



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y
Recursos Naturales**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DEBIDO A
BALANCE PARAMÉTRICO, EN BUQUES PESQUEROS ECUATORIANOS**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por

Marco Salvador Sotelo Zorrilla

Guayaquil – Ecuador

2015

DEDICATORIA

A mi familia, que son el motor de mi vida, quienes me motivan a seguir adelante. A mis amigos y compañeros con los que he compartido tantas experiencias durante mi desarrollo profesional y a todas las personas que siempre me han brindado su apoyo y confiaron en mí.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por guiar mi camino y por todo el apoyo incondicional que he recibido en todas las etapas de mi vida. A mi director de tesis José R. Marín L. por compartir sus conocimientos y experiencias en el transcurso de mis años de estudio y durante la elaboración de este documento. A mi hermano, amigos y compañeros que han contribuido directa e indirectamente en el desarrollo de este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

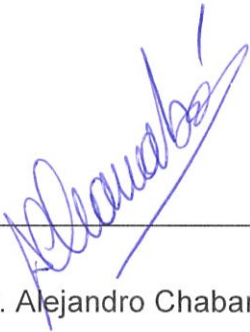
“La responsabilidad por las ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

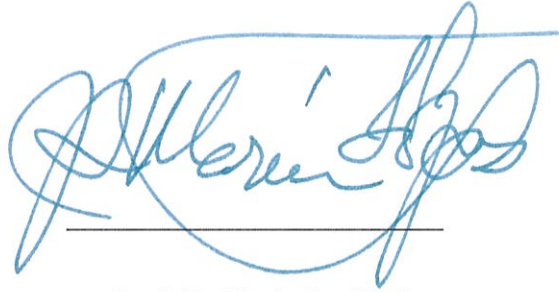
Marco Salvador Sotelo Zorrilla

TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, slanted upwards to the right, written over a horizontal line.

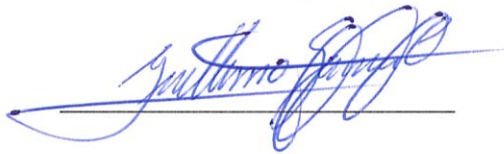
Ing. Alejandro Chabaná, M.Sc.

Presidente del Tribunal

A large, stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

José R. Marín L., Ph.D.

Director de Tesis

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Ing. Guillermo García, M.Sc.

Miembro Principal

RESUMEN

En este trabajo primero se describen brevemente los fenómenos de origen dinámico que se consideran en los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación que se encuentran en desarrollo por la Organización Marítima Internacional. Luego se describe matemáticamente el fenómeno del Balance Paramétrico de un buque, que es uno de los que se encuentran bajo revisión para incluirlo en estos nuevos criterios de estabilidad. Después se compara la ecuación de movimiento homogénea con la de Mathieu, cuya solución incluye zonas de inestabilidad dinámica. También se describen las condiciones de mar típicas en los que operan las embarcaciones pesqueras ecuatorianas, y por las alturas significativas en diferentes épocas del año, se pueden esperar estados de mar 4.

Para la solución numérica de la ecuación de balance Paramétrico, se implementó un programa en lenguaje Visual Fortran, donde se aplica el método de Runge Kutta de cuarto orden para realizar la integración en tiempo de la ecuación de movimiento. El término restaurador de la ecuación de balance paramétrico depende del GZ, que será interpolado usando un modelo de regresión polinómica de orden 5 a partir de las curvas de brazos adrizantes, variando la altura y la posición relativa de la ola. La superficie irregular del mar se la compone de la suma de armónicos a partir de la función Densidad Espectral según la formulación de Bretschneider y luego se la

representa mediante una ola sinusoidal equivalente, siguiendo el método de Grim mejorado. Para los términos del amortiguamiento y radio de giro virtual, se usan valores constantes, que se incluyen en el archivo de datos de entrada.

Finalmente se desarrollan simulaciones del balance de un buque pesquero ecuatoriano que sufrió zozobra cuando operaba alrededor de las Islas Galápagos. Se consideraron dos condiciones de carga, operando en olas regulares e irregulares. De las simulaciones en olas regulares, se determinó que en ambas condiciones de carga es posible encontrar condiciones resonantes, con y sin presencia de amortiguamiento, que llevaban a la zozobra del buque. Con estos resultados se determinaron las regiones principales de inestabilidad en ambas condiciones de carga y se aprecia la semejanza con las regiones inestables de la ecuación de Mathieu. También se observa la reducción de estas regiones inestables, causada por la presencia del amortiguamiento. Para el caso de mar irregular se presenta zozobra por resonancia paramétrica únicamente cuando no se incluye el término de amortiguamiento; basta un coeficiente adimensional del 1% con respecto al crítico, para que se reduzca drásticamente la respuesta resonante y no se produzca zozobra del buque.

INDICE GENERAL

RESUMEN	i
INDICE GENERAL	iii
INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE ANEXOS.....	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 1.....	5
1.1. Descripción de los modos de falla por problemas de estabilidad dinámicos.....	5
1.2. Descripción matemática del fenómeno de Balance Paramétrico....	10
1.3. Resumen de la solución matemática general del problema.....	15
1.4. Descripción de las condiciones de mar típicas en las que operan los buques pesqueros locales	20
CAPITULO 2.....	25
2.1. Descripción general del proceso de simulación.....	25

2.2. Ola equivalente para un mar irregular según el método de Grim mejorado.....	32
2.3. Implementación de la solución numérica de la ecuación de movimiento de Balance Paramétrico	40
CAPITULO 3.....	47
3.1. . Características principales de la flota pesquera ecuatoriana.....	47
3.2. . Resumen de las simulaciones en la condición 'Salida de Puerto'	59
3.3. . Resumen de las simulaciones en la condición 'Llegada a Puerto'	75
3.4. . Posibilidad de zozobra por Balance Paramétrico	88
CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variación del GZ debido al cambio del plano de flotación	8
Figura 2: Equilibrio dinámico del buque en Balance	12
Figura 3: Zonas de Inestabilidad de la Ecuación de Mathieu.....	17
Figura 4: Influencia del Amortiguamiento.....	18
Figura 5: Influencia de la Variación no Lineal de la curva GZ.....	19
Figura 6: Corrientes Marinas que afectan a Ecuador.....	21
Figura 7: Oleaje más frecuente en Invierno	22
Figura 8: Oleaje más frecuente en Verano	23
Figura 9: Diagrama de Flujo del Algoritmo.....	28
Figura 10: Estimación de la Ordenada de Inundación	30
Figura 11: Algoritmo de Ola Efectiva de Grim Mejorada.....	33
Figura 12: Espectro de mar de Bretschneider	36
Figura 13: Cuadrado de Funciones de Transferencia.....	37
Figura 14: Ola Equivalente de Grim Mejorada para $\lambda = 37.83$ m	39
Figura 15: Ejemplo de Datos de Entrada	42
Figura 16: Respuesta Paramétrica del Buque en mar Regular.....	44
Figura 17: Respuesta Paramétrica del Buque en Estado de Mar 4	45
Figura 18: Histograma de la distribución de buques pesqueros ecuatorianos según su eslora.....	48
Figura 19: Relación Eslora/Manga VS Eslora	49
Figura 20: Relación Manga/Calado vs Eslora	50

Figura 21: Distribución General del buque Atunero 52

Figura 22: Modelo Geométrico de la Embarcación Analizada 53

Figura 23: Curvas GZ en función de la posición del Seno de la Ola..... 56

Figura 24: GZ en función de la Altura de la Ola en Condición de Carga 1 .. 57

Figura 25: GZ en función de la Altura de la Ola en Condición de Carga 2 .. 58

Figura 26: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 1 61

Figura 27: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 1 62

Figura 28: GZ versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1 63

Figura 29: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 1 64

Figura 30: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 1 64

Figura 31: Ordenada de Inundación, en la Condición de Carga 1 65

Figura 32: Ordenada de Inundación versus Ángulo de Balance, en la
Condición de Carga 1 66

Figura 33: Asiento vs Posición relativa de la ola, en la Condición de Carga 1
..... 66

Figura 34: Región de Inestabilidad Principal sin amortiguamiento, en la
Condición de Carga 1 68

Figura 35: Región de Inestabilidad Principal con 2.5% de amortiguamiento,
en la Condición de Carga 1 68

Figura 36: Ángulo de Balance en el tiempo con diferentes niveles de
amortiguamiento, en la Condición de Carga 1 70

Figura 37: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 1 70

Figura 38: GZ versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1	71
Figura 39: Amplitud de Olas en el tiempo, en la Condición de Carga 1	71
Figura 40: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 1	72
Figura 41: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 1	72
Figura 42: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 1	73
Figura 43: Ordenada de Inundación versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1	73
Figura 44: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 1	74
Figura 45: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 2	76
Figura 46: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 2	77
Figura 47: Brazo Adrizante versus Balance, en la Condición de Carga 2....	77
Figura 48: Calado Medio en el tiempo, en la Condición de Carga 2	78
Figura 49: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 2	78
Figura 50: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 2	79
Figura 51: Ordenada de Inundación versus Balance, en la Condición de Carga 2	79
Figura 52: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2	80

Figura 53: Región de Inestabilidad Principal sin amortiguamiento, en la Condición de Carga 2	82
Figura 54: Región de Inestabilidad Principal con 2.5% de amortiguamiento, en la Condición de Carga 2	82
Figura 55: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 2	83
Figura 56: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 2	84
Figura 57: Brazo Adrizante versus Balance, en la Condición de Carga 2....	84
Figura 58: Amplitud de Ola en el tiempo, en la Condición de Carga 2.....	85
Figura 59: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 2	85
Figura 60: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 2	86
Figura 61: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 2	86
Figura 62: Ordenada de Inundación versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2	87
Figura 63: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2	87
Figura 64: Zona donde ocurrió la zozobra	95
Figura 65: Altura de Olas durante el accidente	96
Figura 66: Periodo promedio de las olas durante el accidente	96
Figura 67: Condiciones Climáticas durante el accidente	97
Figura 68: Nivel de Convergencia en función del intervalo de tiempo	99
Figura 69: Amplitud de Ola equivalente de Grim en el tiempo	100

Figura 70: Histograma de frecuencias de Amplitudes de ola equivalente.. 101

Figura 71: Comparación entre Superficie real y ola equivalente de Grim .. 102

Figura 72: GZ en olas con la cresta en la Perpendicular de proa, para la
Condición de Carga 1 103

Figura 73: GZ en olas con la cresta a 1/4 de la Perpendicular de proa, para
la Condición de Carga 1 104

Figura 74: GZ con olas en Sección Media, para la Condición de Carga 1. 104

Figura 75: GZ en olas con la cresta a 3/4 de la Perpendicular de proa, para
la Condición de Carga 1 105

Figura 76: GZ en olas con la cresta en la Perpendicular de proa, para la
Condición de Carga 2 106

Figura 77: GZ en olas con la cresta a 1/4 de la Perpendicular de proa, para
la Condición de Carga 2 106

Figura 78: GZ en olas con la cresta a 3/4 de la Perpendicular de proa, para
la Condición de Carga 2 107

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Atura Significativa y Periodo de Olas, según la escala de Douglas	24
Tabla II: Dimensiones Principales de la Embarcación	51
Tabla III: Condición de Carga 1, salida de puerto	54
Tabla IV: Condición de Carga 2, regreso a puerto.....	55
Tabla V: Condición de Carga 1	60
Tabla VI: Condición de Carga 2.....	75

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	95
ANEXO B.....	98
ANEXO C.....	100
ANEXO D.....	103

INTRODUCCIÓN

Varios casos de zozobra de buques nacionales se han dado en los últimos años [1], [2] y [3], asumiéndose que estas embarcaciones, para poder operar, cumplían con los actuales criterios de Estabilidad establecidos por la OMI[4]; en estos cálculos se considera el fenómeno como cuasi estático, [5]. Dicha organización se encuentra revisando los cálculos de estabilidad, y entre los fenómenos dinámicos del buque que se considera que pueden causar la zozobra, está el Balance Paramétrico, [4], que se presenta cuando el buque avanza en olas de Proa ó Popa. Se piensa que este caso se podría presentar con cierta frecuencia en la flota pesquera ecuatoriana con olas de Proa. La solución analítica del problema dinámico de balance hasta alcanzar la zozobra es muy compleja, por lo que se podrían usar simulaciones para obtener aproximaciones de la solución. El modelo numérico con el que se debería trabajar, debe permitir la inclusión de procesos aleatorios para simular el movimiento del buque en un mar irregular

Los criterios de estabilidad de la OMI, que actualmente se aplican mundialmente, son cálculos que se realizan considerando únicamente al buque como un cuerpo en equilibrio cuasi estático, buscándose que la curva de brazos adrizantes cumpla con ciertos valores mínimos, [4]. Pero en vista de que aún se presentan accidentes, los organismos que velan por la seguridad, se ven obligados a considerar nuevos modos de falla para evaluar

la estabilidad de los buques. Por eso desde hace algunos años la OMI viene desarrollando una Segunda Generación de Criterios de Estabilidad, [4], donde se considera la dinámica del buque en olas que pueden conducir a zozobra. Entre los fenómenos considerados está el Balance Paramétrico.

El fenómeno de Balance Paramétrico se produce cuando el buque avanza en olas de proa o popa, con una frecuencia de encuentro en el orden del doble de la de Balance, [4]. Para el caso de embarcaciones relativamente pequeñas, con alta frecuencia de Balance, la resonancia Paramétrica puede presentarse en olas de Proa. Debido a la situación de inestabilidad dinámica que se alcanza, a medida que el buque avanza en este tren de olas, la condición recta es inestable y la embarcación empieza a balancearse con altas amplitudes, pudiendo llegar a la zozobra.

La solución del problema de Balance Paramétrico analíticamente es muy complicada de determinar, porque se incluyen efectos no lineales [4], y algunos coeficientes son variables temporalmente. En este caso se pueden emplear métodos numéricos de Simulación para empezar a estudiar la solución del problema. Se puede usar el método de Runge-Kutta de 4to Orden, [9], para aproximar la solución de la ecuación de Balance, y matemáticamente a la superficie irregular del mar se la puede representarse por una ola regular equivalente, como sugiere el Profesor Bulian, [6]. De esta

forma se puede transformar el problema a un movimiento de balance paramétrico en una ola regular, pero que cambia de amplitud y velocidad de propagación.

Objetivo General

Analizar mediante el uso de simulaciones numéricas, el fenómeno de Balance Paramétrico en buques pesqueros ecuatorianos.

Objetivos Específicos

- Describir el desarrollo del fenómeno de Balance Paramétrico en buques pesqueros ecuatorianos
- Implementar la solución numérica de la ecuación de Balance Paramétrico con olas de proa en mar irregular
- Analizar la posibilidad de zozobra en buques pesqueros ecuatorianos por Balance Paramétrico, en dos condiciones de carga

Beneficios del Trabajo

Localmente se tiene muy poco conocimiento sobre los problemas de estabilidad de origen dinámico de los buques, y se sospecha que este fenómeno podría ser causa de zozobra. En este trabajo se estudia el fenómeno de balance paramétrico como posible fuente de problemas de estabilidad, con el fin de poder aumentar la confiabilidad y el nivel de seguridad en las embarcaciones

Hipótesis

La resonancia paramétrica es la causa de la zozobra de algunos buques de la flota pesquera ecuatoriana

CAPÍTULO 1

FENÓMENO DE BALANCE PARAMÉTRICO EN BUQUES PESQUEROS ECUATORIANOS

1.1. Descripción de los modos de falla por problemas de estabilidad dinámicos

Actualmente se conoce que existen varios fenómenos dinámicos que son posible causa de zozobra de buques. Entre estos se destaca el Balance

Paramétrico, que es un fenómeno de inestabilidad dinámica que puede causar zozobra por la variación excesiva del GM y una corta frecuencia de encuentro. Otro fenómeno similar es la Pérdida Pura de Estabilidad, que se presenta cuando existe una disminución en la restauración estática del buque, debido a la reducción del plano de flotación. El fenómeno de '*Surf-Ridding* y *Broaching*', se presenta cuando el buque es capturado por una ola de popa y se vuelve direccionalmente inestable, pudiendo provocar una zozobra por Guiñada súbita (*'Broaching*'). Finalmente una condición de '*Dead-Ship*', se presenta cuando el buque se encuentra sin propulsión y puede zozobrar al recibir olas de costado. Se considera que el estudio de estos fenómenos dinámicos puede llevar al desarrollo de nuevos criterios de estabilidad y evitar futuras pérdidas de embarcaciones.

Debido a la falta de consideración de los fenómenos de origen dinámico en los actuales criterios de estabilidad, la Organización Marítima Internacional (OMI) en el año 2002 designó un comité para trabajar en el desarrollo de nuevos requerimientos de estabilidad. El propósito de dicho grupo de trabajo es mejorar las regulaciones actuales, aumentar la seguridad de futuras embarcaciones y prevenir accidentes en las embarcaciones operativas. Estos nuevos criterios son llamados "Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta", y se basan principalmente en medir el nivel de vulnerabilidad de los buques a sufrir problemas de estabilidad a causa de fenómenos dinámicos.

Existen cuatro fenómenos principales de la dinámica del buque que son posible causa de zozobra, en los que se basan las investigaciones para el desarrollo de los nuevos criterios de estabilidad. Estos fenómenos son, [4]:

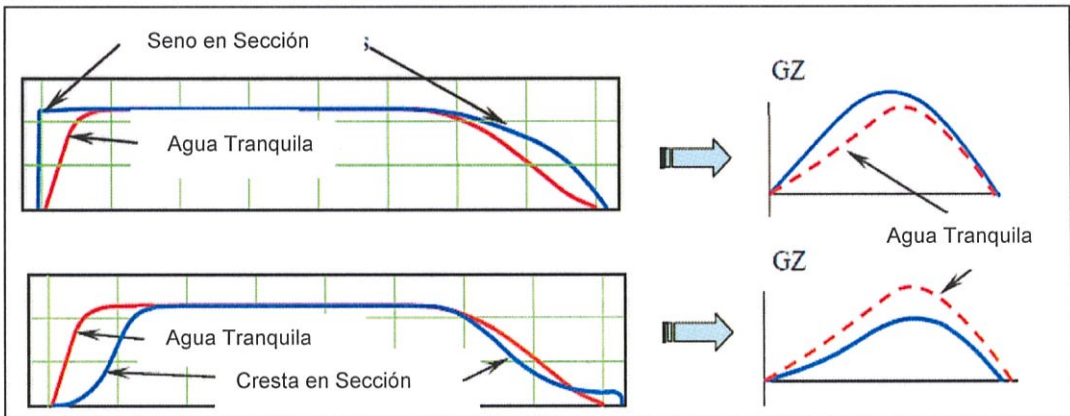
- Pérdida Pura de Estabilidad
- Balance Paramétrico
- *'Surf Riding y Broaching'*
- *'Dead Ship Condition'*

La Pérdida pura de estabilidad, es un fenómeno cuasi estático que ocurre cuando el buque navega en olas de popa, y sufre una reducción notable en la capacidad de adrizamiento debido a la disminución del plano de flotación. Esta condición de estabilidad reducida, es peligrosa cuando el buque está navegando a una velocidad relativamente alta y se acerca una ola de popa con una velocidad ligeramente mayor a la del buque. A la ola le tomará un tiempo relativamente alto en pasar a través de la embarcación, lo que implica que la condición de estabilidad reducida se mantiene durante un largo periodo de tiempo. Existe entonces la posibilidad de que se desarrolle un gran ángulo de escora o incluso podría llevar a la zozobra, situación que podría empeorarse por el momento adicional causado por el viento, [4].

El Balance Paramétrico es un fenómeno de inestabilidad dinámica, que se presenta cuando un buque está navegando en olas de proa, con longitud de

onda cercana a la eslora del buque, produciendo un cambio en la estabilidad estática debido a la variación cuasi armónica del plano de flotación. Normalmente los buques poseen formas finas en la proa y popa, para disminuir la resistencia al avance, pero la secciones se engrosan en la parte superior para incrementar el área en la cubierta. Esto hace que el plano de flotación cambie significativamente con el paso de las olas cuando son de longitud similar a la eslora del buque. Generalmente se observa una alta reducción cuando la cresta de la ola se encuentra cerca de sección media, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Variación del GZ debido al cambio del plano de flotación



[Fuente: [4]]

Si el buque se encuentra con un ángulo de balance mientras el seno de la ola está en sección Media, el incremento de la estabilidad provocará un fuerte momento restaurador. Cuando el buque regresa a la posición de equilibrio, la velocidad de oscilación aumenta debido al momento adicional añadido. Si en

ese momento el buque se encuentra con la cresta de la ola en sección media la estabilidad se reduce y el buque oscilará con mayor amplitud al lado opuesto debido a la velocidad adicional y a la reducción de la restauración. Luego si el seno de la ola pasa nuevamente por sección Media cuando el buque alcanza la amplitud máxima de oscilación, la estabilidad aumenta y el ciclo se repite nuevamente.

Nótese en el fenómeno descrito que se desarrolla con medio periodo de oscilación con el paso completo de una ola. Entonces se necesitan dos olas para completar un periodo de oscilación en balance. Por esta razón se conoce que la resonancia paramétrica se presenta principalmente cuando la frecuencia de encuentro es alrededor de dos veces la frecuencia natural de balance, [4]. En esta situación se ha determinado que la embarcación es dinámicamente inestable.

Otro fenómeno que se estudia en el desarrollo del Segundo Criterio de Estabilidad es la Guiñada Súbita (*'Broaching'*) que se presenta cuando el buque realiza un giro incontrolable aun cuando el timón se encuentre en la dirección opuesta. Como cualquier giro brusco en un buque, la guiñada súbita viene acompañada de un gran ángulo de escora que puede llevar a la zozobra. Este fenómeno se puede presentar en olas de popa con longitudes de onda mayores a la eslora del buque. Para que se pueda presentar la guiñada súbita, primero el buque debe haber sido capturado por una ola, fenómeno conocido

como *Surf-Riding*, que se presenta cuando una ola se acerca desde popa, y atrapa al buque haciendo que este viaje a la misma velocidad, [4].

Finalmente, el cuarto fenómeno que se estudia en los nuevos criterios de estabilidad es "*Dead Ship Condition*", que ocurre cuando el buque ha perdido la propulsión y el gobierno. La acción de las olas hace que el buque se posicione con la proa en dirección perpendicular a las olas incidentes. En esta situación el buque puede zozobrar debido a condiciones ambientales críticas, ya sea por el elevado momento escorante causado por las olas de costado, fuertes vientos o la combinación de ambos, [4].

1.2. Descripción matemática del fenómeno de Balance

Paramétrico

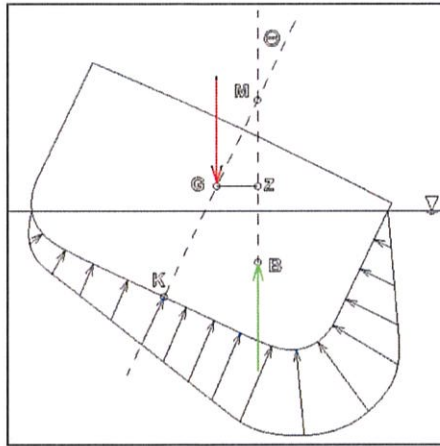
El fenómeno de Balance Paramétrico de un buque se lo analiza mediante una ecuación diferencial ordinaria homogénea de segundo orden para el ángulo de balance, que representa el equilibrio dinámico, cuando recibe olas de proa o popa. En dicha ecuación interviene la inercia del buque combinado con la añadida, y el término de amortiguamiento considerado como no lineal, debido a los elevados valores de velocidad que se alcanzan. Finalmente el tercer término incluye la variación en el tiempo del brazo adrizante GZ debido a la

acción de las olas. La razón de la variación (pendiente) de este último parámetro cambia también debido a la influencia del perfil de la ola a lo largo del buque. Para representar la superficie irregular del mar, se usa una descomposición de armónicos del espectro de mar según la formulación de Bretschneider. La solución analítica de la ecuación de balance en esta condición es muy complicada de obtener y por esta razón, una opción simple son las simulaciones numéricas para aproximar la solución del problema con condiciones iniciales dadas.

Dinámicamente, cuando un cuerpo se encuentra semisumergido, sobre él actúan varias fuerzas que lo mantienen en equilibrio dinámico. Estas fuerzas se pueden apreciar en la Figura 2, y son el empuje ejercido por el agua, representado por la flecha verde y el peso del cuerpo representado con la flecha roja. En el caso del análisis del Balance Paramétrico desacoplado, se considera que las dos fuerzas son de igual valor, es decir no hay oscilación por Levantamiento. Sin embargo, debido al movimiento de Balance, aparece un brazo conocido como GZ, que al multiplicarse por el peso forma un momento restaurador por el que el buque tiende a recuperar el equilibrio. Se espera que la magnitud de este brazo aumenta a medida que el ángulo de balance también lo hace. Este incremento se presenta hasta cierta inclinación, para la que el nivel del agua llega a la cubierta, luego de lo cual se presenta un cambio de pendiente en la curva de brazos adrizantes. Otra consideración importante de la curva del GZ se da cuando el buque se inclina hasta que se

encuentre con una abertura no estanca, a este ángulo de inclinación se lo conoce como ángulo de inundación. A esta situación se la considera comúnmente causa de zozobra por el ingreso de agua al interior del buque.

Figura 2: Equilibrio dinámico del buque en Balance



[Fuente: Elaboración Propia]

Dinámicamente el movimiento de balance paramétrico se lo puede representar mediante la siguiente ecuación diferencial homogénea de segundo orden, que representa el equilibrio dinámico del buque.

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}(\dot{\phi}) + \Delta^* GZ(\phi, t) = 0, \quad (1)$$

donde el término $(I_{xx} + A_{44})$ representa el momento de inercia virtual en dirección X, que se puede expresar como $\frac{\Delta}{g} \cdot k_{xx}^2$, donde Δ es el Peso del cuerpo, g es la aceleración de la gravedad, y, k_{xx} es el radio de giro virtual.

Además, B_{44} es el coeficiente de amortiguamiento, y finalmente $\Delta \cdot GZ(\phi, t)$ representa el momento de restauración del movimiento. Si a esta ecuación se la divide para la inercia virtual, y realizando las simplificaciones correspondientes, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}, V)\dot{\phi} + \omega_o^2 \left(\frac{GZ(\phi, t)}{GM} \right) = 0, \quad (2)$$

donde ω_o es igual a la frecuencia natural que por definición es $\sqrt{\frac{g GM}{k_{xx}^2}}$, mientras que $d(\dot{\phi}, V)$ es el término de amortiguamiento que debido a los elevados valores de velocidad $\dot{\phi}$ que dependen de ella, además también depende de la velocidad de avance del buque. Este término continuamente se expande para incluir un coeficiente lineal y uno cuadrático. El tercer término de la ecuación de balance representa la variación de la restauración estática en el tiempo debido al ángulo de balance y al paso de las olas, que a su vez depende de la altura y posición relativa del seno de la ola. El cambio en la magnitud del Brazo adrizante es causado por la variación del plano de flotación debido al cambio de la superficie libre del mar como se observó en el subcapítulo previo.

Finalmente la ecuación con la que se va a realizar la simulación queda de la siguiente manera:

$$\ddot{\phi} + 2\omega_0\mu\dot{\phi} + \omega_0^2\left(\frac{GZ(\phi,t)}{GM}\right) = 0 \quad (3)$$

Esta forma no linealizada de la ecuación balance se ha venido usando con frecuencia en simulaciones y para el desarrollo de la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad, [4]. Nótese que el coeficiente del tercer término no es constante sino dependiente del tiempo. Esta condición de aumento y disminución de la restauración estática del buque se vuelve peligrosa cuando se presenta con frecuencias de encuentro 2 veces la frecuencia natural del buque.

Una de las formas para estimar la magnitud del brazo adrizante en cada instante de tiempo, es generar primero una ola regular equivalente a la superficie irregular instantánea del mar. Al mar irregular, se lo puede representar mediante una cantidad finita de armónicos, usando alguna formulación para el espectro de mar. Por ejemplo se puede usar la fórmula de Bretschneider que requiere de los valores de frecuencia modal y altura significativa correspondiente a un determinado estado de mar. A cada componente armónico se le puede incluir un desfase pseudo-aleatorio, lo que al sumar los componentes armónicos, da como resultado una función irregular. Esto produce que se tenga como resultado una ola diferente en cada instante de tiempo para la que es necesario estimar el brazo restaurador. Entonces, habiendo calculado la curva de brazos adrizantes en función de la

altura y posición relativa de la ola equivalente, se puede desarrollar una interpolación a partir de la curva de brazos adrizantes del buque, que depende de las tres variables mencionadas: ángulo de balance, altura de ola y posición de la ola respecto de la eslora del buque.

1.3. Resumen de la solución matemática general del problema

Un problema de oscilación del tipo homogéneo puede tener soluciones no triviales bajo ciertas situaciones de inestabilidad dinámica. La ecuación del movimiento del buque en Balance Paramétrico es similar a la de Mathieu cuya solución incluye zonas de inestabilidad. Esta situación se presenta principalmente bajo una combinación de frecuencias de encuentro aproximadamente del doble de la frecuencia natural de balance, lo que provoca una inestabilidad de la solución trivial, desembocando muchas veces en una respuesta con altas amplitudes. La excitación Paramétrica es representada por la variación de la altura metacéntrica GM , que tiene un comportamiento cercano al sinusoidal debido a la influencia de las olas a lo largo del perfil del buque. El amortiguamiento reduce las zonas de inestabilidad de la solución del problema, ya que en estas regiones se producen oscilaciones con elevados valores de velocidad angular,

convirtiéndose en un muy importante parámetro en el problema de inestabilidad Paramétrica.

Comúnmente la inestabilidad por Resonancia Paramétrica de un buque se la relaciona con la ecuación diferencial de Mathieu, [4]:

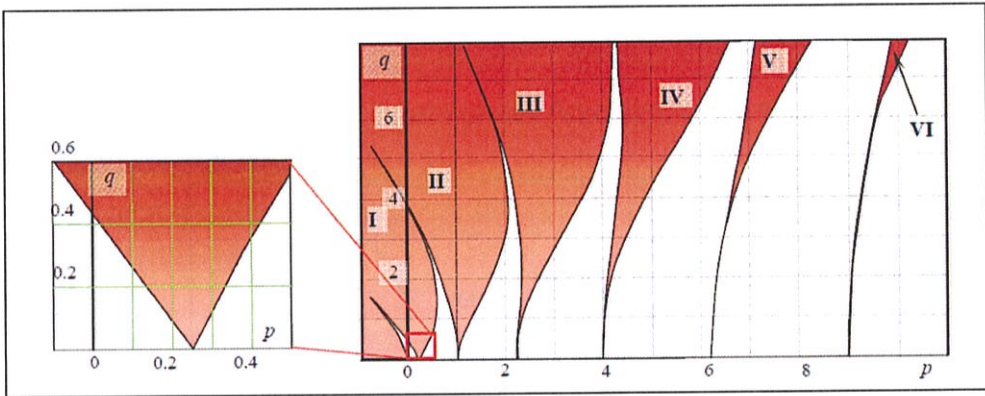
$$\ddot{\xi} + (p + q \cos(t))\xi = 0 \quad (4)$$

Esta ecuación es del tipo homogéneo, de segundo orden, y su principal uso es el de representar el movimiento de un cuerpo. Puede notarse en (4) que en el término que multiplica a la variable dependiente ξ , aparecen dos constantes “p” y “q”, una de las cuales está multiplicada por una función periódica que depende del tiempo.

Debido a que el coeficiente de la variable ξ no es constante, la solución analítica de la ecuación se torna muy compleja. La ecuación homogénea de Mathieu puede tener soluciones no triviales dentro de ciertas zonas denominadas de inestabilidad. Estas regiones de inestabilidad se presentan bajo ciertas combinaciones en los valores de “p” y “q”, que dependen a su vez de las combinaciones entre la frecuencia natural y la frecuencia de encuentro. Mientras que el término periódico de $\cos(t)$, bajo cierta frecuencia de encuentro, colabora en el desarrollo de resonancia paramétrica ya que es posible que reduzca la magnitud del término restaurador. Las principales

zonas de inestabilidad en función de las combinaciones de “ p ” y “ q ”, se muestran de color rojo, en la Figura 3.

Figura 3: Zonas de Inestabilidad de la Ecuación de Mathieu



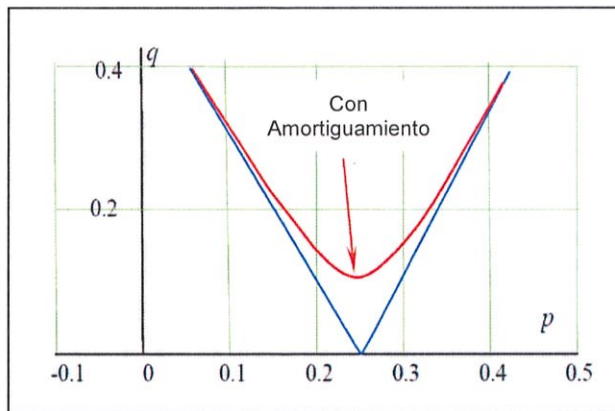
[Fuente: [4]]

Puede notarse en la Figura 3, que para un valor de “ p ” igual a 0.25 aparece la primera zona de inestabilidad, que corresponde a una relación de frecuencia de excitación dos veces la frecuencia natural. Mientras que la segunda región de inestabilidad ocurre para un valor de “ p ” igual a 1, correspondiente a una razón de frecuencias igual a 1, en ambos casos se esperan elevados valores de función solución. Debido al mayor ancho de la primera zona de inestabilidad, es considerada como la condición más peligrosa.

Cuando en la ecuación de Mathieu se agrega el término de amortiguamiento, las zonas de inestabilidad presentadas en la Figura 3 se ven afectadas, como se muestra en la Figura 4; nótese que si el valor “ q ” está por debajo de un cierto valor, cercano a 0.1, con este nivel de amortiguamiento, no se produce

inestabilidad dinámica. La influencia del amortiguamiento es directamente proporcional a la magnitud del mismo, es decir a mayor amortiguamiento, mayor será la reducción en la zona de inestabilidad, como se muestra a continuación en la Figura 4.

Figura 4: Influencia del Amortiguamiento



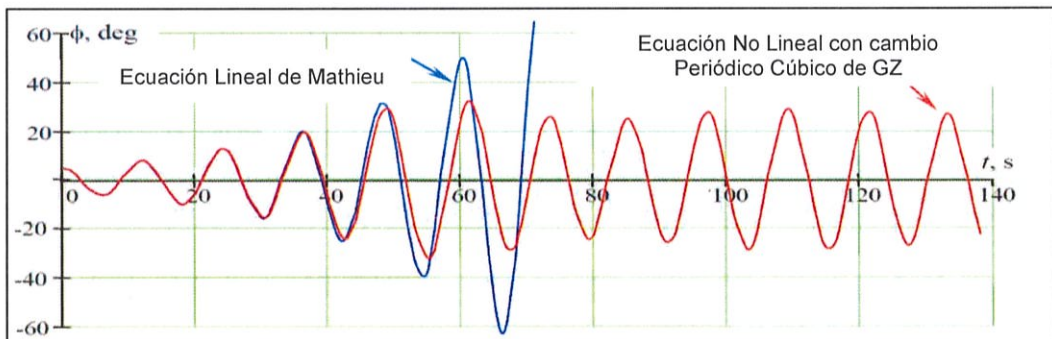
[Fuente: [4]]

La ecuación de movimiento de Balance Paramétrico, al igual que la de Mathieu, es una ecuación diferencial homogénea de segundo orden, con la diferencia de que el término que multiplica a ϕ , se lo representa como $GZ(\phi, t)$ que depende no solo del tiempo, sino también del ángulo de balance. A continuación se muestra la ecuación de Balance Paramétrico mencionada anteriormente, con amortiguamiento lineal equivalente.

$$\ddot{\phi} + (2\omega_0\mu)\dot{\phi} + \omega_0^2 \left(\frac{GZ(\phi, t)}{GM} \right) = 0 \quad (5)$$

En la Figura 5 se ejemplifica la influencia de la no linealidad en el término restaurador. Al comparar ambas ecuaciones, se puede apreciar como la restauración no lineal del modelo de Balance Paramétrico influye, manteniendo la respuesta en elevadas oscilaciones, pero sin que se presente la singularidad. En cambio en el modelo lineal correspondiente a la ecuación de Mathieu, la inestabilidad provoca un incremento en respuesta, que en el caso del buque puede significar zozobra.

Figura 5: Influencia de la Variación no Lineal de la curva GZ



[Fuente: [4]]

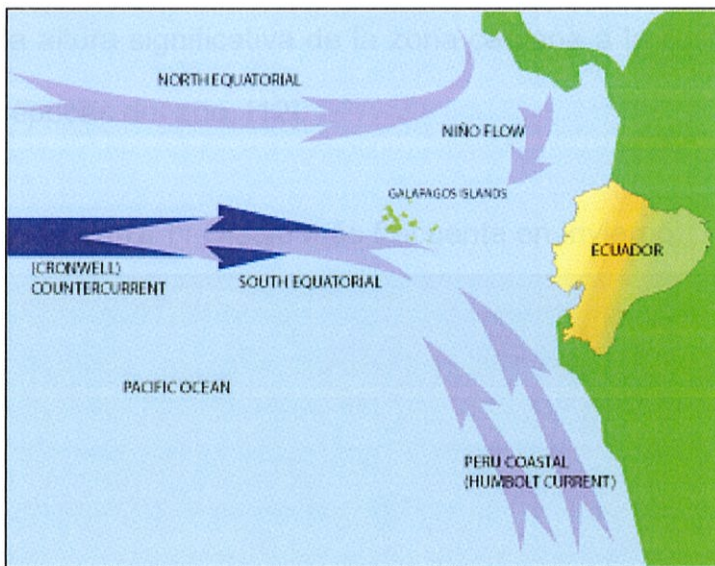
Este comportamiento similar entre ambos modelos, lineal y no lineal se debe a que la variación de la curva de brazos adrizantes tiende a ser lineal para ángulos pequeños, menores a 15 grados. A partir de esta amplitud de balance la no linealidad se hace presente e influye significativamente en la solución, al cambiar el valor de la frecuencia de oscilación del buque.

1.4. Descripción de las condiciones de mar típicas en las que operan los buques pesqueros locales

Las condiciones de mar en aguas ecuatorianas, están influenciadas por las corrientes de “El Niño” y la de “Humboldt”, que interactúan entre sí de diferente forma de acuerdo a la época del año. Localmente se presentan con mayor frecuencia dos oleajes durante el año. En la temporada de invierno (de Enero a Abril) son más frecuentes los oleajes con dirección Sur y Sur-Oeste, mientras que en la temporada de verano (de Mayo a Diciembre), ocurren con mayor frecuencia oleajes con dirección Norte y Nord-Oeste. Los buques pesqueros locales, frecuentan para sus faenas principalmente las zonas del sur de Galápagos. Entonces en la salida de puerto, cuando se dirigen al sur, en verano, los buques reciben las olas de proa, mientras que al regresar a puerto, recibirán las olas de popa. Los estados de mar típicos que se presentan en aguas ecuatorianas están entre 3 y 4.

Debido a la ubicación geográfica del país, el mar territorial del Ecuador se ve influenciado principalmente por dos corrientes marinas. La primera, “El Niño” que es una corriente de agua cálida proveniente de centro América, y generalmente aparece durante los meses de Diciembre a Abril. Mientras que el resto del año se tiene la influencia de la corriente fría de “Humboldt”, proveniente del sur del continente. Las direcciones del flujo de estas corrientes marinas, se las puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6: Corrientes Marinas que afectan a Ecuador



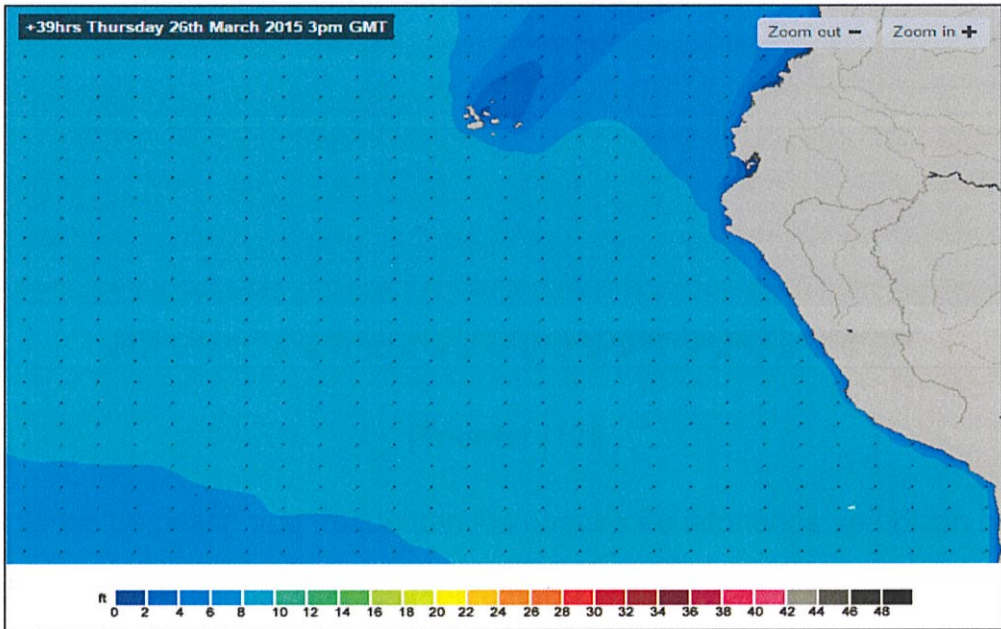
[Fuente: [11]]

Las corrientes marinas que actúan en el mar territorial ecuatoriano, fluyen entre 20 a 40 metros por debajo de la superficie del mar, por lo que no influyen directamente en la formación de olas. Pero junto a estas corrientes marinas normalmente existe también movimiento de vientos superficiales, que contribuyen a la formación de olas, [12]. Entonces la dirección y amplitud de las olas que reciben los buques pesqueros dependen de la época del año y de la dirección del movimiento.

A lo largo de todo el año entran trenes de olas en diferente dirección contra la costa ecuatoriana, destacándose principalmente los oleajes en dirección sur y sur oeste en la época de verano, que normalmente comprende entre Mayo a Diciembre. En el resto del año también aparecen oleajes con dirección Norte

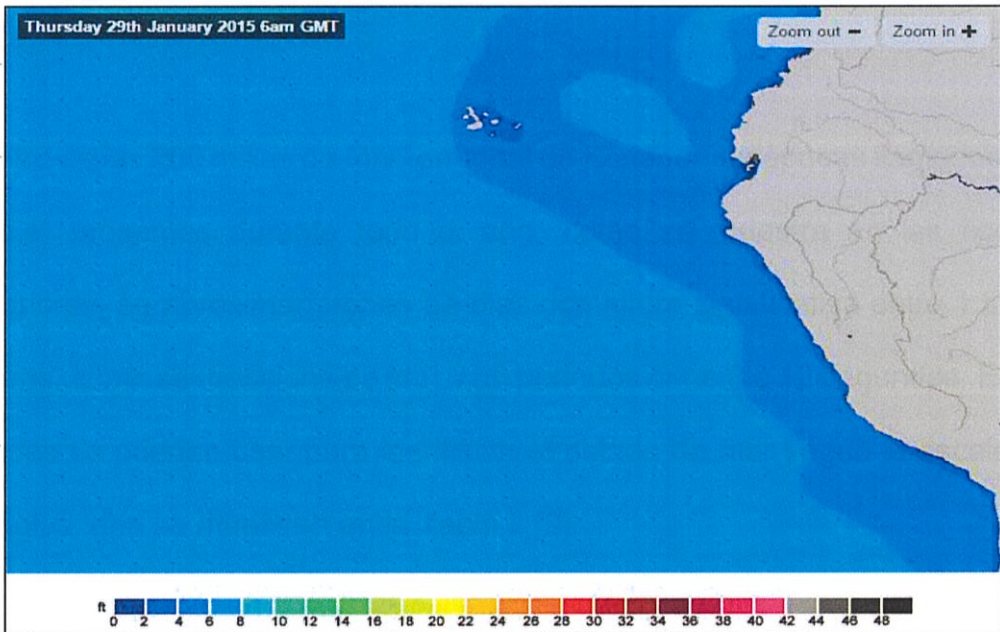
y Nor-Oeste. A continuación se muestra en la Figura 7 y Figura 8, la dirección de oleajes y la altura significativa de la zona cercana a la costa ecuatoriana en diferentes épocas del año, [12].

Figura 7: Oleaje más frecuente en Invierno



[Fuente: [12]]

Figura 8: Oleaje más frecuente en Verano



[Fuente: [12]]

Las zonas de pesca que frecuentan los buques ecuatorianos se ubican cerca de las Islas Galápagos, principalmente hacia el sur, muy próximas a la frontera con el Perú. Estas zonas varían según la temporada y el tipo de pesca al que se dedique la embarcación. La parte sur de Galápagos es bastante frecuentada por los buques dedicados específicamente a la pesca de Dorado y Albacora, que son especies migratorias que visitan estos lugares en determinadas épocas del año, [11]. Entonces los buques al dirigirse a esta zona de pesca desde los puertos principales del continente, durante un oleaje con dirección Sur-Oeste, recibirán el tren de olas principalmente de costado. Por otro lado, cuando los buques regresan al continente, desde la zona de

pesca, en época de oleaje Nor-Oeste, recibirán principalmente las olas de popa.

Dentro de las 200 millas de mar territorial de Ecuador, en épocas llamadas “de oleaje” presentes durante todo el año, como se muestra en las figuras anteriores, se aproximan trenes de olas con altura significativa entre 1.5 a 2 metros, como se menciona en [11], con periodos entre 8 a 12 segundos. Estos valores se pueden usar para identificar el estado de mar según la escala de Douglas, que se muestran en la Tabla I, [9].

Tabla I: Altura Significativa y Periodo de Olas, según la escala de Douglas

Estado de Mar	Periodo Modal [Sec]	Altura Significativa [m]
2	6.3	0.3
3	7.5	0.9
4	8.8	1.9
5	9.7	3.3
6	12.4	5

[Fuente: [9]]

Se puede decir que en época de elevado oleaje, en las zonas que los buques pesqueros ecuatorianos frecuentan para las faenas de pesca, ellos operan en un estado de Mar 4. Mientras que en épocas que no se presentan estos altos oleajes, se podría representar el mar como en un estado 2 ó 3.

CAPITULO 2

SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE BALANCE PARAMÉTRICO CON OLAS DE PROA EN UN MAR IRREGULAR

2.1. Descripción general del proceso de simulación.

El problema de Balance Paramétrico de un buque posee un alto grado de complejidad matemática, y por esto se busca aproximar su solución mediante el uso de algoritmos numéricos. En este trabajo se van a desarrollar

integraciones en tiempo de la ecuación del Balance desacoplado de un buque pesquero ecuatoriano en olas de proa. Esto quiere decir que en cada iteración se calcula el ángulo de balance y la velocidad angular a lo largo del tiempo a partir de ciertas condiciones iniciales dadas. La superficie irregular del mar se la representa con una Ola equivalente, según el método de Grim Mejorado, y con ella, se calcula el brazo adrizante GZ en cada instante de tiempo, en función de la amplitud y posición relativa de la ola, y del ángulo de balance. Una vez estimados los parámetros, se los toma como valores iniciales para la siguiente etapa de la integración. Si el ángulo de escora alcanza la inundación de una abertura sin cierre estanco, el proceso numérico se detiene porque se habría presentado la zozobra del buque.

Como ya se mencionó, la ecuación de movimiento para el Balance Paramétrico es bastante compleja. En el trabajo [6] se menciona una solución analítica propuesta por G. Bulian (2006) en su tesis doctoral, pero los modelos matemáticos empleados son bastante complejos. Por otro lado, existen varios métodos numéricos para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales a partir de condiciones iniciales dadas. Con bastante frecuencia para el balance paramétrico se suelen realizar simulaciones numéricas, donde se realizan integraciones en tiempo, que modelan el movimiento del buque. La ecuación con la que se trabaja es la que se mostró anteriormente:

$$\ddot{\phi} + (2\omega_0\mu)\dot{\phi} + \omega_0^2 \left(\frac{GZ(\phi, t)}{GM} \right) = 0 \quad (6)$$

Para estimar la inercia virtual se toma un porcentaje del 35% de la manga como radio de giro virtual, [9]. Además por cálculos realizados se determinó que el amortiguamiento es muy sensible en la estimación y se lo toma como un valor constante.

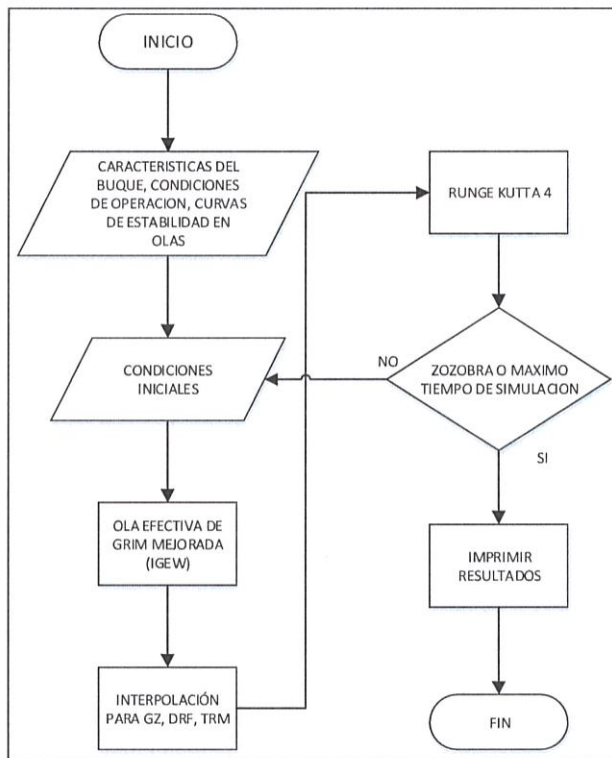
Para la integración en tiempo se usa el método de Runge Kutta de cuarto orden, este algoritmo consiste en aproximar el siguiente valor de la solución en función de la evaluación equidistante de cuatro derivadas próximas al punto de interés, usando una ponderación de los cuatro valores calculados, [7]. Para la implementación del método, dado que es aplicable a problemas de primer orden, se transforma la ecuación (6) de segundo grado en dos de primer orden, usando el artificio $\phi_1 = \phi$, y $\phi_2 = \dot{\phi}$, quedando un sistema de ecuaciones como se muestra a continuación:

$$\dot{\phi}_1 = \phi_2 \quad (7)$$

$$\dot{\phi}_2 = -2\omega_0\mu\phi_2 - \frac{\omega_0^2 \cdot GZ(\phi_1, t)}{GM} \quad (8)$$

El algoritmo para implementar el método de Runge Kutta de cuarto orden es estudiado en el curso de Análisis Numérico de la ESPOL. El diagrama de flujo empleado en esta simulación, se muestra a continuación.

Figura 9: Diagrama de Flujo del Algoritmo



[Fuente: Elaboración Propia]

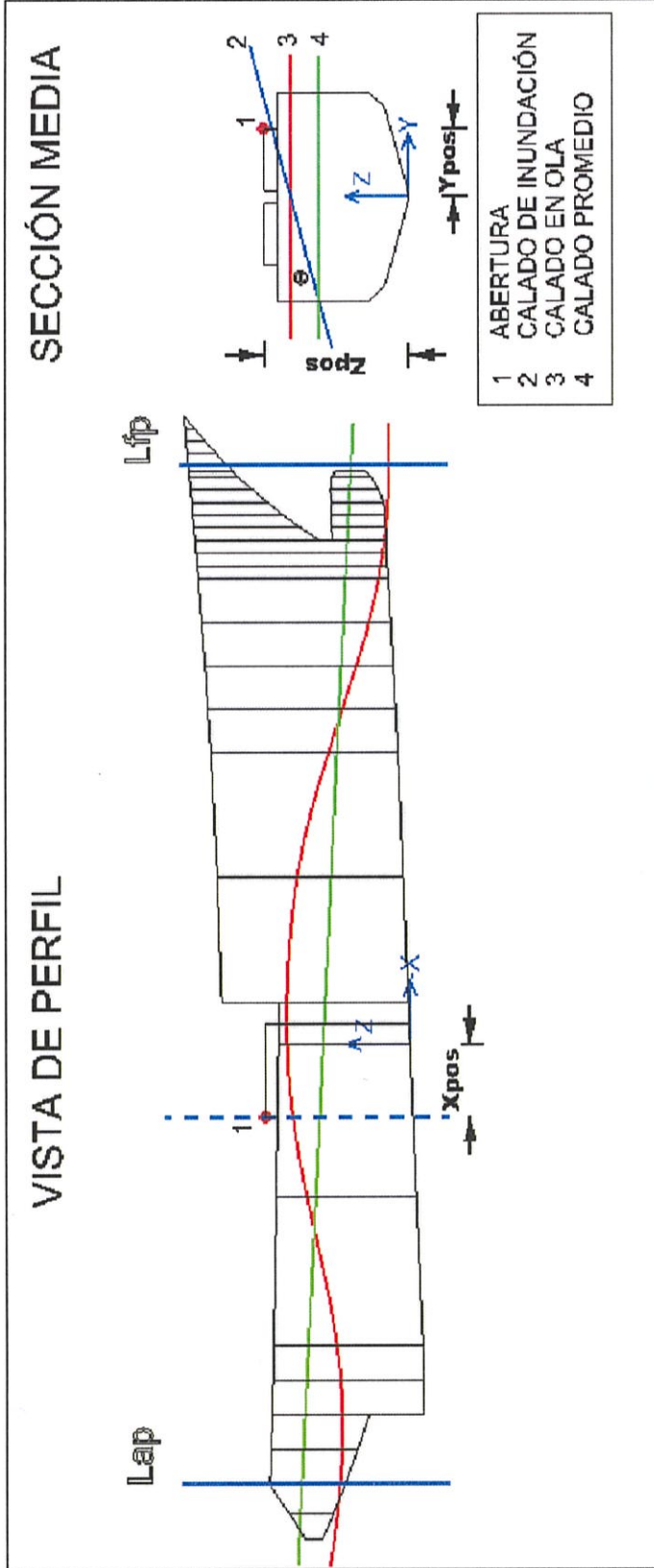
La superficie irregular del mar se la puede representar mediante una combinación finita de armónicos, cuya amplitud y frecuencia obedezcan a la distribución espectral de un estado de mar determinado. Como puede notarse en la ecuación (6), el valor de GZ cambia en el tiempo debido a la variación del plano de flotación, por efecto del paso de las olas, [4]. Esta variación del

brazo adrizante depende de la superficie de la ola respecto del buque, y del ángulo de balance. Para simplificar este problema, se puede usar el método de ola equivalente de Grim, [6], que calcula una ola regular sinusoidal de longitud similar a la eslora del buque, que representa la superficie irregular del mar. Una vez determinada dicha ola, se calcula el valor de GZ, en función de la amplitud, posición relativa del seno de la ola, y el ángulo de balance.

Cuando luego de la interpolación se ha obtenido el valor de GZ, se procede a realizar la integración numérica, usando un intervalo de tiempo adecuado, como se explica en el Anexo. Los valores obtenidos de la integración numérica, corresponden al ángulo de balance y velocidad angular para un determinado instante de tiempo, los que servirán como condiciones iniciales para la siguiente iteración.

Para determinar si se produce la zozobra del buque, se usó el siguiente artificio, mostrado en la Figura 10, que considera al buque en un instante de tiempo, navegando en olas de proa. Cuando debido al movimiento de balance y al paso de las olas, el agua alcanza una abertura no estanca, se la considera como situación de zozobra. El nivel del agua real se la calcula en función de los valores de amplitud y posición de la ola, ángulo de balance, calado medio y asiento. Si después de una simulación de 15 minutos no se ha alcanzado la abertura no estanca, se considera que no se ha producido zozobra alguna.

Figura 10: Estimación de la Ordenada de Inundación



[Fuente: Elaboración Propia]

El algoritmo que se usó para verificar si el nivel del agua alcanza una abertura durante la simulación se muestra a continuación:

$$Z_{Flood} = \tan(\theta) \cdot Y_{pos} + amp \cdot \sin\left(\frac{2\pi(X_{pos} - xcr)}{L_{pp}} - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{trim}{L_{pp}} \cdot X_{pos} + draft, \quad (9)$$

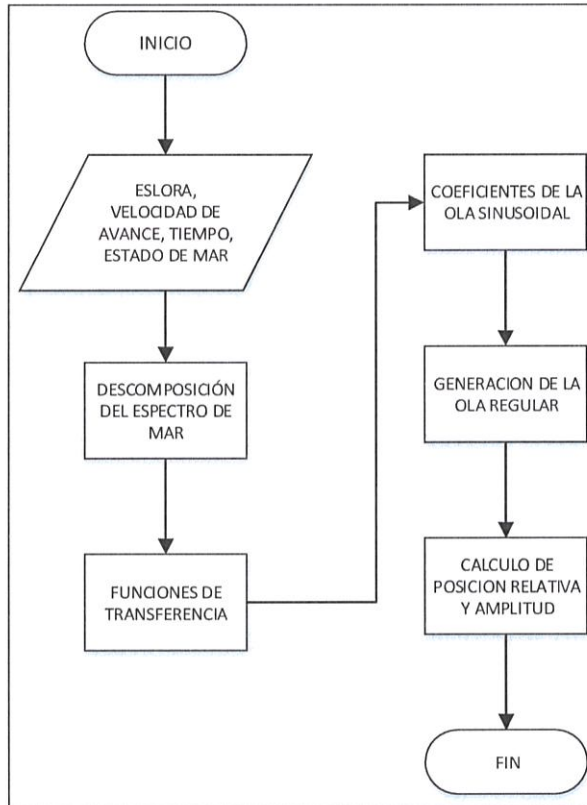
donde Z_{Flood} es el valor calculado de la ordenada de inundación, X_{pos} , Y_{pos} y Z_{pos} son las coordenadas de la posición de la abertura medidas desde sección media, crujía y línea base respectivamente. Los valores de amp y xcr representan la amplitud y posición relativa del seno de la ola, $draft$ y $trim$ son los valores de calado y asiento y θ es el ángulo de balance en el instante de tiempo considerado. La condición para que el proceso de integración numérica se detenga, es que el valor de Z_{Flood} sea mayor o igual que Z_{pos} . Esto físicamente significa que el nivel de la flotación alcanza la abertura no estanca, el agua ingresa al interior del buque, lo que es considerado como zozobra. Si después de un tiempo de 15 minutos no se ha alcanzado la abertura no estanca, se considera que no se ha producido zozobra alguna.

2.2. Ola equivalente para un mar irregular según el método de Grim mejorado

El método de la Ola equivalente de Grim, es una representación idealizada de la superficie irregular del mar, como una función sinusoidal con longitud especificada por el usuario. La superficie irregular se desarrolla primero descomponiendo la densidad espectral de un estado de mar en un número finito de olas sinusoidales simples. Dicha función espectral se la calcula aplicando la formulación de olas de Bretschneider, que requiere la frecuencia modal y altura significativa para su definición. La ola equivalente es capaz de desplazar su seno o cresta a lo largo de la eslora del buque que avanza a su vez con una velocidad dada. La amplitud de la ola equivalente va cambiando en el tiempo y debido a la característica pseudo aleatoria, la ola no avanza de una manera uniforme.

El método de la Ola Equivalente de Grim, [6], realiza una transformación de la superficie irregular del mar, en una ola sinusoidal equivalente, cuya amplitud y posición varía en el tiempo. La longitud de la ola equivalente puede ser especificada por el usuario, y se recomienda usar valores cercanos a la eslora del buque. El algoritmo implementado en el presente proyecto se muestra a continuación:

Figura 11: Algoritmo de Ola Efectiva de Grim Mejorada



[Fuente: [6]]

Para la representación de la superficie irregular, se puede realizar una descomposición de la densidad espectral de un estado de mar, en un número finito de armónicos, con un ángulo de desfase aleatorio, siguiendo la siguiente expresión:

$$Z_{Irregular}(x,t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos(\omega_{en}t - k_n \cos(\chi)x + \sigma_n) \quad (10)$$

Donde el término ω_{en} representa la frecuencia de encuentro del armónico, definida como:

$$\omega_{en} = \omega_n - k_n V \cos \chi \quad (11)$$

Donde a su vez k_n y ω_n son el número de ola y la frecuencia del armónico, V es la velocidad de avance del buque, y $\cos \chi$ es el ángulo de incidencia del tren de olas con respecto a la eslora del buque.

Puede notarse que en la ecuación (10), se muestra la función que define la superficie irregular del mar definido como sumatorio de un número infinito de armónicos. Cada armónico tiene una componente posee una amplitud c_n que por definición es igual a $\sqrt{2 \cdot \Delta\omega \cdot S(\omega)}$, donde $S(\omega)$ representa la densidad espectral y $\Delta\omega$ el intervalo de frecuencias usado para la descomposición. Puede notarse que k_n , el número de la ola también es independiente para cada armónico y $\cos(\chi)$ es el ángulo de incidencia de la ola, que se va asumir 180 grados, ya que se trata de olas de proa. Cada armónico posee un término aleatorio σ_n que representa el desfase, y este varía desde $-\pi$ hasta π .

El comportamiento resultante de esta descomposición de armónicos es irregular, aun cuando todos sus componentes sean funciones periódicas. Esta

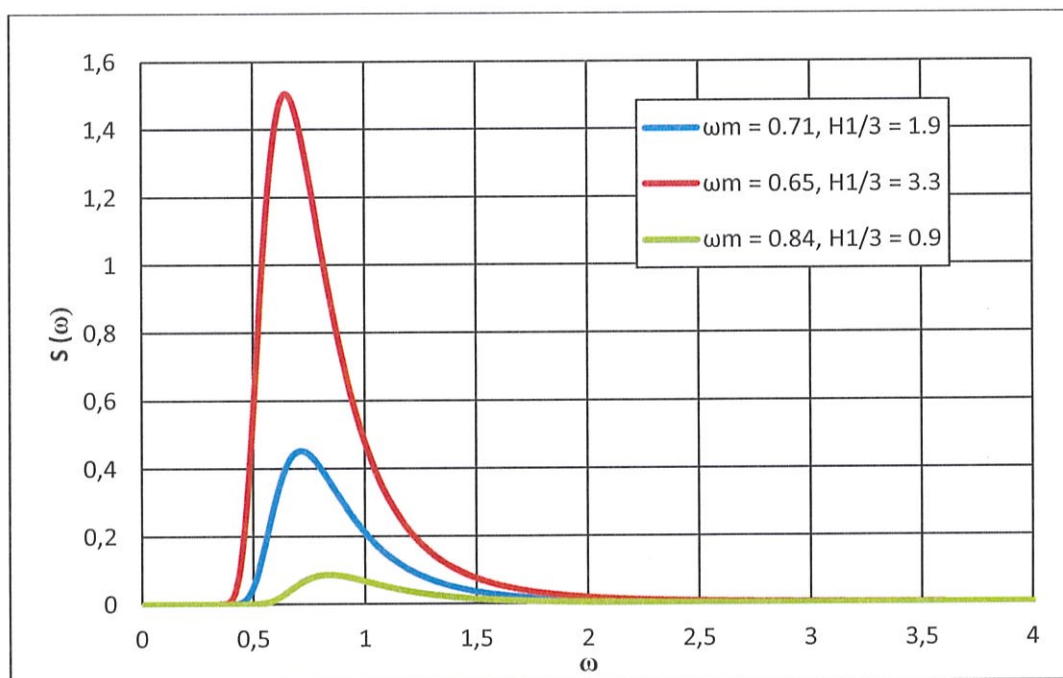
característica se debe a que al sumar los armónicos tienen diferente frecuencias lo que les resta regularidad, [6].

La densidad espectral usada para representar el estado de mar en este trabajo se la obtiene al aplicar la formulación de Bretschneider, [9]:

$$S(\omega) = \left(\frac{5(\omega_m)^4}{16\omega^5} \right) (H_{1/3})^2 e^{\frac{-5\omega_m^4}{4\omega^4}} \quad (12)$$

Esta formulación para el espectro de mar depende únicamente de dos factores, la frecuencia modal ω_m y la altura significativa $H_{1/3}$, [9]. En la Figura 12 se presenta el espectro de mar para Estados 3, 4 y 5. La frecuencia modal de cada estado de mar corresponde a la frecuencia a la cual se encuentran los valores de mayor energía del espectro.

Figura 12: Espectro de mar de Bretschneider



[Fuente: [9]]

Las formulaciones empleadas para el cálculo de la amplitud y de la posición de la ola equivalente son, [6]:

$$\sum^2(a, \eta_C, \eta_S) = \int_{-L/2}^{L/2} [z_{irregular}(x, t) - z_{JGEW}(x, t | a, \eta_C, \eta_S)]^2 dx \quad (15)$$

Donde los términos a, η_C y η_S están definidos de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \Sigma^2}{\partial a} = 0 \Leftrightarrow a(t) = \sum_{n=1}^N c_n f_a(k_n) \cos(\omega_{en} t + \sigma_n) \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Sigma^2}{\partial \eta_c} = 0 \Leftrightarrow \eta_c(t) = \sum_{n=1}^N c_n f_c(k_n) \cos(\omega_{en} t + \sigma_n) \quad (15)$$

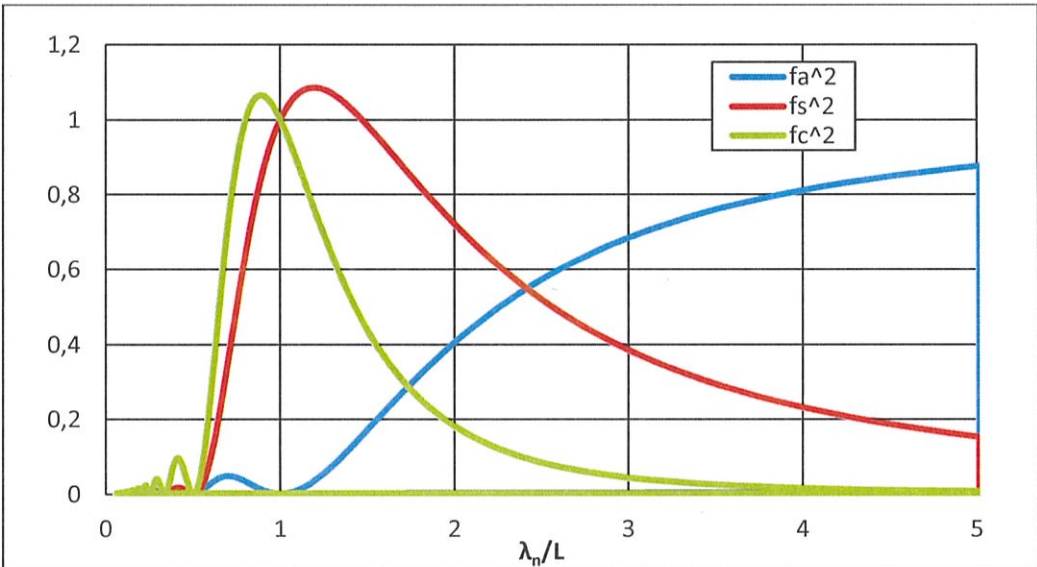
$$\frac{\partial \Sigma^2}{\partial \eta_s} = 0 \Leftrightarrow \eta_s(t) = \sum_{n=1}^N c_n f_s(k_n) \cos\left(\omega_{en} t + \sigma_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (16)$$

$$f_a(k_n) = \frac{\sin(Q)}{Q} \quad ; f_c(k_n) = 2 \frac{Q \sin(Q)}{\pi^2 - Q^2} \quad ; f_s(k_n) = 2 \frac{\pi \sin(Q)}{\pi^2 - Q^2} \quad ; Q = \frac{L}{2} k_n \cos(\chi)$$

Donde se usan las funciones de transferencia f_a , f_c y f_s que dependen de k_n que es número de onda de cada componente armónico del mar irregular.

Estas funciones de transferencia están definidas de la siguiente manera:

Figura 13: Cuadrado de Funciones de Transferencia



[Fuente: [6]]

La ola equivalente de Grim, originalmente se la representaba mediante una ola sinusoidal fija en sus extremos, teniendo en el centro la cresta o el seno.

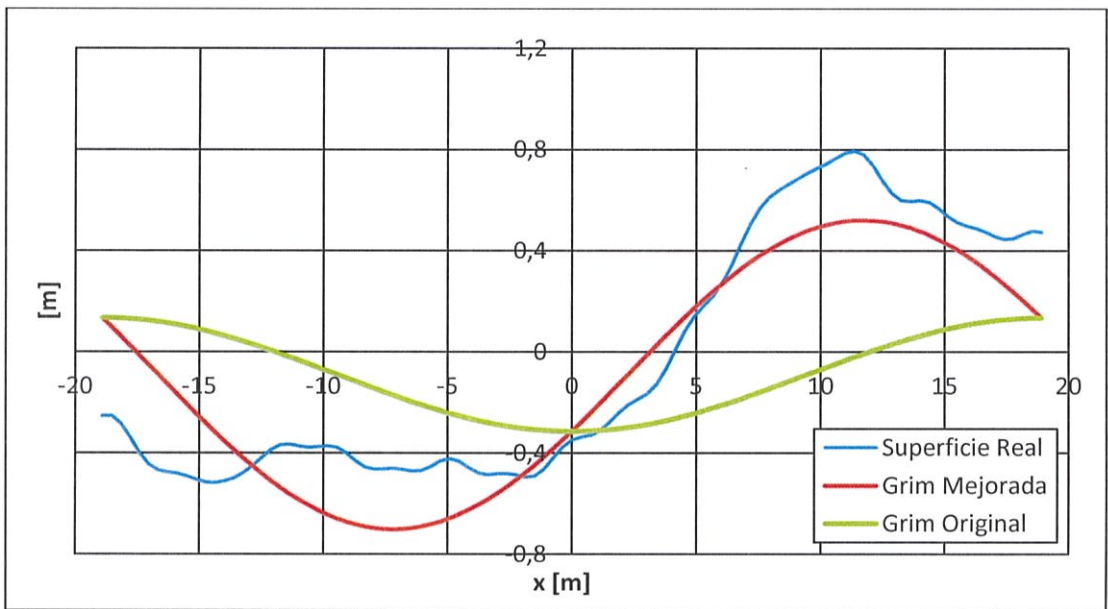
Esta aproximación es bastante buena para buque con formas convencionales, ya que las máximas variaciones del plano de flotación se presentan cuando la cresta o seno de la ola se encuentran en la sección Media. La ola mejorada de Grim propuesta por [6], representa un modelo de ola también sinusoidal, pero con una componente adicional, que le permite desplazarse en dirección x . Las ecuaciones de ambas funciones se muestran a continuación:

Ola original de Grim:
$$Z_{Grim}(x, t) = a(t) + \eta_c(t) \cos\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \quad (13)$$

Grim Mejorada:
$$Z_{IGEW}(x, t) = a(t) + \eta_c(t) \cos\left(\frac{2\pi}{L} x\right) + \eta_s(t) \sin\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \quad (14)$$

Puede notarse en los modelos de ola equivalente (13) y (14), que los coeficientes que acompañan a las funciones periódicas tienen dependencia del tiempo, [6]. A continuación en la Figura 14 se muestra gráficamente la diferencia entre ambas olas, para un estado de mar 4, usando el espectro de Bretschneider. En este cálculo se emplearon 1000 componentes armónicos.

Figura 14: Ola Equivalente de Grim Mejorada para $\lambda = 37.83$ m



[Fuente: Elaboración Propia]

La amplitud de la Ola mejorada de Grim está definida por $\sqrt{\eta_s(t) + \eta_c(t)}$, lo que significa que es dependiente del tiempo, donde $\eta_s(t)$ y $\eta_c(t)$ son los coeficientes que acompañan al seno y coseno respectivamente. Eso se debe a que la ola equivalente, en cada instante de tiempo debe calcular los coeficientes que la generen de tal manera que se acople mejor a la superficie irregular del mar.

Debido a la pseudo aleatoriedad del mar, la ola equivalente generada no viaja a una velocidad constante, aun cuando esta es representada por una ola regular. Esto se produce porque se genera en cada instante de tiempo una nueva ola que se acople mejor a la superficie irregular. Entonces la ola

equivalente viajará a la velocidad que se desplacen la mayor cantidad de componentes armónicas del espectro de mar, que es una velocidad equivalente cercana a la frecuencia modal.

2.3. Implementación de la solución numérica de la ecuación de movimiento de Balance Paramétrico

En la implementación de la solución numérica del balance paramétrico del buque, se usan como datos de entrada las características hidrostáticas, el estado de mar, condiciones iniciales y una base de datos para el brazo adrizante. Para el caso del amortiguamiento, se trabajó con varios niveles en la magnitud del coeficiente lineal equivalente. Los resultados principales de la integración en tiempo se muestran en un archivo de resultados, y son el ángulo de balance, la razón de balance, amplitud y posición relativa de la ola, brazo adrizante, asiento y calado. Estos tres últimos términos fueron interpolados de las curvas correspondientes a las características de estabilidad del buque que son parte de los datos de entrada, para obtener el brazo adrizante instantáneo. Se determinó que el valor del intervalo para la integración en tiempo que presenta una adecuada aproximación es de 0.1 segundos. Mediante el uso de este algoritmo se pudo aproximar la respuesta paramétrica del buque en olas de proa, en diferentes estados de mar.

Para aproximar la solución numérica de la ecuación de Balance Paramétrico de un buque pesquero, se necesitan los brazos adrizantes en olas y las características hidrostáticas de la embarcación. Entre estos datos se encuentran las dimensiones principales de la embarcación, así como también las condiciones de operación, esto quiere decir velocidad de avance y estado de mar, y el radio de giro virtual y el coeficiente adimensional de amortiguamiento μ . Deben especificarse también las condiciones iniciales, el número de iteraciones y el intervalo de tiempo entre ellas.

Respecto de los cálculos de estabilidad requeridos para desarrollar las simulaciones del Balance Paramétrico, se debe incluir en el archivo de datos, valores del brazo adrizante en olas. Esto es, calcular para diferentes alturas de ola y posición de ella respecto del buque, valores de los brazos adrizantes para diferentes ángulos de escora. Dado que estos cálculos de tipo estático también estiman los valores de calado medio y asiento, ellos también se incluyen en el archivo de datos dado que serán utilizados en la simulación para determinar la posibilidad de zozobra. Para preparar esta matriz de datos de entrada en el presente caso, se usó el módulo de estabilidad intacta en olas del programa SHCP, en función de la altura y la posición relativa del seno de la ola, [10]. A continuación en la Figura 15 se muestra un ejemplo de los datos de entrada.

Figura 15: Ejemplo de Datos de Entrada

37.83	8.00	4.78	4.434							Lpp, B, D,T [m]
0.65	0.866									Block & Midship section coefficient
3.51										vertical center of gravity
9.8										Gravity accel. [m/sec^2]
19.2	20.0	0.05								Ship velocity init,final,increment [knots]
1025	1.0e-6									rho[kg/m3], nu[m2 s]
0.35	0.025									kxx/B, zi
4										Sea state
-2.0	2.6	5.2								xopen, yopen, zopen
3.0	3.0	2.5	0.00	0.00	0.1					theta init, thef, dtheta, (deg), thed init, thedf, dthed
3600	0.1									ntime, dtime sec

Height [m]	xpos [m]	Theta [Grad]	Gz [m]	Draft [m]	Trim [m]
0	-18.915	0	0.	4.434	-0.222
		5	0.05	4.434	-0.22
		10	0.101	4.433	-0.202
		15	0.141	4.444	-0.156
		20	0.163	4.474	-0.032
		25	0.176	4.521	0.177
		30	0.188	4.582	0.464
		35	0.205	4.658	0.838
		40	0.224	4.756	1.306
		45	0.236	4.885	1.881

[Fuente: Elaboración Propia]

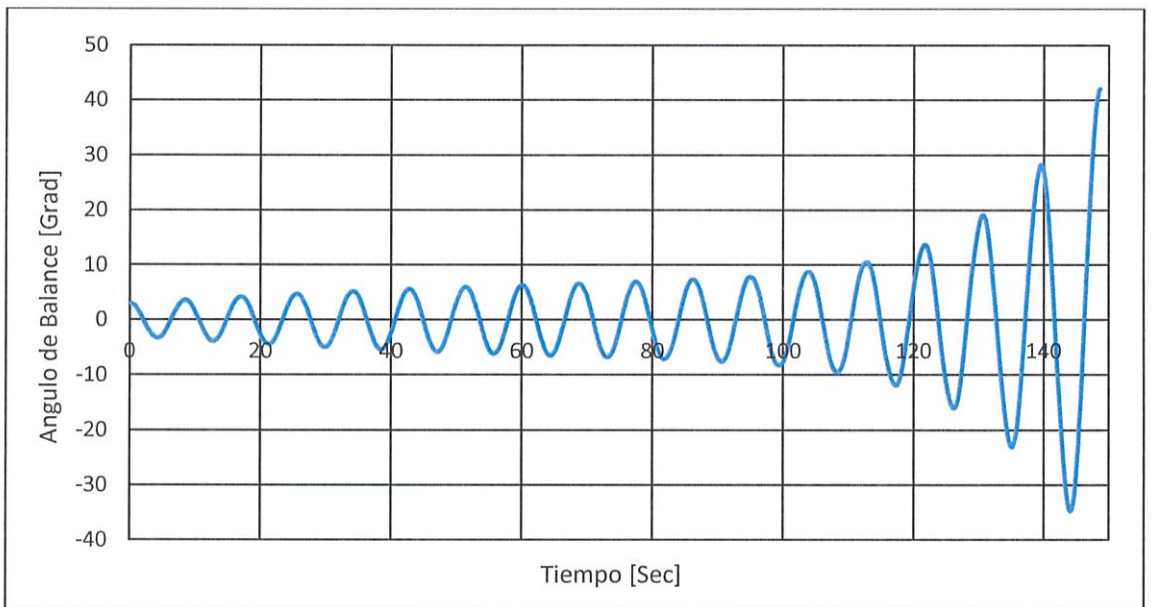
El término de amortiguamiento se puede calcular en base a las formulaciones semi empíricas, por ejemplo la de Himeno, [8]. En este proyecto se consideran 3 diferentes niveles de la magnitud del coeficiente lineal, principalmente se usarán valores adimensionales del 2.5%, 5% y 7.5% (0.025, 0.05 y 0.075).

Los valores del brazo adrizante, GZ, son interpolados usando un modelo de regresión polinómica de orden 5, [7], a partir de los valores previamente tabulados. Una vez elaborado el modelo de regresión, se lo evalúa para obtener el valor de GZ en función del ángulo de balance, amplitud y posición relativa del seno de la ola. Una vez completado el cálculo del nuevo ángulo de balance, se interpola también el calado medio y asiento que serán

empleados luego para determinar la posibilidad de que el agua alcance la abertura sin cierre estanco y se produzca la zozobra del buque.

La impresión de los resultados de la simulación se realiza en un archivo externo tipo texto, donde luego se podrá procesar esta señal para su análisis. Se imprimen los valores ángulo de balance y velocidad de rotación para cada instante de tiempo. Otros resultados que merecen ser analizados como la posición relativa de la ola, brazo adrizante, calado y asiento también se los imprime en el archivo de resultados. Para iniciar la simulación se deben especificar las condiciones iniciales, ángulo de balance y velocidad angular iniciales. En este trabajo se tomó un ángulo de escora inicial de 3 grados y velocidad angular nula para todas las simulaciones. A continuación en la Figura 16 se muestran los resultados de simulaciones en olas regulares, sin incluir amortiguamiento, con incremento de tiempo de 0.1 segundos.

Figura 16: Respuesta Paramétrica del Buque en mar Regular

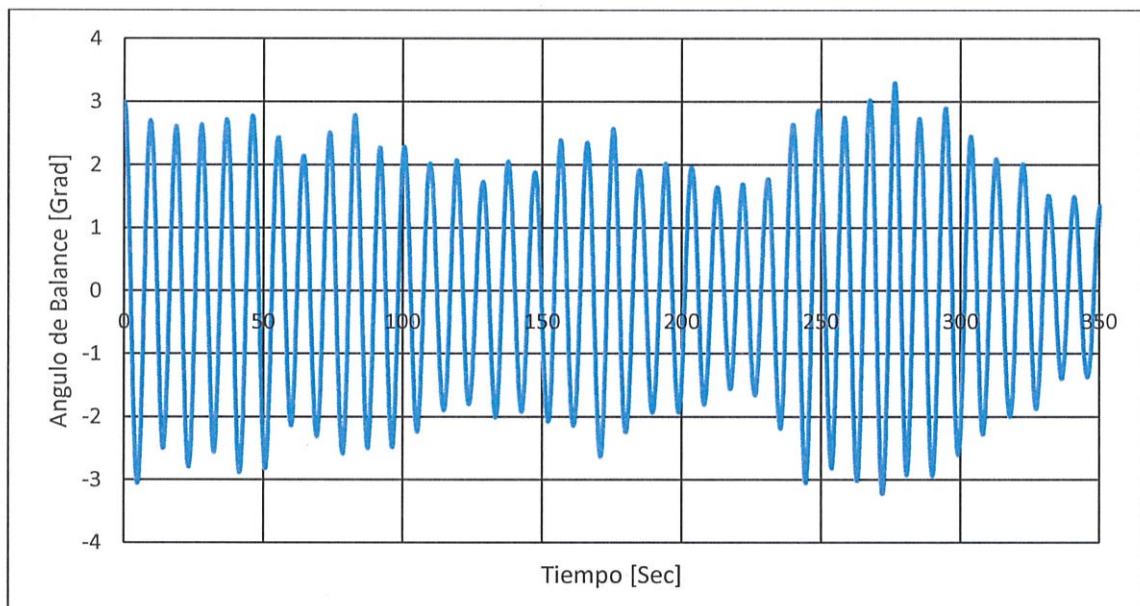


[Fuente: Elaboración Propia]

El resultado mostrado en la Figura 16 representa la respuesta del buque en olas regulares con longitud de onda igual a la eslora entre perpendiculares y amplitud de ola de 1 metro. Se usó una velocidad relativa de 19 Nudos, que generaba una frecuencia de encuentro cercana a dos veces la frecuencia natural del buque en balance, situación donde se presenta el fenómeno de resonancia paramétrica, que desemboca eventualmente en zozobra, luego de 150 segundos.

En la Figura 17 se presenta la respuesta del buque en un mar irregular, estado de mar 4, con altura significativa de 1.9 metros y periodo modal de 8.8 segundos, [9].

Figura 17: Respuesta Paramétrica del Buque en Estado de Mar 4



[Fuente: Elaboración Propia]

En este caso, a un mar irregular, aun cuando se usa una velocidad crítica, no se presentó una situación de zozobra, aunque parece que la resonancia paramétrica causó un incremento en respuesta respecto de la escora inicial, alrededor de los 275 segundos.

CAPITULO 3

Posibilidad de zozobra en buques pesqueros ecuatorianos por Balance Paramétrico

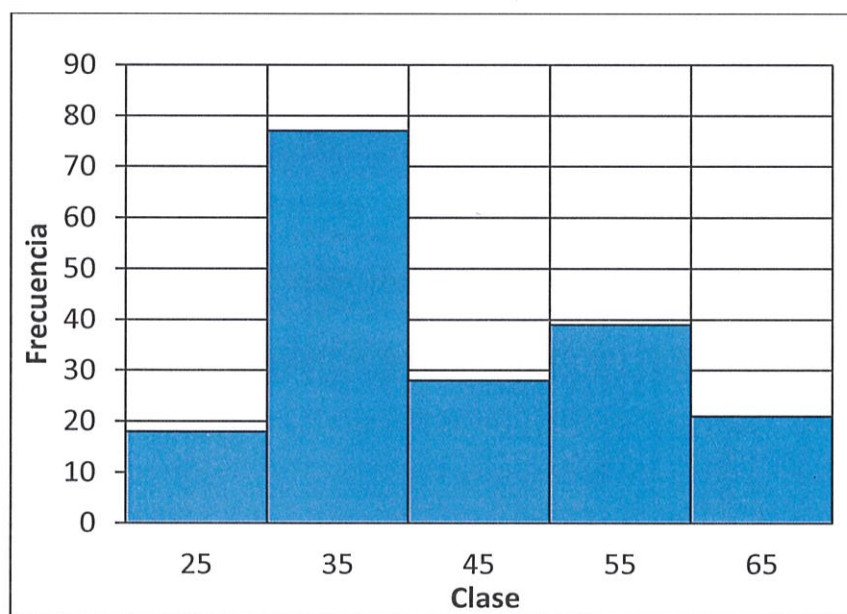
3.1. Características principales de la flota pesquera ecuatoriana

Hasta el año 2014, estadísticamente se registran más de 700 embarcaciones pesqueras operativas en el Ecuador, de las cuales 447 corresponden a buques desde 50 hasta 150 TRB, y 267 con capacidad entre 150 y 1500 TRB.

Manta es el puerto de mayor interés para los pescadores industriales y artesanales del país, contando con un aproximado de 310 embarcaciones operativas, y contribuye con aproximadamente el 65% de desembarques, seguido de Guayas con 25% y otras provincias con un 10%.

En la Figura 18, se presenta un histograma de la distribución de buques pesqueros operativos ecuatorianos de acuerdo a la eslora, con una capacidad de carga entre 50 y 150 TRB, a partir de las estadísticas de la SPTMF, [13]. Se puede notar que los buques comprendidos en un rango entre 30 y 40 metros son los que lideran la actividad pesquera, seguidos de las embarcaciones con eslora mayor a los 55 metros.

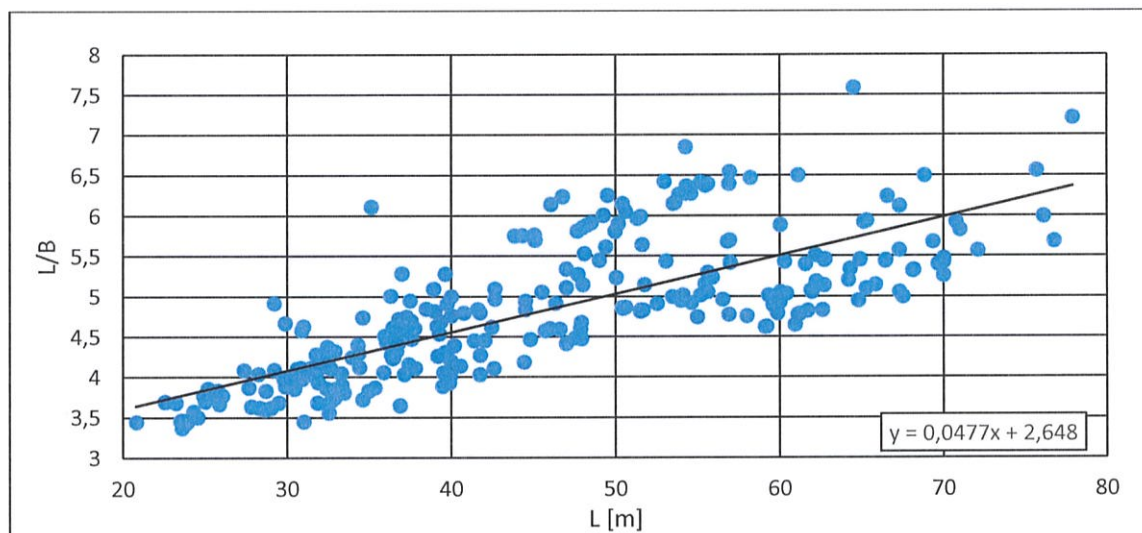
Figura 18: Histograma de la distribución de buques pesqueros ecuatorianos según su eslora



[Fuente: [13]]

A continuación se presenta la gráfica de la relación Eslora/Manga (L/B) versus eslora de los buques registrados en la base de datos.

Figura 19: Relación Eslora/Manga VS Eslora



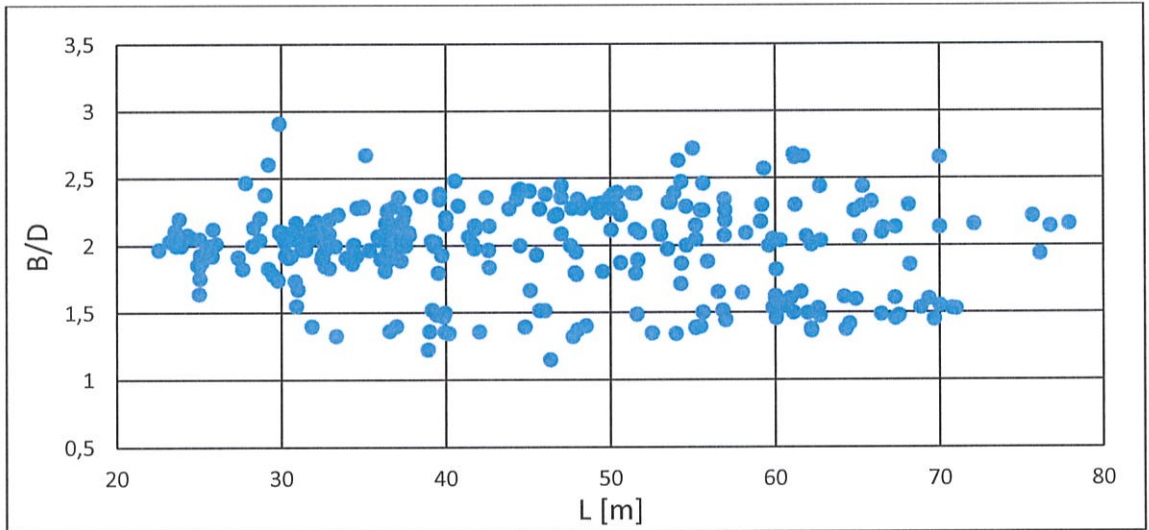
[Fuente: [13]]

La relación eslora/manga en promedio muestra un incremento con la eslora del buque. Se nota una alta dispersión lo que posiblemente se debe a que en la base de datos analizada se encontraron diferentes tipos de buques pesqueros, como atuneros, camaroneros, chinchorreros y otros. Por esto es posible que la relación eslora/manga varíe entre un modelo de buque y otro, causando esta dispersión.

En la Figura 21 se presenta la relación manga/puntal (B/D), obteniendo valores entre 1.5 y 2.5, que corresponden al 84% de la flota pesquera. Se puede decir que los buques pesqueros ecuatorianos tienen una relación

promedio, B/D de 2.0, ya que cercano a este valor se encuentra aproximadamente el 53% de la flota.

Figura 20: Relación Manga/Calado vs Eslora



[Fuente: [13]]

Una de las principales desventajas que tienen los buques pesqueros es que debido a su relativamente baja relación Manga/Puntal, y a las condiciones de carga bastante variables, inciden en que el valor de altura metacéntrica GM sea relativamente bajo. Si a esta condición de baja altura metacéntrica, se le suma que el buque está recibiendo olas de proa, se aumenta la probabilidad de sufrir problemas de Balance Paramétrico, ya que la frecuencia de encuentro tiende a ser elevadas, [6]. Por otro lado es muy poco probable que existan problemas de balance paramétrico cuando el buque navega con olas de popa, debido a que las frecuencias de encuentro son relativamente bajas.

Pero en dicha situación podrían aparecer otros problemas de estabilidad de origen dinámico, como el Surf- Riding, y la Pérdida Pura de Estabilidad, [4].

En el presente trabajo se va a analizar la posibilidad de que un buque ecuatoriano tipo atunero de 45 m de eslora sufra Resonancia Paramétrica que expliquen su zozobra. La embarcación tiene las siguientes características principales:

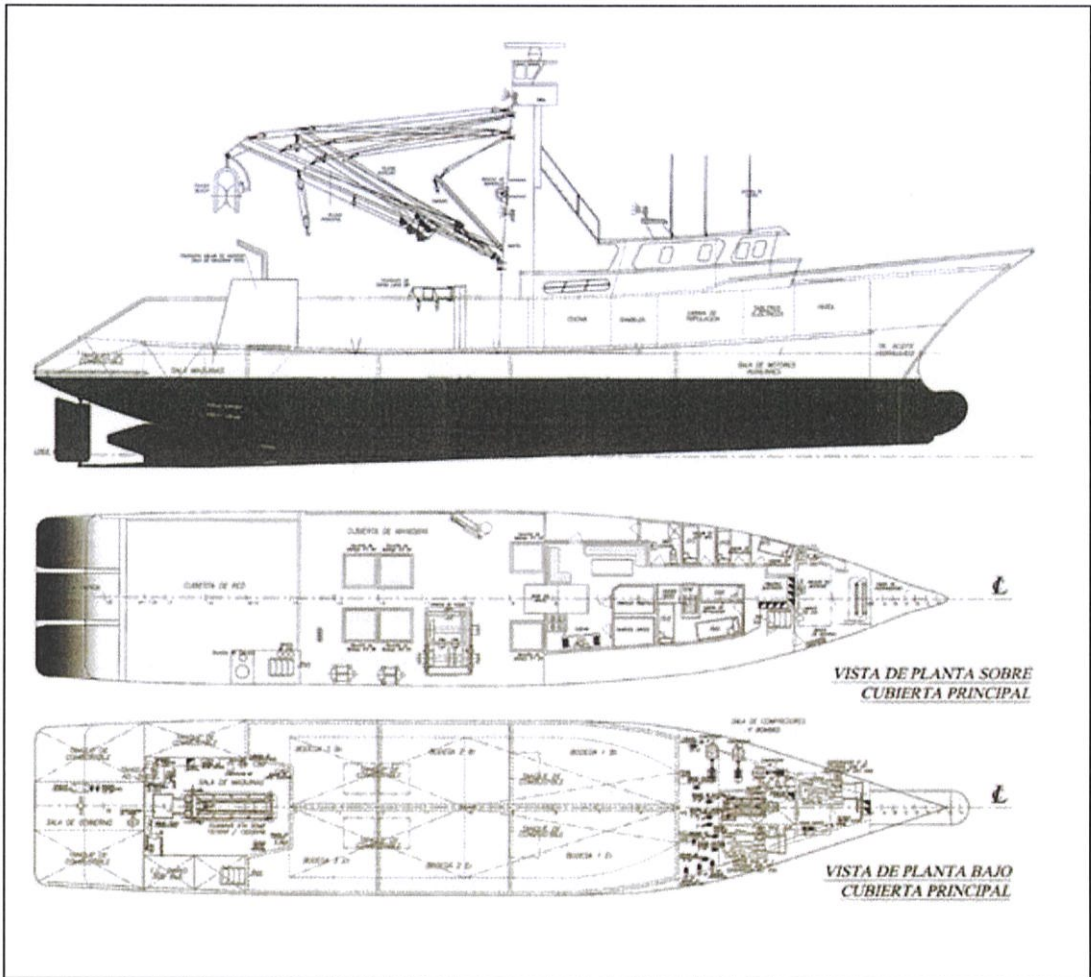
Tabla II: Dimensiones Principales de la Embarcación

Eslora Total	45	[m]
Manga	8	[m]
Puntal	4.72	[m]
Calado de Diseño	4.55	[m]
Desplazamiento	890.	[Ton]
Cb	0.56	

[Fuente: [13]]

El plano de distribución general de la embarcación se muestra a continuación en la Figura 21. Este buque tiene la sala de máquinas en popa y un bulbo de proa. Además encima de la cubierta principal, en la zona de proa, tiene una cubierta superior. Finalmente a la altura de la cubierta principal tiene escotillas para acceder a los tanques de carga, y en este trabajo se considera esas aberturas como posible causa de inundación y posterior zozobra.

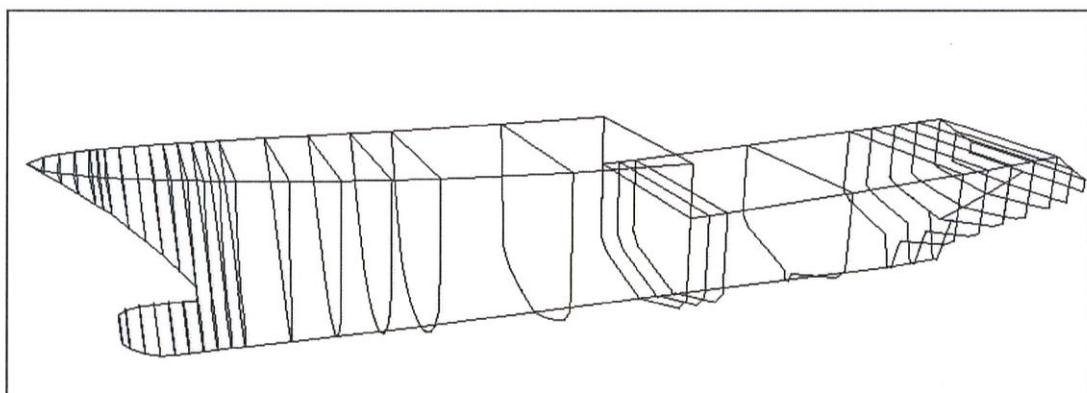
Figura 21: Distribución General del buque Atunero



[Fuente: [13]]

Para los cálculos hidrostáticos y de estabilidad del buque se consideraron secciones hasta la cubierta de francobordo en zona de popa, y hasta la cubierta superior en la zona de proa. Los cálculos hidrostáticos se realizaron usando el módulo de estabilidad en olas del programa SHCP, [9]. Se usó un total de 33 estaciones incluyendo 3 tripletas para representar los cambios abruptos de sección. El modelo geométrico se muestra a continuación.

Figura 22: Modelo Geométrico de la Embarcación Analizada



[Fuente: Elaboración Propia]

La primera condición que se va a analizar se la denomina 'Salida de puerto', cuyos detalles se los presenta en la Tabla III. Se debe recordar que cuando los buques pesqueros zarpan, se podría considerar que esta es una condición de carga ligera, ya que únicamente llevan víveres, salmuera y consumibles, permitiéndoles alcanzar relativamente altas velocidades de navegación.

Para esta estimación del centro de gravedad se partió de los resultados del experimento de inclinación reportados en los archivos de la SPTMF, [13].

Para la segunda condición de carga, se considera que el buque viaja de regreso a puerto con las bodegas de carga relativamente llenas, y la mayoría de tanques de combustibles se vacíos, a excepción de los tanques de doble fondo. Los pesos considerados en esta condición se reportan a continuación, en la Tabla III.

Tabla III: Condición de Carga 1, salida de puerto

CONDICIÓN DE CARGA 1, A SALIDA DE PUERTO							
Item	% Llenado	Peso [Ton]	Z [m]	Mto. Vert. [Ton*m]	X [m]	Mto. Long. [Ton*m]	Iy [Ton*m]
Desplazamiento Ligero		435.94	4.34	1890.87	-0.51	-221.88	
TQ. Comb. Proa	0.95	0.77	1.79	1.38	14.27	10.98	0.23
TQ. Comb. Proa (Eb)	0.95	0.77	1.13	0.87	14.27	10.98	0.50
TQ. Comb. Proa (Bb)	0.95	0.77	1.13	0.87	14.27	10.98	0.50
TQ. Comb. S. Maq (Bb)	0.95	3.09	2.90	8.95	-14.15	-43.69	1.72
TQ. Diario S. Maq (Eb)	0.95	1.55	2.10	3.25	-14.60	-22.61	1.03
TQ. Comb. Popa (Bb)	0.50	13.02	3.00	39.06	-17.98	-234.10	4.34
TQ. Comb. Popa (Eb)	0.50	13.02	3.00	39.06	-17.98	-234.10	4.34
TQ. Comb. Db. Fondo Proa 2	1.00	55.33	0.50	27.67	2.22	122.83	0.00
TQ. Comb. Db. Fondo Popa 1	1.00	42.31	0.60	25.39	-5.97	-252.59	0.00
Bodega No 1 (Eb)	0.35	30.28	1.99	60.32	3.50	105.96	37.90
Bodega No 1 (Bb)	0.35	30.28	1.99	60.32	3.50	105.96	37.90
Bodega No 2 (Eb)	0.40	28.08	2.09	58.69	-2.69	-75.54	30.76
Bodega No 2 (Bb)	0.40	28.08	2.09	58.69	-2.69	-75.54	30.76
Bodega No 3 (Eb)	0.50	34.25	2.26	77.41	-8.25	-282.56	29.94
Bodega No 3 (Bb)	0.50	34.25	2.26	77.41	-8.25	-282.56	29.94
TQ Agua Dulce	1.00	2.08	3.00	6.25	-15.00	-31.26	0.00
TQ AC Hidráulico Proa	1.00	4.35	3.80	16.52	17.44	75.83	0.00
Tripulación	1.00	0.78	7.80	6.08	0.00	0.00	
Equipos Varios	1.00	0.20	5.30	1.06	11.50	2.30	
Panga.	1.00	8.00	4.78	38.24	-19.33	-154.64	
Speed Boats	1.00	0.60	7.40	4.44	-1.19	-0.71	
Red	1.00	35.00	5.50	192.50	-13.30	-465.50	
TOTAL		802.79		2695.28		-1931.44	209.89

Calado	4.06	[m]
Puntal	4.78	[m]
Asiento	-0.17	[m]
LCG	-2.41	[m]
KG	3.62	[m]
GM	0.48	[m]

[Fuente: Elaboración Propia]

Puede notarse que en esta condición de carga el asiento es negativo, lo que implica que el buque se encuentra ligeramente encabuzado.

Tabla IV: Condición de Carga 2, regreso a puerto

CONDICIÓN DE CARGA 2 LLEGADA A PUERTO							
Item	% Llenado	Peso [Ton]	Z [m]	Mto Vert [Ton*m]	X [m]	Mto Long [Ton*m]	Iy [Ton*m]
Desplazamiento Ligero		435.94	4.34	1890.87	-0.51	-221.88	
TQ. Comb. Proa	0.10	0.08	1.26	0.10	14.27	1.16	0.00
TQ. Comb. Proa (Eb)	0.10	0.08	0.58	0.05	14.27	1.16	0.00
TQ. Comb. Proa (Bb)	0.10	0.08	0.58	0.05	14.27	1.16	0.00
TQ. Comb. S. Maq (Bb)	0.10	0.33	1.17	0.39	-14.15	-4.67	0.00
TQ. Diario S. Maq (Eb)	0.10	0.16	1.08	0.18	-14.60	-2.38	0.00
TQ. Comb. Popa (Bb)	0.20	5.21	2.66	13.85	-17.98	-93.64	4.34
TQ. Comb. Popa (Eb)	0.20	5.21	2.66	13.85	-17.98	-93.64	4.34
TQ. Comb. Db. Fondo Proa 2	1.00	66.72	0.50	33.36	2.22	148.12	0.00
TQ. Comb. Db. Fondo Popa 1	1.00	51.02	0.60	30.61	-5.97	-304.59	0.00
Bodega No 1 (Eb)	0.45	38.93	2.19	85.15	3.50	136.24	37.90
Bodega No 1 (Bb)	0.45	38.93	2.19	85.15	3.50	136.24	37.90
Bodega No 2 (Eb)	0.50	35.10	2.29	80.20	-2.69	-94.42	30.76
Bodega No 2 (Bb)	0.50	35.10	2.29	80.20	-2.69	-94.42	30.76
Bodega No 3 (Eb)	1.00	68.50	3.21	219.89	-8.25	-565.13	0.00
Bodega No 3 (Bb)	1.00	68.50	3.21	219.89	-8.25	-565.13	0.00
TQ Agua Dulce	0.10	0.21	1.29	0.27	-15.00	-3.15	0.00
TQ AC Hidráulico Proa	0.10	0.43	2.63	1.14	17.44	7.58	0.00
Tripulación	1.00	1.40	7.80	10.92	0.00	0.00	
Equipos Varios	1.00	0.20	5.30	1.06	11.50	2.30	
Panga.	1.00	8.00	4.70	37.60	-19.33	-154.64	
Speed Boats	1.00	0.60	7.40	4.44	-1.19	-0.71	
Red	1.00	35.00	5.50	192.50	-13.30	-465.50	
TOTAL		895.73		3001.71		-2229.9	146.00

Calado	4.43	[m]
Puntal	4.78	[m]
Asiento	-0.22	[m]
LCG	-2.49	[m]
KG	3.51	[m]
GM	0.56	[m]

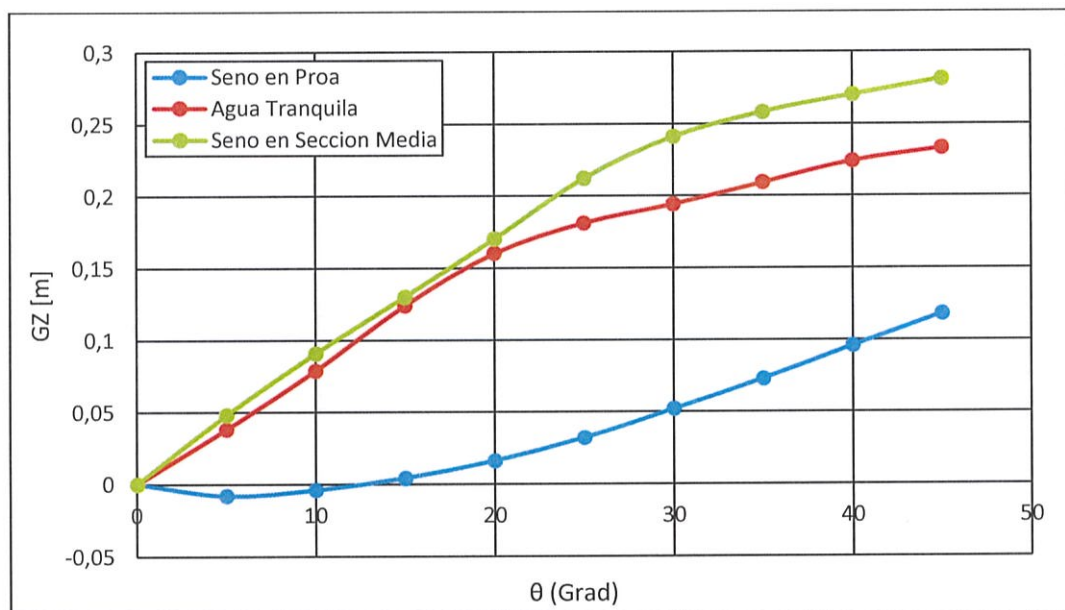
[Fuente: Elaboración propia]

En esta segunda condición de carga, se presenta nuevamente un valor de asiento negativo, y un aumento de calado.

En la Tabla IV se muestran curvas representativas de los brazos adrizantes GZ del buque, correspondientes a una altura de ola de 3 metros, en dos

posiciones de la ola, comparadas con la condición de aguas tranquilas. Puede notarse que cuando el seno de la ola se ubica en la proa o popa, se produce la mayor reducción en el valor de GM, provocado por la disminución del plano de flotación.

Figura 23: Curvas GZ en función de la posición del Seno de la Ola

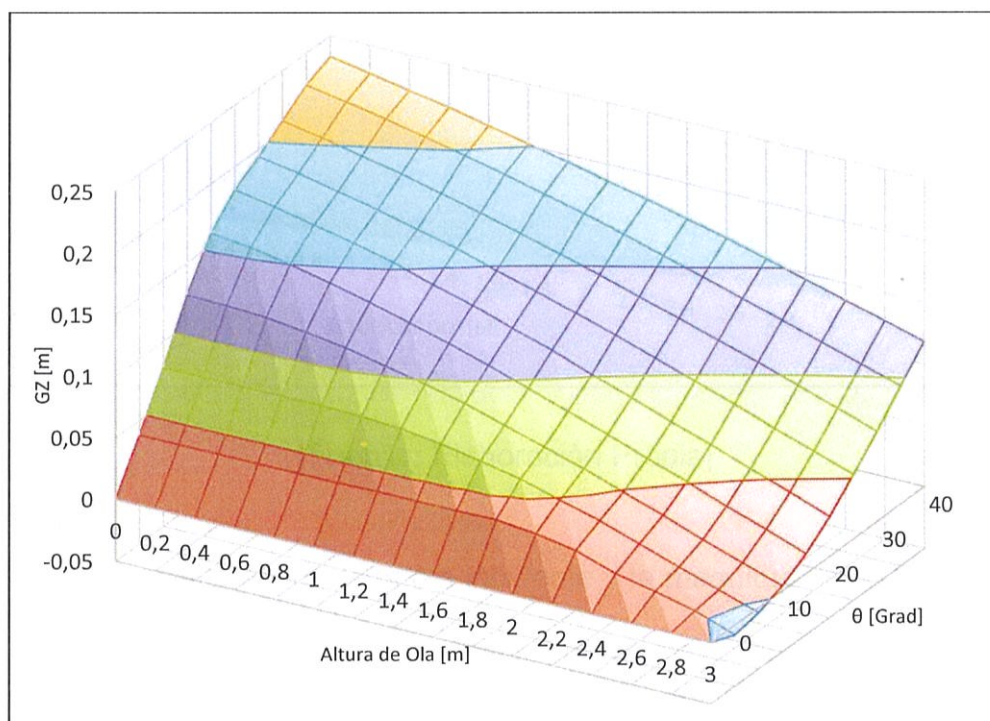


[Fuente: Elaboración Propia]

Nótese que cuando el seno de la ola se ubica en la proa del buque, para valores de ángulo de escora menores a 13 grados, el brazo GZ es negativo. A este ángulo límite del comportamiento de GZ negativo se lo conoce como "Loll Angle". Este fenómeno de GZ negativo es muy poco común y se presenta únicamente cuando existe una significativa reducción en el plano de flotación.

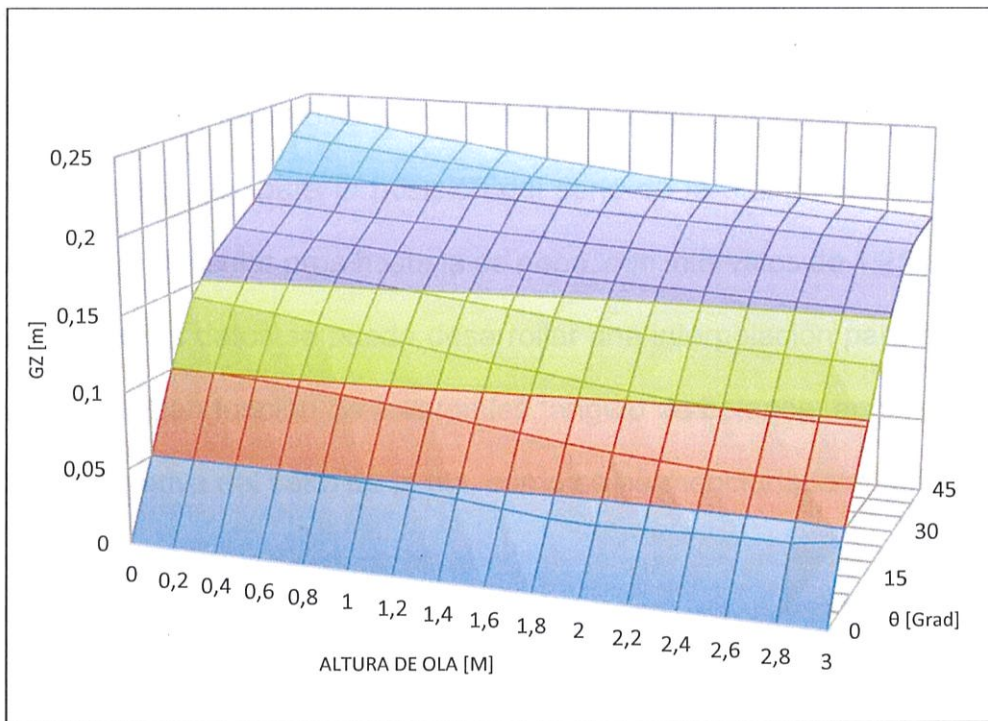
Las curvas GZ también varían en función de la altura de la ola, como se muestra en la Figura 24 y Figura 25 , en las que se grafica como superficie, los valores de GZ correspondientes a olas de diferente altura, cuyo seno se ubica en la perpendicular de proa del buque.

Figura 24: GZ en función de la Altura de la Ola en Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 25: GZ en función de la Altura de la Ola en Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

La relación entre la altura de la ola incidente y la magnitud del GZ del buque analizado, es inverso, es decir a mayor altura de ola, menor es la magnitud del Brazo Adrizante, como se puede apreciar en la Figura 24 y la Figura 25. Esto se debe a que al ubicar el seno de la ola en la proa, a medida que la amplitud de la ola aumenta, se produce una mayor reducción del plano de flotación. Por otro lado, si el seno de la ola se ubica en la sección media del buque, la relación entre amplitud de ola y GZ es proporcional, debido a que en este caso el plano de flotación aumente a medida que la amplitud de la ola también lo hace.

Los cálculos de GZ para el buque aquí mostrados se desarrollaron para valores de escora en un rango desde 0° hasta 45° grados, con intervalos de 5° . Se usaron alturas de olas que van desde 0 hasta 3 m, con incrementos de 0.2 m. Mientras que para la posición del seno de la ola, se usaron valores, desde la perpendicular proa hasta la de popa, con intervalos de 1.25 m. Luego a partir de estos datos se puede desarrollar una interpolación para encontrar el valor de GZ en función de 3 variables, ángulo de balance, amplitud de ola y posición relativa del seno de la ola, como se ha mencionado anteriormente.

3.2. Resumen de las simulaciones en la condición ‘Salida de Puerto’

En la condición de carga denominada ‘Salida de Puerto’, como ya se explicó anteriormente, se considera que el buque pesquero analizado tiene los tanques de consumibles totalmente llenos y las bodegas están parcialmente cargadas con salmuera. En esta distribución de pesos, se tienen las siguientes características:

Tabla V: Condición de Carga 1

Condición de Carga 1		
Desplazamiento	802.79	[Ton]
Calado	4.09	[m]
Puntal	4.78	[m]
Asiento	-0.17	[m]
LCG	-2.41	[m]
KG	3.62	[m]
Francobordo	0.61	[m]
GM	0.48	[m]
ω_0	0.72	[1/Sec]

[Fuente: Elaboración Propia]

Se realizaron simulaciones numéricas del Balance Paramétrico en olas regulares e irregulares con esta condición de carga, empleando una integración numérica con intervalo de tiempo de 0.1 segundo.

Respuesta en olas regulares

Para la simulación del Balance en olas regulares, se usa una longitud de onda igual a la eslora entre perpendiculares del buque y se integró hasta los 15 minutos. La amplitud de la ola es de 1 m, y se trabaja sin amortiguamiento y con un porcentaje de amortiguamiento adimensional del 2.5%. La frecuencia natural en esta condición de carga es de 0.72 Sec^{-1} , lo que implica que la frecuencia de encuentro crítica deberá estar alrededor de 1.44 Sec^{-1}

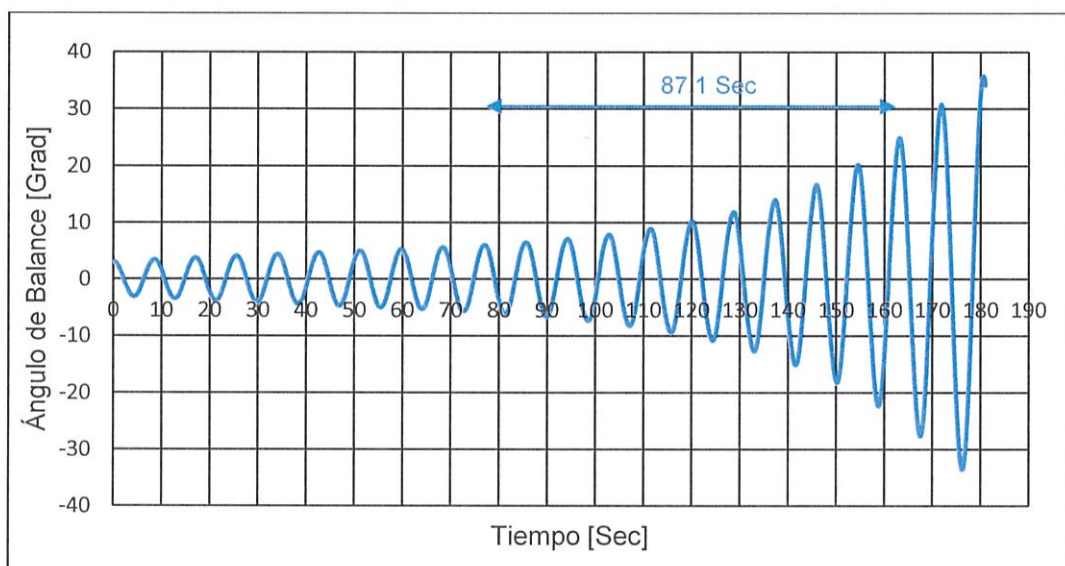
Con olas de longitud igual a la eslora entre perpendiculares, la frecuencia de encuentro es:

$$\omega_e = k \cdot V_{rel} = \frac{2\pi \cdot V_{rel}}{\lambda}$$

Dando como resultado una velocidad relativa entre el buque y la ola de 16.93 Nudos.

A continuación en la Figura 26 hasta la Figura 33 se presentan el ángulo de Balance, la velocidad angular en balance, el brazo adrizante, calado medio, la ordenada de inundación y el asiento versus la posición de la ola respecto del buque, resultantes en la integración con amortiguamiento. En el caso presentado, la velocidad relativa es la crítica.

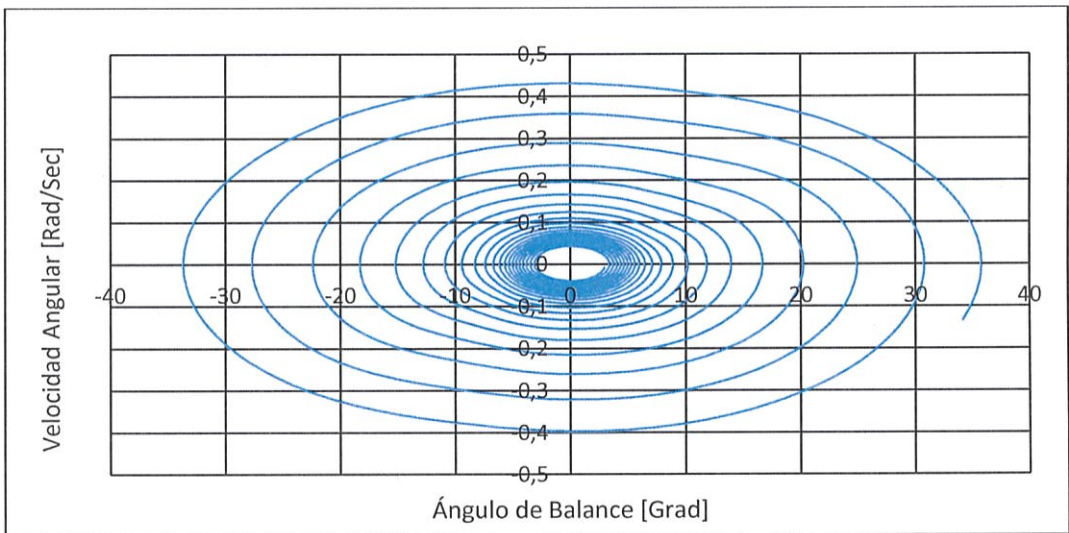
Figura 26: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

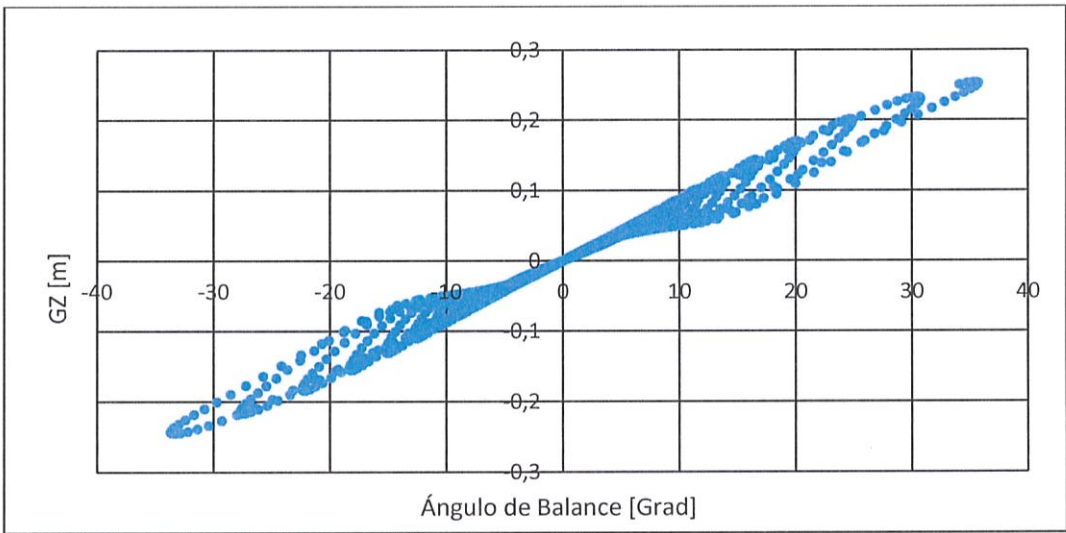
Nótese en la figura anterior, que si se contabiliza el tiempo en completar 10 ciclos y se estima un periodo promedio, se obtiene un valor de 8.71 sec/ciclo, que corresponde a una frecuencia de oscilación de 0.74 rad/sec. Es decir a pesar de que la frecuencia con que encuentra las olas es de 1.44 rad/sec, el buque oscila con una frecuencia de 0.74 rad/sec, a su propia frecuencia natural.

Figura 27: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

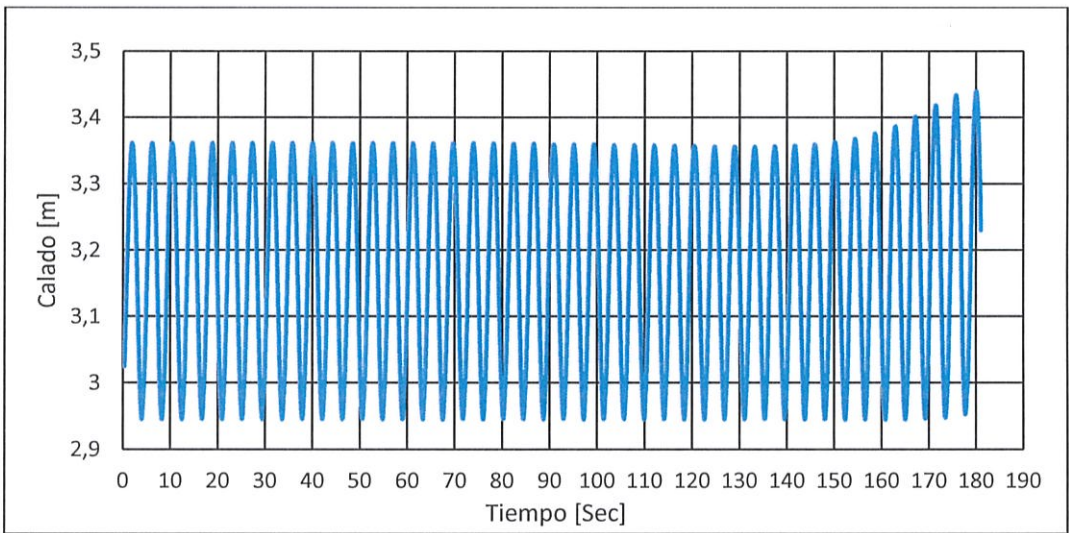
Figura 28: GZ versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

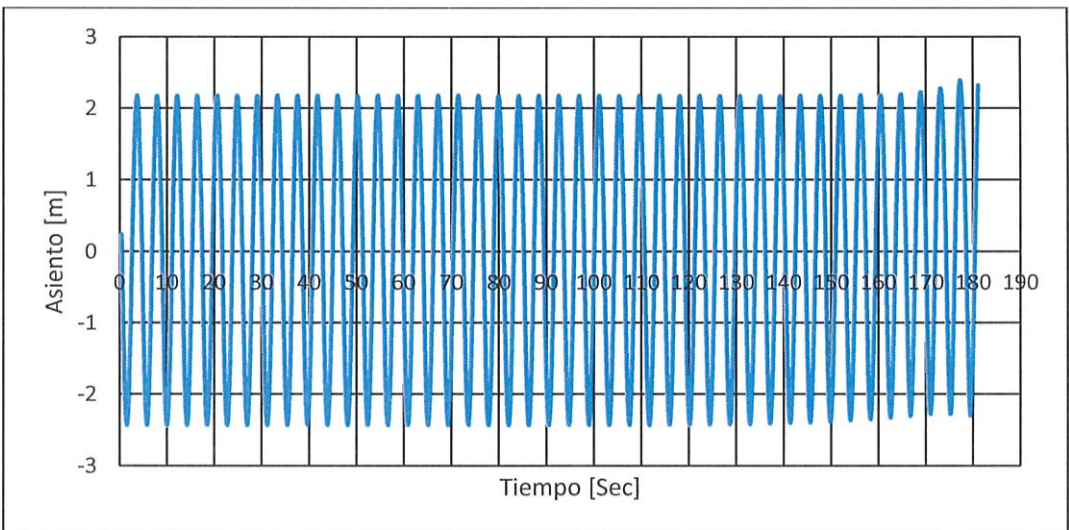
Puede notarse en la Figura 28 como la magnitud del brazo adrizante tiene varios valores para un mismo ángulo de balance, esto se debe a que también depende de la amplitud y posición relativa de la ola, como se explicó anteriormente.

Figura 29: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 1



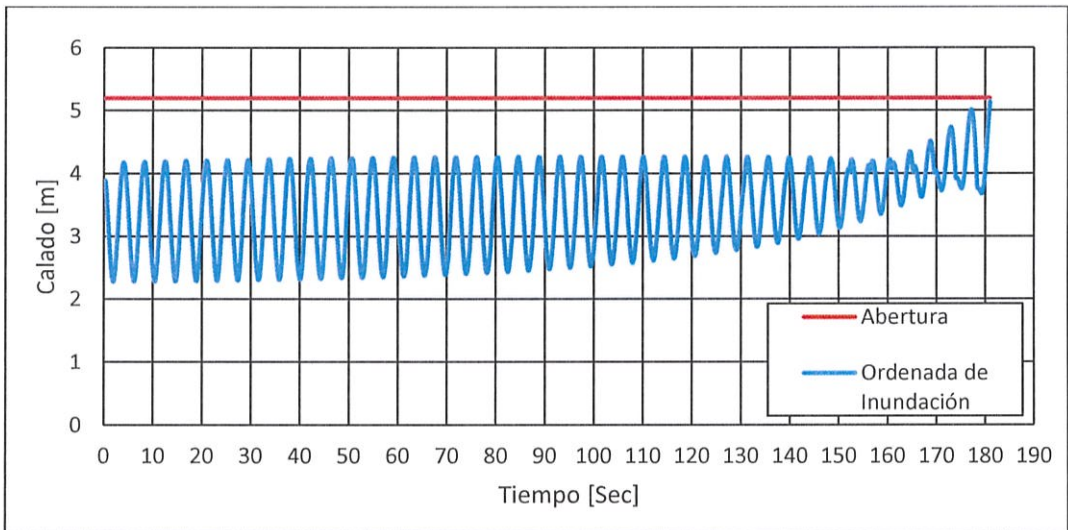
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 30: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

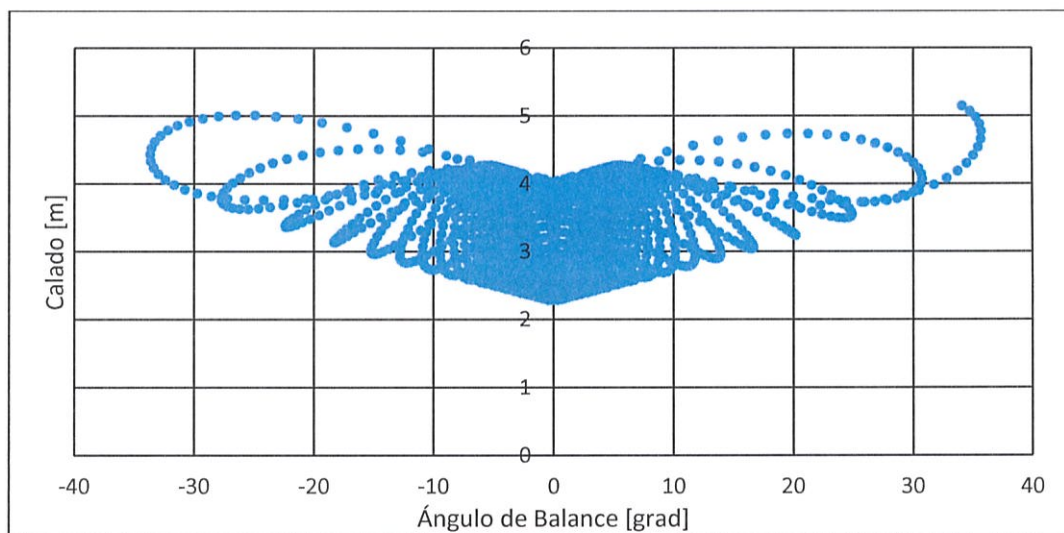
Figura 31: Ordenada de Inundación, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

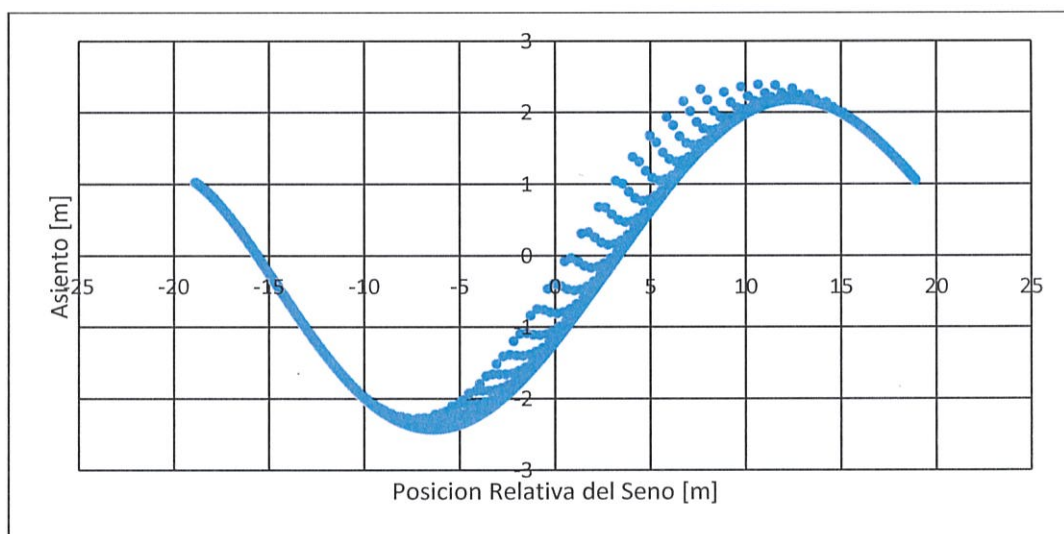
El valor de la ordenada de inundación varia, en función del ángulo de balance, amplitud y posición de la ola, hasta que es igual a la posición vertical de la abertura, donde se produce la zozobra.

Figura 32: Ordenada de Inundación versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 33: Asiento vs Posición relativa de la ola, en la Condición de Carga 1

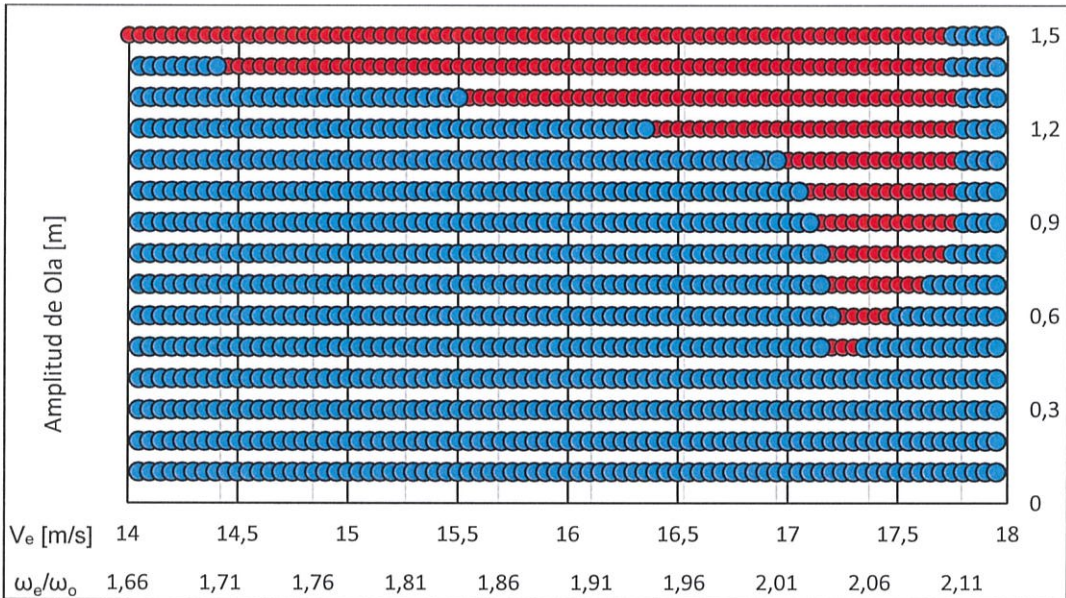


[Fuente: Elaboración Propia]

A continuación se desarrollan las simulaciones del Balance Paramétrico, variando la velocidad de encuentro y cambiando la amplitud de la ola incidente. En la Figura 34 se muestra el resumen de las simulaciones sin considerar amortiguamiento, mientras que en la Figura 35 se muestran los resultados usando un valor de amortiguamiento equivalente de 2.5%. En ambas gráficas, la zona de color azul representa la región donde no se presentó inestabilidad, mientras que en la región roja se produjo la zozobra del buque.

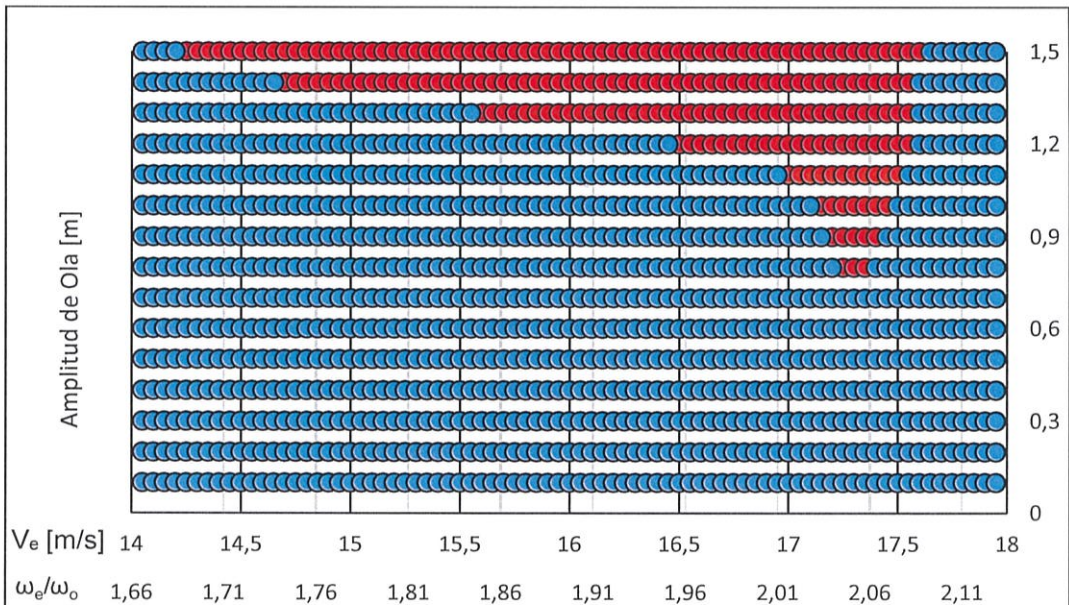
En forma similar a la Figura 3 del Capítulo 1, alrededor de la zona de Inestabilidad dinámica más importante, se producen altas oscilaciones que llevan al buque a la zozobra. Además, esta área de inestabilidad dinámica es altamente dependiente de la cantidad de amortiguamiento, y se puede notar este comportamiento en la reducción de la zona de zozobra en la Figura 32.

Figura 34: Región de Inestabilidad Principal sin amortiguamiento, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 35: Región de Inestabilidad Principal con 2.5% de amortiguamiento, en la Condición de Carga 1

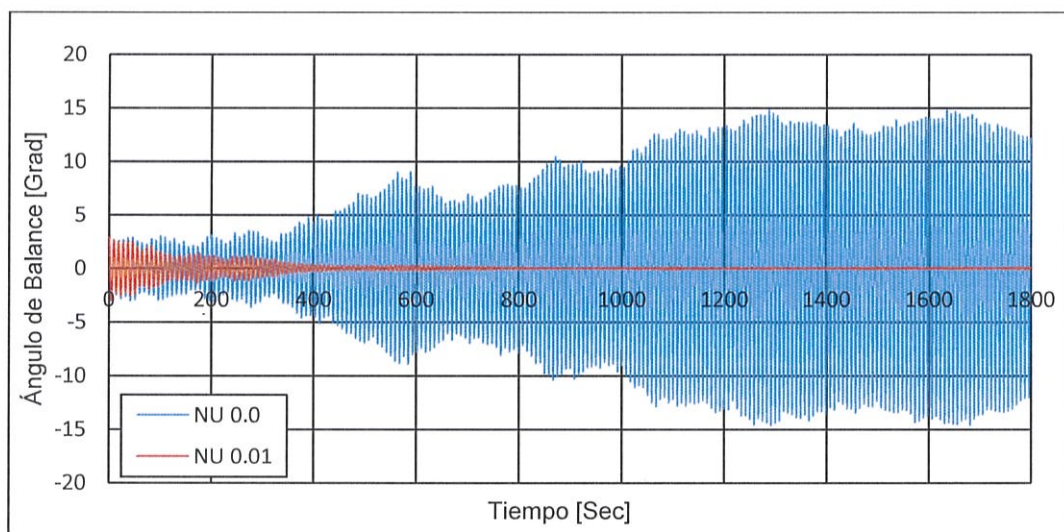


[Fuente: Elaboración Propia]

Respuesta en mar Irregular

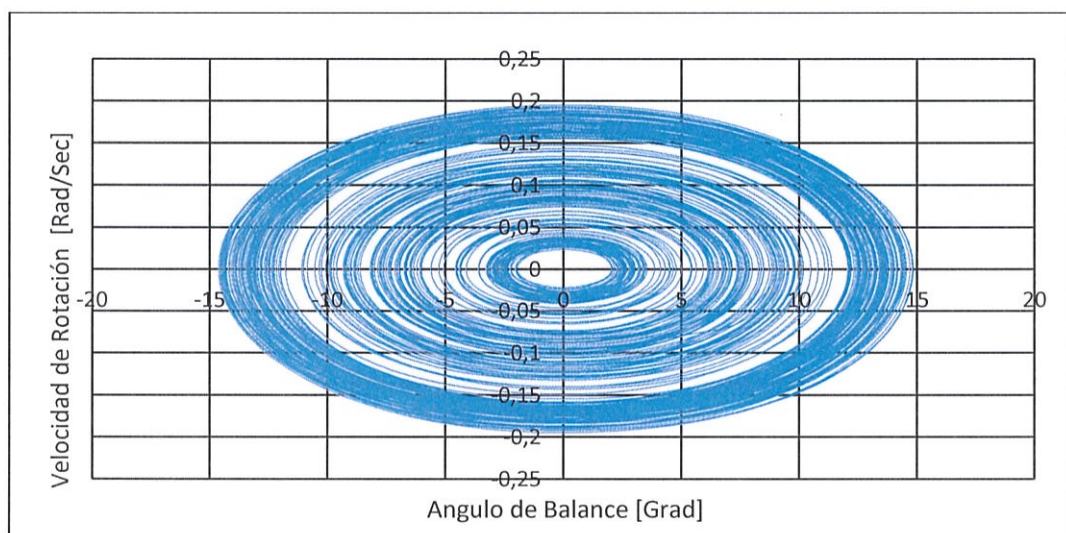
Finalmente se han desarrollado simulaciones del balance del buque en condición de carga 1 con mar irregular, en un estado de mar 4. En este caso es más difícil establecer la velocidad de avance crítica dado que la velocidad de las olas no es constante. En general únicamente cuando no existe la presencia de amortiguamiento se pudo observar la zozobra, y un coeficiente de amortiguamiento del orden de 0.01 (1%) es suficiente para evitarla, como se observa en la Figura 36. En estas simulaciones se usó un intervalo de tiempo de 0.1 segundos, con un tiempo total de simulación de 30 minutos, valor que se considera razonable que pueda mostrarse estacionario un estado de mar. Los resultados de la simulación se muestran a continuación en la Figura 36 hasta la Figura 44. Se usó una velocidad del buque de 2.5 m/sec.

Figura 36: Ángulo de Balance en el tiempo con diferentes niveles de amortiguamiento, en la Condición de Carga 1



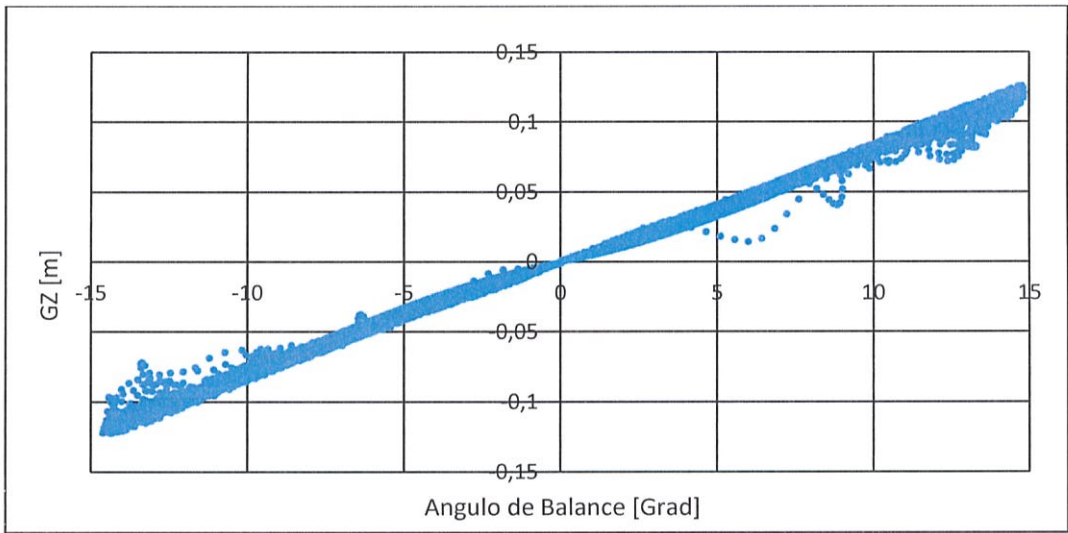
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 37: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 1



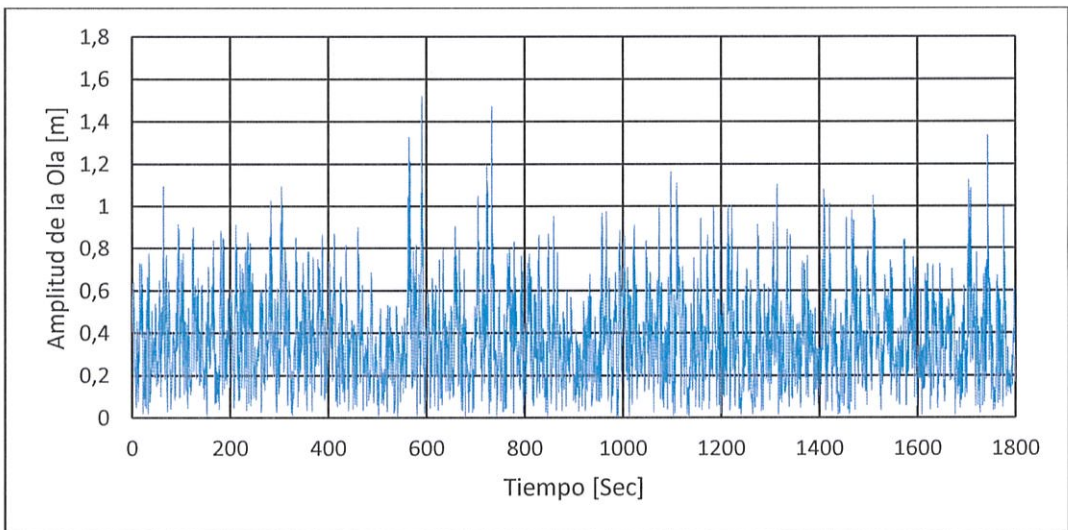
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 38: GZ versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 39: Amplitud de Olas en el tiempo, en la Condición de Carga 1

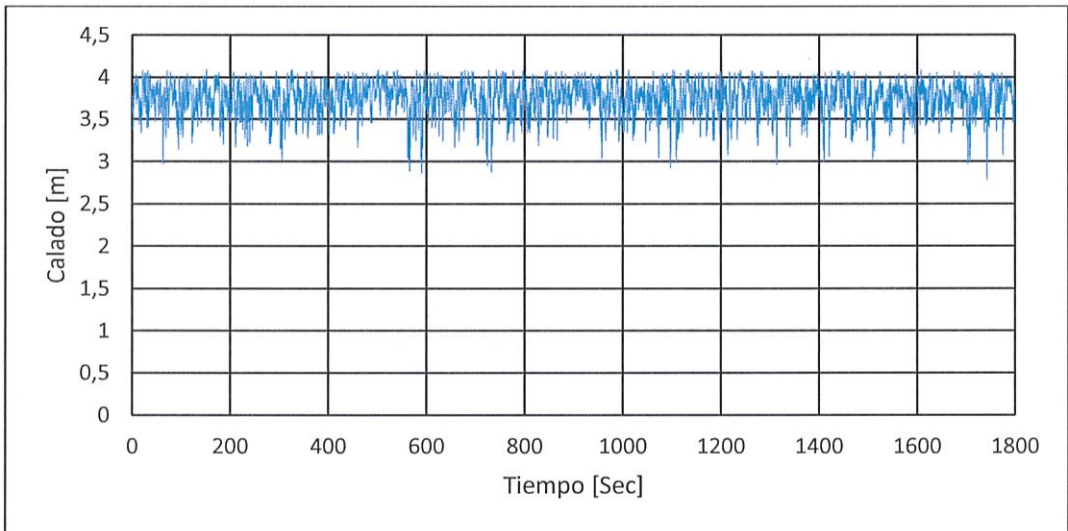


[Fuente: Elaboración Propia]

Al tratarse de mar irregular, en cada instante de tiempo se genera una ola con una altura equivalente diferente. En el Apéndice se presentan los resultados

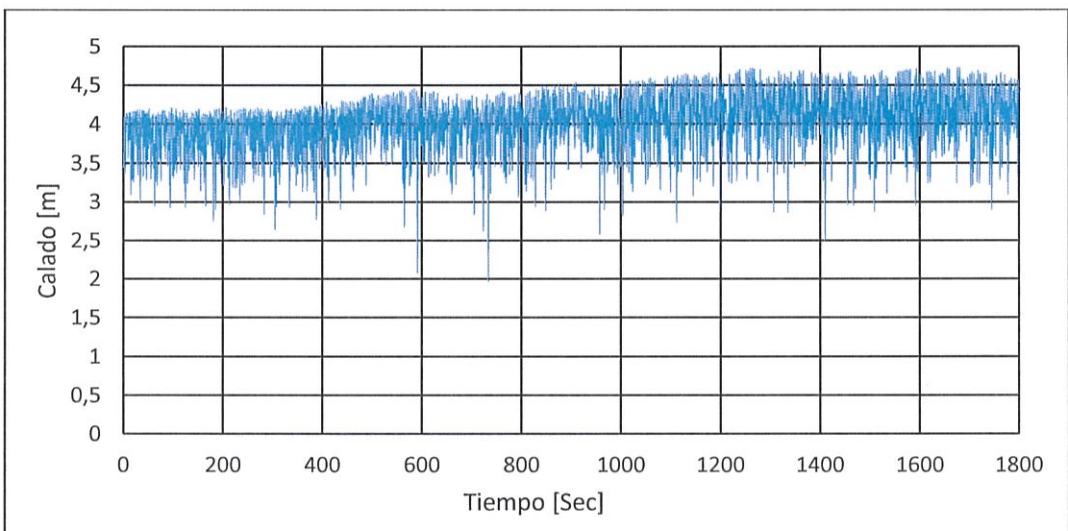
del cálculo de la altura significativa de esta señal, con un resultado que se aproxima al valor del estado de mar que se empleó en la simulación de 1.9 m.

Figura 40: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 1



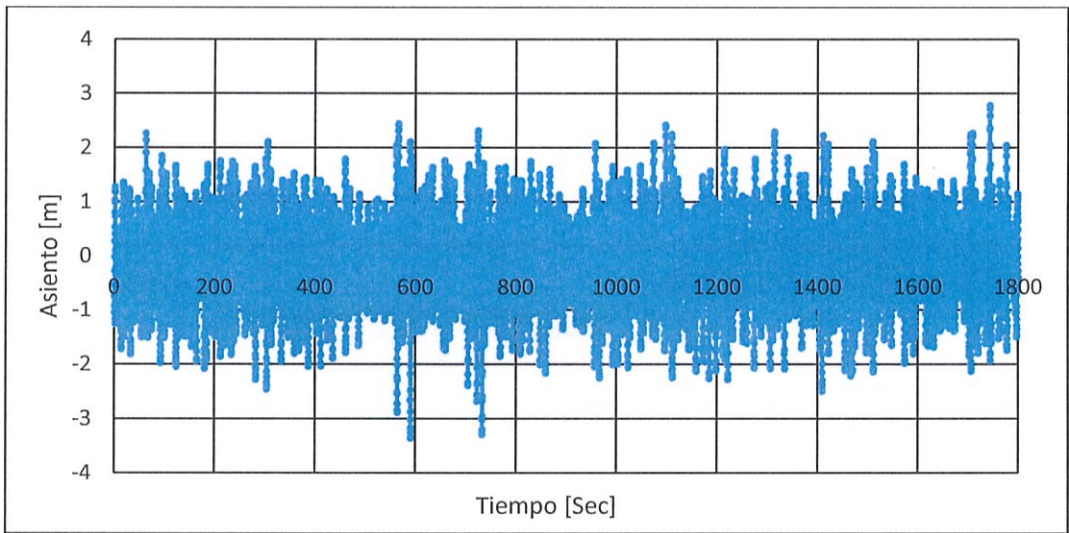
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 41: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 1



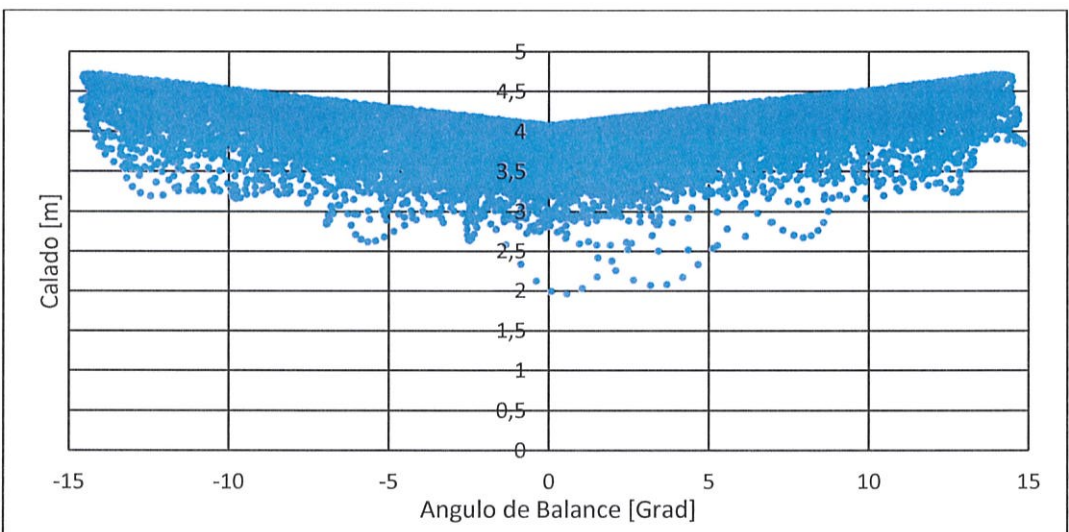
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 42: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 1



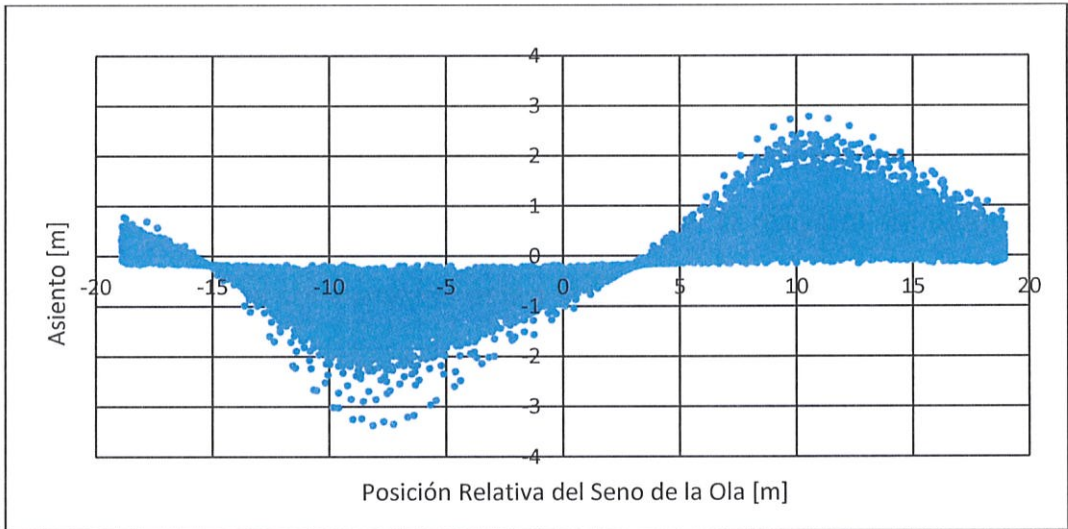
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 43: Ordenada de Inundación versus Ángulo de Balance, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 44: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

3.3. Resumen de las simulaciones en la condición 'Llegada a Puerto'

En la segunda condición de carga que se analizó, se asume que las bodegas están parcialmente llenas de carga, mientras que la mayoría de tanques de combustible y otros consumibles están vacíos. En este caso se tiene menor francobordo, y dado que el GM se incrementa, la frecuencia natural también lo hace.

Tabla VI: Condición de Carga 2

Condición de Carga 2		
Desplazamiento	895.73	[Ton]
Calado	4.43	[m]
Puntal	4.78	[m]
Asiento	-0.22	[m]
LCG	-2.49	[m]
Francobordo	0.35	[m]
KG	3.51	[m]
GM	0.56	[m]
ω_0	0.80	[1/sec]

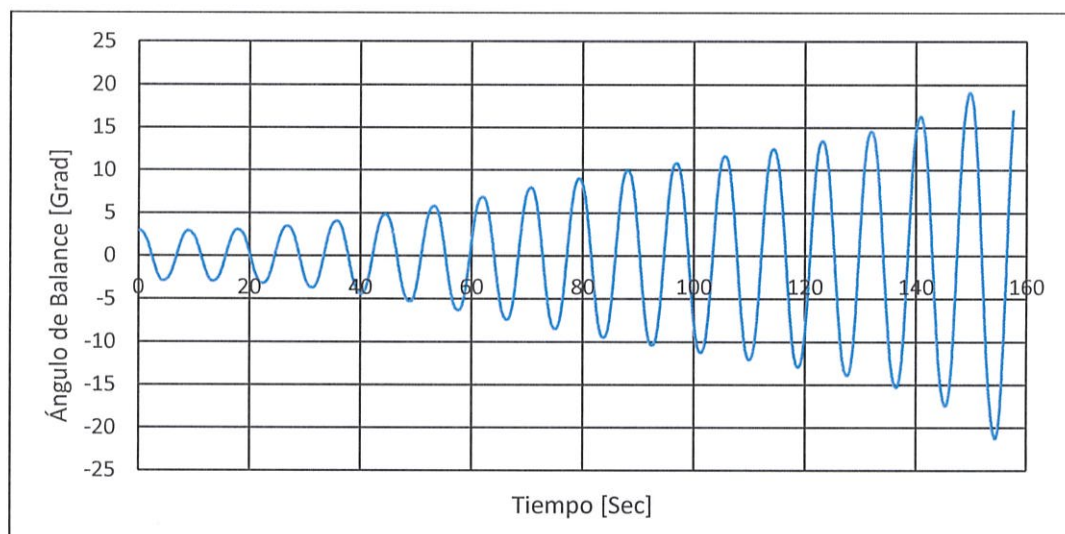
[Fuente: Elaboración Propia[13]]

Respuesta en olas regulares

En esta condición de carga, la frecuencia natural es de 0.80 [Sec⁻¹], entonces la velocidad relativa de avance del buque respecto de las olas, para que se produzca la resonancia paramétrica debe ser aproximadamente 20 Nudos.

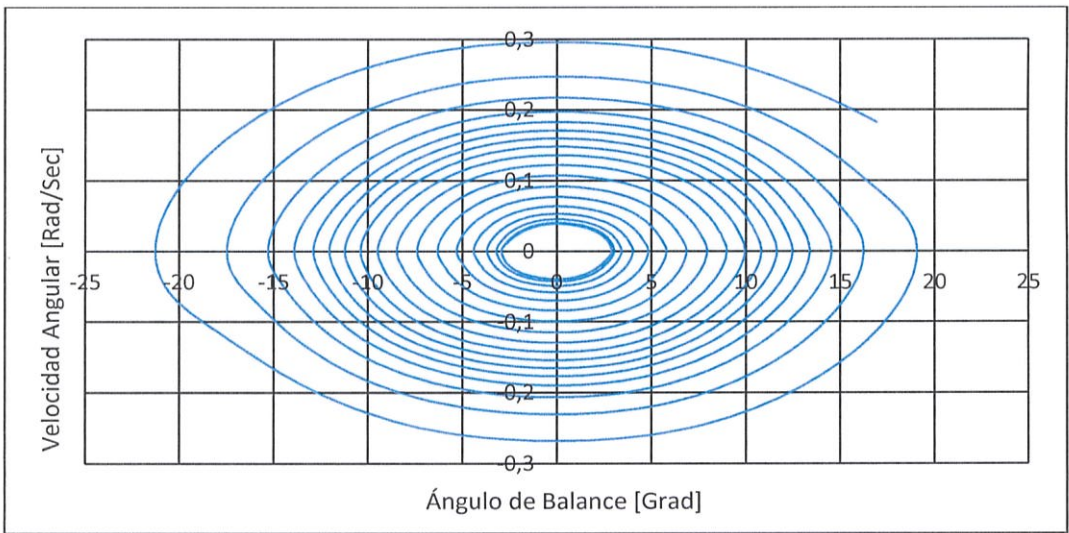
A continuación desde la Figura 45 hasta la Figura 52, se muestran los resultados de las simulaciones en olas regulares, con una velocidad relativa de 20 nudos y olas de 1 m de amplitud, con un valor de amortiguamiento de 0.025.

Figura 45: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 2



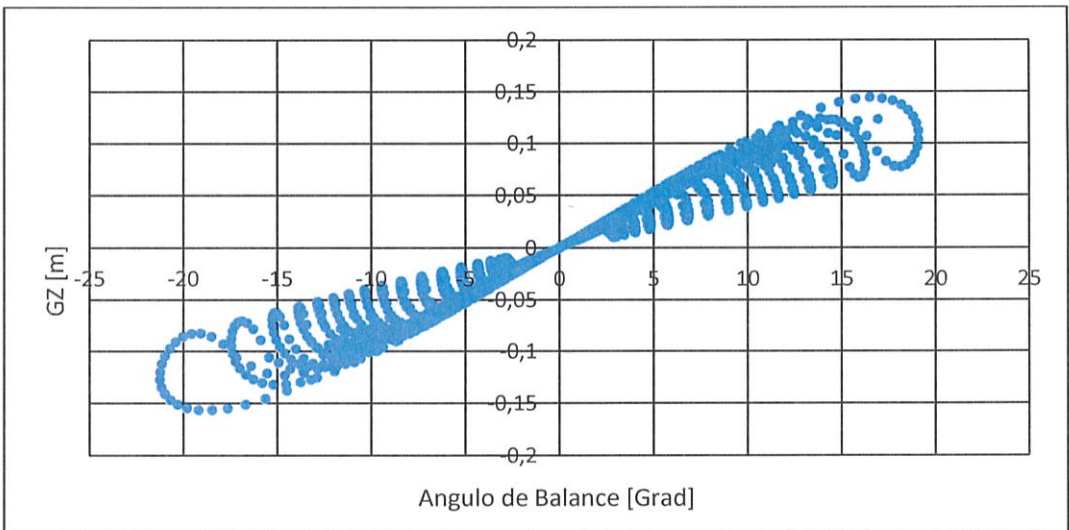
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 46: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 2



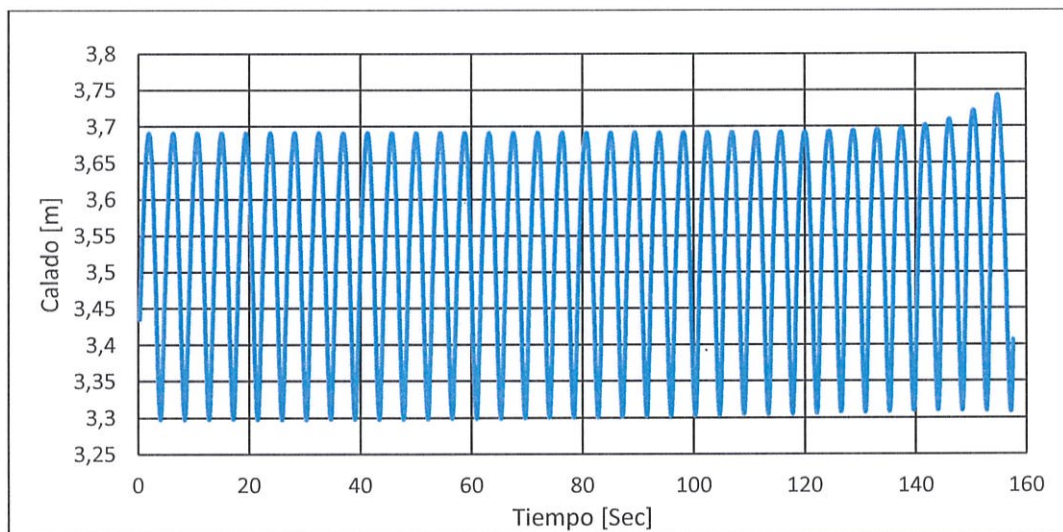
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 47: Brazo Adrizante versus Balance, en la Condición de Carga 2



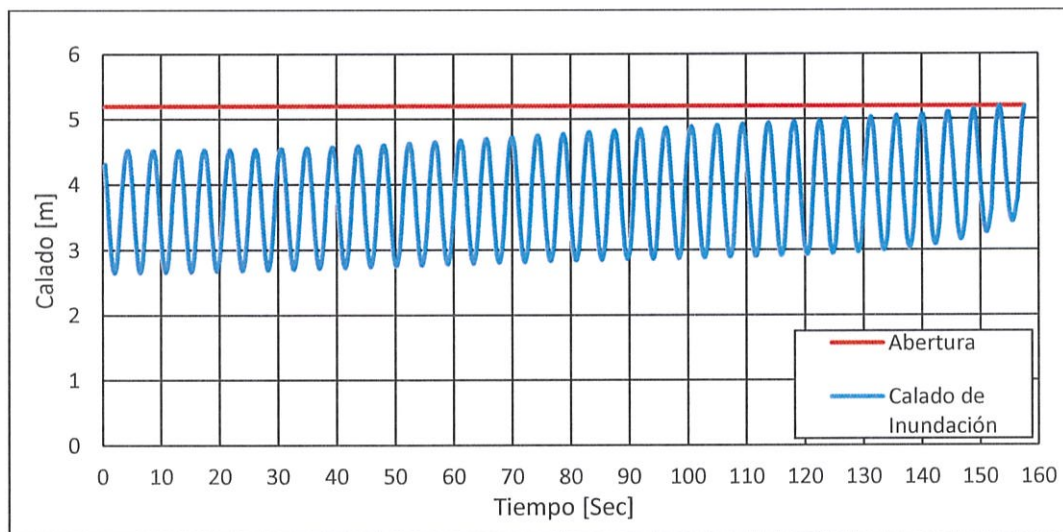
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 48: Calado Medio en el tiempo, en la Condición de Carga 2



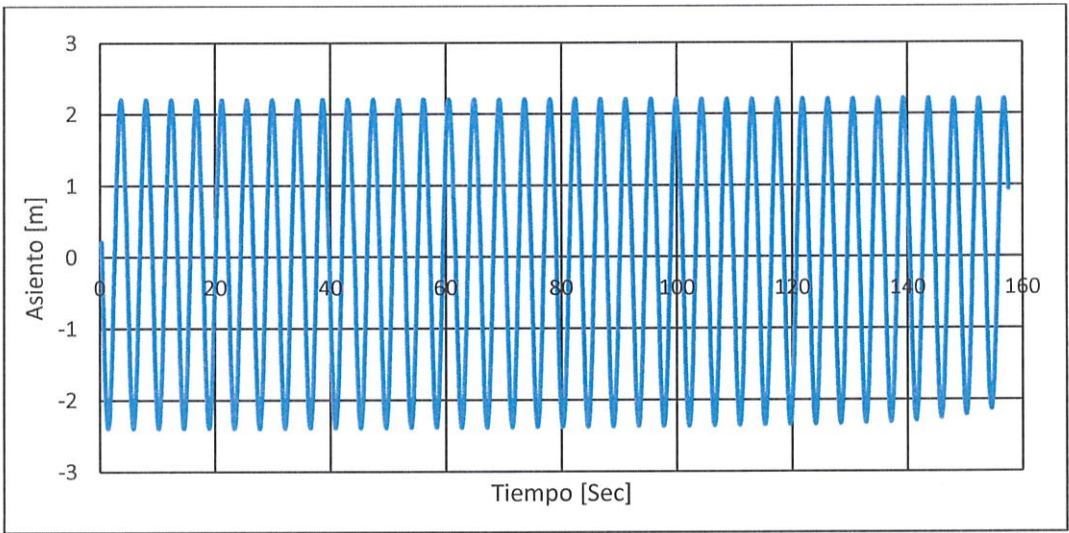
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 49: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 2



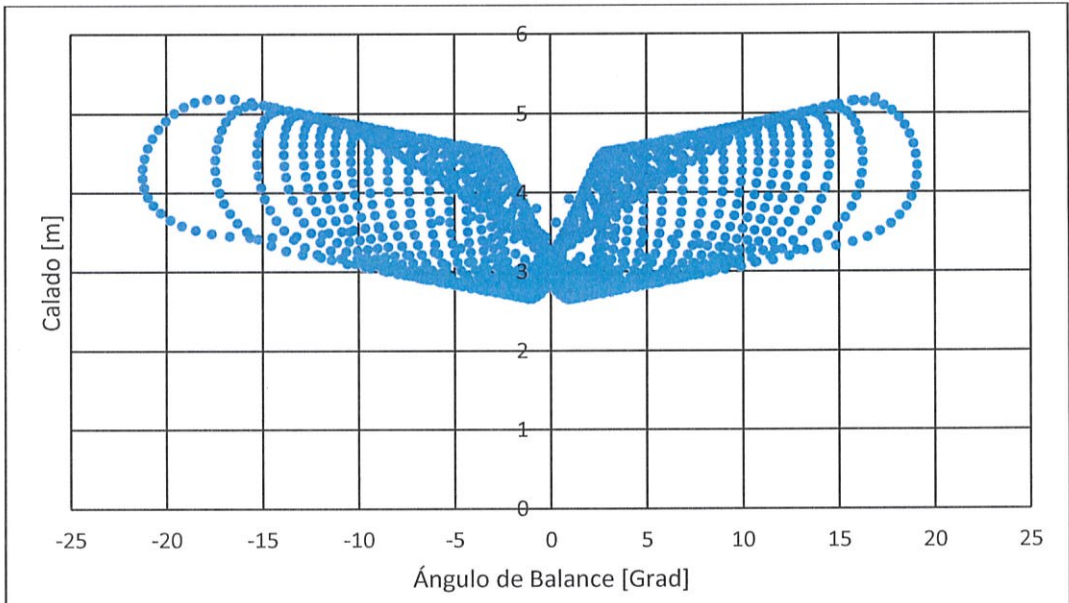
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 50: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 2



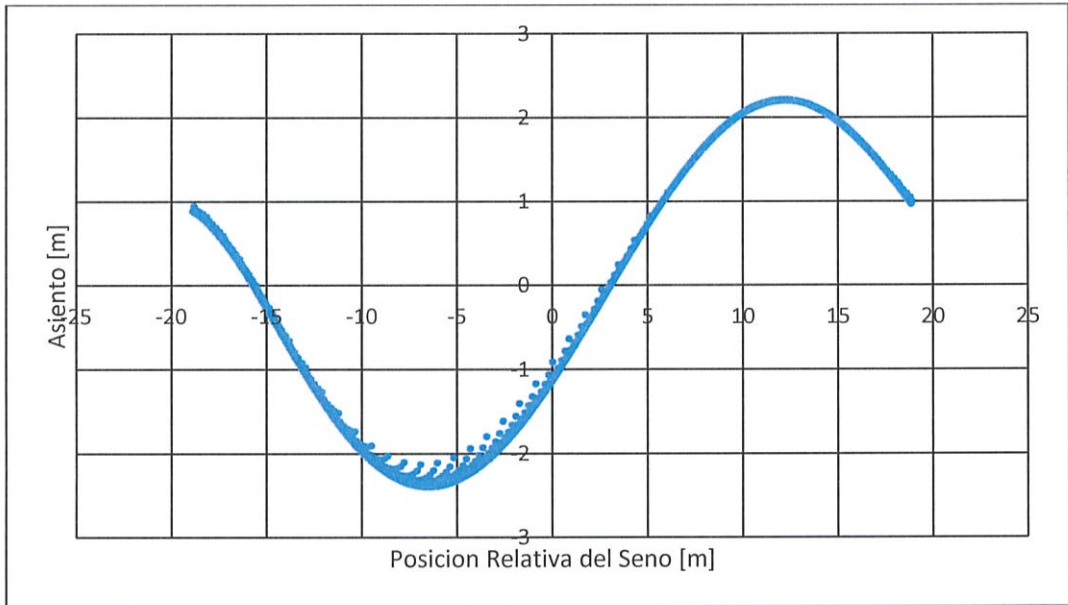
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 51: Ordenada de Inundación versus Balance, en la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 52: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2



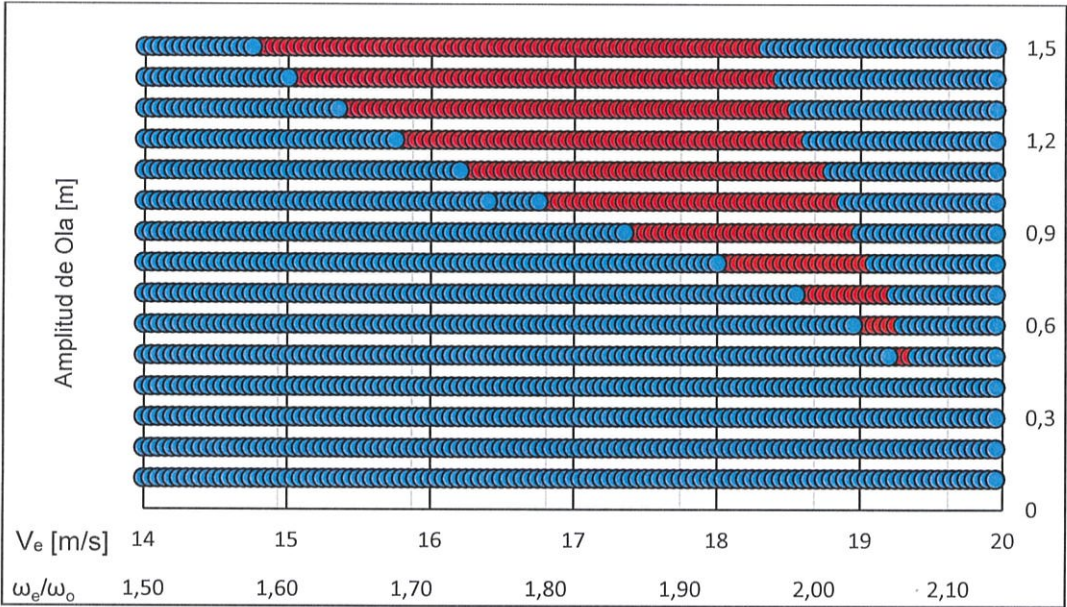
[Fuente: Elaboración Propia]

En forma similar a la condición de carga 1, se va a determinar la región de Inestabilidad variando la velocidad relativa del buque respecto de las olas, y la amplitud de las olas regulares. En Figura 53 se muestra la principal región de inestabilidad para simulaciones realizadas sin amortiguamiento. El comportamiento es similar al resultado obtenido en la primera condición de carga, que se mostró en la Figura 34. La principal diferencia entre ambos resultados fue que la velocidad relativa donde ocurrieron las primeras respuestas resonantes fue mayor para la segunda condición de carga. Puede notarse que para todos los casos, la condición resonante no se encuentra específicamente en la razón de frecuencias de 2; en su lugar, la situación resonante se desplaza a la derecha, tendiendo a alcanzar una ligeramente

mayor razón de frecuencias. Esto ocurre hasta cierta amplitud de ola excitadora cercana a un metro, a partir de esta, la condición resonante se tiende a desplazar hacia la izquierda, buscando menor razón de frecuencias. A esta característica de las oscilaciones no lineales se debe principalmente a que el término restaurador del sistema tiene un comportamiento flexibilizante, lo que provoca una reducción virtual de la frecuencia natural a medida que la amplitud de la oscilación aumenta.

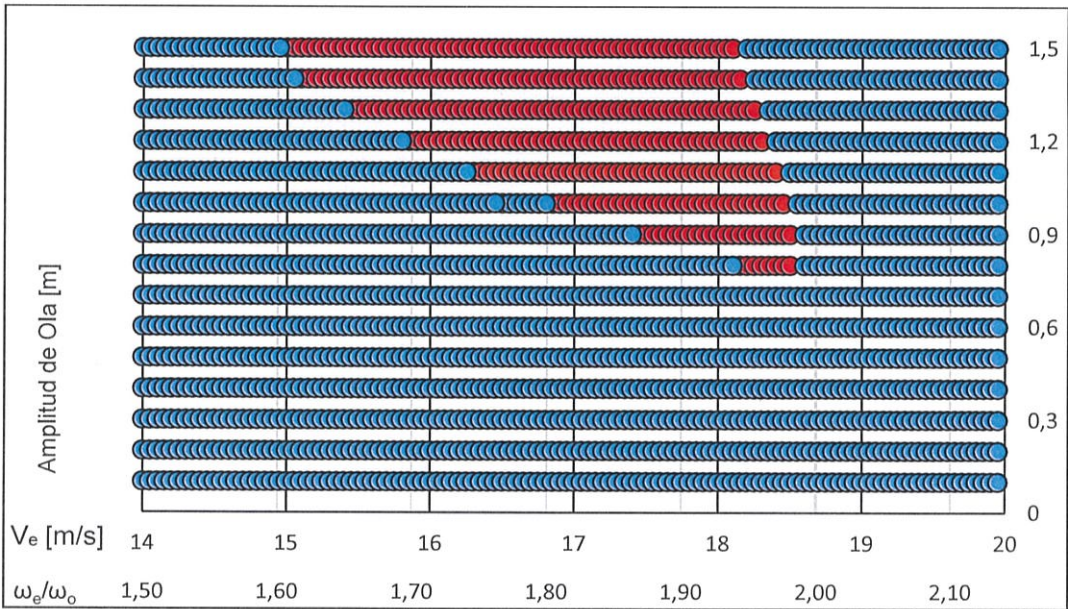
En la Figura 54 se muestra la principal zona de inestabilidad, usando un coeficiente de amortiguamiento adimensional de 2.5%. Puede notarse que la región inestable se ve reducida, debido a la presencia del amortiguamiento, fenómeno que fue observado en resultados previos.

Figura 53: Región de Inestabilidad Principal sin amortiguamiento, en la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 54: Región de Inestabilidad Principal con 2.5% de amortiguamiento, en la Condición de Carga 2



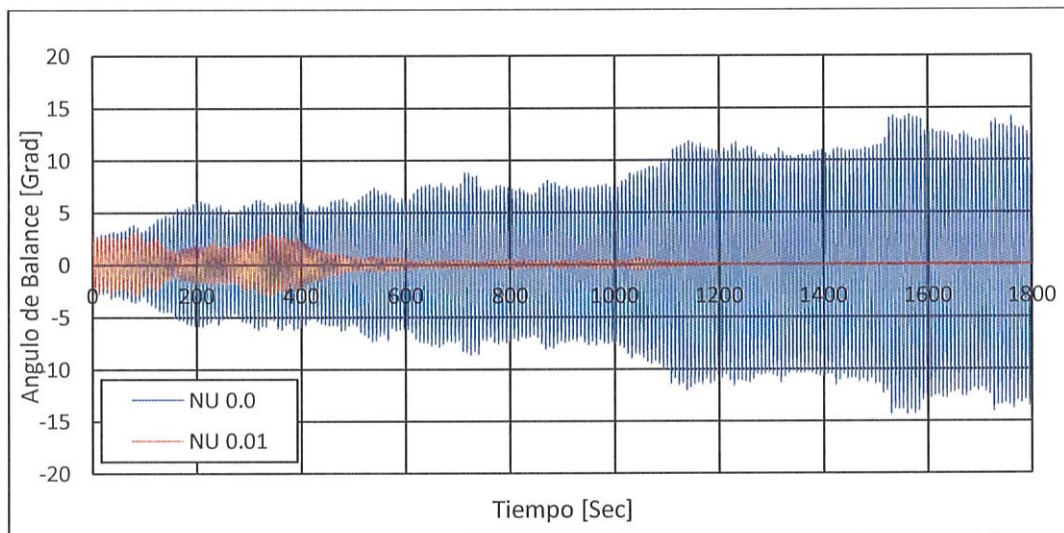
[Fuente: Elaboración Propia]

Respuesta en mar Irregular

Se han desarrollado simulaciones del Balance Paramétrico del buque pesquero con mar irregular, en un estado de mar 4 para esta segunda condición de carga, similares a la primera. En general, en forma similar al caso anterior únicamente cuando no se incluye amortiguamiento se pudo observar zozobra por resonancia paramétrica. Un coeficiente de amortiguamiento del orden 0.01 (1%) es suficiente para evitarla, como se observa en la Figura 55.

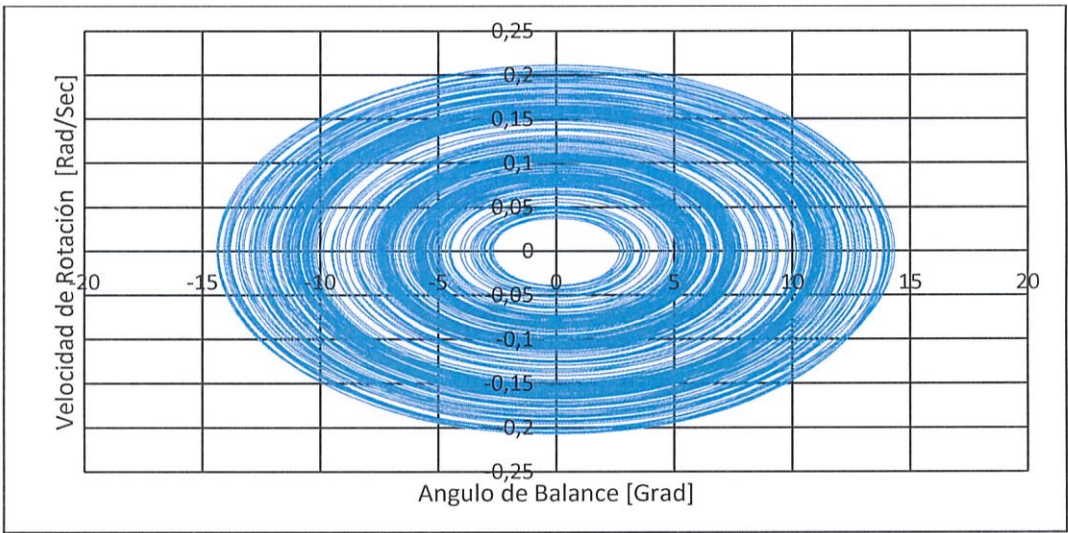
La velocidad de avance del buque empleada fue de 4 [m/Sec], y los resultados se muestra a continuación desde la Figura 55 hasta la Figura 63.

Figura 55: Ángulo de Balance en el tiempo, en la Condición de Carga 2



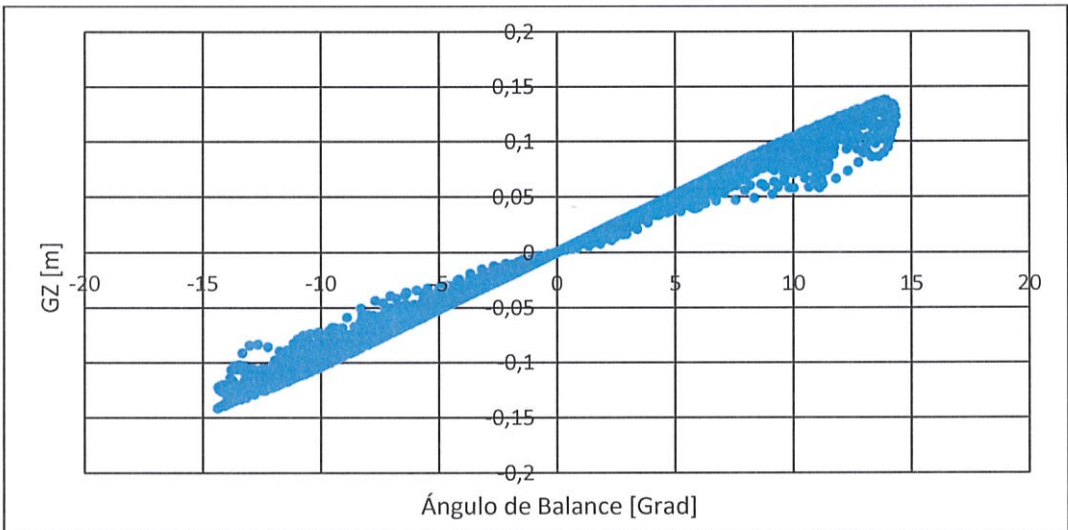
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 56: Velocidad Angular versus Balance, en la Condición de Carga 2



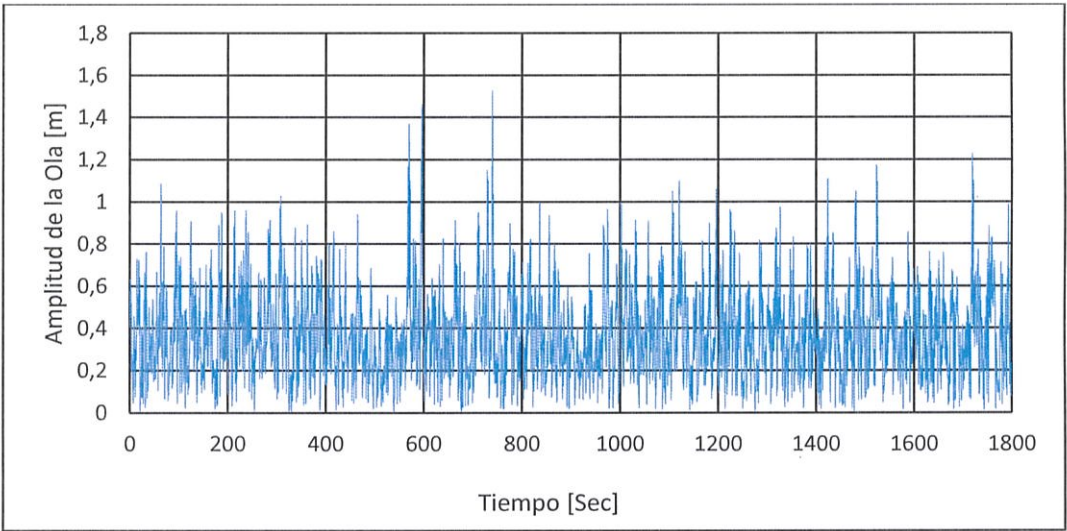
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 57: Brazo Adrizante versus Balance, en la Condición de Carga 2



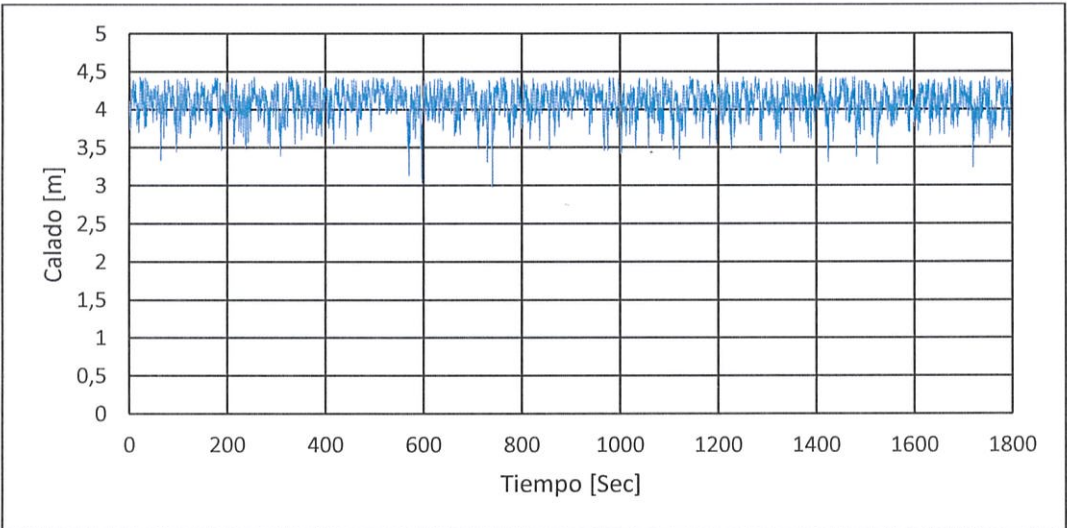
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 58: Amplitud de Ola en el tiempo, en la Condición de Carga 2

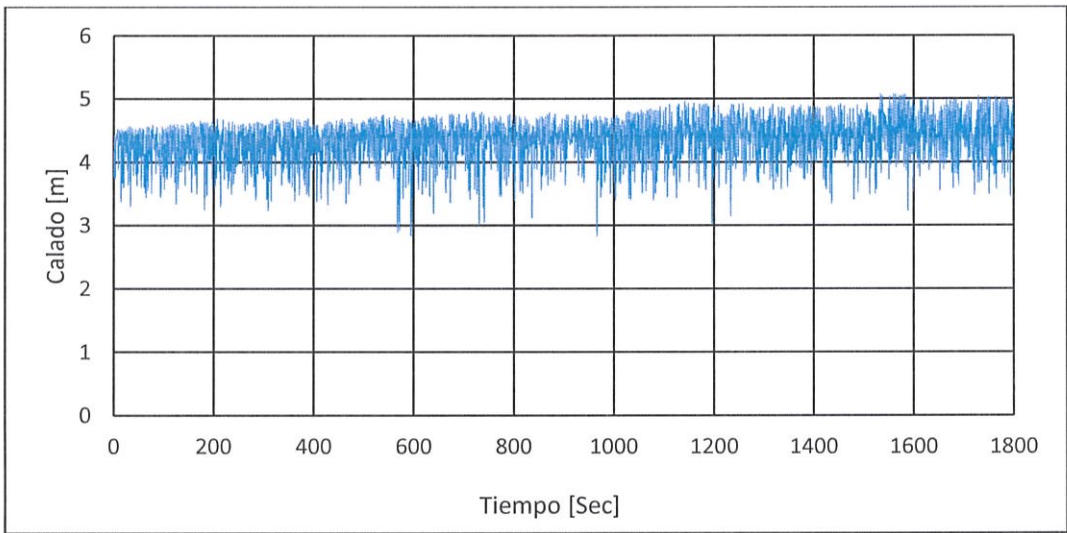


[Fuente: Elaboración Propia]

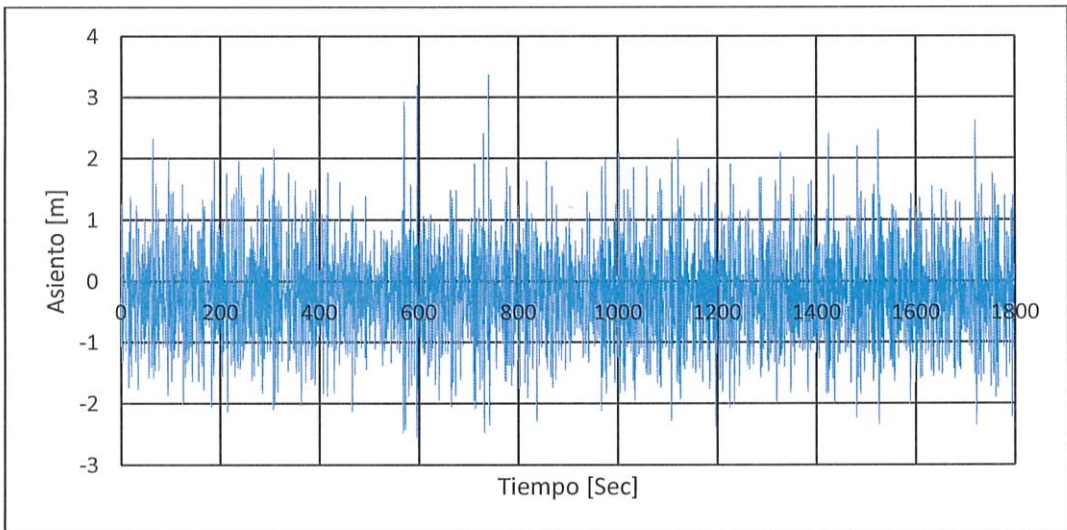
Figura 59: Calado Promedio en el tiempo, en la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

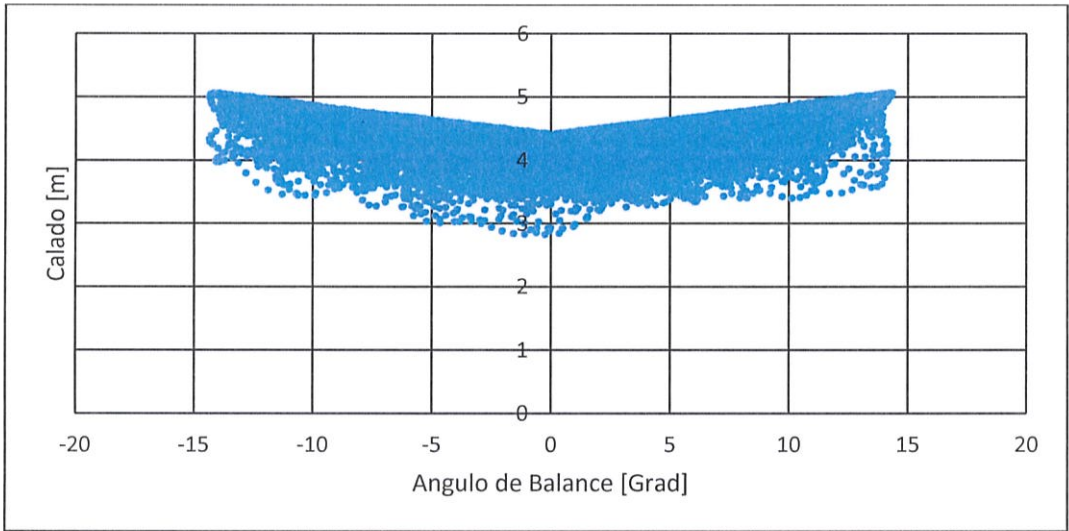
Figura 60: Ordenada de Inundación en el tiempo, en la Condición de Carga 2

[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 61: Asiento en el tiempo, en la Condición de Carga 2

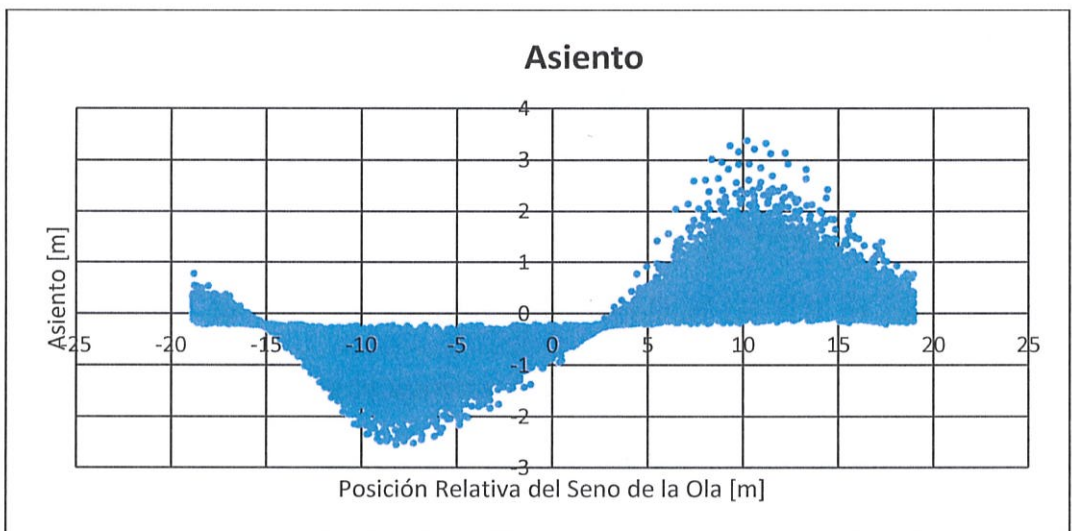
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 62: Ordenada de Inundación versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 63: Asiento versus Posición Relativa de la Ola, en la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

3.4. Posibilidad de zozobra por Balance Paramétrico

En este trabajo se analizó la Resonancia Paramétrica un buque atunero ecuatoriano que zozobró en las cercanías de las Islas Galápagos, a causa de condiciones de mar severas. Se partió de la información correspondiente al libreto de estabilidad, con autorización de la Subsecretaria de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, [13]. En varias de las condiciones mostradas en dicho informe, no se satisfacían los criterios de Estabilidad requeridos por la OMI, que se encuentran actualmente en vigencia. Las condiciones de carga 1 y 2 usadas en las simulaciones desarrolladas son situaciones específicas que cumplen los actuales criterios de estabilidad.

En el caso del fenómeno de balance paramétrico en olas regulares, puede notarse en la Figura 34, que es suficiente una ola con amplitud de 0.5 m, bajo cierta frecuencia de encuentro, para que se produzca zozobra por resonancia paramétrica, cuando no se considera amortiguamiento. Sin embargo, una vez que se agrega este término, aun usando valores bajos de amortiguamiento equivalente, del orden de 0.025 (2.5%), la zona de inestabilidad se reduce, requiriéndose de olas excitadoras con amplitud de 0.8 m para lograr la resonancia, como se puede apreciar en la Figura 35 y Figura 54. Por otro lado, en el caso de olas irregulares la influencia del coeficiente de amortiguamiento es mucho más significativa como se puede apreciar en la Figura 36 y Figura 55. Nótese que en estas respuestas en un estado 4 de mar irregular, con la

aparición del término amortiguador, aun cuando la magnitud de este sea baja, del orden de 0.01 (1%), es suficiente para que el sistema no encuentre condiciones resonantes durante el tiempo que se realizó la simulación.

La resonancia paramétrica es mucho más fácil de presentarse en olas regulares, ya que la velocidad relativa del buque y por tanto la frecuencia de encuentro es constante. En estas condiciones se puede alcanzar en forma relativamente fácil una sincronización entre la frecuencia excitadora y la natural. La resonancia paramétrica se presenta como un aumento gradual de energía que se añade al sistema, manifestándose como un incremento constante en la amplitud de respuesta, provocando eventualmente la zozobra, como se puede observar en la Figura 26 y Figura 45.

En el caso de oscilación de un mar irregular, para el tipo de buque y las condiciones de carga que se analizaron, se puede encontrar situaciones resonantes graves cuando no se incluye el término de amortiguamiento. Una vez que incluye ese término, la disipación de energía y la falta de sincronización entre la frecuencia excitadora y la frecuencia natural se pierden, e impiden al sistema el aumento gradual de energía como ocurre con olas regulares.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe el fenómeno del Balance Paramétrico de un buque y las características principales que intervienen en este fenómeno. Luego se implementó el método de Runge Kutta de cuarto orden, para aproximar la solución de la ecuación de movimiento de Balance Paramétrico, en mar regular e irregular, empleando el artificio matemático de ola equivalente de Grim mejorada. Finalmente se realizan varias simulaciones para un buque nacional tipo atunero, en dos condiciones de carga diferentes y se analiza la posibilidad de zozobra por Resonancia Paramétrica.

1. La resonancia paramétrica es un fenómeno de inestabilidad dinámica, que se desarrolla principalmente cuando la frecuencia de excitación es dos veces la frecuencia natural del buque en balance. Esto se debe a que el término restaurador de la ecuación de movimiento que representa la excitación paramétrica, sufre una variación en función del perfil de la ola. En el caso del buque, la variación del plano de flotación por efecto de la ola representa el armónico de excitación paramétrico.
2. El método de Runge Kutta de cuarto orden, sirvió para desarrollar la integración en tiempo de la ecuación de movimiento de Balance Paramétrico de un buque pesquero ecuatoriano. Empleando artificios matemáticos como el método de Grim para una representación equivalente del mar irregular, se logra estimar el valor del brazo adrizante en función de la amplitud, posición relativa del seno de la ola y el ángulo de balance. Las zonas de inestabilidad encontradas en olas regulares, en las dos condiciones de carga analizadas, son consistentes con el comportamiento de la ecuación de Mathieu.
3. El término de amortiguamiento en el Balance Paramétrico es de vital importancia en el análisis. En el caso de la respuesta en olas regulares, reduce significativamente las regiones de inestabilidad. Mientras que en el caso de mar irregular, la razón de disipación de energía provocado por

el amortiguamiento es mayor que la razón de aumento de energía provocado por la excitación paramétrica. Por esta razón se considera la magnitud del amortiguamiento como un factor clave para la seguridad del buque, en los Criterios de Estabilidad de Segunda Generación.

4. Es posible que un buque pesquero ecuatoriano sufra Resonancia Paramétrica, en olas regulares bajo una frecuencia de encuentro crítica. Cuando se llega a una situación resonante, en cada oscilación se agrega más energía al movimiento, aumentando la amplitud del balance que puede provocar la zozobra del buque.

5. Es poco probable que el buque pesquero ecuatoriano analizado en este trabajo, bajo las condiciones de operación asumidas y en olas irregulares con estado de mar 4 haya sufrido zozobra por resonancia paramétrica. Esto se debe a que las olas en un mar irregular tienen una velocidad que sigue una función de densidad probabilística, lo cual dificulta una sincronización entre la frecuencia de encuentro y la frecuencia natural para que se produzca la zozobra. Es posible que se presente zozobra en un mar irregular, únicamente cuando no existe la presencia del amortiguamiento, lo cual no es físicamente posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **DIARIO LA HORA**, Pesquero zozobra cerca de Posorja, Octubre del 2005 (<http://www.lahora.com.ec>)
- [2] **DIARIO HOY**, Cuatro muertos y derrame de diésel, por naufragio, Mayo 2010 (<http://www.hoy.com.ec>)
- [3] **DIARIO EL COMERCIO**, Dos muertos y tres desaparecidos en naufragio del atunero Tuna 1, Abril 2012 (<http://www.elcomercio.com>)
- [4] **BELENKY, V. L., BASSLER, C. C., SPYROU, K. J.**, Development of Second Generation Intact Stability Criteria. Naval Surface Warfare Center Carderock Division, Hydromechanics Department, 2011
- [5] **IMO**, Code of Intac Stability, London 2008
- [6] **BULIAN, G.**, On an improved Grim effective wave. Department of Naval Architecture, Department of Ocean and Environmental Engineering. University of Trieste. 2008
- [7] **PRESS, W., VETTERLING, W., FLANNERY, B.**, Numerical Recipes. Cambridge University Press, 1992
- [8] **ZHANG, S.**, Experimental Study of the Effect of Forward Speed and Following Waves on Roll Damping of Fishing Vessels, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 1993

- [9] **BHATTACHARYYA, R.**, Dynamics of Marine Vehicles, John Wiley & Sons, 1978
- [10] **NAVSEC.**, Manual del Usuario SHCP, 1976
- [11] **INOCAR.**, Derrotero de la Costa Continental e Insular del Ecuador, Guayaquil, Ecuador 2012
- [12] **MAGIC SEA WEED.**, magicseaweed.com
- [13] **SPTMF.**, Estadísticas de Buques pesqueros hasta el año 2014. Guayaquil Ecuador 2014

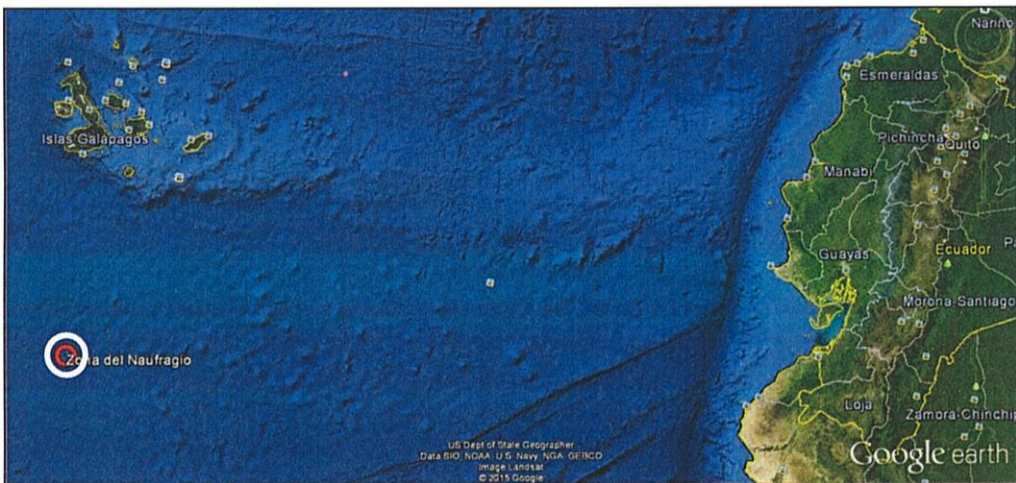
ANEXOS

ANEXO A

Características Climatológicas durante la Zozobra

En este trabajo se van a estudiar un caso de zozobra de un buque nacional de tipo atunero que ocurrió dentro de las 200 millas de mar territorial, y fue registrado en la DIRNEA (Dirección Nacional de Espacios Acuáticos). El naufragio del buque ocurrió en el año 2012 a 180 millas náuticas al sur de la Isla Isabela, en Galápagos y las causas principales del siniestro fue “la acción sobre el buque impactado por 2 grandes olas”. La ubicación geográfica de este accidente, se puede apreciar en la Figura 64.

Figura 64: Zona donde ocurrió la zozobra

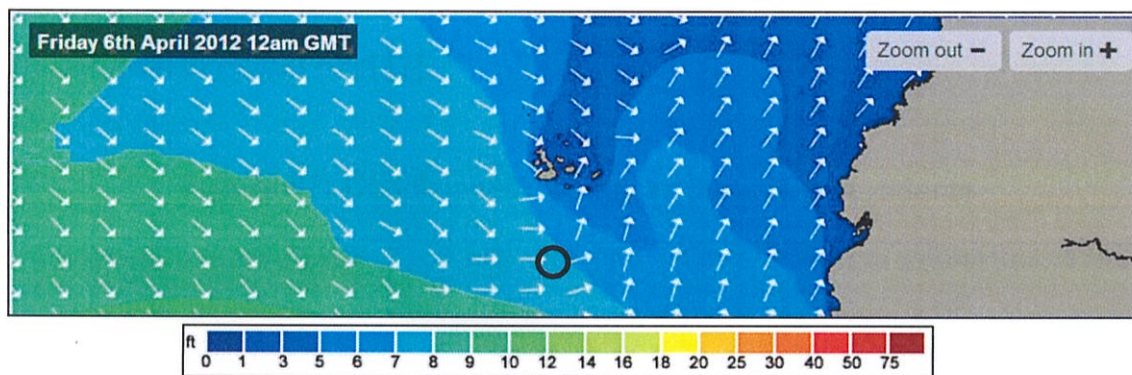


[Fuente: [12]]

Según el reporte local, a la hora y en el lugar del siniestro se registraron alturas significativa de olas entre 1.75 y 2.15 metros con dirección Oeste, como se

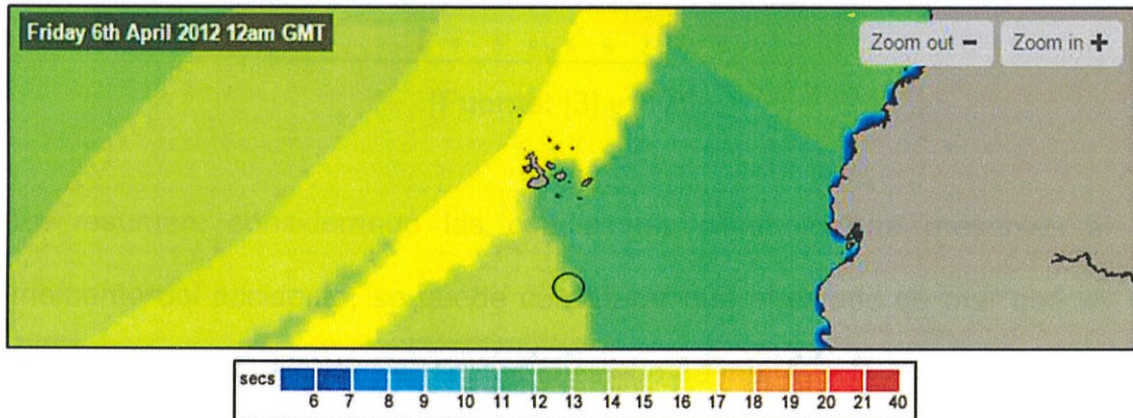
puede apreciar en la Figura 65, [12]. Puede notarse también la dirección principal de las olas durante el siniestro, que al parecer era hacia el oeste.

Figura 65: Altura de Olas durante el accidente



[Fuente: [3] y [12]]

Figura 66: Periodo promedio de las olas durante el accidente

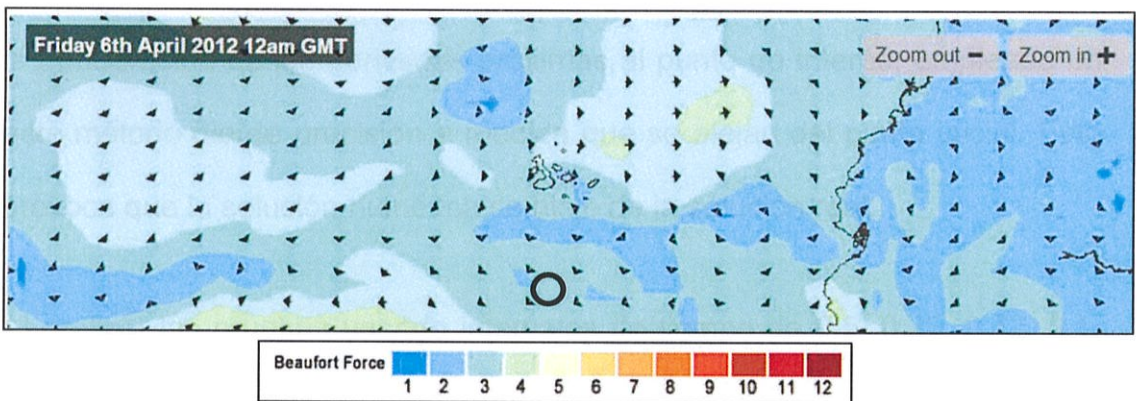


[Fuente: [3] y [12]]

Por otro lado, también se tiene registrado el periodo promedio del oleaje, que es aproximadamente de 12 segundos, como se puede apreciar en la Figura 67.

El viento también es una posible causa para que se haya producido el accidente, ya que el momento de escora producido por esta causa es bastante significativo. Durante el siniestro el viento que se registró fue de 3 en la escala de Beaufort, que representan velocidades entre 5 a 12 Nudos, como se muestra en la Figura 67, [12].

Figura 67: Condiciones Climáticas durante el accidente



[Fuente: [3] y [12]]

En resumen, considerando las condiciones climatológicas presentes al momento del accidente, se puede considerar que el estado de mar que se asemeja a las condiciones reales es el estado de mar 4.

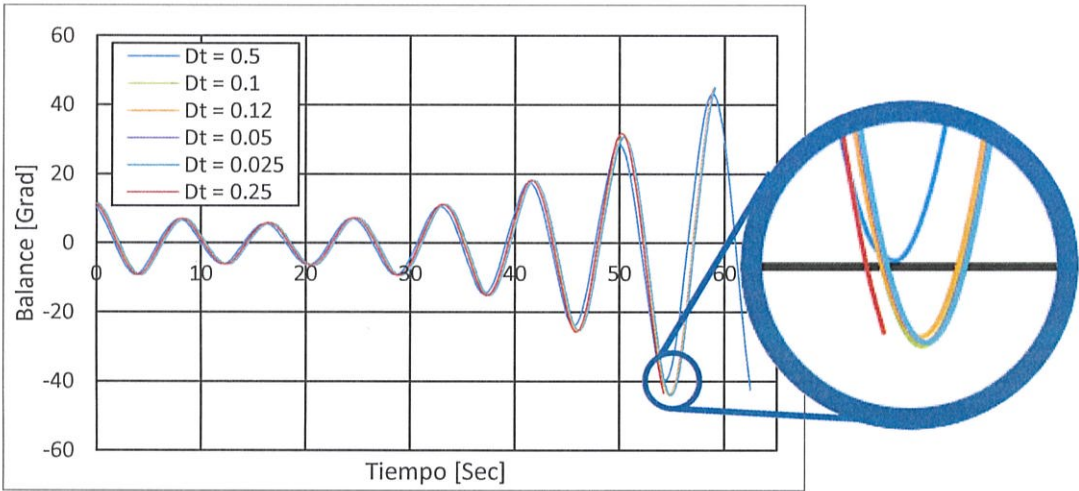
ANEXO B

Determinación del intervalo en tiempo para la simulación

Para estimar un intervalo de tiempo adecuado para las integraciones, se realizaron varias simulaciones probando diferentes valores de Δt y se analizó su nivel de convergencia. Cuando se usa un intervalo de tiempo mayor, el método de Runge Kutta de cuarto orden pierde eficacia. Esto se debe a que la ponderación de las derivadas próximas al punto de interés, empleado en este método pierde precisión a medida que se alejan del punto inicial. Esto provoca que la solución numérica se aleje de la solución real.

Al realizar las pruebas usando intervalos de tiempo de 0.5, 0.25, 0.12, 0.1, 0.05 y 0.25 segundos, se notó que la solución se alejaba para intervalos de tiempo mayores igual a $\Delta t = 0.12 \text{ sec}$. Mientras que para valores menores a 0.12, los resultados obtenidos coincidían. En la Figura 68 se grafica la respuesta en balance de la embarcación analizada, en olas regulares con amplitud de ola de 1.5 m, usando una velocidad relativa crítica de 17.2 m/sec.

Figura 68: Nivel de Convergencia en función del intervalo de tiempo



[Fuente: Elaboración Propia]

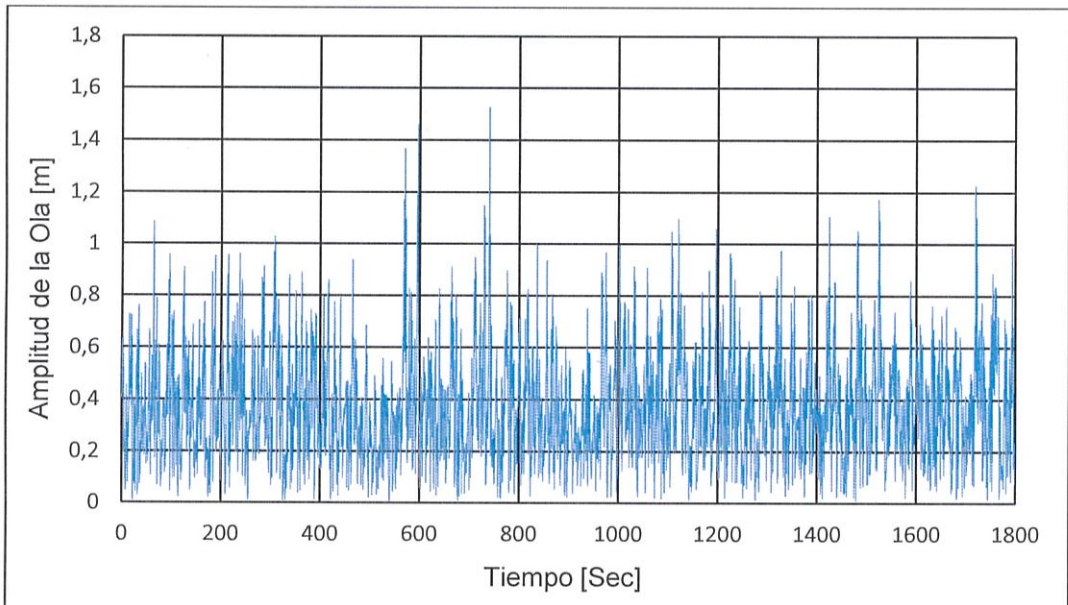
Del análisis de convergencia realizado, se obtuvo que para valores de Δt menores a 0.1 la solución prácticamente coincide, como se mencionó anteriormente. La desventaja de usar un intervalo de tiempo demasiado pequeño, es que el tiempo de ejecución del programa aumenta significativamente. Por esta razón para las simulaciones posteriores se emplea el valor de $\Delta t = 0.1$ segundos, ya que con este valor tenemos una buena aproximación, empleando la menor cantidad de tiempo computacional.

ANEXO C

Cálculo de Altura Significativa usando el método de la Ola equivalente de Grim mejorada

Uno de los resultados que se grafican en la simulación, es el cálculo de la amplitud instantánea en cada iteración. En la Figura 69 se presentan las amplitudes calculadas mediante el método de ola equivalente de Grim mejorada, para un estado de mar 4 en un tiempo de simulación de 1800 segundos.

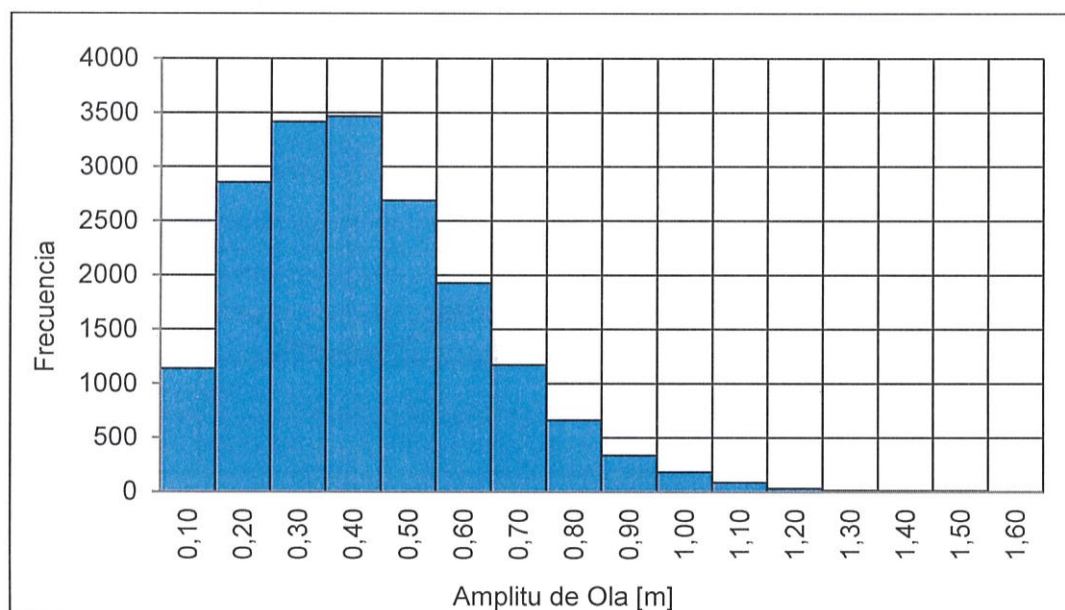
Figura 69: Amplitud de Ola equivalente de Grim en el tiempo



[Fuente: Elaboración Propia]

Puede notarse que en varios instantes de tiempo aparecen olas con amplitud mayor a 1.5 metros. Este comportamiento es típico, ya que se trata de una representación equivalente de un mar irregular. Con estos valores de amplitud se elabora un histograma de frecuencias, como se muestra en la Figura 70.

Figura 70: Histograma de frecuencias de Amplitudes de ola equivalente

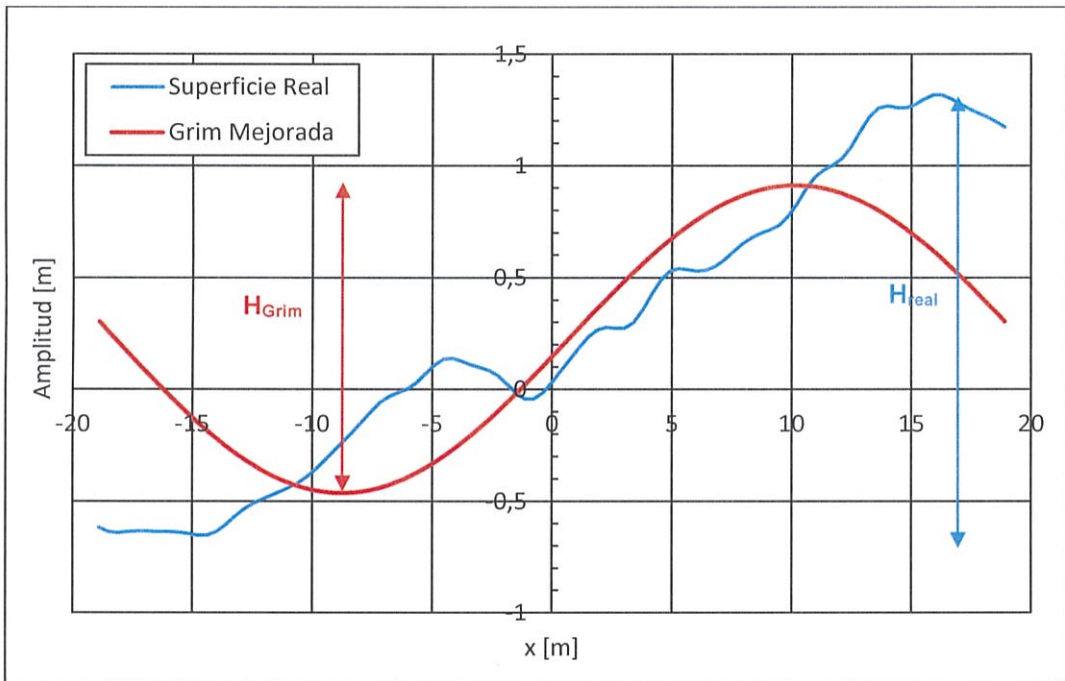


[Fuente: Elaboración Propia]

Nótese que a medida que la amplitud de la ola aumenta, el valor observado de la misma disminuye. La mayor cantidad de amplitudes que se observaron se encuentran en un rango entre 0.2 hasta 0.5 metros. Con este histograma se estimó la altura significativa obteniendo como resultado 1.32 metros. Sin embargo, para un estado de mar 4, la altura significativa es de 1.9 metros. Esta reducción se debe a que el método de ola equivalente de Grim realiza

una transformación de la superficie del mar irregular a una ola sinusoidal equivalente de menor amplitud como se observa en la Figura 71.

Figura 71: Comparación entre Superficie real y ola equivalente de Grim



[Fuente: Elaboración Propia]

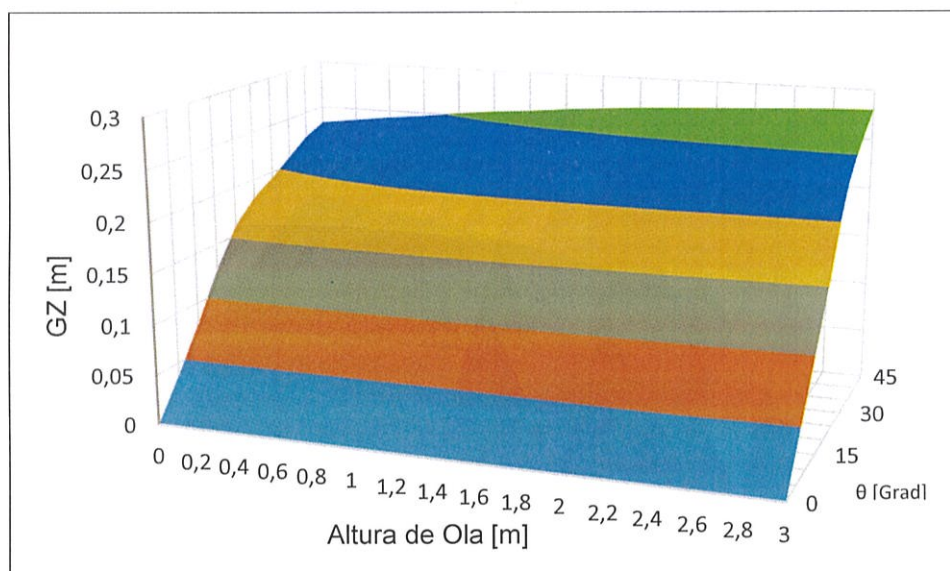
Puede notarse que la ola equivalente de Grim mejorada tiende a calcular valores más pequeños en amplitud, ya que realiza un tipo de promediación del perfil irregular de la ola, en cada instante de tiempo. Otra limitante de este método es que la ola equivalente tiene una longitud de ola igual a la eslora entre perpendiculares del buque, mientras que el mar irregular está compuesto de olas de diferente longitud de onda.

ANEXO D

Curvas GZ en Olas para las Condiciones de Carga 1 y 2

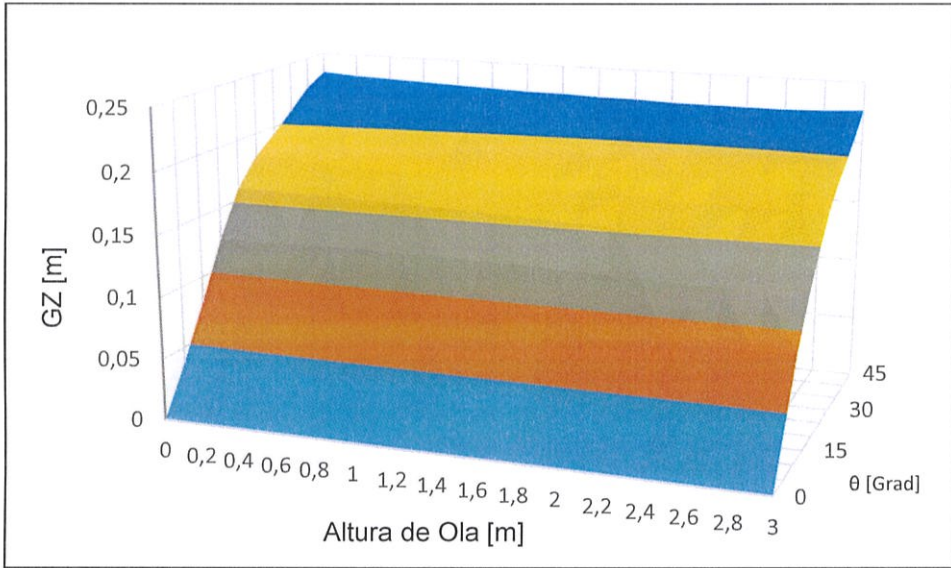
A continuación se muestran las curvas principales de estabilidad intacta en olas para la Condición de Carga 1. Para la elaboración de estas curvas, se calculan usando el programa SHCP, con el módulo de Estabilidad Intacta en Olas. En las curvas aquí mostradas mantiene la cresta de la ola en una posición fija a lo largo de la eslora del buque, variando la altura de la ola los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Figura 72: GZ en olas con la cresta en la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 1



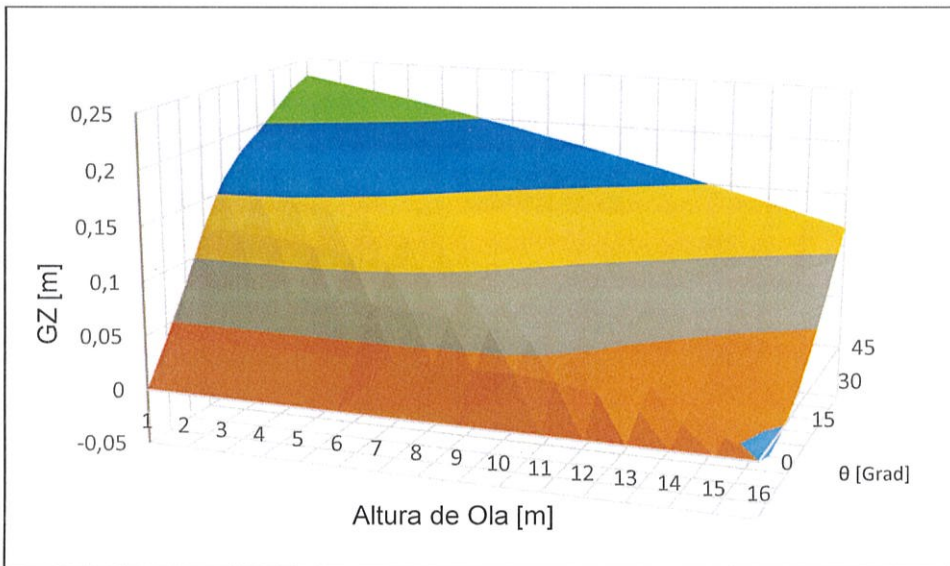
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 73: GZ en olas con la cresta a 1/4 de la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 1



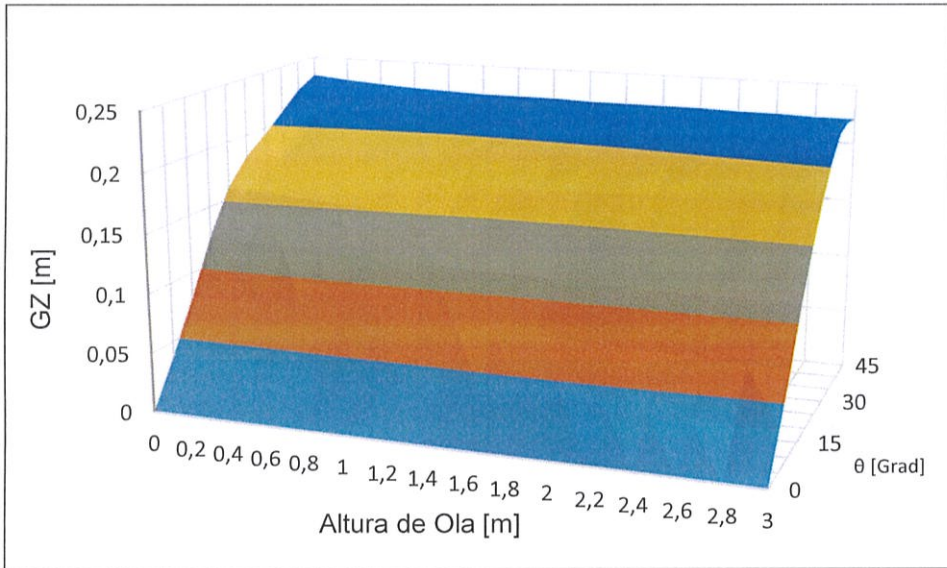
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 74: GZ con olas en Sección Media, para la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia].

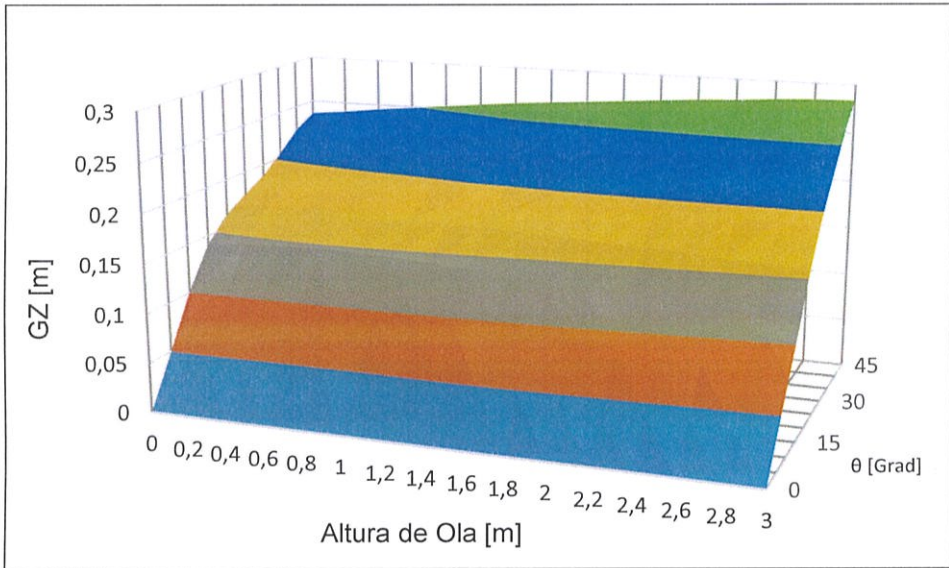
Figura 75: GZ en olas con la cresta a 3/4 de la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 1



[Fuente: Elaboración Propia]

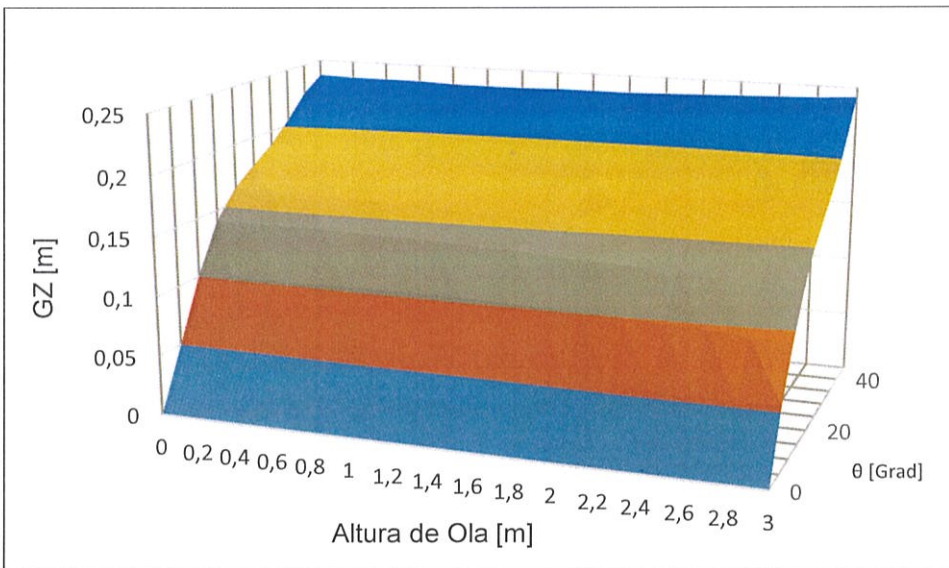
De manera similar, se realiza el mismo proceso para la condición de Carga 2, los resultados se muestran a continuación:

Figura 76: GZ en olas con la cresta en la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 2



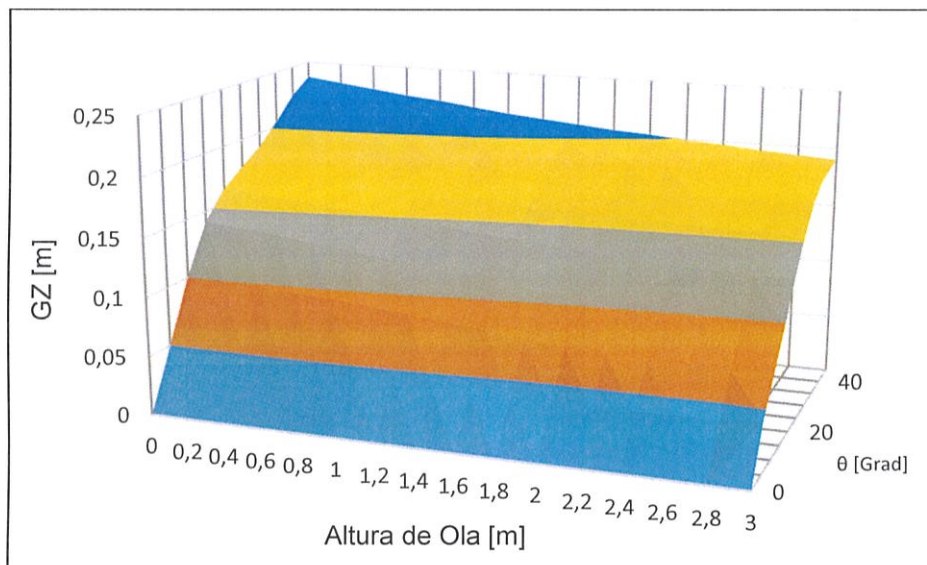
[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 77: GZ en olas con la cresta a 1/4 de la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 78: GZ en olas con la cresta a 3/4 de la Perpendicular de proa, para la Condición de Carga 2



[Fuente: Elaboración Propia]