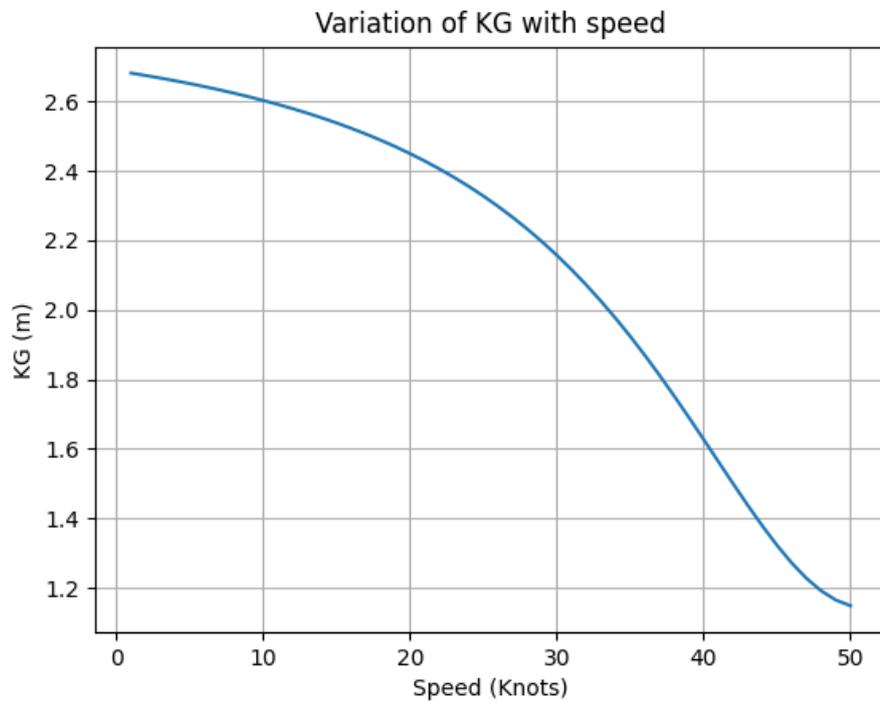


Figura 78

Lancha 2 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados

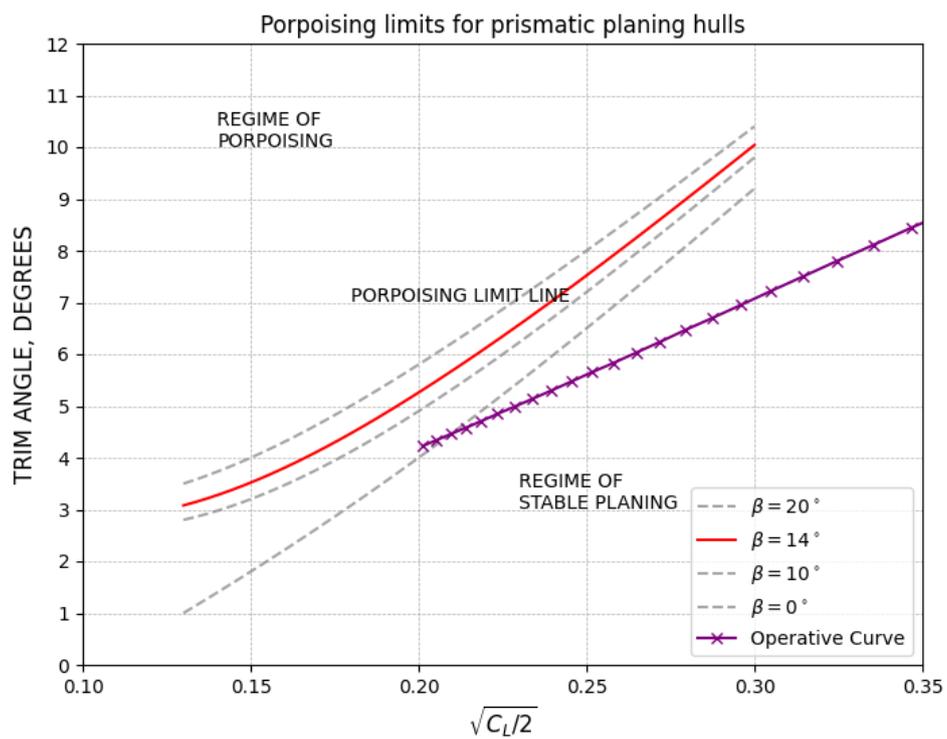
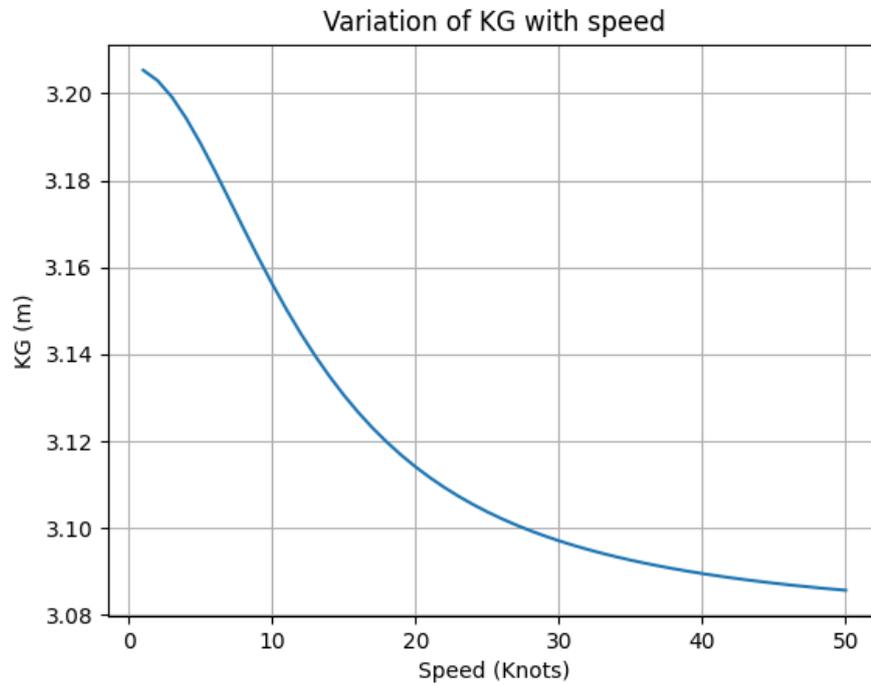


Figura 79

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 100%

**Figura 80**

KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 100%

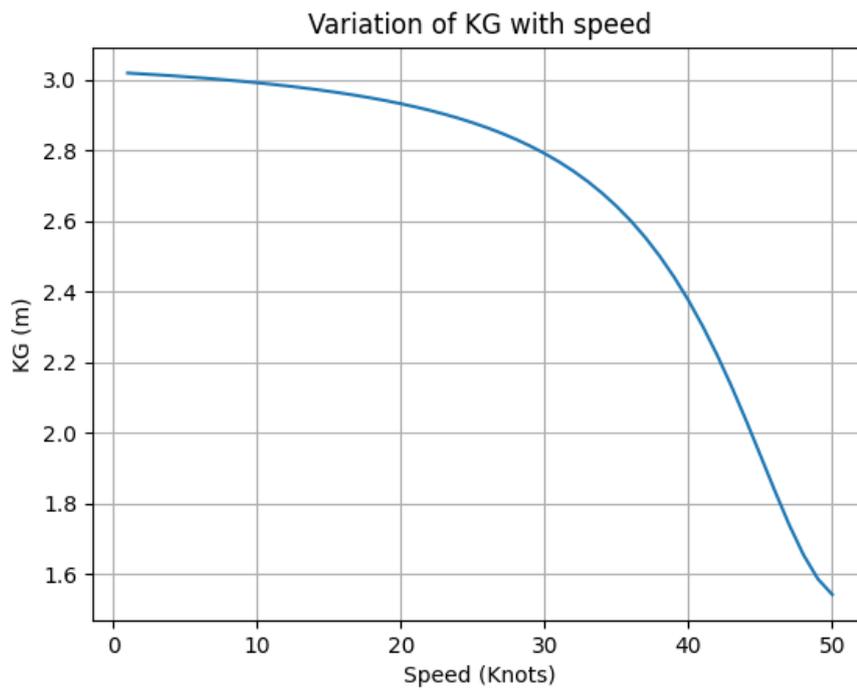


Figura 81

Lancha 2 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados

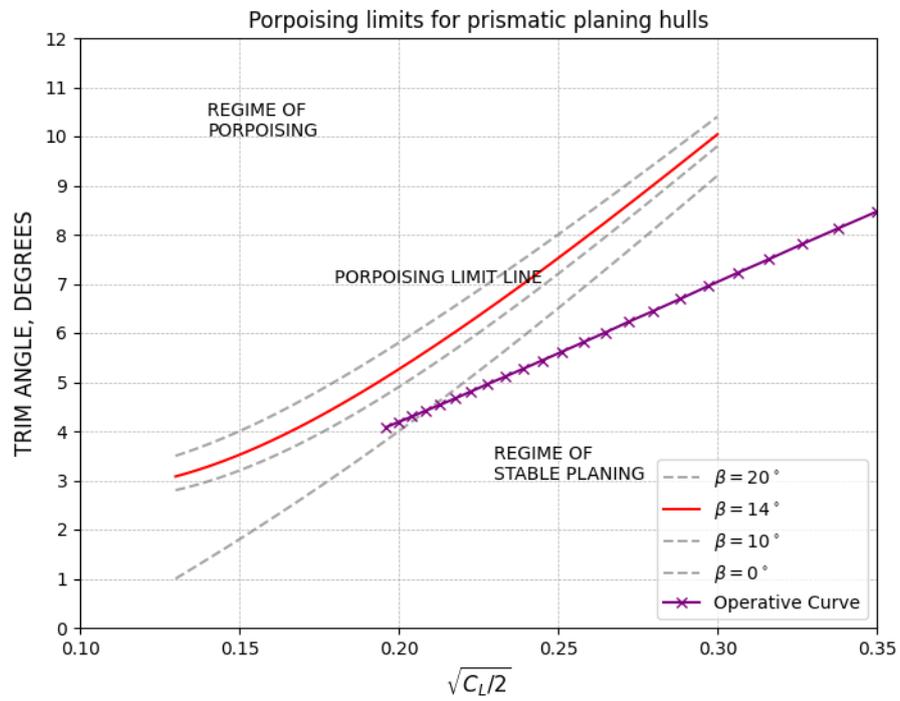


Figura 82

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 50%

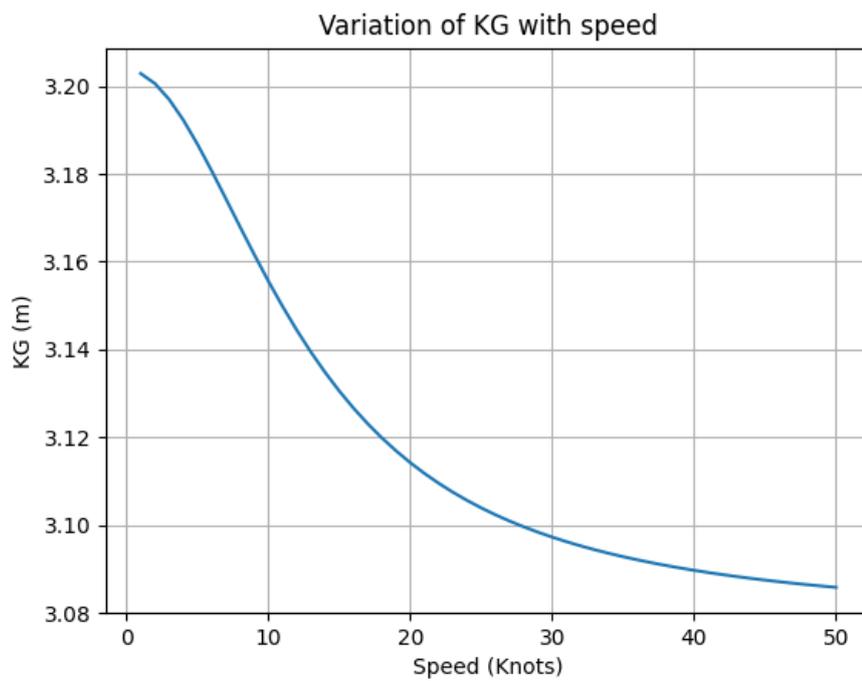


Figura 83

KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 50%

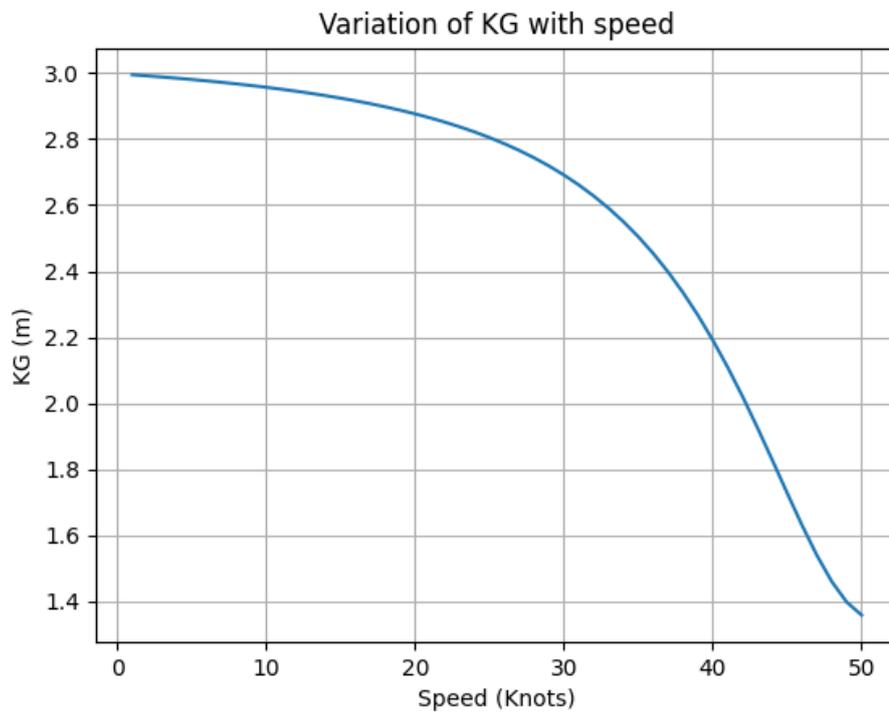


Figura 84

Lancha 2 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados

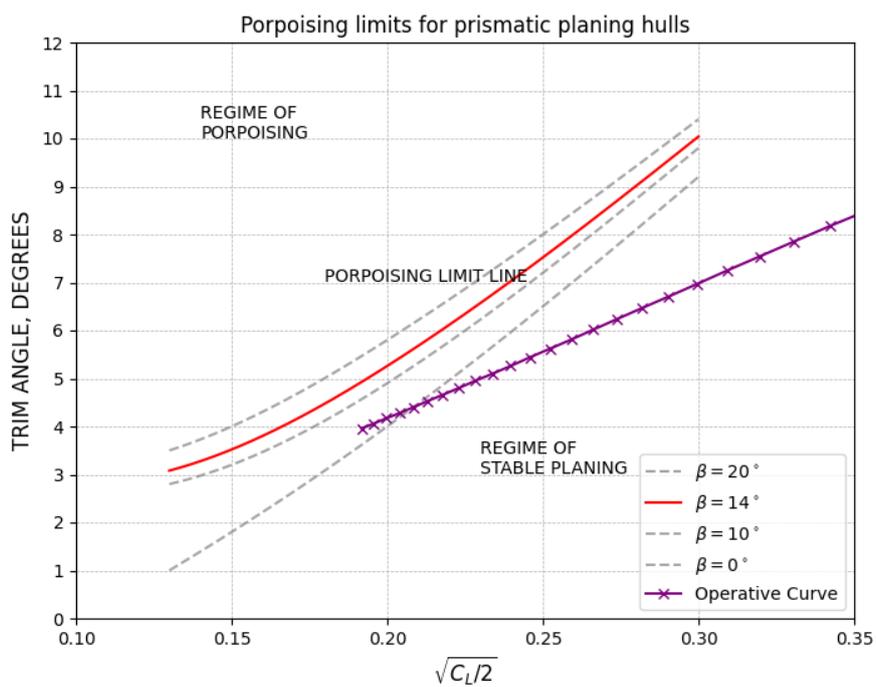
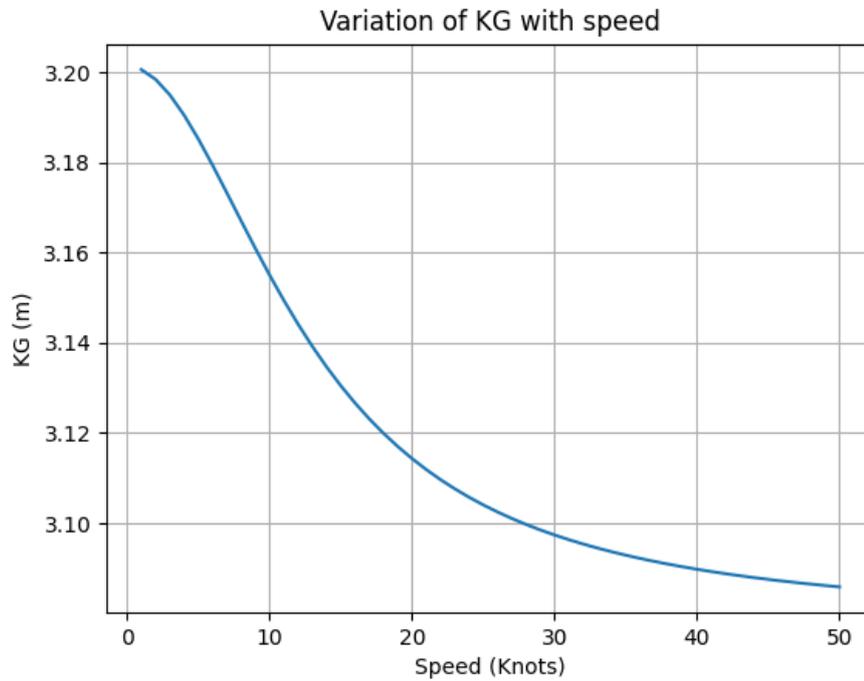


Figura 85

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 2 Condición 10%

**Figura 86**

KG Dinámico con Apéndices Lancha 2 Condición 10%

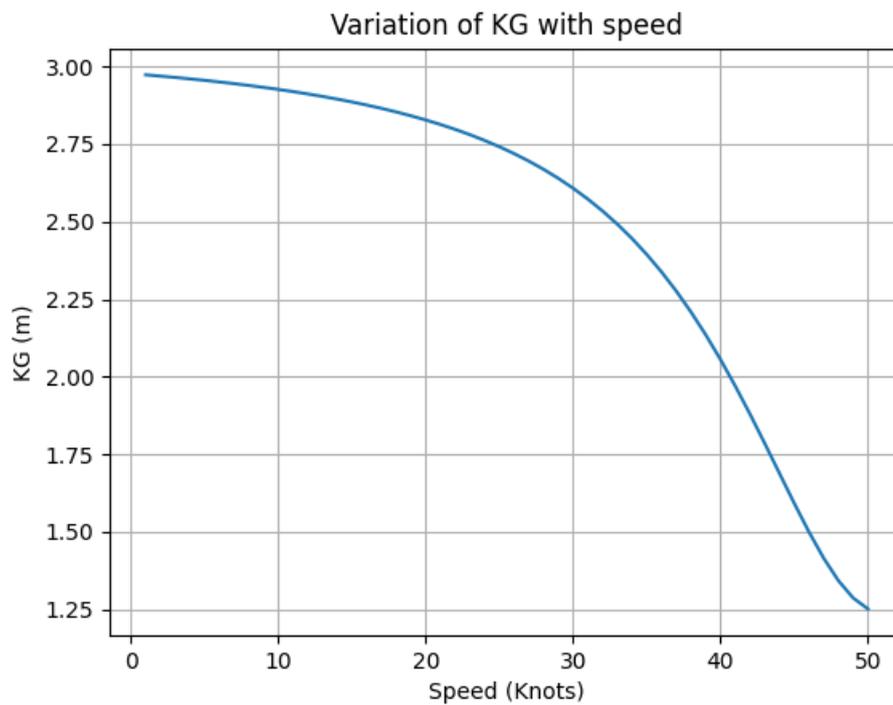


Figura 87

Lancha 3 Condición 100% de Carga y Pasajeros Sentados

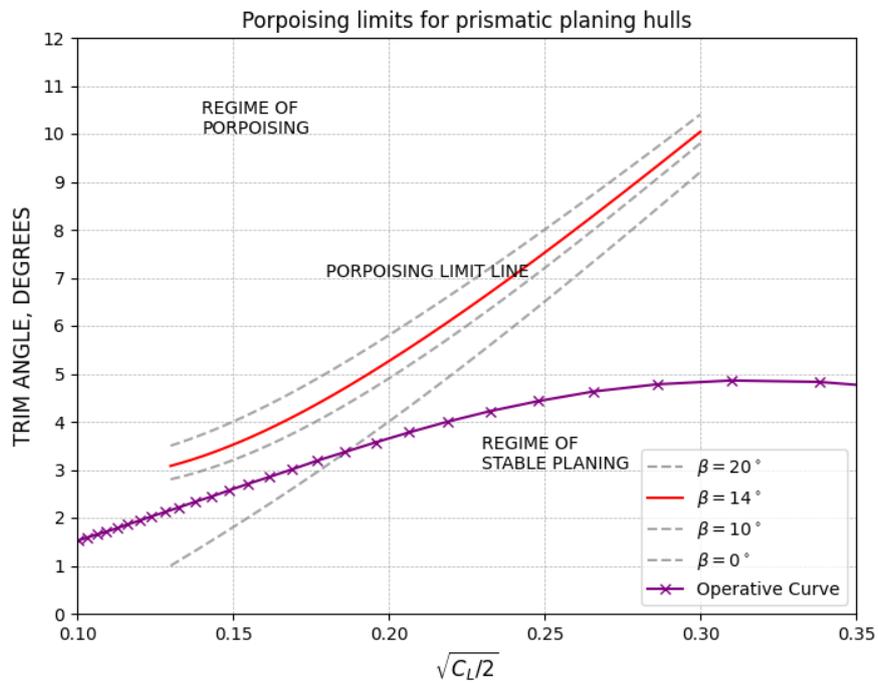


Figura 88

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 100%

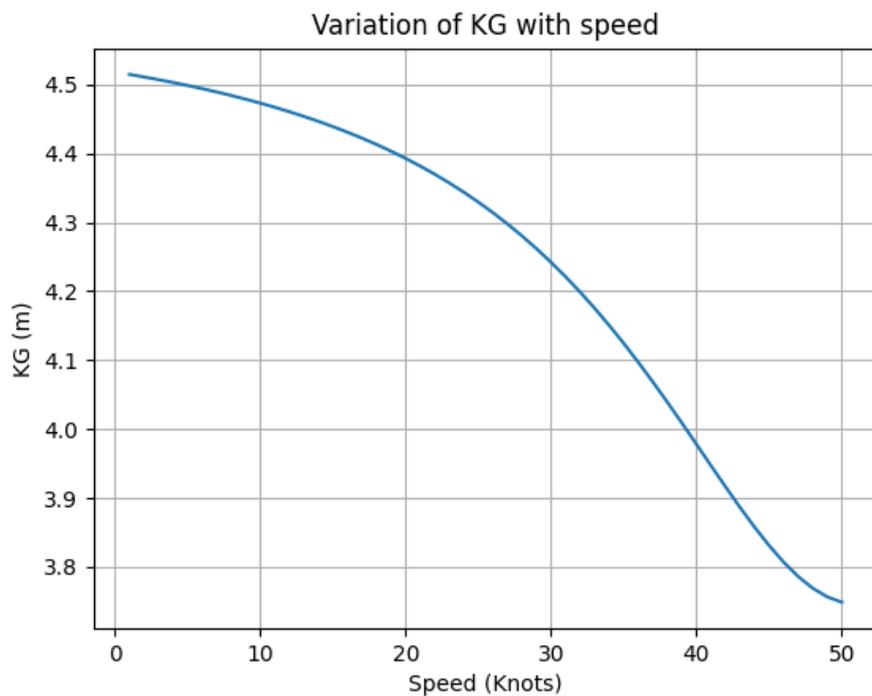


Figura 89

KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 100%

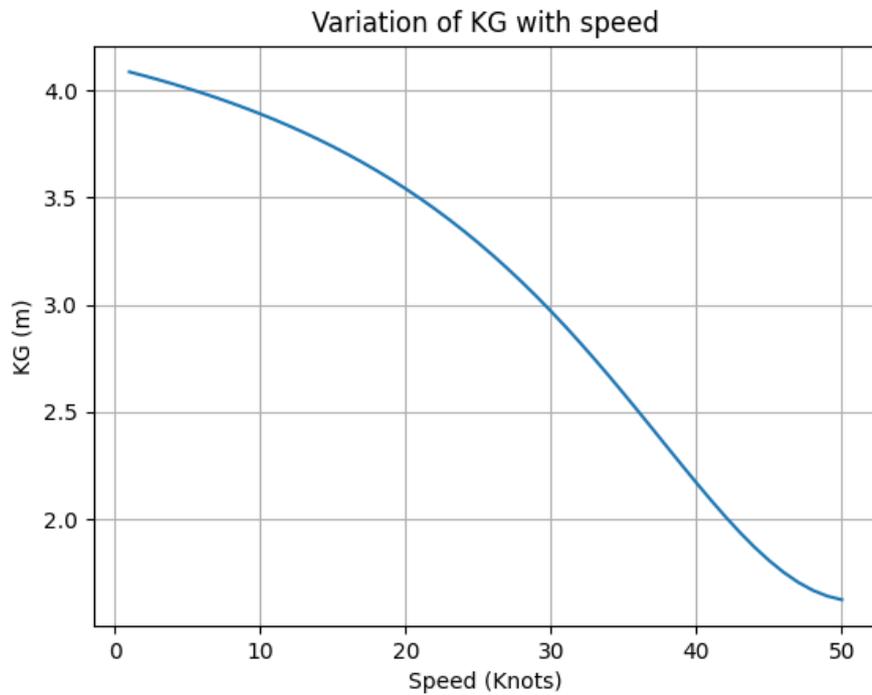


Figura 90

Lancha 3 Condición 50% de Carga y Pasajeros Sentados

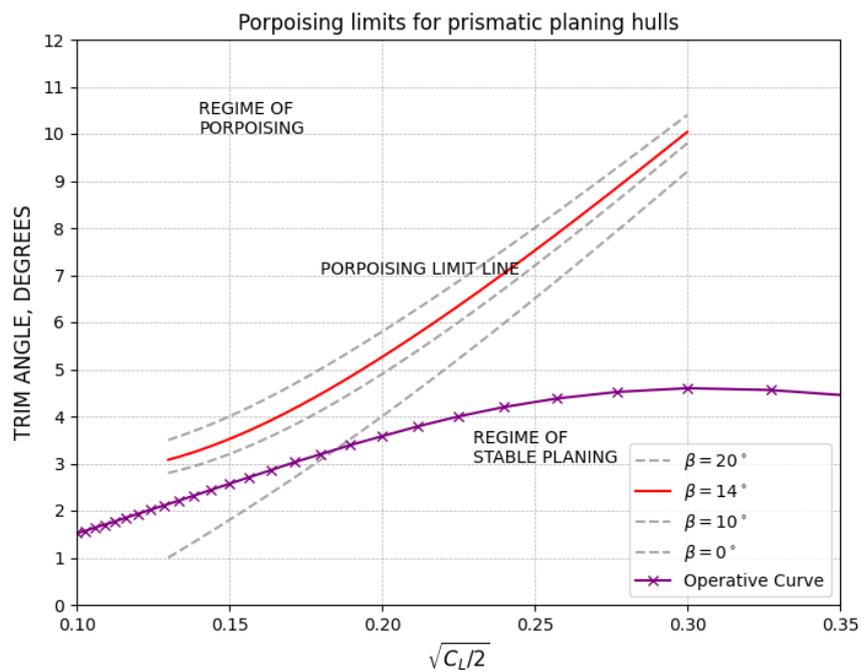
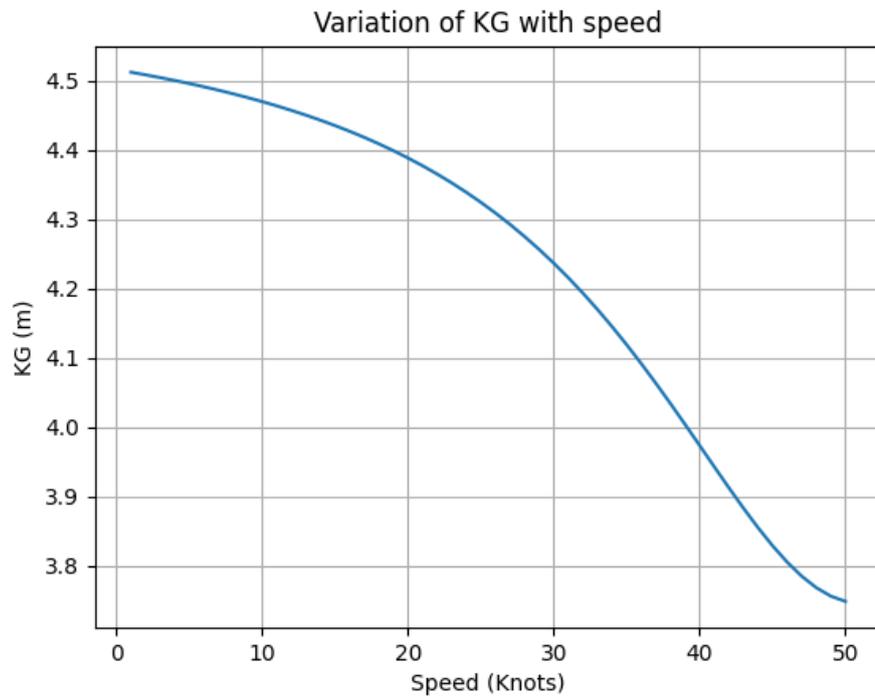


Figura 91

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 50%

**Figura 92**

KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 50%

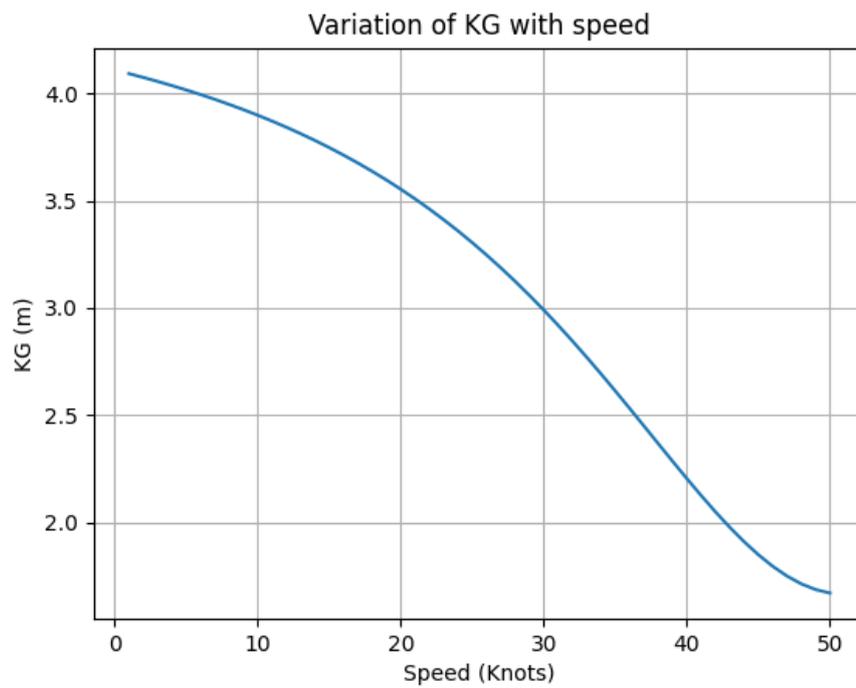


Figura 93

Lancha 3 Condición 10% de Carga y Pasajeros Sentados

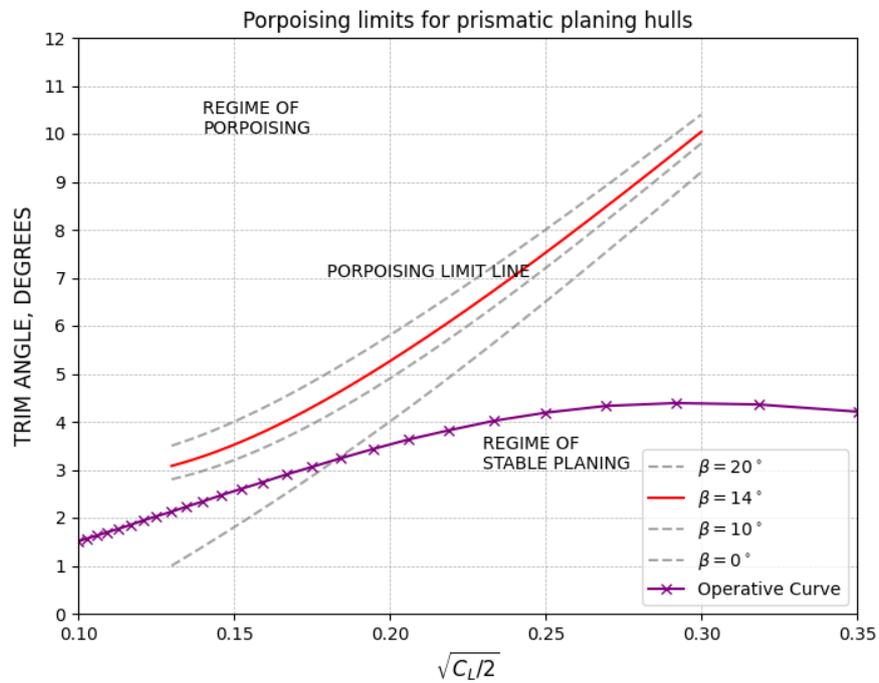


Figura 94

KG Dinámico sin Apéndices Lancha 3 Condición 10%

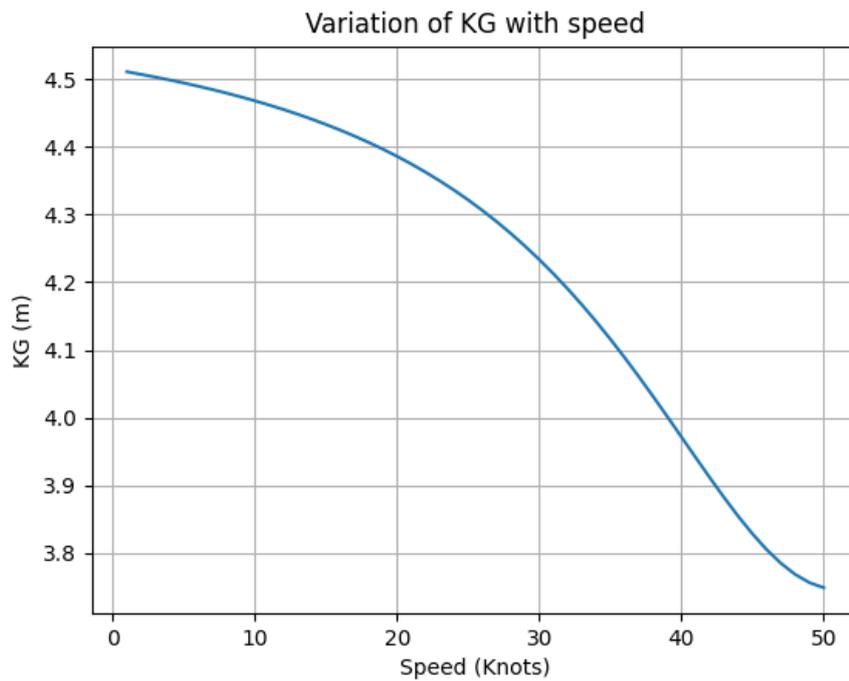
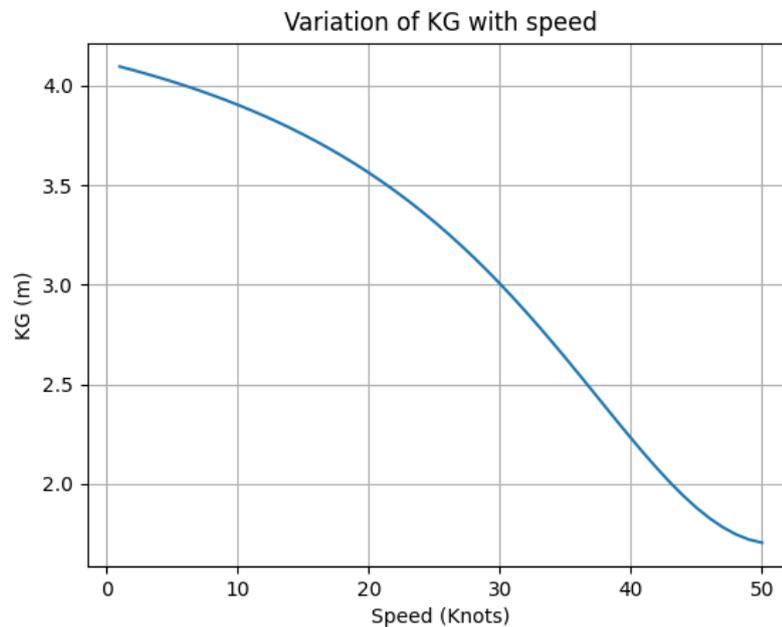


Figura 95*KG Dinámico con Apéndices Lancha 3 Condición 10%***Tabla 11***Condición 100% Chine Walking*

Condición 100 %			
L0075	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	3,29
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	2,774
	Eslora Proyectada	Lp [m]	7,2
	Área Proyectada	Ap [m ²]	11,84
	Volumétrico	Δ [m ³]	2,54243902
L1132	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	4,46
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	4,486
	Eslora Proyectada	Lp [m]	10,38
	Área Proyectada	Ap [m ²]	17,36
	Volumétrico	Δ [m ³]	15,2585366
L1202	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	4,92
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	4,888
	Eslora Proyectada	Lp [m]	11,33
	Área Proyectada	Ap [m ²]	27,08
	Volumétrico	Δ [m ³]	9,43902439

Tabla 12*Condición 50% Chine Walking*

Condición 50 %			
L0075	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	3,29
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	2,812
	Eslora Proyectada	Lp [m]	7,2
	Área Proyectada	Ap [m ²]	11,84
	Volumétrico	Δ [m ³]	2,5102439
L1132	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	4,46
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	4,369
	Eslora Proyectada	Lp [m]	10,38
	Área Proyectada	Ap [m ²]	17,36
	Volumétrico	Δ [m ³]	14,4780488
L1202	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	4,92
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	4,958
	Eslora Proyectada	Lp [m]	11,33
	Área Proyectada	Ap [m ²]	27,08
	Volumétrico	Δ [m ³]	8,85365854

Tabla 13*Condición 10% Chine Walking*

Condición 10 %			
L0075	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	3,29
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	2,803
	Eslora Proyectada	Lp [m]	7,2
	Área Proyectada	Ap [m ²]	11,84
	Volumétrico	Δ [m ³]	2,48487805
L1132	Proyección de China		
	Centroide Área Proyectada	C Ap [m]	4,46
	Centroide Longitudinal	LCG [m]	4,302
	Eslora Proyectada	Lp [m]	10,38
	Área Proyectada	Ap [m ²]	17,36
	Volumétrico	Δ [m ³]	13,8536585

L1202 Proyección de China			
Centroide Área Proyectada	C Ap [m]		4,92
Centroide Longitudinal	LCG [m]		5,022
Eslora Proyectada	Lp [m]		11,33
Área Proyectada	Ap [m ²]		27,08
Volumétrico	Δ [m ³]		8,36780488

Tabla 14

Cálculo de datos para Chine Walking

	$Ap/\Delta^{2/3}$	$(Cap - LCG/Lp)\%$
Lancha 0075		
Condición 100 %	6,35601146	7,17
Condición 50 %	6,41024195	6,64
Condición 10%	6,45379227	6,76
Lancha 1132		
Condición 100 %	2,82189683	-0,25
Condición 50 %	2,92242269	0,88
Condición 10%	3,00958584	1,52
Lancha 1202		
Condición 100 %	6,06313523	0,28
Condición 50 %	6,32751934	-0,34
Condición 10%	6,57013505	-0,90