



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE SURF-RIDING EN UN BUQUE DE LA
FLOTA PESQUERA ECUATORIANA**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por

Daniel Antonio Vásquez Alcívar

Guayaquil – Ecuador

2016

DEDICATORIA

A mis padres Xavier y Cecilia quienes han sido mi guía y mi apoyo durante mis años de estudio. A mis Hermanos Mélida y Xavier quienes diariamente me motivan a seguir adelante en este arduo caminar. A mi sobrina Graciela quien me da la fortaleza para superarme a diario.

AGRADECIMIENTO

A Dios por dame unos padres maravillosos que me apoyan y motivan a ser mejor cada día, a mis hermanos por su constante apoyo. A mi director de tesis PhD. José R. Marín por compartir sus conocimientos y experiencias durante mis años de estudio y durante la elaboración de este documento.

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)

Daniel Antonio Vásquez Alcívar

TRIBUNAL DE GRADO

José R. Marín L. PhD.
Director de Tesis

Ing. Daniela Benites, M.Sc.
Miembro Principal

RESUMEN

En este trabajo se ha analizado el fenómeno de Surf-riding para un buque pesquero de forma numérica. Se comienza con la descripción de los fenómenos que están siendo considerados por la Organización Marítima Internacional, en los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación. Luego se detallan los Criterios de Vulnerabilidad para el fenómeno de Surf-riding, que es un modo de falla dinámico evaluado en esta nueva generación. Estos criterios emplean indicadores que determinan si una embarcación puede presentar dicho fenómeno. También se describe la ecuación de Largada del buque, la cual con ciertas condiciones, es adecuada para representar matemáticamente el fenómeno de Surf-riding.

Luego se realizó un análisis de los buques de la flota pesquera ecuatoriana estableciendo relaciones entre sus formas, potencias y velocidades de operación. También se determinó por medio de los criterios de vulnerabilidad del Surf-riding de la OMI, las embarcaciones susceptibles a este tipo de fenómeno. Posteriormente determinó que un buque de la flota, de tipo atunero con 45.1 metros de eslora total, que zozobró en el 2012 cerca de las Islas Galápagos, es muy capaz de sufrir Surf-riding en olas de popa y será analizado en la siguiente etapa.

Para la simulación numérica del fenómeno de Surf-riding se emplea el método de Runge Kutta de cuarto orden (RK4), usando el modelo matemático desacoplado del movimiento de largada del buque. Este método aproxima el valor de la velocidad del buque evaluando la aceleración que provocan el desequilibrio de la Resistencia, el Empuje y la Fuerza Hidrodinámica que ejerce la ola. La Fuerza Hidrodinámica de la ola fue calculada una vez que la embarcación alcanza el equilibrio hidrostático en el plano vertical, mediante la integración de presiones en cada segmento de área sobre la superficie del casco, y considerando la componente de Froude-Krylov.

Finalmente, se desarrollaron simulaciones para el fenómeno de Surf-riding en mar regular de un buque atunero de la flota ecuatoriana. Considerando dos condiciones de carga y navegando con olas de popa, se determinó que si la velocidad inicial del buque está sobre los 8.5 nudos, con razón λ_w/L_{bp} entre el 0.75 y 1.50, y, con A_w/L_{bp} mayores a 0.0125, la embarcación puede ser acelerada hasta alcanzar la velocidad de la ola, en un tiempo de simulación de 100 segundos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
BENEFICIOS	5
HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO 1	6
1.1 Descripción de los modos de falla dinámicos.	6
1.2 Descripción de los criterios de vulnerabilidad del Surf-riding.....	9
1.3 Descripción de la ecuación del fenómeno de Surf-riding.	14
1.4 Descripción de zozobra por Guiñada súbita.	18
CAPÍTULO 2.....	22
2.1 Análisis de los barcos de la flota pesquera ecuatoriana.	22
2.2 Análisis de los buques pesqueros ecuatorianos aplicando el primer nivel de vulnerabilidad.	27

2.3	Características principales del buque pesquero seleccionado.	31
CAPÍTULO 3.....		41
3.1	Implementación del método de Integración numérica	41
3.2	Estimación de la Fuerza Axial por efecto de la ola	48
3.3	Simulación numérica del fenómeno de Surf-riding para el buque pesquero analizado	53
CAPÍTULO 4.....		62
4.1	Resumen de los resultados para la condición “Salida de Puerto”....	62
4.2	Resumen de los resultados para la condición “Llegada a Puerto” ...	68
CONCLUSIONES		73
RECOMENDACIONES.....		76
BIBLIOGRAFÍA.....		78
ANEXOS.....		81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evaluación de Estabilidad Intacta según la Segunda Generación.	11
Figura 2: Diagrama de la zona de peligro del fenómeno de Surf-riding.	13
Figura 3: Fenómeno de Surf-riding en cualquier punto del frente de la ola.	17
Figura 4: Fenómeno de Guiñada Súbita una vez alcanzado el Surf-riding. .	20
Figura 5: Distribución de buques pesqueros ecuatorianos según la eslora.	24
Figura 6: Relaciones eslora/manga (L/B) y manga/puntal (B/D) con relación a la eslora de los buques de la flota pesquera ecuatoriana.	25
Figura 7: Gráfico de la potencia instalada en los buques de la flota pesquera ecuatoriana con relación a su posible velocidad de operación.	27
Figura 8: Número de Froude con relación a la eslora de la embarcación....	29
Figura 9: Número de Froude y relación longitud de ola/eslora del buque con relación a la eslora.....	30
Figura 10: Plano de líneas de forma del buque pesquero analizado.	33
Figura 11: Distribución General del buque pesquero analizado.....	34
Figura 12: Datos de entrada para cálculo de resistencia al avance.....	37
Figura 13. Resistencia al avance de la embarcación analizada.....	38
Figura 14: Empuje requerido y velocidad de avance de la embarcación analizada en cada condición de carga.....	40
Figura 15: Equilibrio dinámico del buque en olas de popa.....	42
Figura 16: Diagrama de flujo del proceso de simulación RK4.	44

Figura 17: Equilibrio de la embarcación en cada instante de tiempo.	46
Figura 18: Modelo geométrico de la embarcación analizada.	49
Figura 19: Áreas y vectores normales en la superficie del casco.	50
Figura 20: Componente axial neta de la fuerza de la ola sobre la embarcación.	52
Figura 21: Ejemplo de datos de entrada.	55
Figura 22: Variación de la velocidad de la embarcación respecto al tiempo.	57
Figura 23: Velocidad del buque, posición relativa y componente axial de la fuerza hidrodinámica de la ola.	58
Figura 24: Perfil de la ola y del buque sin surfeo.	60
Figura 25: Perfil de la ola y del buque con surfeo.	61
Figura 26: Resultados de la condición de carga 1.	64
Figura 27: Velocidad final del buque para la condición de carga 1.	65
Figura 28: Componente axial de la Fuerza Hidrodinámica de la ola final para la condición de carga 1.	66
Figura 29: Fuerza hidrodinámica de la ola para $A_w/L_{bp}=0.015$, para la condición de carga 1.	67
Figura 30: Resultados de la condición de carga 2.	69
Figura 31: Velocidad final del buque para la condición de carga 2.	70
Figura 32: Componente axial de la Fuerza Hidrodinámica de la ola final para la condición de carga 2.	71

Figura 33: Fuerza hidrodinámica de la ola para $A_w/L_{bp}=0.015$, para la condición de carga 2.....	72
Figura 34: Nivel de convergencia en función del intervalo de tiempo.	83
Figura 35: Componente axial del vector normal desde la franja 1 hasta la 7, a lo largo de la eslora.....	85
Figura 36: Componente axial del vector normal desde la franja 8 hasta la 13, a lo largo de la eslora.....	86
Figura 37: Componente vertical del vector normal desde la franja 1 hasta la 7, a lo largo de la eslora.....	88
Figura 38: Componente vertical del vector normal desde la franja 8 hasta la 13, a lo largo de la eslora.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Características principales de la embarcación.	32
Tabla II: Condición de Carga 1, Salida de Puerto.....	35
Tabla III: Condición de Carga 2, Llegada a Puerto.....	36
Tabla IV: Características del sistema propulsor.....	39

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	82
ANEXO B.....	84

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que afecta a los buques de una flota pesquera es la Inestabilidad Dinámica, [1] y [2], que puede conducir a zozobras ocasionando pérdidas materiales y humanas. Una situación peligrosa se presenta con olas de popa que pueden forzar a la embarcación a moverse con su misma velocidad (“Surf-riding”), [3], lo que produce una posible pérdida de gobierno produciendo Guiñada Súbita (“Broaching”) que conlleva peligrosamente a una zozobra. La OMI ofrece regulaciones y medidas a tomar para evitar siniestros por guiñada súbita, [4] y [5], sin embargo, en nuestro medio este fenómeno y sus consecuencias son poco conocidas. El intentar resolver este problema lleva a un análisis no lineal, por esto, una forma más simple de analizar este fenómeno sería mediante el uso de alguna técnica de Simulación numérica para poder predecir el comportamiento de la embarcación en mar regular.

En la actualidad los criterios de estabilidad están basados en análisis cuasiestáticos. Sin embargo, embarcaciones que se espera que cumplan estos criterios zozobran como podría ser el caso de la embarcación pesquera que naufragó por dos olas cerca de Galápagos, [6], así también como, [7], [8] que zozobraron en aguas Ecuatorianas. El Protocolo de Torremolinos para la Seguridad de los Buques Pesqueros de 1993, contiene criterios importantes a considerar para determinar estabilidad en estado intacto por medio de la evaluación de la curva de brazos adrizantes. La carencia del análisis dinámico

hace que los actuales criterios de estabilidad sean considerados incompletos, y por esto, la OMI está desarrollando criterios de Segunda Generación. Estos criterios ofrecen niveles de chequeo para cada uno de los fenómenos dinámicos como es el caso de zozobra por Guiñada Súbita [9].

Una embarcación cuando navega en mares de popa puede ser “capturada” o forzada a moverse simultáneamente con la ola (Surf-riding). En esta situación la mayoría de los buques son direccionalmente inestables, lo que lleva al buque a un repentino cambio de dirección. Este fenómeno se considera peligroso ya que la acción inercial debido al cambio de dirección y la pendiente de la ola actúan en la misma dirección generando una posible zozobra de la embarcación, [10].

La solución analítica del problema de Surf-riding conlleva un análisis matemático muy complejo, y por la falta de un tanque de pruebas en la ESPOL no se puede realizar experimentación. Por lo tanto, la solución se puede investigar por simulación numérica por método de Runge Kutta de cuarto orden, [11]. Este método realiza la interacción en tiempo para aproximar la solución mediante condiciones establecidas previamente. De esta manera la solución numérica puede llevar a la determinación Surf-riding.

Takaishi en [12] concluye que las olas de popa afectan en mayor porcentaje a las embarcaciones pesqueras que a otro tipo de embarcación. Esto debido a un análisis de 3212 casos de accidentes en el periodo de 1973 a 1977 en

Japón, del cual obtuvo que 448 casos fueron por zozobra e inundación y del cual la tercera parte fueron de buques pesqueros. De la misma manera, otros autores ya antes mencionados, [1] y [2], ofrecen experimentaciones con modelos para identificar las posibles causas de zozobra e influencia de las condiciones de mar en los siniestros específicamente en las embarcaciones pesqueras. De manera que la opción de analizar numéricamente la posibilidad de zozobra en buques pesqueros ecuatorianos se hace una necesidad para evitar futuros siniestros.

OBJETIVO GENERAL

En el presente proyecto, se pretende determinar la posibilidad del fenómeno de Surf-riding en un buque pesquero ecuatoriano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir la influencia del mar de popa para que se desarrolle el fenómeno de Surf-riding en olas de mar regular.
2. Seleccionar el buque de la flota pesquera Ecuatoriana para análisis de posible caso de Surf-riding y zozobra por Guiñada Súbita.
3. Aplicar método de simulación para un buque pesquero vulnerable a posible zozobra por Guiñada súbita.
4. Determinar la posibilidad de Surf-riding de un buque pesquero de la flota Ecuatoriana.

BENEFICIOS

Los buques pesqueros particularmente por dimensiones y velocidades de operación pueden ser vulnerables al fenómeno de Surf-riding y consecuentemente a una posible zozobra por Guiñada Súbita. La contribución de algún método de predicción para este fenómeno será herramienta útil para tratar de evitar siniestros. A su vez, el medio naval podrá entender mejor la dinámica del Surf-riding a través de la difusión de los resultados obtenidos de las simulaciones. De esta manera las autoridades marítimas podrían recomendar rangos de operación a fin de evitar la inestabilidad direccional que pueda dar paso a zozobra. Por último, se podría llegar a establecer requisitos fundamentales para el proyecto de todo buque pesquero en el Ecuador.

HIPÓTESIS

La zozobra de los buques de la flota pesquera ecuatoriana puede ser causada por el fenómeno de Surf-riding.

CAPÍTULO 1

FENÓMENO DE SURF-RIDING Y CRITERIOS DE ESTABILIDAD INTACTA DE SEGUNDA GENERACIÓN

1.1 Descripción de los modos de falla dinámicos.

Un buque al estar sometido a condiciones de mar severas puede desarrollar fenómenos dinámicos que son posible causa de zozobra, llamados modos de falla o mecanismos de zozobra. La Organización Marítima Internacional, OMI, establece que los modos de falla son: Pérdida pura de estabilidad, que por la disminución considerable de la altura metacéntrica GM bajo ciertas condiciones puede llevar a la zozobra de la embarcación; Balance Paramétrico, donde la inestabilidad dinámica puede ser

causa de zozobra a una cierta frecuencia de encuentro; Surf-riding y Guiñada Súbita, cuando el buque es capturado y acelerado en fase con la ola y debido a la inestabilidad direccional puede llegar a la zozobra; y, Dead-Ship Condition, que por pérdida de poder y debido a la acción de olas por el costado llevan a una posible zozobra de la embarcación. La OMI consideró la importancia de estos fenómenos y propone adoptar criterios de Segunda Generación para evitar situaciones peligrosas y a su vez una posible zozobra.

Un buque al navegar en olas, puede ser considerado como un cuerpo rígido y por tanto se mueve con tres movimientos de traslación y tres de rotación. Si el ángulo de rotación en dirección longitudinal, Balance, es muy alto, puede llegar un punto en el que no hay capacidad de restauración, es decir, no puede regresar a la posición recta y llegará a la zozobra. Los mecanismos que llevan a la zozobra son denominados por la OMI, [9], como Modos de Falla y son motivo de investigación en la actualidad.

Entre los modos de falla de un buque, la Pérdida Pura de Estabilidad y el Balance Paramétrico son consideradas como fenómenos peligrosos asociados con la variación de la curva de brazos de adrizamientos GZ, [13]. La Pérdida pura de estabilidad es un fenómeno que ocurre en mar de popa cuando la longitud de la ola es similar a la del buque y navega a velocidades altas. Este fenómeno se vuelve considerablemente peligroso cuando el buque se encuentra con la cresta de la ola cerca de sección Media provocando una

reducción en su plano de flotación. Todo esto produce un efecto significativo en la estabilidad del buque, debido a que la curva de brazos adrizantes GZ se reduce respecto al de aguas tranquilas, disminuyendo la altura metacéntrica GM. Si esta pérdida de estabilidad está presente por largo tiempo, el buque puede alcanzar grandes ángulos de balance y zozobrar.

El Balance Paramétrico de un buque es un fenómeno que se caracteriza por grandes amplitudes del movimiento de balance causado por la inestabilidad dinámica a ciertas frecuencias de encuentro, [9]. A diferencia de la Pérdida Pura de Estabilidad, este fenómeno se produce principalmente cuando el buque navega en olas de proa con variación periódica de estabilidad como consecuencia de la posición de la ola respecto del buque. Estos cambios de estabilidad con una frecuencia de encuentro crítica alrededor del doble de la frecuencia natural de balance, hacen que las amplitudes del movimiento de balance sean altas y el buque pueda alcanzar grandes ángulos de escora con posible zozobra.

Otra forma de falla se presenta cuando el buque navegando en olas de popa es capturado y acelerado a su misma velocidad, en un fenómeno llamado Surf-riding. Este modo de falla dinámico ocurre comúnmente cuando la longitud de la ola es similar y hasta el doble de la eslora de la embarcación navegando a altas velocidades, [9]. En la condición de Surf-riding muchas embarcaciones son direccionalmente inestables provocando un repentino cambio de dirección

y una posible zozobra por Guiñada Súbita (“Broaching”). El fenómeno de Surf-riding es un requisito necesario aunque no suficiente para la presencia de la Guiñada Súbita, [9], y por esta razón se usa como guía para generar criterios y evitar situaciones peligrosas.

La condición Dead-Ship es un modo de falla dinámico donde la pérdida de estabilidad se debe a la ausencia repentina de poder de la maquinaria y la embarcación se somete a olas de costado. Este fenómeno involucra la acción de la fuerza del viento y la reacción hidrodinámica de la ola, teniendo como resultado un movimiento de balance pronunciado de la embarcación. Si el ángulo de balance es muy grande o algún espacio es inundado, la estabilidad del buque se ve amenazada y la embarcación puede llegar a zozobrar.

Los cuatro fenómenos descritos en los párrafos anteriores son los modos de falla dinámicos considerados por la OMI en los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación que conllevan a una posible zozobra del buque. Sin embargo, la OMI ofrece guías para que los capitanes puedan evadir situaciones peligrosas en estados de mar adversos, [5], y así poder evitar la zozobra por los diversos modos de falla descritos.

1.2 Descripción de los criterios de vulnerabilidad del Surf-riding.

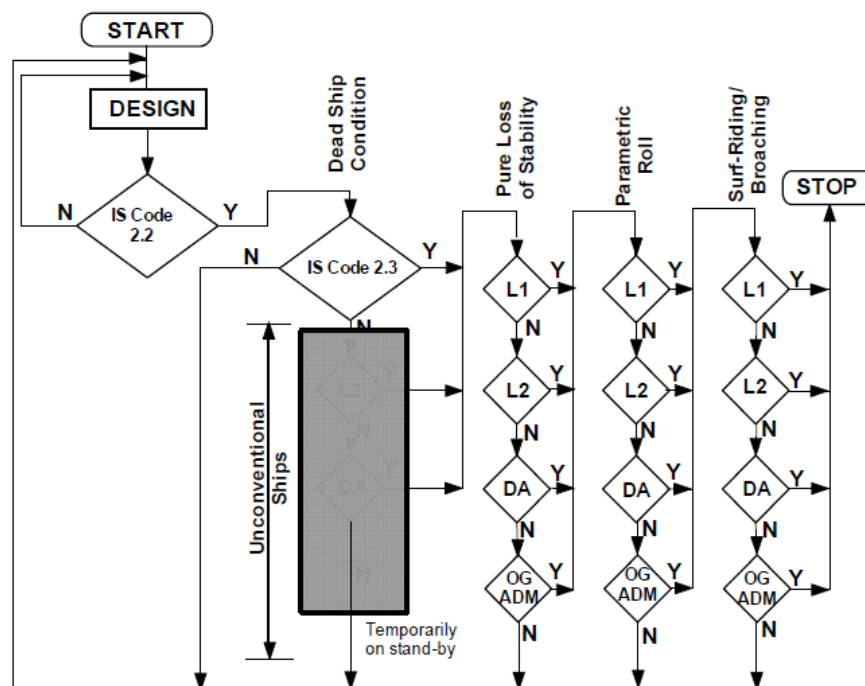
Un Criterio de Vulnerabilidad de un modo de falla es un indicador que determina si alguna embarcación puede ser susceptible a sufrir este

fenómeno. Los criterios para cada fenómeno constan de tres niveles, dos de Chequeo de Vulnerabilidad y uno de Evaluación Directa. Para el fenómeno de Surf-riding, el primer nivel consiste en evaluar la geometría y condiciones de operación para evitar velocidades mayores que un cierto valor crítico. El segundo nivel se encarga de confirmar la vulnerabilidad a este modo de falla y se lo mide por el porcentaje de olas capaces de hacer “surfear” a la embarcación. Finalmente la evaluación directa, aún en desarrollo, consiste en simulaciones numéricas para realizar el análisis de estabilidad y determinar la probabilidad de que se presente el Surf-riding, evaluando el nivel de seguridad de la embarcación. Estos niveles de análisis se incluyen en los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación de la OMI, considerando que si la embarcación satisface la evaluación directa de vulnerabilidad del fenómeno de Surf-riding puede ser considerada como segura a este modo de falla.

La Figura 1 tomada de [10], muestra un esquema de cómo la OMI realiza la evaluación de los distintos niveles para los diferentes modos de falla dinámicos en los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación. La embarcación una vez que satisface los criterios de Estabilidad Estática Intacta (IS), deberá ser sometida a la evaluación para cada modo de falla dinámico usando el criterio del nivel 1 (L1). Si se encuentra que el buque es vulnerable, el criterio del nivel 2 (L2) deberá ser evaluado, y, si se confirma la vulnerabilidad a este nivel, una evaluación directa (DA) tiene que ser desarrollada. Por último, si la evaluación directa de estabilidad muestra que la

embarcación tiene altas probabilidades de presentar algún modo de falla, se deberá desarrollar guías operacionales (OG) sujetas a los requerimientos de la administración (ADM) donde opere la embarcación.

Figura 1: Evaluación de Estabilidad Intacta según la Segunda Generación.



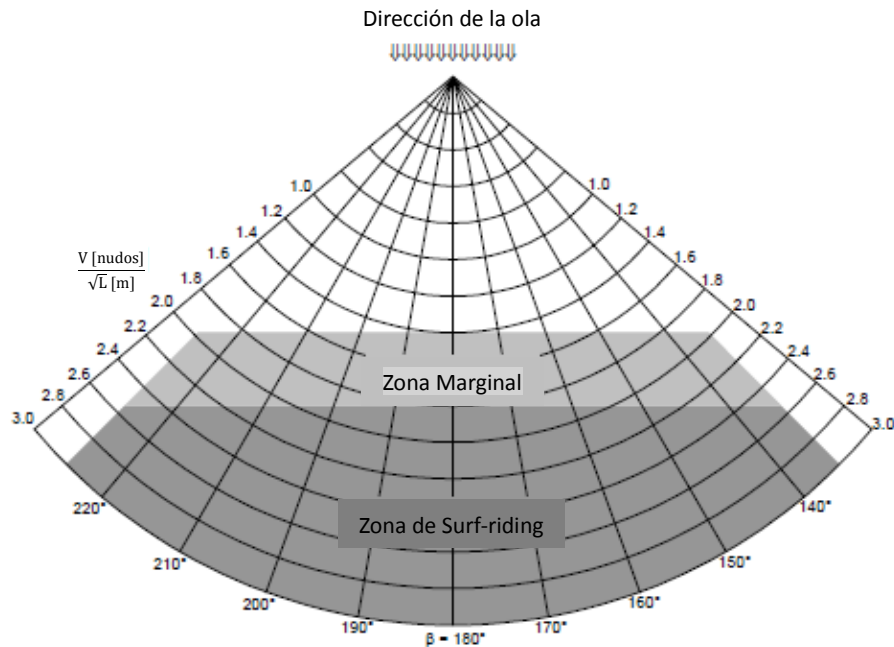
Fuente: [10]

Para el fenómeno de Surf-riding el primer nivel de vulnerabilidad (L1), consiste en la aplicación de una formulación sencilla basada en la geometría, condición de carga y parámetros de operación básicos de la embarcación, [9]. El Surf-riding es un fenómeno que ocurre en olas de popa, sin embargo, el ángulo de encuentro de análisis cubre un rango de hasta 45° a cada banda de la embarcación. Para evitar situaciones peligrosas, la OMI recomienda en el

criterio del primer nivel de vulnerabilidad, que la embarcación debe evitar velocidades críticas mayores a $1.8\sqrt{L}$ nudos, con L en metros. Esto es, evitar que las embarcaciones operen con $F_n \geq 0.3$, cuando reciben olas de popa para no entrar en la zona de peligro por este fenómeno. En la Figura 2, se presenta un diagrama donde indica la zona de peligro en relación al ángulo de incidencia y velocidad crítica de la embarcación. Se muestra también la zona marginal donde se pueden producir fuertes amplitudes del movimiento de largada (“Surging”) equivalentes al movimiento de Surf-riding provocando una peligrosa reducción de estabilidad.

Los buques de la flota pesquera ecuatoriana por sus esloras y velocidades de operación pueden alcanzar velocidades críticas, es decir, operar con número de Froude por encima de 0.3 como es el caso del buque sardinero que zozobró en el 2005, [7]. En este caso, con una eslora de 25.17 metros, la velocidad crítica es de 9 nudos aproximadamente. Considerando una velocidad de operación de 10 nudos esta embarcación satisface este criterio, es decir, existe una probabilidad muy alta de zozobra por Guiñada Súbita si recibe olas de popa (“Broaching”).

Figura 2: Diagrama de la zona de peligro del fenómeno de Surf-riding.



Fuente: [5]

El segundo criterio de vulnerabilidad (L2) considerando el modo de falla por Surf-Riding confirma si la embarcación es capaz de “surfear” en la ola y justifica la aplicación de la evaluación directa de estabilidad, [9]. Este criterio consiste en cálculos físicos simplificados con un nivel de complejidad mayor que el primer nivel (L1) e incluye el uso de herramientas computacionales para el cálculo de parámetros necesarios de propulsión, maniobrabilidad y comportamiento en olas. La vulnerabilidad de este nivel puede ser medido por el porcentaje de olas capaces de hacer que la embarcación alcance el equilibrio haciéndolo surfear.

La evaluación directa de estabilidad (DA) evalúa el nivel de seguridad y prepara información para el análisis de diseño y desarrollo de guías operacionales como se explica en, [4] y [5], específicos para la embarcación (OG). En este nivel, simulaciones numéricas son necesarias para realizar el análisis de estabilidad del fenómeno de Surf-riding bajo condiciones reales de mar. La simulación numérica se la realiza por la integración en tiempo de la ecuación de movimiento que involucra los términos de Resistencia al avance y Empuje de la embarcación, así como también de la fuerza de la ola sobre la superficie del casco. De esta forma se puede determinar si la embarcación es capturada por la ola y obligada a surfear.

Para el fenómeno de Guiñada Súbita, que normalmente sigue al de Surf-riding, las herramientas de análisis son limitadas, debido a que simular fenómenos de maniobrabilidad de un buque representa un nivel de exigencia mucho mayor. Este nivel aún se encuentra en fase de desarrollo, [9], y está previsto que la evaluación directa se realice mediante eventos probabilísticos para el análisis de la embarcación en mar irregular.

1.3 Descripción de la ecuación del fenómeno de Surf-riding.

Para modelar la dinámica del fenómeno de Surf-riding en el buque se usa la ecuación de Largada (“Surging”), obtenida mediante la aplicación de la segunda Ley de Newton del movimiento longitudinal en olas. El resultado es

una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden que representa el equilibrio dinámico longitudinal del buque en olas. En esta ecuación participan el Empuje del propulsor y la Resistencia total de la embarcación, ambas dependientes de la velocidad del buque; además se incluye la fuerza de la ola sobre la superficie del casco que depende de la posición instantánea relativa de la embarcación. La mayoría de los estudios del fenómeno de Surf-riding son realizados asumiendo que el buque navega en olas regulares de popa, donde el término de la fuerza de la ola deberá acelerar a la embarcación para alcanzar la velocidad de la ola, [10]. El equilibrio de la embarcación con la ola es prerequisite para el Surf-riding que desemboca en Guiñada Súbita, por lo que según la OMI una duración mayor del equilibrio podría ser considerado como indicador de vulnerabilidad de este fenómeno. El resolver analíticamente este fenómeno lleva a un análisis muy complejo, por lo que una opción es estudiarlo mediante el uso de simulaciones numéricas.

El movimiento de Largada (“Surging”) del buque, traslación en dirección x , puede analizarse con un modelo matemático desacoplado para una embarcación que navega en olas de popa, que representa el equilibrio dinámico, [10]:

$$T(\dot{\xi}_G, c_w) - R_T(\dot{\xi}_G, c_w) + F_{wave}(\xi_G, t) = (M + M_A) \cdot \ddot{\xi}_G, \quad (1)$$

donde M y M_A son la masa seca y añadida del buque, ξ_G representa la distancia entre la cresta de la ola y el centro de gravedad del buque, y, c_w la celeridad

de la ola. Las fuerzas T y R_T son el Empuje y la Resistencia al avance en aguas tranquilas respectivamente que dependen de la celeridad de la ola y de la velocidad relativa del buque; además, F_{wave} es la fuerza de instantánea que ejerce la ola sobre el casco. Esta ecuación establece que el fenómeno de Surf-riding ocurre cuando la embarcación es capturada forzándola a moverse a la misma velocidad que la ola, condición que se representa como:

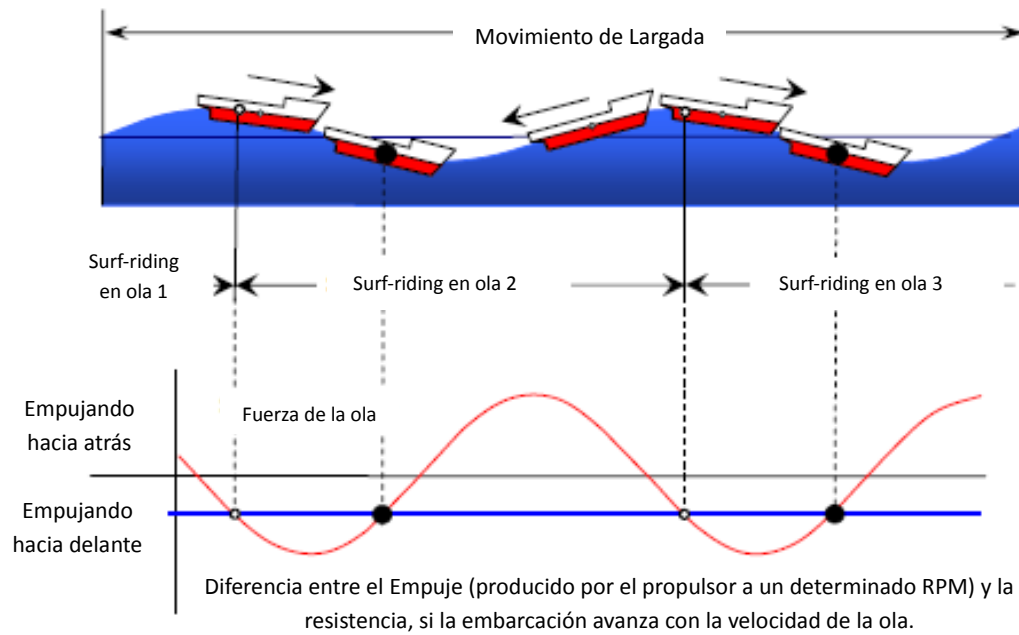
$$\dot{\xi}_G = 0 , \quad \ddot{\xi}_G = 0. \quad (2)$$

Esto significa que la velocidad y la aceleración del buque respecto a la ola son nulos. Para el movimiento de largada del buque en olas de popa, si la diferencia de velocidades entre la ola y el buque es alta y la fuerza de la ola no proporciona la acción necesaria para que la embarcación alcance una velocidad cercana a la ola, el Surf-riding no es posible. La fuerza de la ola deberá proporcionar el empuje necesario para compensar la diferencia de velocidades, de manera que el Surf-riding es posible únicamente cuando el buque esté en la pendiente negativa de la ola.

La Figura 3 muestra que el “surfeo” de la embarcación en la ola es inevitable cuando la componente axial de la fuerza de la ola genera el suficiente empuje para disminuir esta diferencia de velocidades, y hace que el fenómeno de Surf-riding se presente en cualquier punto a lo largo del frente de la ola. Para evaluar la fuerza que ejerce la ola sobre el casco se puede aplicar la simplificación de Froude-Krylov, [13], mediante la integración de las presiones

hidrostática y dinámica considerando que el tren de olas avanza como si el buque no estuviera presente.

Figura 3: Fenómeno de Surf-riding en cualquier punto del frente de la ola.



Fuente: [10]

Aplicando la ecuación de Bernoulli linealizada se puede obtener la presión:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g z = -A_w \rho g e^{kz} \cos(k\xi_G - \omega t) - \rho g z, \quad (3)$$

e integrando sobre la superficie del casco la fuerza de la ola,

$$\vec{F}_{ola} = \iint p \hat{n} dA, \quad (4)$$

donde ϕ representa la función potencial de velocidad obtenida de la teoría lineal de olas gravitacionales, A_w la amplitud de la ola, $k = 2\pi/\lambda_w$ es el número

de la ola donde λ_w es su longitud, y, \hat{n} el vector normal sobre la superficie del casco apuntando hacia adentro.

Por lo expresado, la ecuación de movimiento deberá ser resuelta hasta determinar si bajo condiciones iniciales de velocidad instantánea y posición relativa en la ola, la embarcación está en movimiento relativo de Largada o “surfeando” en la ola. Este resultado servirá como base para obtener velocidades críticas que puedan hacer que en la embarcación se presente el fenómeno de Surf-riding y posteriormente se produzca zozobra por Guiñada Súbita (“Broaching”).

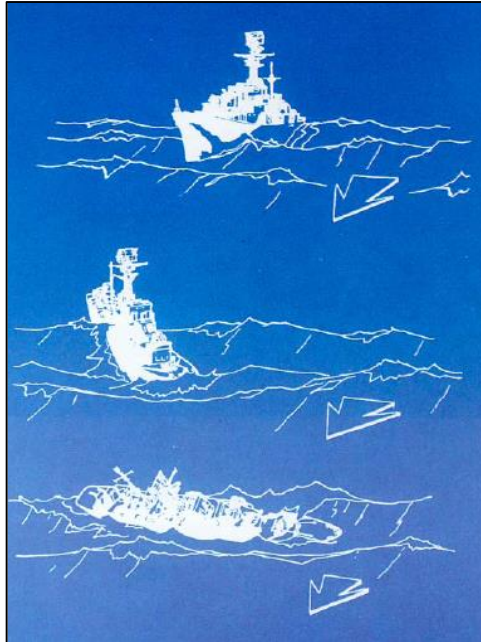
1.4 Descripción de zozobra por Guiñada súbita.

La Guiñada es el movimiento de rotación respecto del eje vertical del buque, que se refleja en cambio en dirección del movimiento longitudinal. La Guiñada Súbita (‘Broaching’) es un fenómeno por el que el buque “surfeando” en la ola no es capaz de mantener el rumbo, y zozobra debido a la acción inercial provocada por el cambio de dirección y la acción escorante de la pendiente de la ola, [9]. El nivel de complejidad del modelo matemático del Surf-riding es más sencillo que el de Guiñada Súbita (‘Broaching’), debido a que este último fenómeno requiere del análisis de inestabilidad direccional, el cual involucra hasta 4 grados de libertad. Esta diferencia de complejidad es motivo por el cual el modelo matemático de Surf-riding es usado para los

distintos análisis y desarrollo de los criterios para determinar la posibilidad de zozobra por Guiñada Súbita (“Broaching”).

Como se ha explicado previamente, la Guiñada Súbita se presenta cuando el buque es forzado a avanzar con la ola y no es capaz de mantener el rumbo a pesar de la máxima aplicación del timón. Esto se debe a que el momento de guiñada inducido por la acción de las olas puede ser mucho mayor que el momento ejercido por el timón en sentido opuesto, lo que representa una pérdida de la capacidad de gobierno, [9]. En esta condición el buque es direccionalmente inestable, y un repentino cambio de dirección hace que se encuentre con olas de costado, donde la acción inercial por el giro y la fuerza hidrodinámica de la pendiente de la ola inducen un ángulo de escora que puede llevar a la zozobra de la embarcación, como se muestra en Figura 4.

Figura 4: Fenómeno de Guiñada Súbita una vez alcanzado el Surf-riding.



Fuente: [9]

Se ha encontrado que embarcaciones de esloras muy grandes no son vulnerables a zozobrar por Guiñada Súbita, debido a que las olas con longitud necesaria son muy rápidas en comparación con la velocidad de operación del buque por lo que no alcanza la condición de “surfeo” en la ola, [9]. Sin embargo, los pesqueros por sus dimensiones y velocidades de operación son vulnerables a este tipo de fenómeno. De esta forma concluye Takaishi en [12], donde de los 448 casos de accidentes de zozobra analizados en Japón, un tercio del total fueron buques pesqueros. También menciona que un cuarto del total de los accidentes en olas de popa, fueron de buques de la flota pesquera. Esta investigación concluye que accidentes en mar de popa ocurren con mayor frecuencia en buques pesqueros que en cualquier otro tipo de embarcación.

La OMI mantiene investigaciones para ofrecer guías operacionales dirigidos a la flota pesquera ya que son vulnerables a una posible zozobra por Guiñada Súbita, con el fin de evitar siniestros que ponen en riesgo la seguridad e integridad de la embarcación.

CAPÍTULO 2

SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL BUQUE PESQUERO DE LA FLOTA ECUATORIANA VULNERABLE A SURF-RIDING

2.1 Análisis de los barcos de la flota pesquera ecuatoriana.

La actividad pesquera en el Ecuador, por condiciones y ubicación geográfica, se desarrolla principalmente en las provincias de Manabí con 31.2%, Esmeraldas con 24.8%, Guayas con 18% y Sta. Elena que aporta con 12.9% del número total de buques pesqueros, [14]. Hasta el año 2014, la flota pesquera ecuatoriana contaba con más de 700 embarcaciones operativas, con capacidad entre 50 y 1500 TRB¹, [15]. Según análisis estadísticos, las formas de estas embarcaciones muestran un ligero

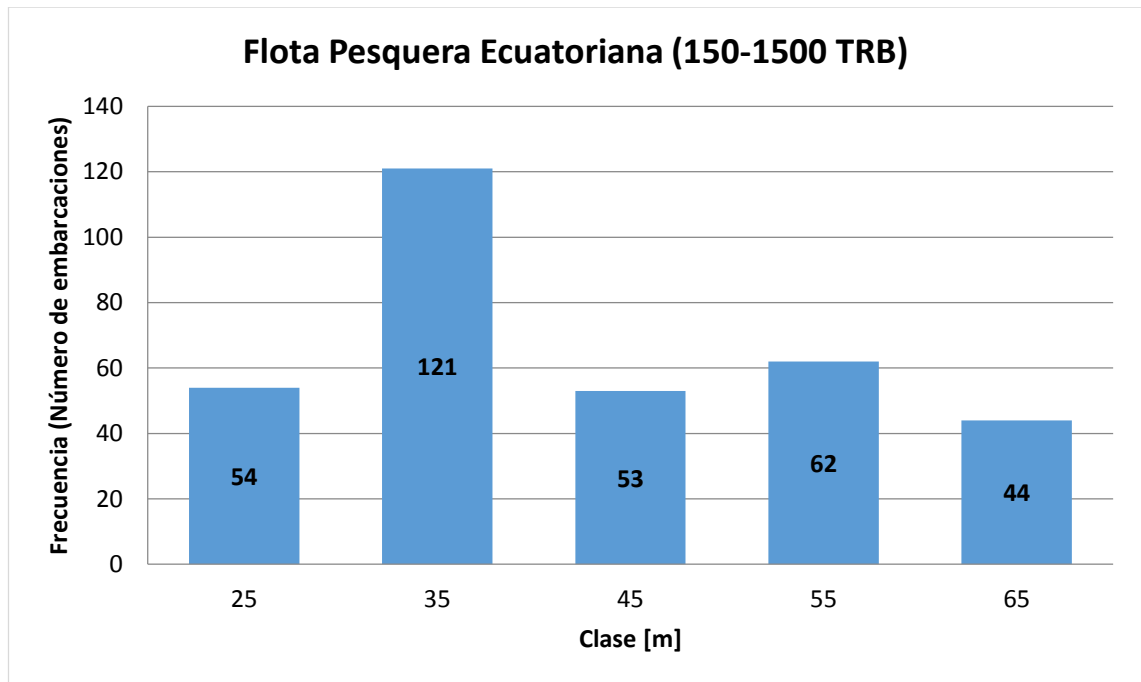
¹ TRB (Tonelaje de Registro Bruto): Medida que expresa el volumen total o capacidad utilizable de los buques calculado por el Convenio Internacional sobre el Arqueo de Buques.

incremento en la relación eslora/manga (L/B) y una relación manga/puntal (B/D) virtualmente constante respecto a la eslora.

En la actualidad aproximadamente más de 700 embarcaciones pesqueras, entre 51 y 1500 TRB, se encuentran operativas en Ecuador según la información proporcionada por la Subsecretaria de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial (SPTMF), [15]. Se estima que aproximadamente el 70% de la flota pesquera industrial ecuatoriana por su velocidad operan con un número de Froude por encima de 0.3. La flota industrial oceánica ecuatoriana representada por los buques atuneros, opera en aguas internacionales o en los límites de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del Pacífico. La flota sardinera, donde figuran los buques cerqueros, operan cerca de la costa, o alrededor de las Islas Galápagos pero dentro de las 40 millas marinas que corresponde a la zona de amortiguamiento de la Reserva Marina, [14]. Por sus condiciones de operación, en general los buques atuneros son los de mayor tamaño.

En la Figura 5 se presenta un histograma de la distribución de buques pesqueros ecuatorianos según su eslora. De un total de 345 embarcaciones registradas con capacidad entre 150 y 1500 TRB, se tiene que el 36% de los buques tienen eslora comprendida en un rango de 30 a 40 metros, seguido por el grupo de buques de alrededor de 55 metros con el 19%, según [15].

Figura 5: Distribución de buques pesqueros ecuatorianos según la eslora.

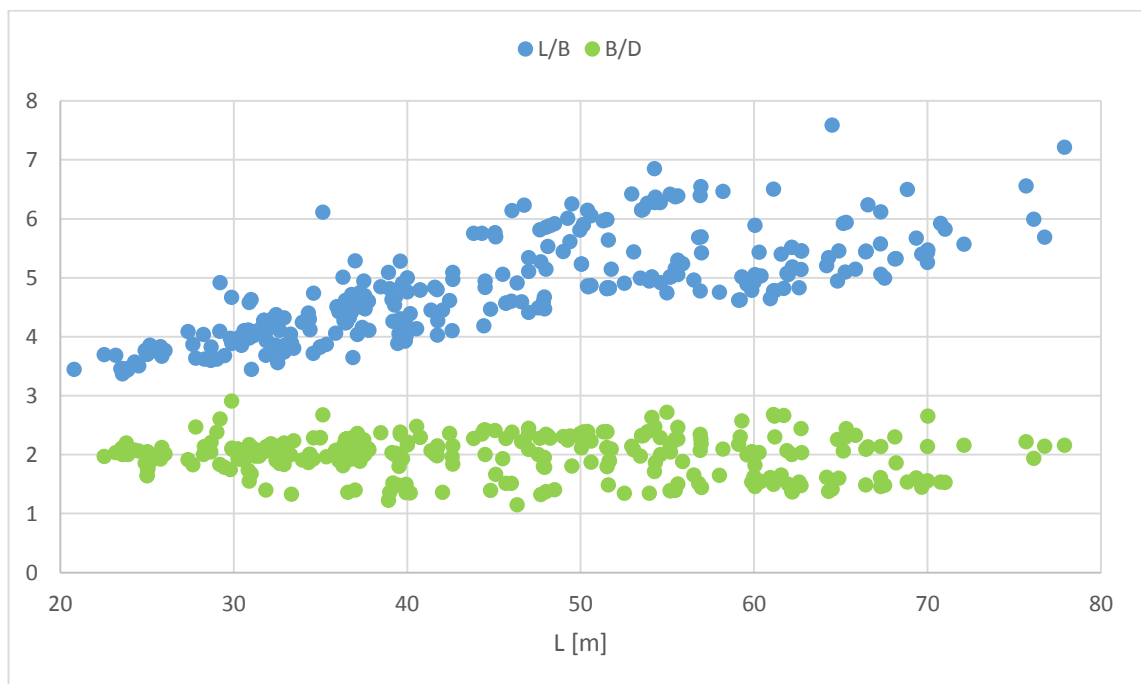


Fuente: Elaboración Propia

Los buques pesqueros ecuatorianos por sus dimensiones y condiciones de operación son propensos a tener problemas en su estabilidad intacta. Este tipo de embarcaciones suelen operar con un bajo francobordo, entonces con un alto valor en su relación B/D, combinado con una gran escora, el agua puede llegar a cubierta y luego inundar algún compartimento, teniendo una alta probabilidad de zozobra. Por otro lado, un bajo valor de B/D lleva a que el buque tenga un valor de altura metacéntrica relativamente bajo, haciendo que la embarcación no cumpla ciertos requerimientos de estabilidad regidos por la OMI para garantizar su seguridad.

En la Figura 6 se presenta las relaciones L/B y B/D respecto a la eslora de las embarcaciones de la flota, notándose que la primera relación aumenta en forma lineal; la alta dispersión que se observa posiblemente es producto de los distintos tipos de buques analizados. Para la relación B/D se observa un valor promedio de 2.0, número relativamente alto para este tipo de embarcaciones que en otras flotas tienen un valor de máximo de 1.6, [17].

Figura 6: Relaciones eslora/manga (L/B) y manga/puntal (B/D) con relación a la eslora de los buques de la flota pesquera ecuatoriana.



Fuente: Elaboración Propia.

Debido a que en la base de datos de la SPTMF no se tiene información sobre la velocidad de operación de los buques, esta será estimada por medio la fórmula del Almirantazgo. Esta formulación sirve para estimar la potencia

requerida a nivel preliminar para que una embarcación de desplazamiento dado alcance una cierta velocidad, [18]:

$$HP = \frac{\Delta^{2/3} V^3}{C} \quad (5)$$

En esta fórmula, C es el coeficiente de Almirantazgo, Δ es el desplazamiento de la embarcación en toneladas, V es la velocidad en nudos y HP la potencia requerida. En este estudio conociendo la velocidad de operación, desplazamiento y potencia de un buque de la flota, se obtiene el coeficiente de almirantazgo para este tipo de embarcaciones de 100. Luego, la velocidad de cada buque de la flota será estimada mediante esta formulación con dicho valor de coeficiente de almirantazgo, asumiendo un coeficiente bloque de 0.65, junto con las relaciones promedio L/B y L/T obtenidas de la base de datos con valores de 4.65 y 10.5 respectivamente.

$$\Delta = \gamma \cdot C_b \cdot L \cdot B \cdot T \quad (6)$$

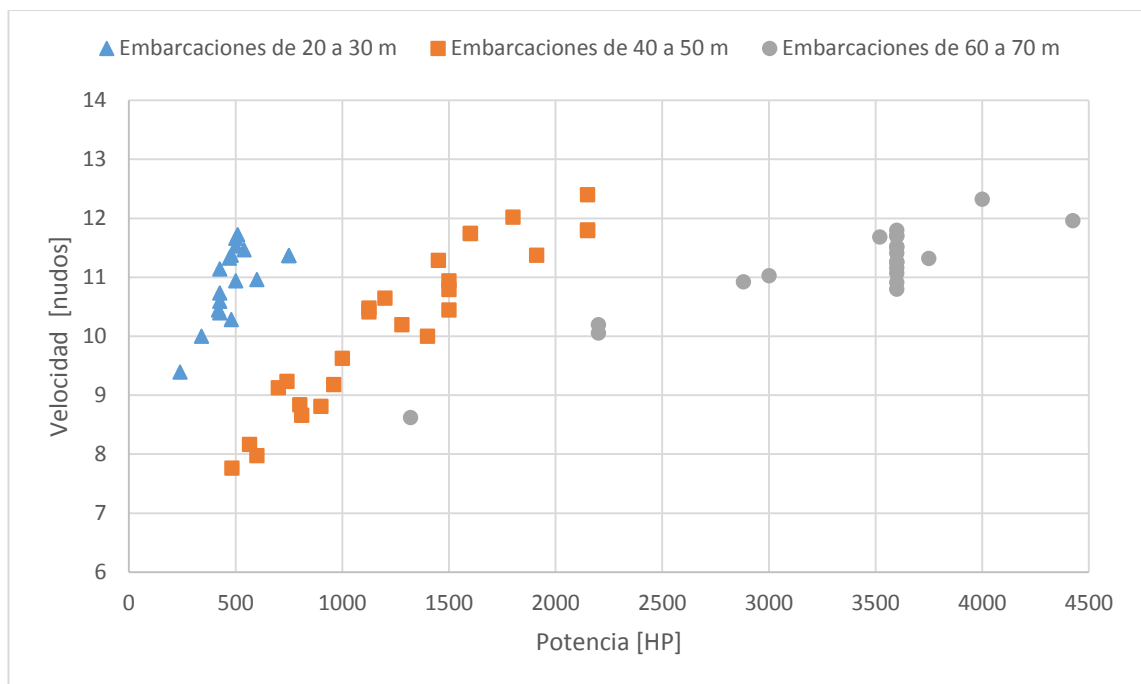
$$\Delta = \gamma \cdot C_b \cdot L^3 \cdot \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{T}{L}\right) \quad (7)$$

$$V = \sqrt[3]{\frac{HP \cdot C}{\left[\gamma \cdot C_b \cdot L^3 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{-1}\right]^{2/3}}} \quad (8)$$

En la Figura 7 se presenta la potencia instalada de los buques con relación a la velocidad de operación de la flota pesquera oceánica, estimada con la ecuación (8). Se observa en un gran porcentaje que los buques operan entre los 8 y 12 nudos. Esto implica que operan con un número de Froude superior

a 0.3, lo que puede hacerlos proclives al fenómeno de Surf-riding según el Primer Criterio de Vulnerabilidad, [4].

Figura 7: Gráfico de la potencia instalada en los buques de la flota pesquera ecuatoriana con relación a su posible velocidad de operación.



Fuente: Elaboración Propia.

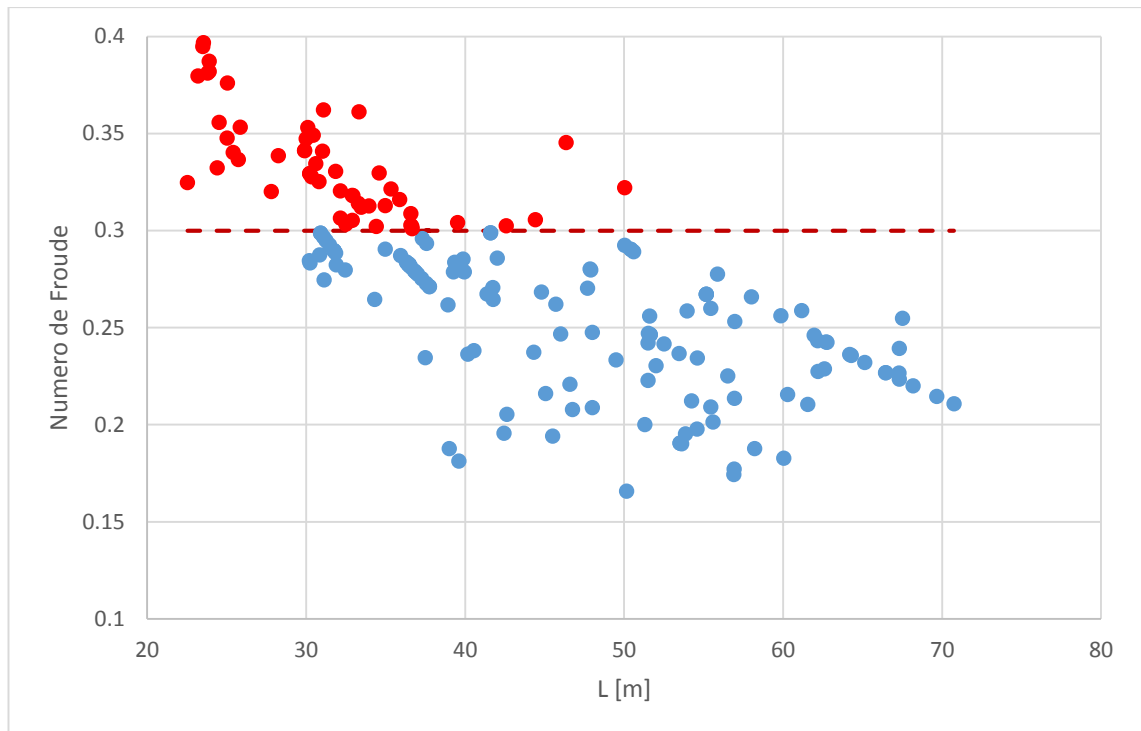
2.2 Análisis de los buques pesqueros ecuatorianos aplicando el primer nivel de vulnerabilidad.

La OMI, en el desarrollo de los Criterios de Estabilidad Intacta de Segunda Generación, recomienda en el primer nivel de vulnerabilidad del fenómeno de Surf-riding evitar el superar la velocidad crítica. De esta forma, no se entra en

zona de inestabilidad direccional y consecuentemente se evita la zozobra por Guiñada Súbita. Este nivel indica que las embarcaciones no deben de operar por encima de un número de Froude de 0.3 cuando navegan con olas de popa. Además, para que este fenómeno ocurra, la longitud de la ola debe estar entre el 80 y el 200% de la eslora entre perpendiculares del buque, con una altura significativa mayor que el 4% de su eslora entre perpendiculares, [13]. De la flota industrial oceánica, se conoce información completa de 183 embarcaciones, y se estima que aproximadamente la tercera parte de ellos cumplen el criterio del número de Froude y con una relación de longitud de ola entre una y 1.75 veces la eslora del buque, haciéndolos vulnerables a este fenómeno.

La Figura 8 muestra el número de Froude que tiene cada embarcación de la flota pesquera ecuatoriana utilizando la velocidad estimada en el subcapítulo anterior aplicando la fórmula del almirantazgo. Se nota que el 30% de ellas son proclives a sufrir este fenómeno operando por encima de un número de Froude de 0.3.

Figura 8: Número de Froude con relación a la eslora de la embarcación.



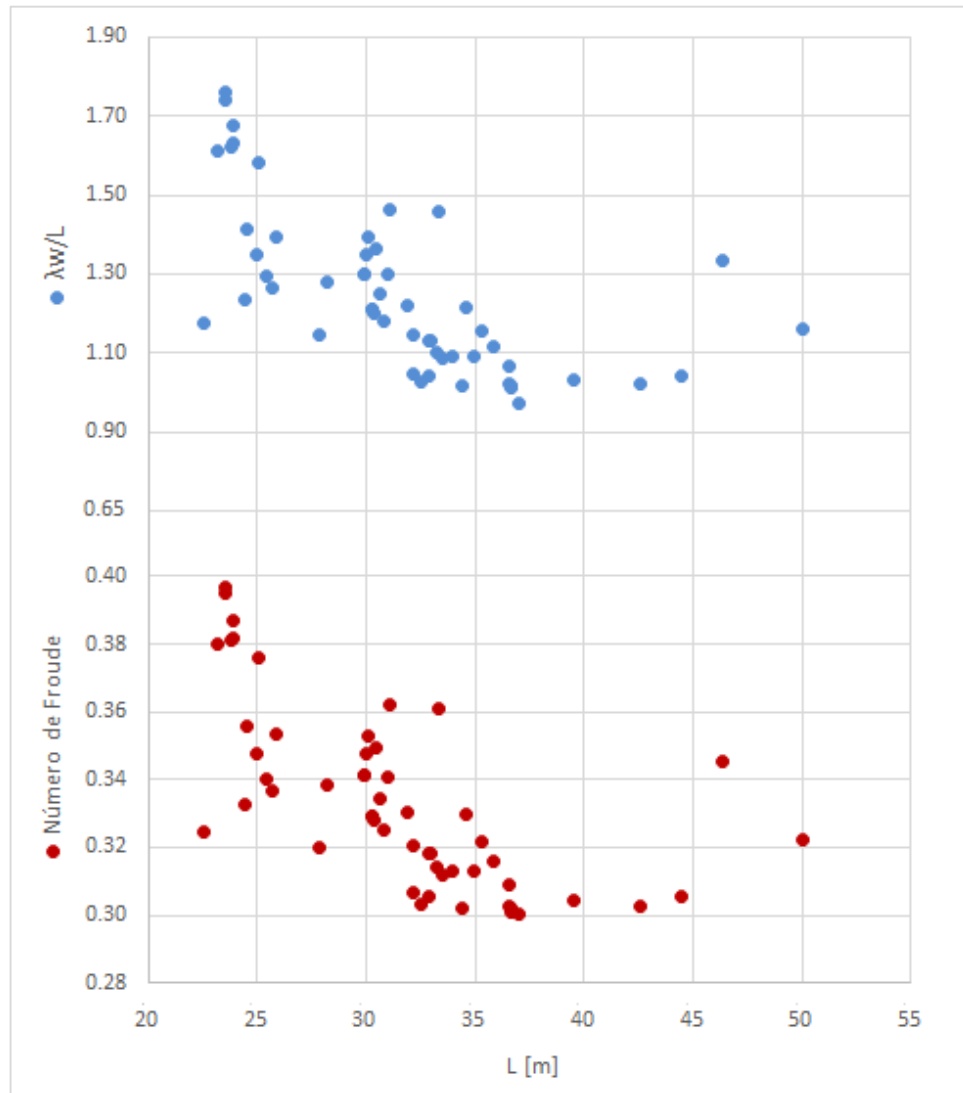
Fuente: Elaboración Propia.

Así también en la Figura 9, se presenta el número de Froude de las embarcaciones que son vulnerables junto con su relación λ_w/L . La longitud de ola λ_w es obtenida por la formulación de la celeridad de olas gravitacionales en aguas profundas dada por, [3]:

$$\lambda_w = \frac{2\pi \cdot c_w^2}{g} \quad (9)$$

donde c_w es la celeridad de la ola. La referencia [13] establece que c_w debe ser alrededor del 33% por encima de la velocidad de operación de la embarcación para que el fenómeno de Surf-riding ocurra.

Figura 9: Número de Froude y relación longitud de ola/eslora del buque con relación a la eslora.



Fuente: Elaboración Propia.

Entonces aplicando el primer nivel de vulnerabilidad, se puede reducir a 54 el número de embarcaciones de la flota pesquera oceánica que se encuentran en potencial peligro de sufrir el fenómeno de Surf-riding cuando reciben olas

de popa. De estas, se tiene información que en los últimos 10 años tres de ellos zozobraron cerca de las costas ecuatorianas. Se desconoce las causas reales de los siniestros donde desafortunadamente hubieron pérdidas humanas, sin embargo, los reportes indican que fueron producto del fuerte oleaje, por lo que el presente análisis de este fenómeno es importante para evaluar la posible causa de dichos accidentes.

2.3 Características principales del buque pesquero seleccionado.

La embarcación a ser analizada en este trabajo es de tipo atunero, cuenta con 310 m³ de capacidad de bodega y zozobró cerca de las Islas Galápagos. Las formas del buque tienen doble china, un ángulo de astilla muerta de 15° y bulbo de proa. Este atunero tiene su maquinaria principal en popa, y se estima que puede alcanzar una velocidad de 11 nudos que corresponde a un número de Froude de 0.30. A esta velocidad, la longitud de la ola debe de ser igual a la eslora del buque para que el fenómeno de Surf-riding se presente. La Resistencia al avance de la embarcación se estima con el método Holtrop y es de aproximadamente 6.6 toneladas para una velocidad de 11 nudos, en la condición de carga de máximo desplazamiento.

En este proyecto, se va a analizar la posibilidad de que se presente el fenómeno de Surf-riding en un buque pesquero de la flota pesquera

ecuatoriana de 300 toneladas de capacidad en sus bodegas. Sus características principales se presentan en la Tabla I.

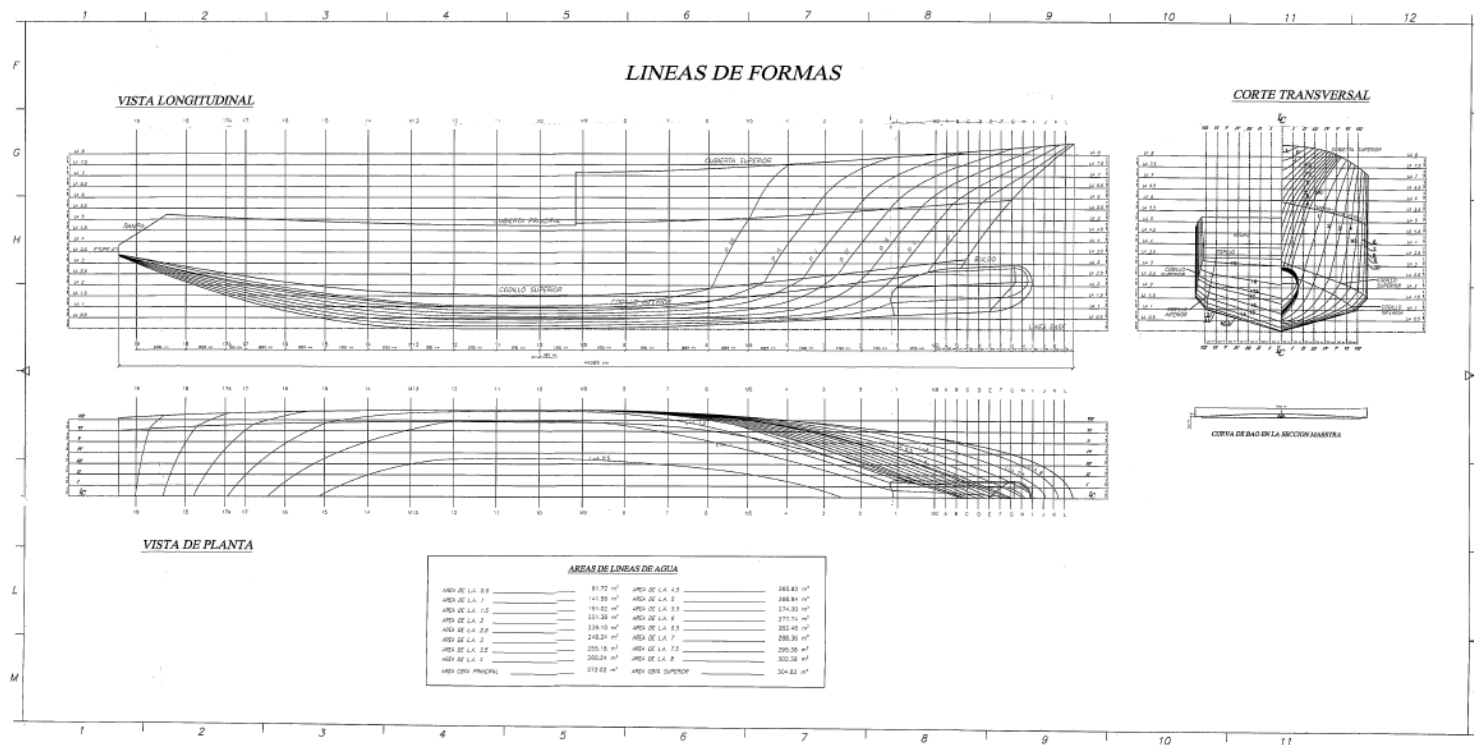
Tabla I: Características principales de la embarcación.

Características	Valor	Unidades
Eslora total	45.1	m
Eslora entre perp.	39.8	m
Manga	8.00	m
Puntal	4.72	m
Calado de diseño	4.55	m
Coefficiente Bloque	0.65	-
Potencia instalada	1076	hp

Fuente: [15]

En la Figura 10 se muestra el plano de líneas de forma y en la Figura 11 el plano de distribución del buque pesquero analizado.

Figura 10: Plano de líneas de forma del buque pesquero analizado.



Para el análisis del fenómeno de Surf-riding de esta embarcación, se van a considerar dos condiciones de carga: “Salida de Puerto” (LC1) y “Llegada a Puerto” (LC2), como se muestra en la Tabla II y III respectivamente.

Tabla II: Condición de Carga 1, Salida de Puerto.

CONDICIÓN DE CARGA 1, SALIDA DE PUERTO							
Item	% Llenado	Peso [Ton]	Z [m]	Mto. Vert. [Ton*m]	X [m]	Mto. Long. [Ton*m]	I ^v [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: [19]

Tabla III: Condición de Carga 2, Llegada 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]	I ^v [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: [19]

Estas condiciones fueron consideradas en [19], en la que se investigó la posibilidad de Resonancia Paramétrica de este buque.

En la Figura 12 se tiene las características de la embarcación que son consideradas para el cálculo de la Resistencia al Avance para cada condición de carga, aplicando el método de Holtrop en el programa DISPROP, [20].

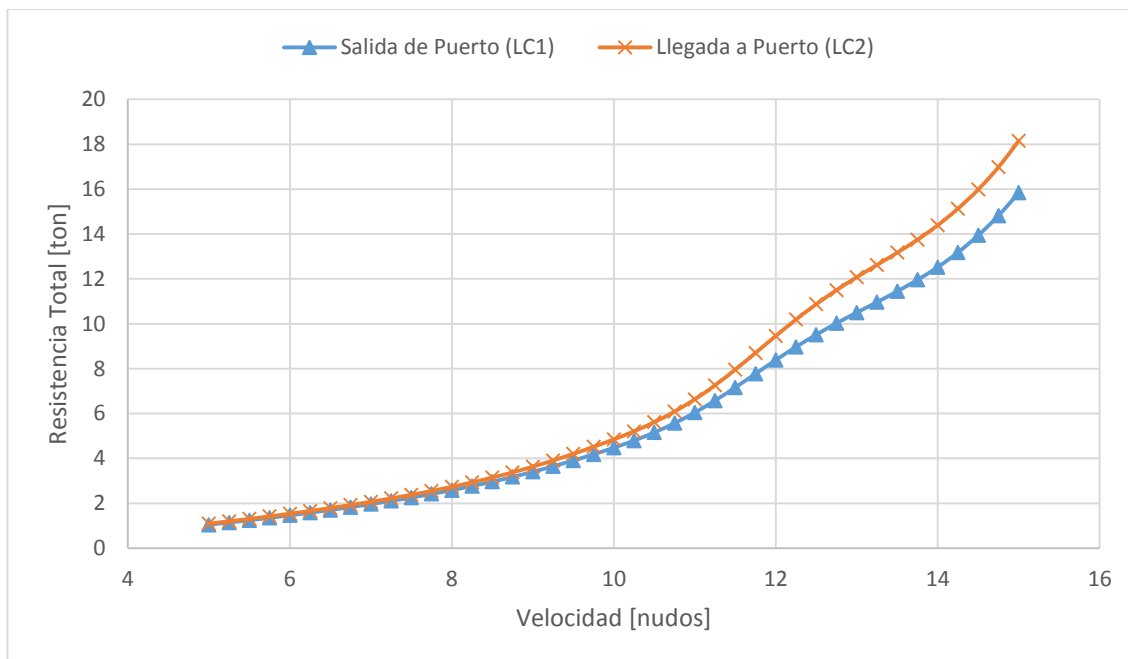
Figura 12: Datos de entrada para cálculo de resistencia al avance.

D A T O S de l a E M B A R C A C I O N		D A T O S de l a E M B A R C A C I O N	
// C O N D I C I O N de C A R G A 1 //		// C O N D I C I O N de C A R G A 2 //	
ESLORA	: 0.4211E+02 METROS	ESLORA	: 0.4215E+02 METROS
MANGA	: 0.8010E+01 METROS	MANGA	: 0.8010E+01 METROS
CALADO	: 0.4100E+01 METROS	CALADO	: 0.4430E+01 METROS
SUPERF. MOJADA	: 0.4890E+03 METROS**2	SUPERF. MOJADA	: 0.5154E+03 METROS**2
VOL. DESPLAZ.	: 0.7836E+03 METROS**3	VOL. DESPLAZ.	: 0.8707E+03 METROS**3
COEF. BLOQUE	: 0.5700E+00	COEF. BLOQUE	: 0.6300E+00
COEF. S. MEDIA	: 0.8300E+00	COEF. S. MEDIA	: 0.9100E+00
COEF. PRISM.	: 0.6800E+00	COEF. PRISM.	: 0.6900E+00
COEF. P. FLOT.	: 0.7900E+00	COEF. P. FLOT.	: 0.7900E+00
LCB (%L-1/2L)	: -.5720E+01 %	LCB (%L-1/2L)	: -.5910E+01 %
SEMIANG. ENTR.	: 0.1900E+02 GRADOS	SEMIANG. ENTR.	: 0.2000E+02 GRADOS
DENSIDAD	: 0.1023E+04 KG/METROS**3	DENSIDAD	: 0.1023E+04 KG/METROS**3
VISCOS. CINEM.	: 0.9425E-06 METROS**2/SEG	VISCOS. CINEM.	: 0.9425E-06 METROS**2/SEG
SUPER. APEND.	: 0.4900E+02 METROS**2	SUPER. APEND.	: 0.4900E+02 METROS**2
AREA TR. BULBO	: 0.2270E+01 METROS**2	AREA TR. BULBO	: 0.2270E+01 METROS**2
ALT. CG. BULBO	: 0.1750E+01 METROS	ALT. CG. BULBO	: 0.1750E+01 METROS
CALADO EN PROA	: 0.4190E+01 METROS	CALADO EN PROA	: 0.4540E+01 METROS
CALADO EN POPA	: 0.4010E+01 METROS	CALADO EN POPA	: 0.4320E+01 METROS
AREA SUM. ESP.	: 0.4220E+01 METROS**2	AREA SUM. ESP.	: 0.4330E+01 METROS**2
INMERS. PROPUL.	: 0.2810E+01 METROS	INMERS. PROPUL.	: 0.3120E+01 METROS

Fuente: [20]

La Figura 13 muestra las curvas de Resistencia Total para ambas condiciones de carga, calculadas con un factor de seguridad de 20%, las cuales serán empleadas en la simulación numérica posterior. Esto debido a que el método de Holtrop no es completamente adecuado para este tipo de embarcaciones.

Figura 13. Resistencia al avance de la embarcación analizada.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla IV se muestra las características estimadas del sistema propulsor. La embarcación con una potencia instalada de 1076 hp alcanza una velocidad de 11 nudos, considerando una hélice de tipo B Wageningen que gira a 400 RPM.

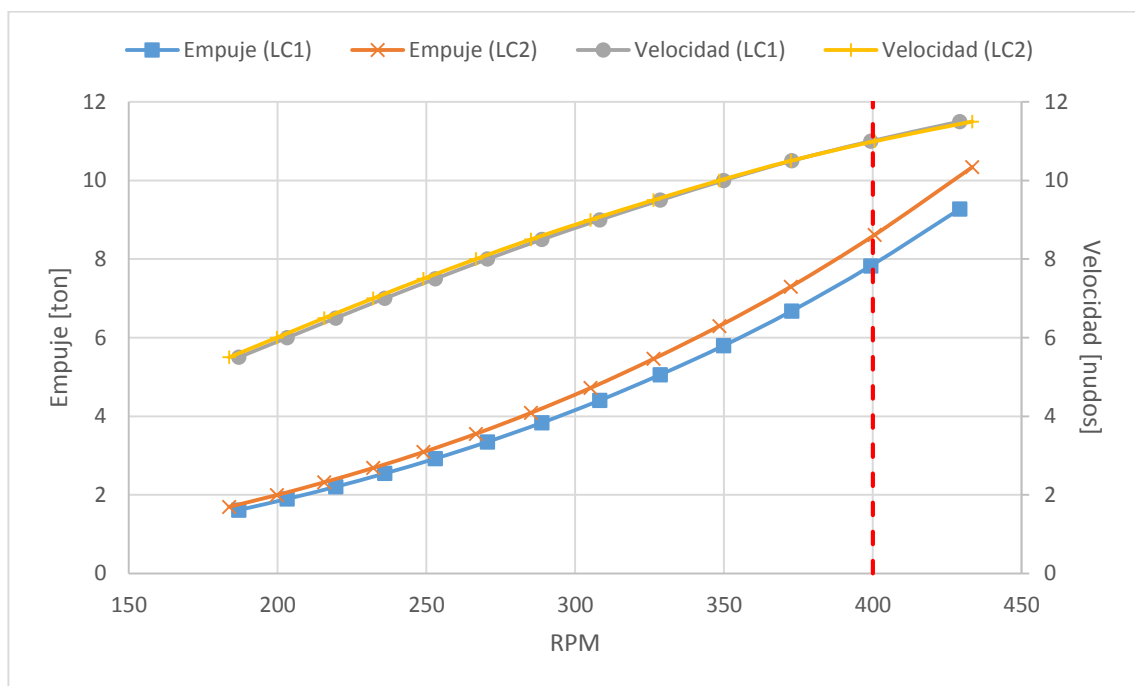
Tabla IV: Características del sistema propulsor.

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	1.90	m
P/D	0.57	
Ae/Ao	0.60	-
Número de Palas	4	-

Fuente: [20]

Tomando un factor de deducción de Empuje de 0.23, según la formulación de Holtrop, [20], en la Figura 14 se grafica el Empuje requerido y la Velocidad de avance de la embarcación analizada respecto a la velocidad de rotación para cada una de las condiciones de carga. Se puede observar, que para una velocidad de avance 11 nudos, considerada velocidad crítica de este buque, se requiere un empuje de aproximadamente 8.6 toneladas, con la hélice operando a 400 RPM.

Figura 14: Empuje requerido y velocidad de avance de la embarcación analizada en cada condición de carga.



Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN PARA EL FENÓMENO DE SURF-RIDING

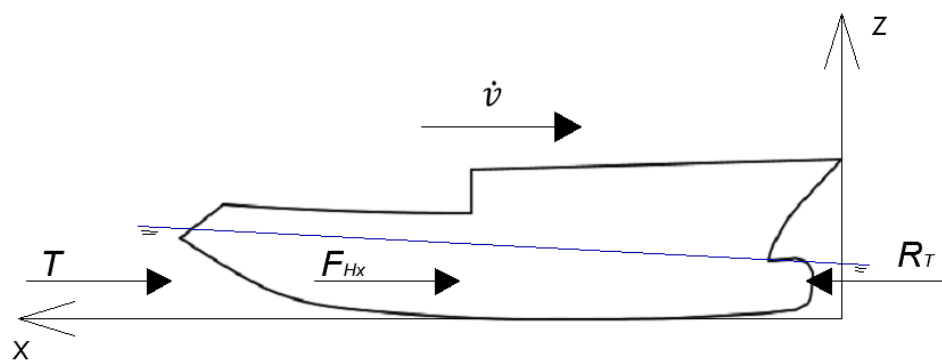
3.1 Implementación del método de Integración numérica

Para la simulación numérica del fenómeno de Surf-riding se emplea el método de Runge Kutta de cuarto orden (RK4), aproximando la velocidad de la embarcación analizada en cada instante de tiempo evaluando la aceleración que el desequilibrio de fuerzas ocasiona. En la simulación se usa el modelo matemático desacoplado del movimiento de Larga del buque, en el cual

participan el Empuje del propulsor, la Resistencia al avance de la embarcación y la Fuerza Hidrodinámica de la ola sobre la superficie del casco. El desequilibrio de estas fuerzas produce una aceleración que es empleada en RK4 para actualizar el valor de la velocidad en cada instante de tiempo. Cuando la componente axial de la fuerza hidrodinámica acelera al buque hasta la de avance de la ola, se considera que la embarcación se encuentra surfeando en ella.

La Figura 15 representa el equilibrio dinámico en dirección x de la embarcación en la ola. En el sistema de referencia empleado, las olas se desplazan en dirección x negativa y la fuerza hidrodinámica F_{Hx} que ejercen las olas sobre la superficie del casco puede ser positiva o negativa dependiendo de la posición del buque en la ola. La Resistencia total, R_T , es interpolada de valores calculados previamente. El Empuje, T , se calcula empleando la curva K_T del propulsor asumido del tipo B-Wageningen, manteniendo constante la velocidad de rotación.

Figura 15: Equilibrio dinámico del buque en olas de popa.



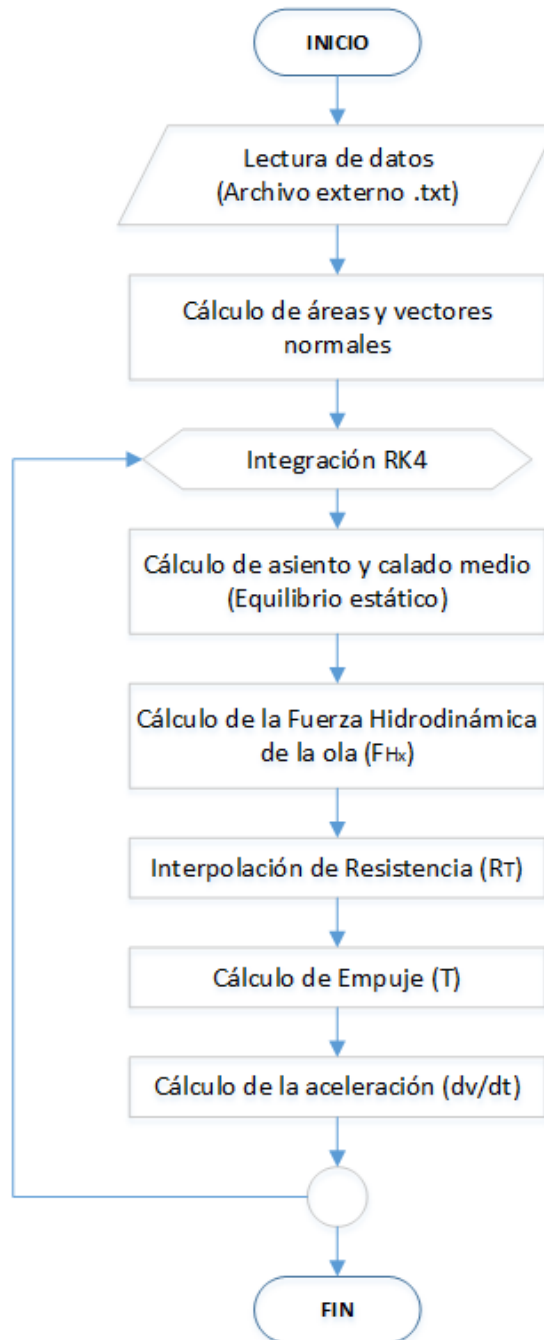
Fuente: Elaboración Propia.

Para modelar la dinámica del fenómeno de Surf-riding se utiliza el modelo matemático desacoplado del movimiento de Largada del buque ("Surging"). Aplicando la segunda ley de Newton al movimiento longitudinal del buque en olas se obtiene:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_x}{(M + M_A)} = \frac{R_T - T + F_{Hx}}{(M + M_A)} \quad (10)$$

donde la masa añadida en traslación longitudinal M_A es asumida como el 10% de la masa del buque, [4]. Partiendo con la velocidad inicial y posición relativa de la embarcación respecto a la ola, se puede calcular la Resistencia total, el Empuje y la componente axial de la Fuerza hidrodinámica, para posteriormente estimar la aceleración en cada instante de tiempo dv/dt . En la simulación numérica del fenómeno de Surf-riding a partir de esta aceleración, se estimará el siguiente valor de velocidad del buque con el método de RK4. En la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo para el proceso de simulación del fenómeno de Surf-riding.

Figura 16: Diagrama de flujo del proceso de simulación RK4.



Fuente: Elaboración Propia.

El método de RK4 consiste en aproximar el siguiente valor de la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden con valores iniciales, [14], a partir de su razón de cambio. En el presente caso, se puede estimar la velocidad en cada instante de tiempo como:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{1}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad (11)$$

donde v_i es la velocidad actual en cada iteración y k_i son estimaciones cercanas al punto de interés que dependen de v_i y del instante de tiempo tomado para la integración. Las aceleraciones para evaluar los k_i 's se calculan aplicando la ecuación en un instante de tiempo dado, de la siguiente forma:

$$k_1 = f(t_i, v_i) \cdot \Delta t = \frac{dv}{dt}(t_i, v_i) \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, v_i + \frac{k_1}{2}\right) \cdot \Delta t = \frac{dv}{dt}\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, v_i + \frac{k_1}{2}\right) \cdot \Delta t \quad (13)$$

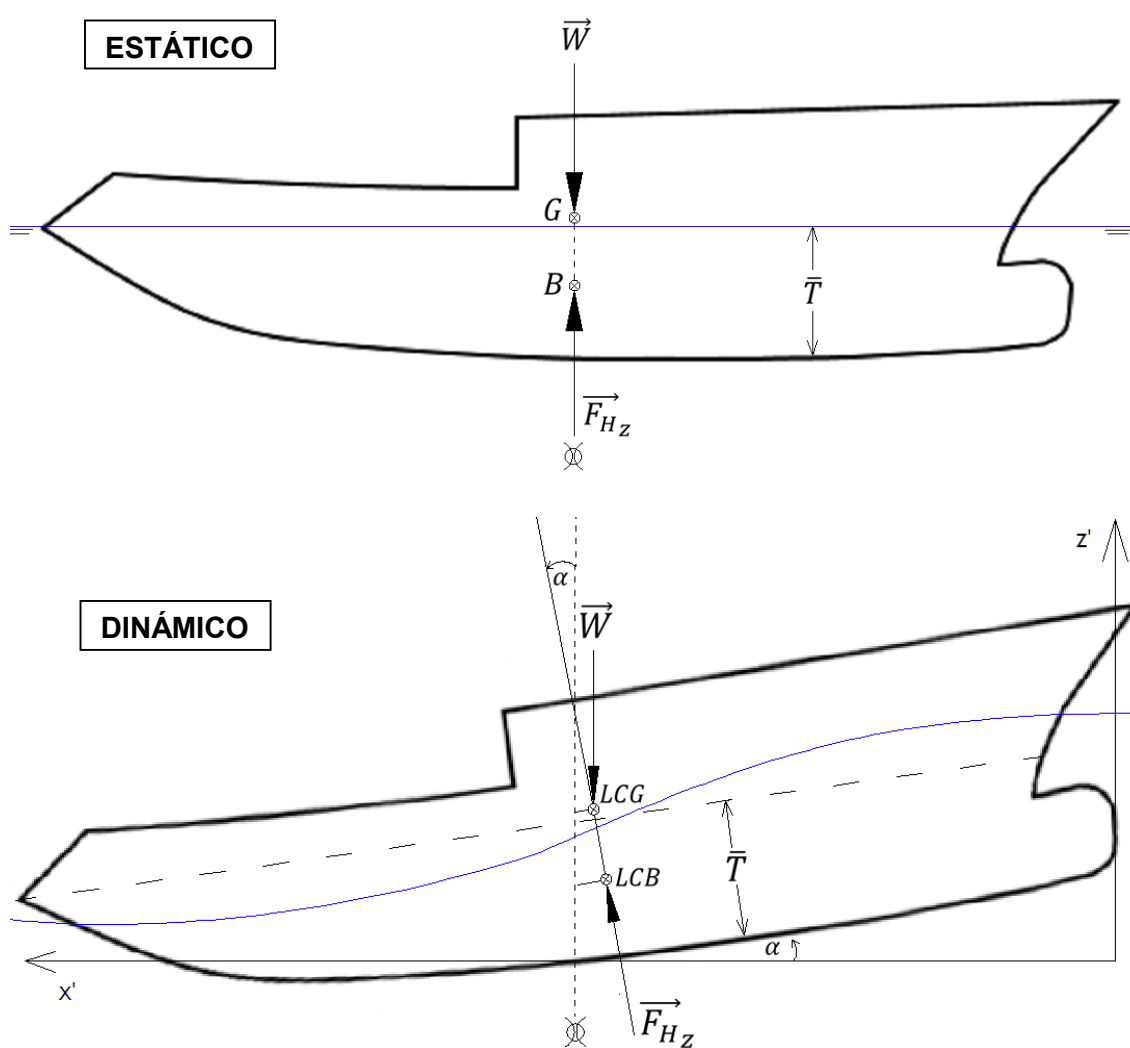
$$k_3 = f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, v_i + \frac{k_2}{2}\right) \cdot \Delta t = \frac{dv}{dt}\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, v_i + \frac{k_2}{2}\right) \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$k_4 = f(t_i + \Delta t, v_i + k_1) \cdot \Delta t = \frac{dv}{dt}(t_i + \Delta t, v_i + k_1) \cdot \Delta t \quad (15)$$

donde Δt es el intervalo de tiempo y f es la función que evaluada produce la aceleración, ecuación (10). La fuerza hidrodinámica de la ola en dicha ecuación se calcula una vez que la embarcación alcanza el equilibrio en el plano vertical.

En la Figura 17 se muestra el equilibrio de la embarcación, donde el peso debe igualarse con el desplazamiento, y, el centro de gravedad longitudinal (LCG) debe alinearse con el centro de boyantez longitudinal (LCB).

Figura 17: Equilibrio de la embarcación en cada instante de tiempo.



Fuente: Elaboración Propia.

El calado medio \bar{T} y el ángulo de asiento α del buque son calculados mediante un método iterativo como resultado de equilibrar la embarcación en la ola, con la condiciones:

$$W - \Delta = 0 \quad (16)$$

$$LCG + (KG - KB)\tan \alpha - LCG = 0 \quad (17)$$

donde la altura metacéntrica KG y el LCG son ingresados como datos de entrada para la condición de carga analizada, y, los valores de KB y LCB son calculados a partir de las formas de la embarcación en la flotación instantánea. Una vez alcanzado el equilibrio en el plano vertical, conociendo el asiento y calado medio, se puede calcular la fuerza de la ola sobre la superficie del casco en dirección x, la cual es detallada en el siguiente subcapítulo.

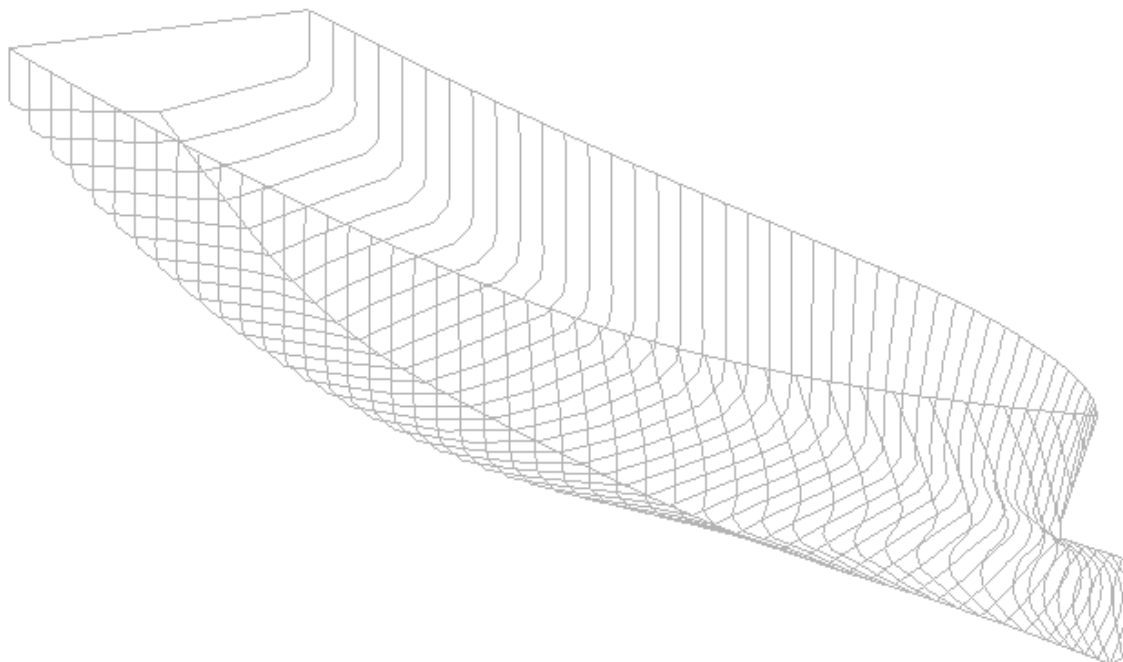
Para la interpolación de la Resistencia se utiliza una regresión polinómica de cuarto orden. El empuje se lo calcula en función de la velocidad de la embarcación, calculando el coeficiente de avance J a partir de la velocidad instantánea del buque y evaluando el coeficiente de empuje K_T , manteniendo las RPM constantes en cada instante de tiempo. Para este cálculo se emplean los polinomios de la curva de las hélices tipo B-Wageningen y se usa un factor de estela, ingresado como dato de entrada.

3.2 Estimación de la Fuerza Axial por efecto de la ola

Para la estimación de la fuerza en dirección x que ejerce la ola sobre el casco, siguiendo la recomendación de [3], se toma simplemente la componente de Froude-Krylov. Para ello es necesario definir en forma adecuada la geometría de la embarcación analizada, que permita calcular el vector fuerza sobre los segmentos de área de la superficie del casco; este parámetro es calculado por la integración de las presiones estáticas en dichos diferenciales de área considerados como pequeños triángulos planos, donde el vector normal establece su dirección. La componente vertical integrada y su correspondiente momento longitudinal deben producir el equilibrio de Fuerza y momento del buque, obteniendo un asiento y calado medio para cada posición sobre el perfil de la ola. La componente axial de la fuerza de la ola es la que participa en el equilibrio dinámico del fenómeno de Surf-riding, que depende de la posición instantánea relativa de la embarcación.

La geometría del casco del buque analizado es elaborada empleando el programa GFormas [21], el cual genera 41 estaciones como se muestra en la Figura 18, e incluye en el presente caso 12 curvas espaciales a lo largo de la eslora (similares a las varetas). Luego se añadieron 6 estaciones en la zona de proa para describir adecuadamente el bulbo.

Figura 18: Modelo geométrico de la embarcación analizada.



Fuente: Elaboración Propia.

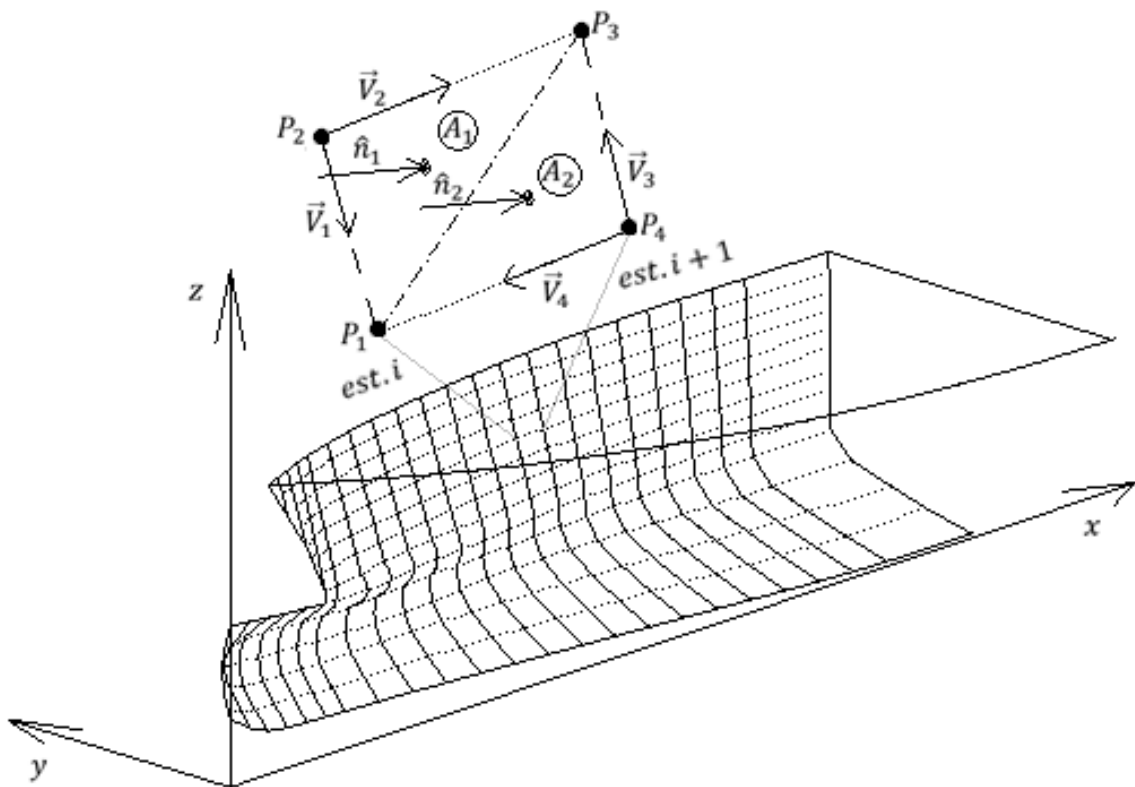
Las 13 franjas conformadas por las 12 curvas (varetas) espaciadas a lo largo de la eslora más el alefriz y la cubierta, están constituidas por cuadriláteros en el espacio, de diferentes dimensiones y direcciones. En la Figura 19 se muestran los cuadriláteros como segmentos de área definidos para el cálculo de los vectores fuerza. Estos segmentos de área están delimitados entre las líneas discontinuas que representan las estaciones y las líneas punteadas que dividen el casco en las 13 franjas desde la quilla hasta la cubierta a lo largo de la eslora. Con el fin de obtener una correcta representación, el segmento cuadrilátero de área será dividido en dos superficies triangulares planas, obteniendo también dos

vectores normales los cuales apuntarán hacia adentro de la superficie del casco. Los vectores normales y las áreas de cada superficie triangular son calculados de la siguiente manera:

$$\vec{V}_1 = \overline{P_1P_2}; \quad \vec{V}_2 = \overline{P_2P_3}; \quad \hat{n}_1(\hat{n}_{1x}, \hat{n}_{1y}, \hat{n}_{1z}) = \frac{\vec{V}_2 \times \vec{V}_1}{|\vec{V}_2 \times \vec{V}_1|}; \quad A_1 = \frac{|\vec{V}_2 \times \vec{V}_1|}{2} \quad (18)$$

$$\vec{V}_3 = \overline{P_3P_4}; \quad \vec{V}_4 = \overline{P_4P_1}; \quad \hat{n}_2(\hat{n}_{2x}, \hat{n}_{2y}, \hat{n}_{2z}) = \frac{\vec{V}_4 \times \vec{V}_3}{|\vec{V}_4 \times \vec{V}_3|}; \quad A_2 = \frac{|\vec{V}_4 \times \vec{V}_3|}{2} \quad (19)$$

Figura 19: Áreas y vectores normales en la superficie del casco.



Fuente: Elaboración Propia.

Es posible obtener la Fuerza hidrodinámica de la ola mediante la integración de la presión sobre cada superficie triangular sumergida a lo largo de la eslora. La integral de la fuerza se la expresa como el producto del área por la presión media evaluada en el centroide de cada triángulo, el cual es considerado como el promedio de los tres puntos que conforman cada superficie triangular. El vector fuerza hidrodinámica de la ola es:

$$\vec{F}_H (F_{Hx}, F_{Hy}, F_{Hz}) = \gamma \sum_{i=1}^{nst-1} \sum_{j=1}^{n(i)} (\bar{T}_i - \bar{z}_{i,j}) \cdot \hat{n}_{i,j} \cdot \Delta A_{i,j} \quad (20)$$

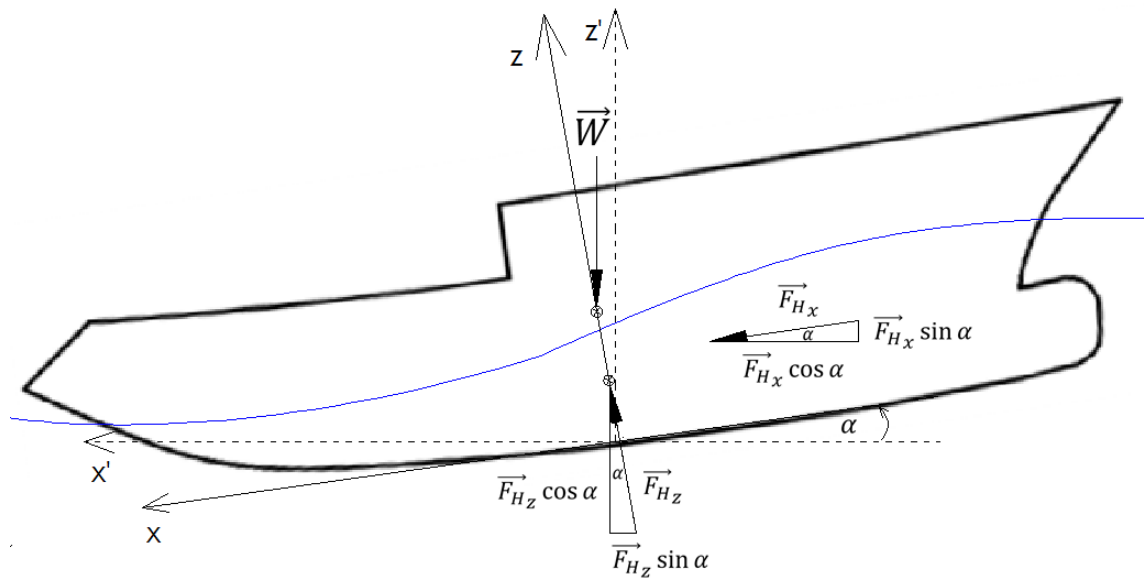
donde \vec{F}_H es el vector fuerza hidrodinámica de la ola sobre la superficie del casco y γ es el peso específico 1.025 ton/m³. Las variables $\bar{z}_{i,j}$, $\hat{n}_{i,j}$ y $\Delta A_{i,j}$ son la posición vertical del centroide, el vector normal y el área de cada superficie triangular respectivamente. El calado medio \bar{T} es calculado una vez que el buque alcanza el equilibrio vertical como se mencionó en el subcapítulo anterior, con las ecuaciones (16) y (17). Para encontrar este equilibrio se calculan LCB y KB con las ecuaciones (21) y (22) respectivamente. Para valores asumidos de \bar{T} y α se pueden determinar la profundidad media de cada superficie triangular para una posición de ola conocida. En el caso de los triángulos superiores, se desarrollan las interpolaciones correspondientes.

$$LCB = \frac{F_{Hz} \cdot \bar{x}}{\Delta_{ship}} = \frac{\gamma \sum_{i=1}^{nst-1} \sum_{j=1}^{n(i)} (\bar{T}_i - \bar{z}_{i,j}) \cdot \hat{n}_{z_{i,j}} \cdot \Delta A_{i,j} \cdot \bar{x}_i}{\Delta_{ship}} \quad (21)$$

$$KB = \frac{F_{Hz} \cdot \bar{z}}{\Delta_{ship}} = \frac{\gamma \sum_{i=1}^{nst-1} \sum_{j=1}^{n(i)} (\bar{T}_i - \bar{z}_{i,j}) \cdot \hat{n}_{z_{i,j}} \cdot \Delta A_{i,j} \cdot \bar{z}_j}{\Delta_{ship}} \quad (22)$$

Debe enfatizarse que los vectores normales se refieren al sistema de referencia original (x-z), pero la embarcación rota un ángulo α de asiento, por lo que habrá que considerar componentes como se indica en la Figura 20.

Figura 20: Componente axial neta de la fuerza de la ola sobre la embarcación.



Fuente: Elaboración Propia.

Las fuerzas hidrodinámicas $\overrightarrow{F_{H_x}}$ y $\overrightarrow{F_{H_z}}$ son obtenidas a partir de las características geométricas del buque según las ecuaciones:

$$\overrightarrow{F_{H_x}} = \gamma \sum_{i=1}^{nst-1} \sum_{j=1}^{n(i)} (\overline{T}_i - \overline{z}_{i,j}) \cdot \hat{n}_{x_{i,j}} \cdot \Delta A_{i,j}, y, \quad (23)$$

$$\overrightarrow{F_{H_z}} = \gamma \sum_{i=1}^{nst-1} \sum_{j=1}^{n(i)} (\overline{T}_i - \overline{z}_{i,j}) \cdot \hat{n}_{z_{i,j}} \cdot \Delta A_{i,j}. \quad (24)$$

Una vez equilibrado, la Fuerza axial sobre el casco será:

$$F_{H_{x'}} = F_{H_x} \cos \alpha + F_{H_z} \sin \alpha. \quad (25)$$

Si esta fuerza $F_{H_{x'}}$ es negativa significa que el buque apunta en dirección del movimiento, y como resultado este es acelerado. Si dicha fuerza es positiva, producirá una reducción en su velocidad.

3.3 Simulación numérica del fenómeno de Surf-riding para el buque pesquero analizado

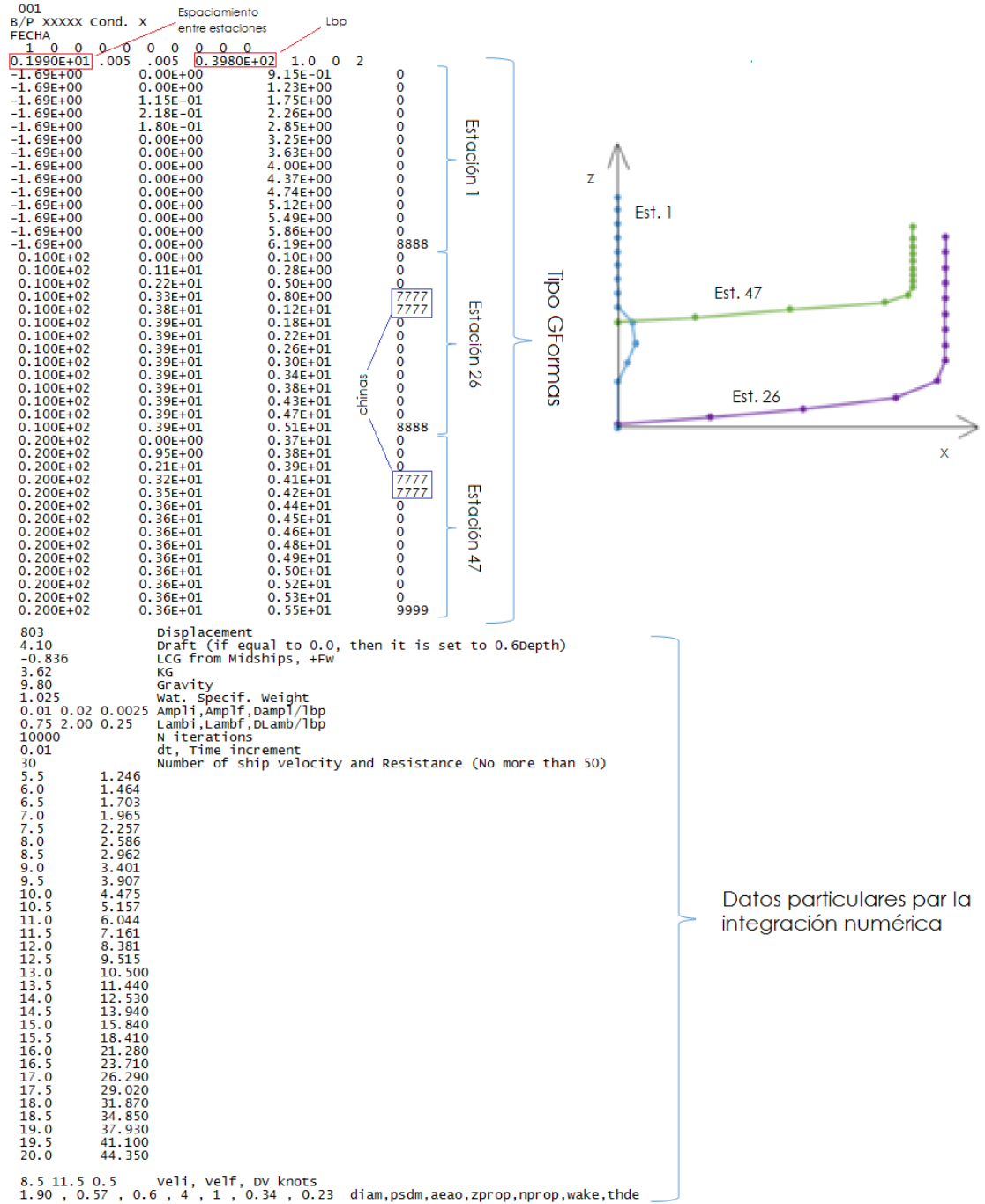
En la simulación numérica del fenómeno de Surf-riding del buque desarrollada en este trabajo, se requieren como datos de entrada: las formas del buque, las características hidrostáticas de la condición de carga, la curva de resistencia al avance, los datos del propulsor, la velocidad inicial del buque y las características de las olas regulares. Los resultados de la simulación numérica aplicando RK4

para cada instante de tiempo son guardados en un archivo texto para su posterior análisis. Mediante esta simulación se determina qué condiciones iniciales hacen que la fuerza hidrodinámica de una cierta ola acelere a la embarcación, haciéndola surfear.

Para empezar la simulación, primero se prepara un archivo de datos con formato tipo texto que contenga las formas del buque obtenido del programa GFORMAS. Luego se debe incluir las características de la condición de carga y de la ola que son: el desplazamiento, calado, LCG, KG, rango de amplitudes y longitudes con respecto a la eslora del buque, así como del número de iteraciones y el incremento en tiempo Δt . También se ingresa la cantidad y los valores de velocidad y Resistencia al avance utilizadas en la simulación. Por último, se especifica el rango de velocidades iniciales del buque a considerar en el análisis, y las características del sistema propulsor.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de cómo deben de ser ingresados los datos. Una vez realizada la simulación, los resultados que son impresos en un archivo externo tipo texto para su posterior análisis son: posición relativa de la cresta respecto del buque, velocidad del buque, calado medio, calado en proa y en popa, ángulo de asiento, Resistencia al avance, Empuje total y la fuerza hidrodinámica de la ola en dirección de la ola.

Figura 21: Ejemplo de datos de entrada.

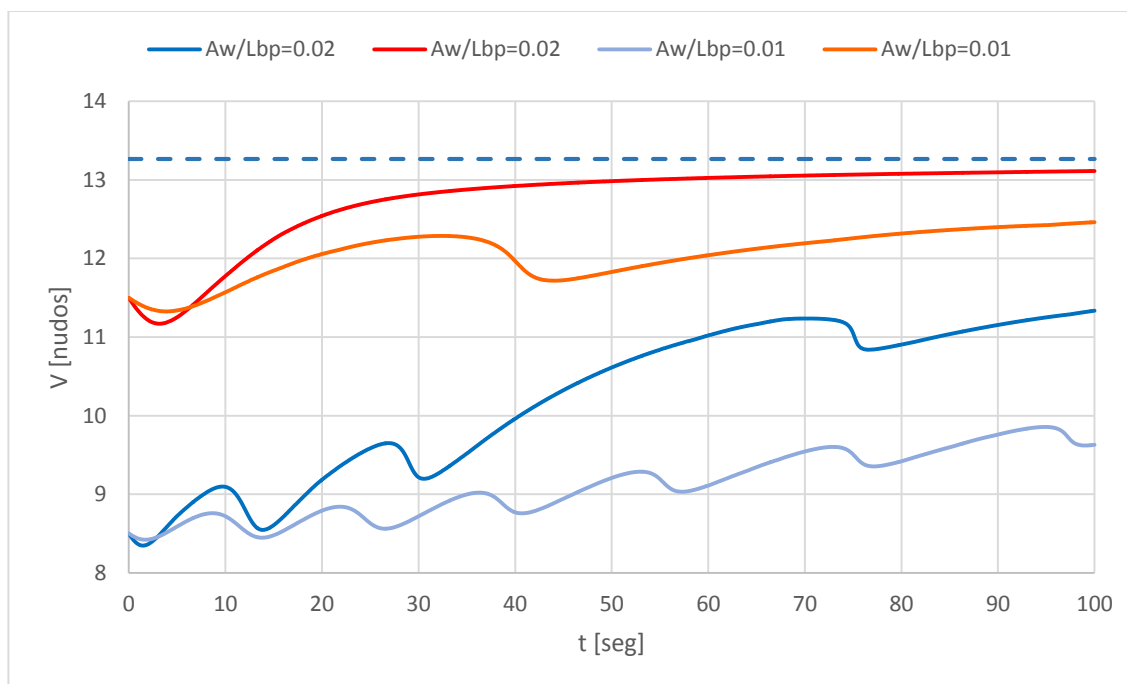


Fuente: Elaboración Propia.

Dado que el Surf-riding es un fenómeno de tipo no lineal, es posible que numéricamente el proceso no alcance una convergencia a la solución. Por ello debe usarse un intervalo de tiempo suficientemente pequeño, pero eficiente en el tiempo de ejecución. Se encontró que con un intervalo de tiempo de 0.01 segundos se obtiene una adecuada aproximación del fenómeno, como se explica en el Anexo A. En el presente trabajo se ha considerado que si luego de un tiempo de simulación de 100 segundos la embarcación no alcanza la velocidad de la ola considerada como regular, entonces se determina que la embarcación no presenta el fenómeno de Surf-riding con dichas condiciones iniciales.

En la Figura 22 se presentan los resultados de simulaciones del buque pesquero descrito previamente para una relación de longitud de ola $\lambda_w/L_{bp} = 0.75$, con amplitud de ola $A_w/L_{bp} = 0.01$ y 0.02 . Se emplean dos velocidades iniciales y con incremento de tiempo de 0.01 segundos.

Figura 22: Variación de la velocidad de la embarcación respecto al tiempo.

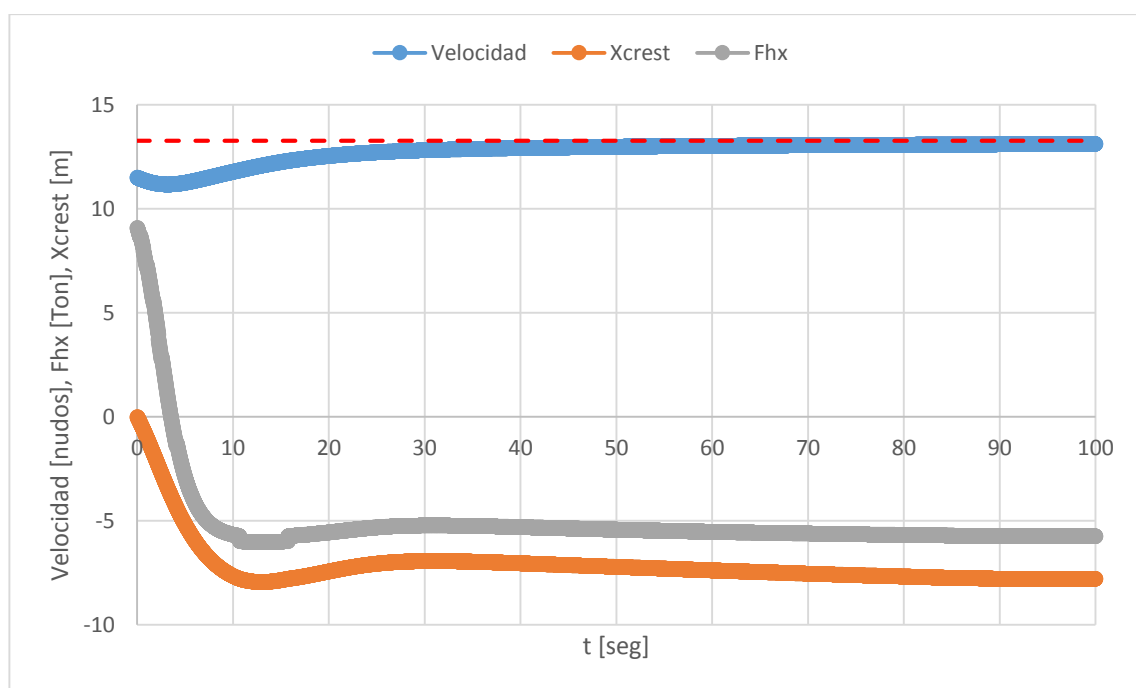


Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar en la Figura 22 que para una longitud de ola igual a 0.75 de la eslora entre perpendiculares del buque, con $A_w/L_{bp} = 0.01$ y 0.02 , que corresponde a aproximadamente a 40 y 80 cm respectivamente, la embarcación presenta un movimiento periódico para una velocidad inicial de 8.5 nudos. Para una velocidad inicial de 11.5 nudos con $A_w/L_{bp} = 0.02$, el buque es acelerado a una velocidad de 13.11 nudos, correspondiente al 99% de la celeridad de la ola. Sin embargo con $A_w/L_{bp} = 0.01$, bajo la misma velocidad inicial de 11.5 nudos, la embarcación tiene un comportamiento similar pero alcanzando una velocidad muy

por debajo de la velocidad de la ola. Entonces, luego de 100 segundos de simulación, se puede decir que en la embarcación analizada se presenta el fenómeno de Surf-riding con características de ola de $\lambda_w/L_{bp} = 0.75$ y $A_w/L_{bp} = 0.02$, con una velocidad inicial de 11.5 nudos, alcanzando el 99% de la celeridad de la ola. En la Figura 23 se muestra la componente axial de la fuerza hidrodinámica, la velocidad y la posición relativa de la embarcación bajo estas condiciones, en el caso en que la embarcación surfea en la ola.

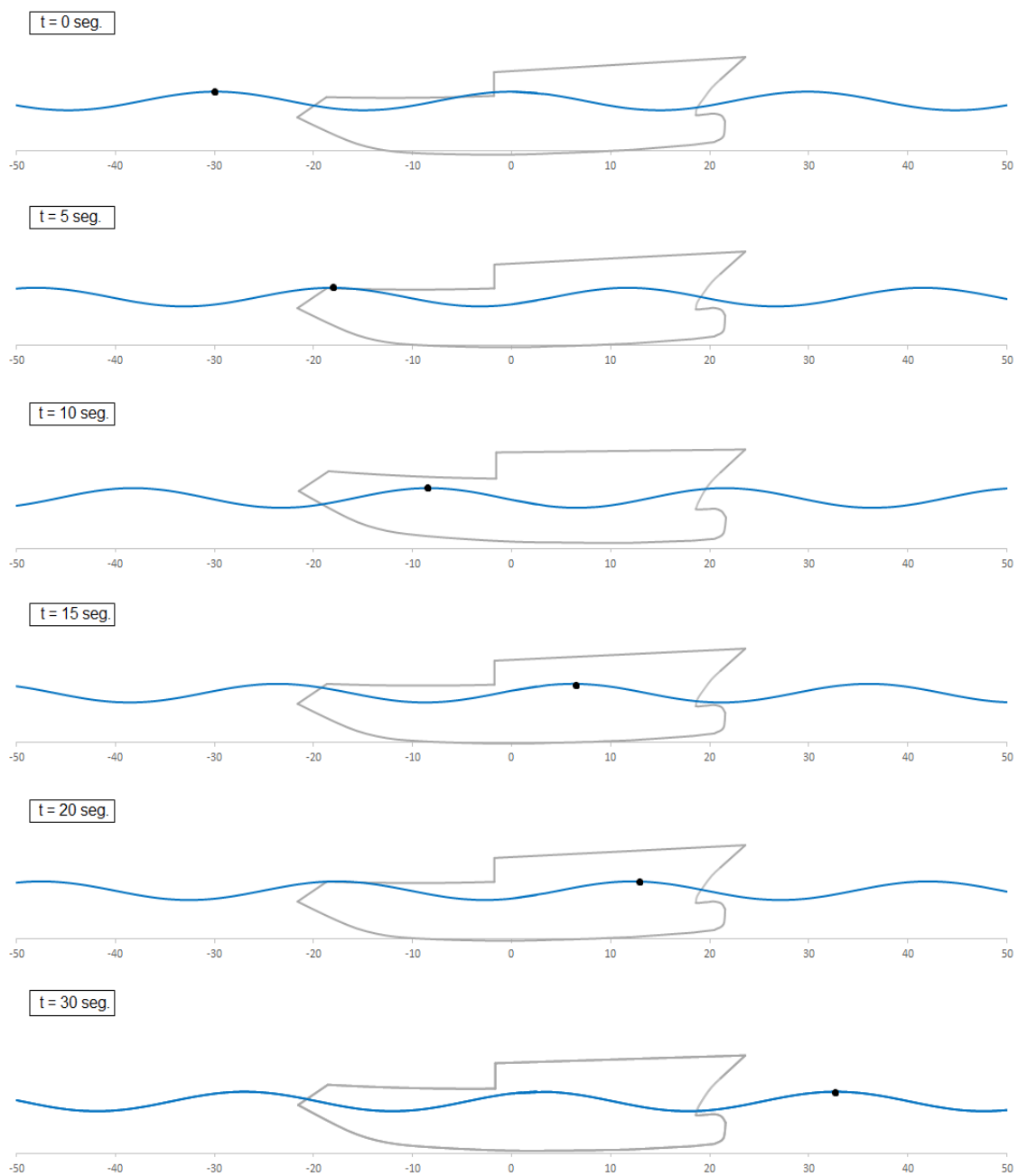
Figura 23: Velocidad del buque, posición relativa y componente axial de la fuerza hidrodinámica de la ola.



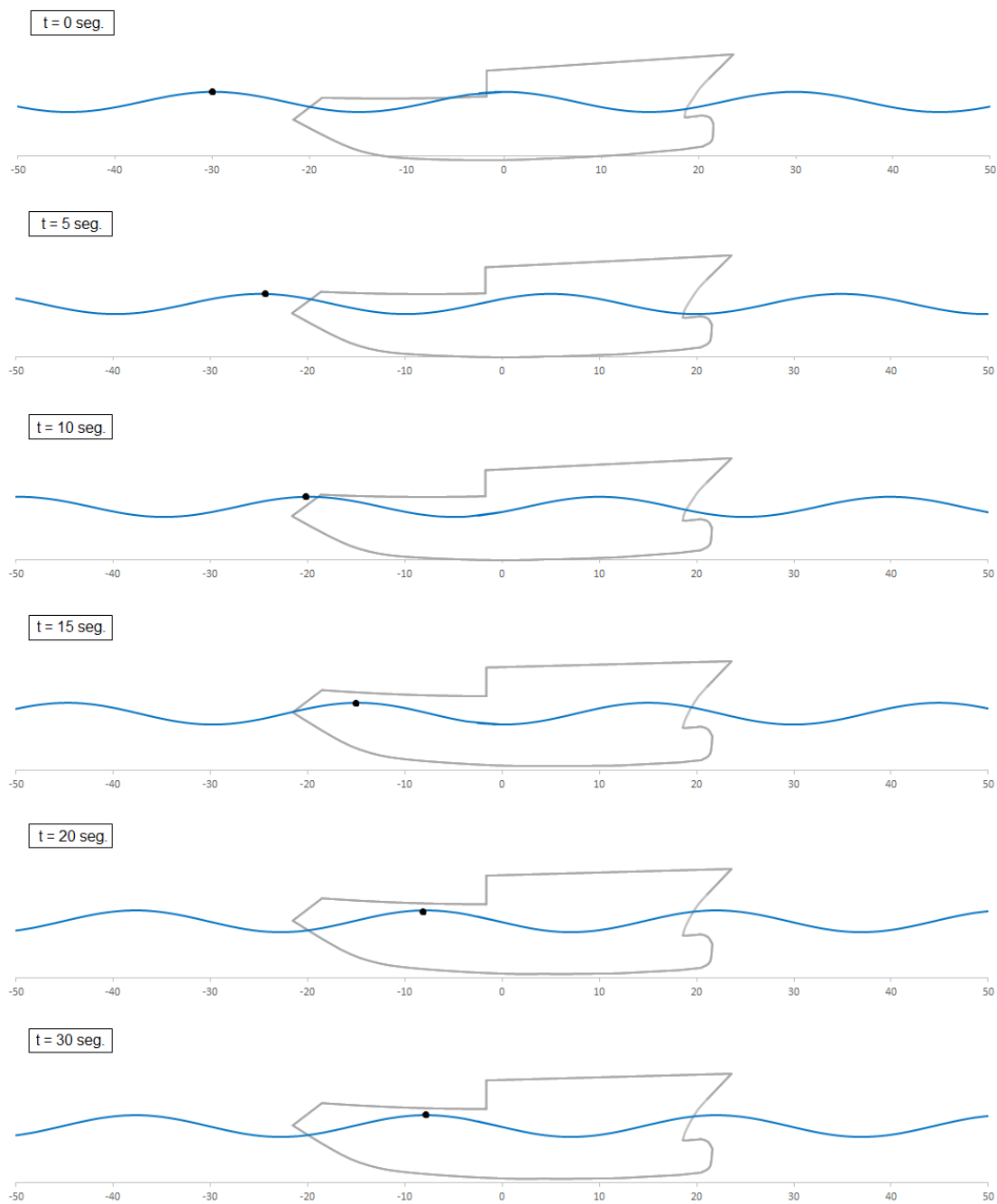
Fuente: Elaboración Propia.

Como resultado de las simulaciones desarrolladas, en la Figura 23 se muestra que aproximadamente a los 20 segundos la embarcación alcanza una velocidad de 12.6 nudos correspondiente al 95% de la celeridad de la ola. Una vez que el buque alcanza esta velocidad, la fuerza de la ola incrementa parcialmente llegando a 5.7 toneladas, instante cuando la velocidad del buque aumenta a 13.12 nudos. A esta velocidad, la posición de la embarcación con respecto a la ola tiene una posición relativa prácticamente constante, lo que significa que el buque y la ola avanzan juntos con velocidades muy cercanas.

Con los resultados de las simulaciones desarrolladas, en la Figura 24 y 25 se presenta el perfil de la ola y el de la embarcación en diferentes instantes de tiempo para $\lambda_w/L_{bp} = 0.75$, $A_w/L_{bp} = 0.02$ y velocidades iniciales de 8.5 y 11.5 nudos respectivamente. En la Figura 24 se observa que para una velocidad inicial de 8.5 nudos la ola avanza en cada instante de tiempo como si el buque no estuviera presente, debido a que es muy rápida para la velocidad instantánea de la embarcación. Sin embargo, para una velocidad inicial de 11.5 nudos, la posición relativa entre la ola y la embarcación es cero desde los 20 segundos, lo que significa que el buque avanza a la misma velocidad de la ola surfeando en ella, como se muestra en la Figura 25.

Figura 24: Perfil de la ola y del buque sin surfeo.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 25: Perfil de la ola y del buque con surfeo.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 4

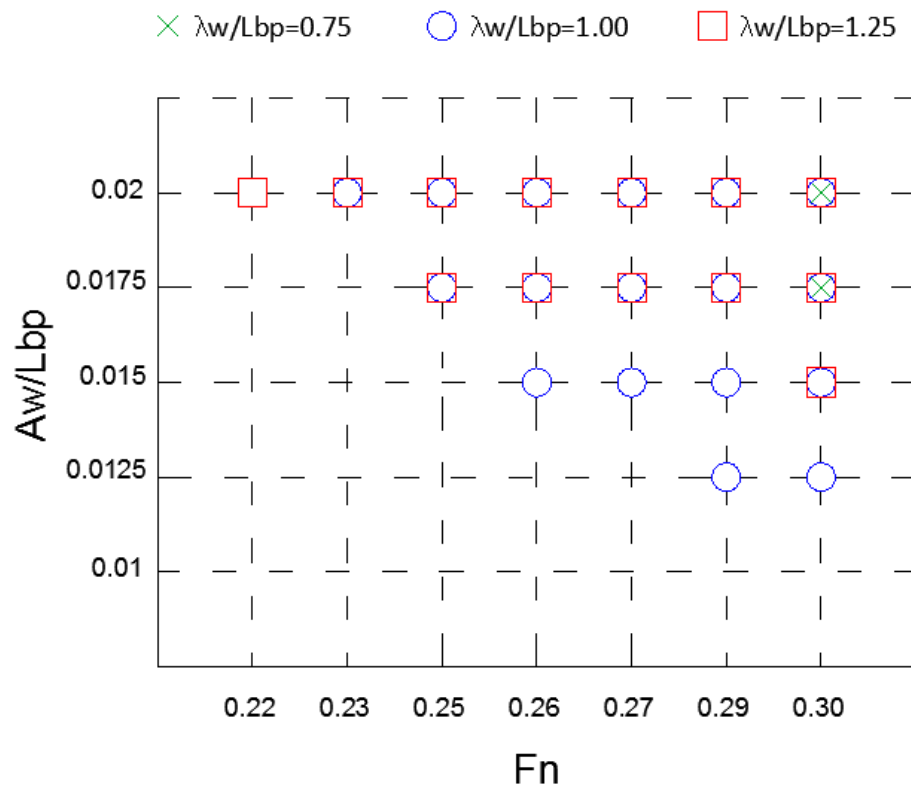
ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES PARA EL FENÓMENO DE SURF-RIDING

4.1 Resumen de los resultados para la condición “Salida de Puerto”

En los subcapítulos 4.1 y 4.2 se resumen los resultados de las simulaciones del fenómeno de Surf-riding del buque pesquero analizado en las dos condiciones de carga descritas en capítulos anteriores. Los parámetros considerados fueron la velocidad inicial, en un rango de 8.5 a 11.5 nudos, la amplitud y longitud de la ola respecto a la eslora del buque de 0.01 a 0.02, y, de 0.75 a 2.00, respectivamente.

Para la condición de carga 1 llamada “Salida de Puerto”, como se explicó con anterioridad, se considera el buque analizado como indica [19] en la simulación numérica de Balance Paramétrico. En la Figura 26 se muestra el resumen de los resultados de las simulaciones para dicha condición de carga, donde existen algunas condiciones iniciales de velocidad del buque, amplitud y longitud de la ola con respecto del buque; V_0 , A_w/L_{bp} y λ_w/L_{bp} respectivamente, que hacen surfear a la embarcación con riesgo a una posible zozobra. Los puntos marcados indican las condiciones que desembocaron en el surfear de la embarcación, que depende de las tres parámetros ya descritos.

Figura 26: Resultados de la condición de carga 1.

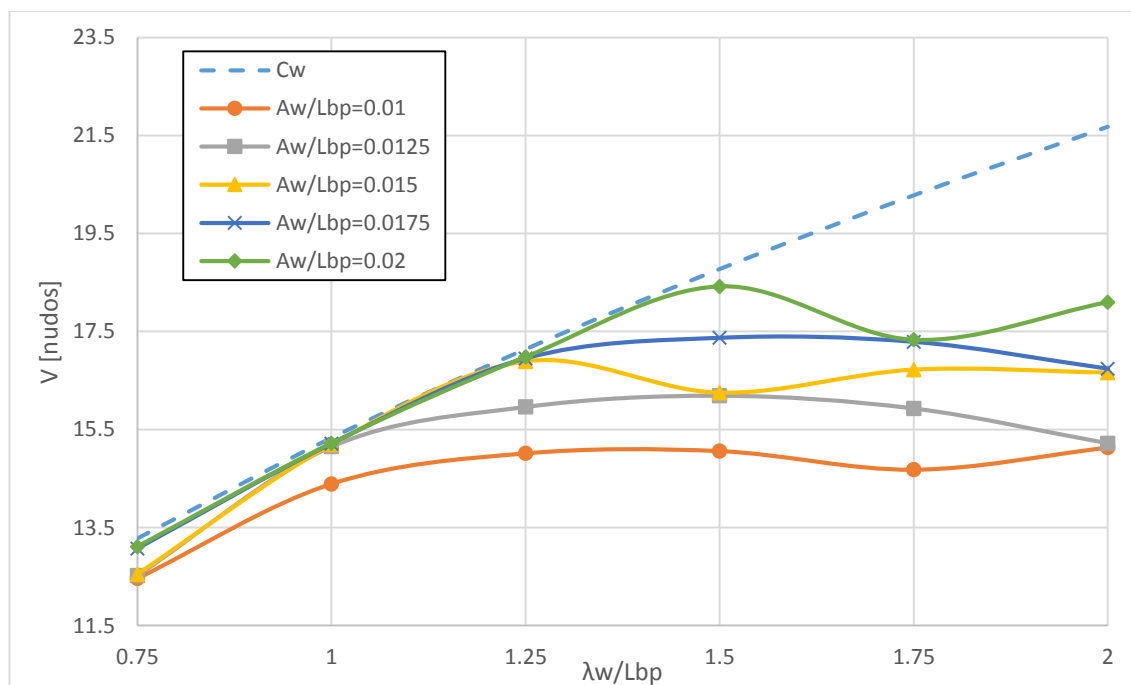


Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la Figura 26, la relación λ_w/L_{bp} que provoca Surf-riding con mayor frecuencia es la de 1.0, que representa una longitud de ola de aproximadamente 40 metros. Para esta longitud, el Surf-riding se presenta para relaciones de amplitud A_w/L_{bp} mayores a 0.0125, con número de Froude desde 0.23, que corresponden a amplitudes de ola mayores de 0.5 metros con velocidades iniciales del buque desde los 9 nudos.

En la Figura 27 se presenta la velocidad final del buque luego de 100 segundos de simulación para cada característica de ola tomando un número de Froude de 0.3, velocidad a la cual se presenta con mayor frecuencia el surfeo de la embarcación. Se puede observar que para relaciones de A_w/L_{bp} igual a 0.02; y, λ_w/L_{bp} de 0.75 a 1.5, el buque es más proclive a ser acelerado hasta alcanzar una velocidad muy cercana a la de la ola. Para longitudes de ola superiores a 1.5 veces la eslora de la embarcación, se nota que ella avanza a velocidades relativamente altas respecto del buque y no se alcanza la condición de surfeo.

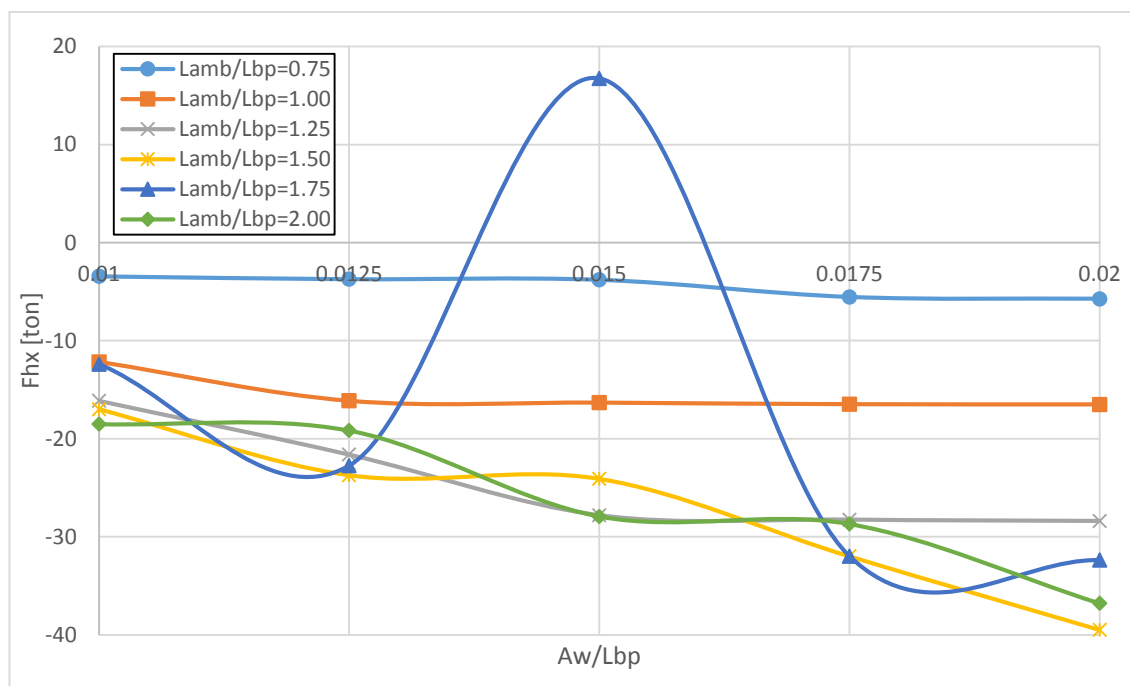
Figura 27: Velocidad final del buque para la condición de carga 1.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 28 se presenta la componente axial de la fuerza hidrodinámica de la ola al final de la simulación respecto a A_w/L_{bp} , para distintos valores de λ_w/L_{bp} . Nótese que cuando esta fuerza es negativa significa que el buque tiene la cresta de la ola en la popa, teniendo como resultado una aceleración, esto es un incremento de velocidad en la misma dirección que su velocidad de avance, según la referencia mostrada en la Figura 15. Si esta fuerza es positiva, implica que la cresta de la ola está ubicada en la proa, desacelerándolo.

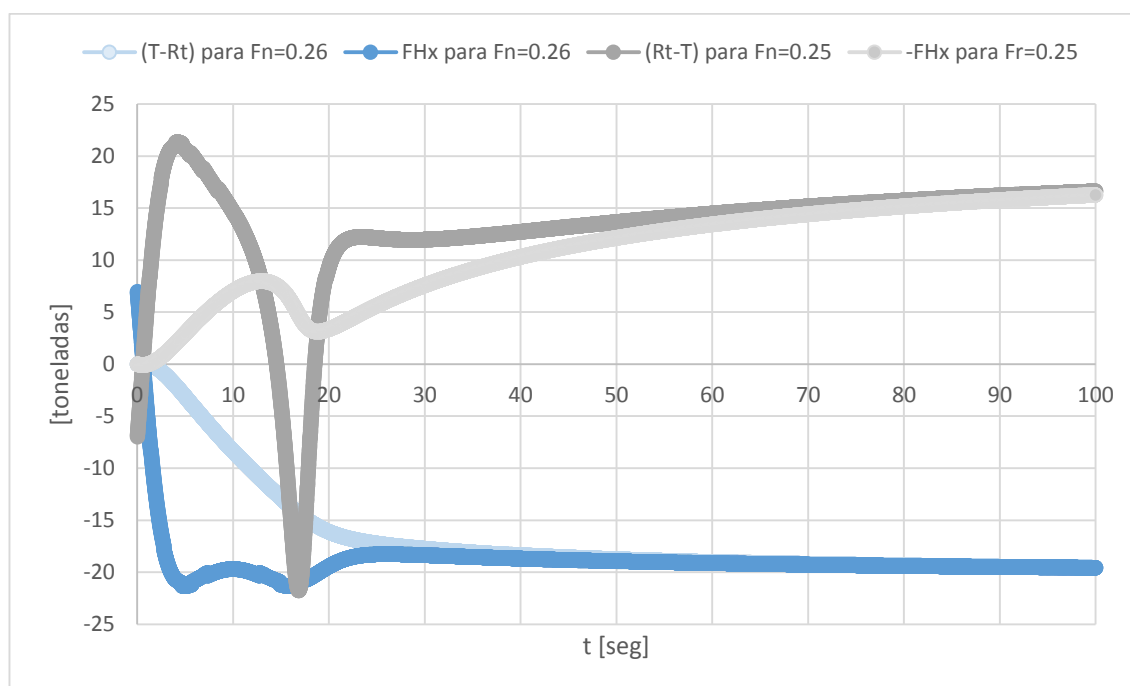
Figura 28: Componente axial de la Fuerza Hidrodinámica de la ola final para la condición de carga 1.



Fuente: Elaboración Propia.

Ahora en la Figura 29, se presenta la fuerza hidrodinámica F_{HX} y la diferencia entre la Resistencia al avance R_T , y el Empuje, T , generado por el propulsor, para una relación de longitud λ_w/L_{bp} y amplitud A_w/L_{bp} de 1.0 y 0.015 respectivamente, para números de Froude de 0.25 y 0.26.

Figura 29: Fuerza hidrodinámica de la ola para $A_w/L_{bp}=0.015$, para la condición de carga 1.



Fuente: Elaboración Propia.

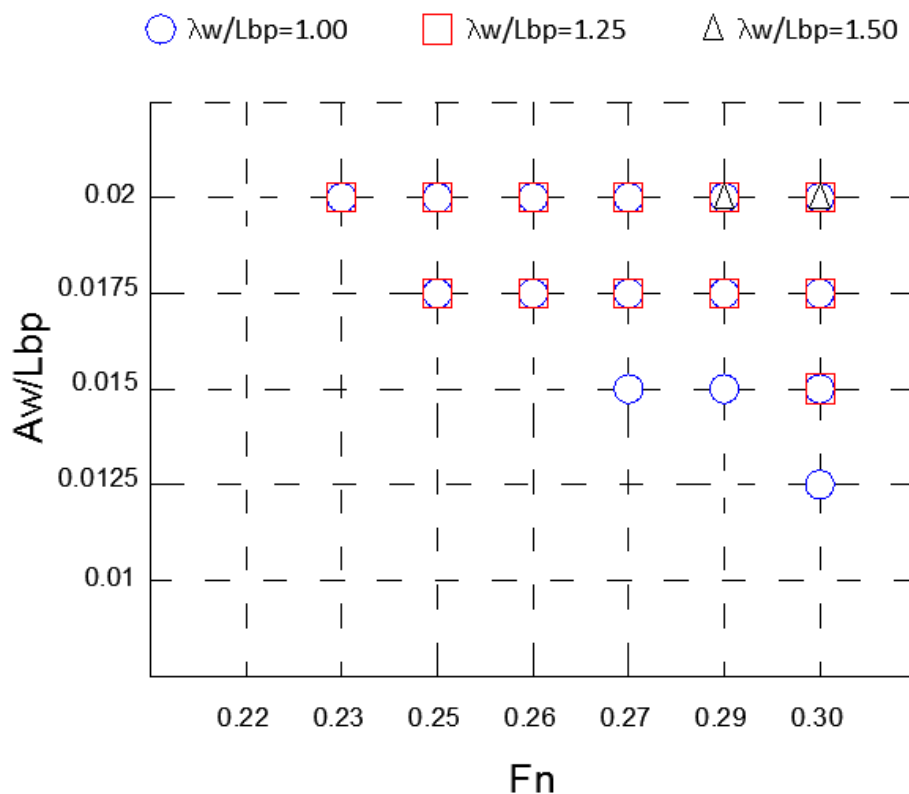
Para un número de Froude de 0.25, en la embarcación no se presenta el fenómeno de Surf-riding después de un tiempo de simulación de 100 segundos,

como se indica en la Figura 26. Esto debido a que la sumatoria de las fuerzas que participan en este fenómeno provocan una variación de velocidad muy pequeña, haciendo imposible que el buque alcance al menos el 95% de la celeridad de la ola, como se muestra en la Figura 29. Para el caso del número de Froude de 0.26, bajo las mismas relaciones de amplitud y longitud de la ola, se observa que esta sumatorias de fuerzas tienen una tendencia constante con una diferencia más alta. Como resultado esto provoca una mayor aceleración, es decir la embarcación alcanza velocidades más altas en cada instante de tiempo, y es capaz de surfear en la ola.

4.2 Resumen de los resultados para la condición “Llegada a Puerto”

En forma similar al subcapítulo anterior, en la Figura 30 se resumen las condiciones que hacen que se produzca el surfear de la embarcación en esta condición de carga. En esta segunda condición de carga que se analizó, llamada “Llegada a Puerto” considerada también en [19], se obtuvieron de las simulaciones los siguientes resultados:

Figura 30: Resultados de la condición de carga 2.

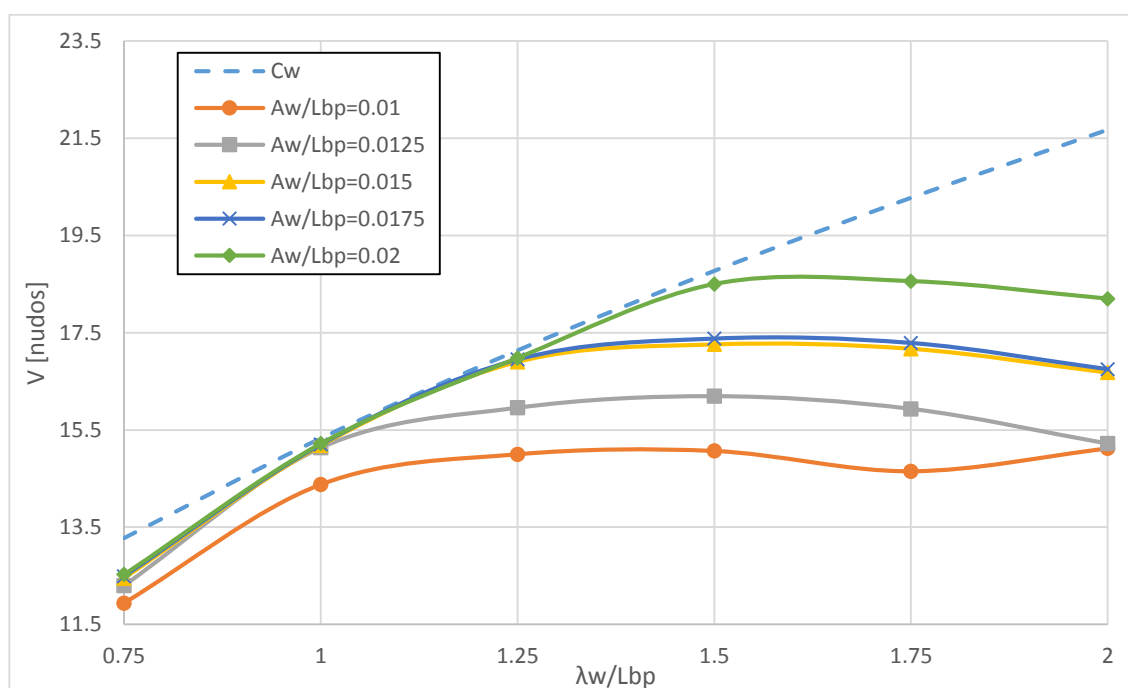


Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos en la Figura 30, igual que en la condición de carga anterior, el Surf-riding se presenta con mayor frecuencia con las mismas condiciones iniciales, pero con menor cantidad de situaciones de presentarse este fenómeno. Esto se debe a que el buque en esta condición de carga tiene mayor desplazamiento que en la condición de carga analizada en el subcapítulo anterior, y como resultado se tiene que es más difícil que el ola pueda acelerarlo hasta alcanzar su velocidad, como se indica en la ecuación (10).

En esta condición de carga, el surfeo de la embarcación se presenta en mayor porcentaje para una longitud de ola igual a la eslora del buque, con velocidades iniciales desde los 9 nudos para amplitudes de ola mayores a 0.5 metros. En la Figura 31 se observa la velocidad final del buque tomando un número de Froude de 0.3, donde se observa que para una relación de A_w/L_{bp} igual a 0.02 el buque es más propenso a alcanzar la velocidad de la ola.

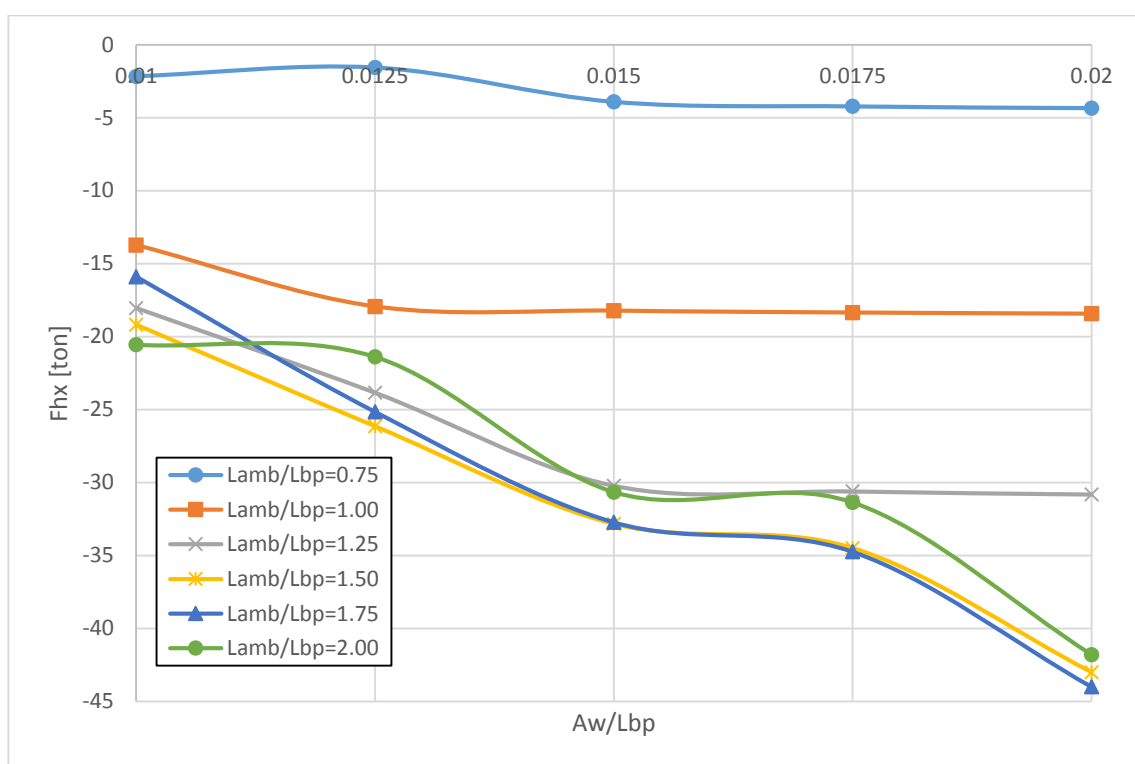
Figura 31: Velocidad final del buque para la condición de carga 2.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 32 se muestra la componente axial de la fuerza hidrodinámica de la ola de la condición de carga 2, para ciertas características de la misma, después de un tiempo de simulación de 100 segundos.

Figura 32: Componente axial de la Fuerza Hidrodinámica de la ola final para la condición de carga 2.

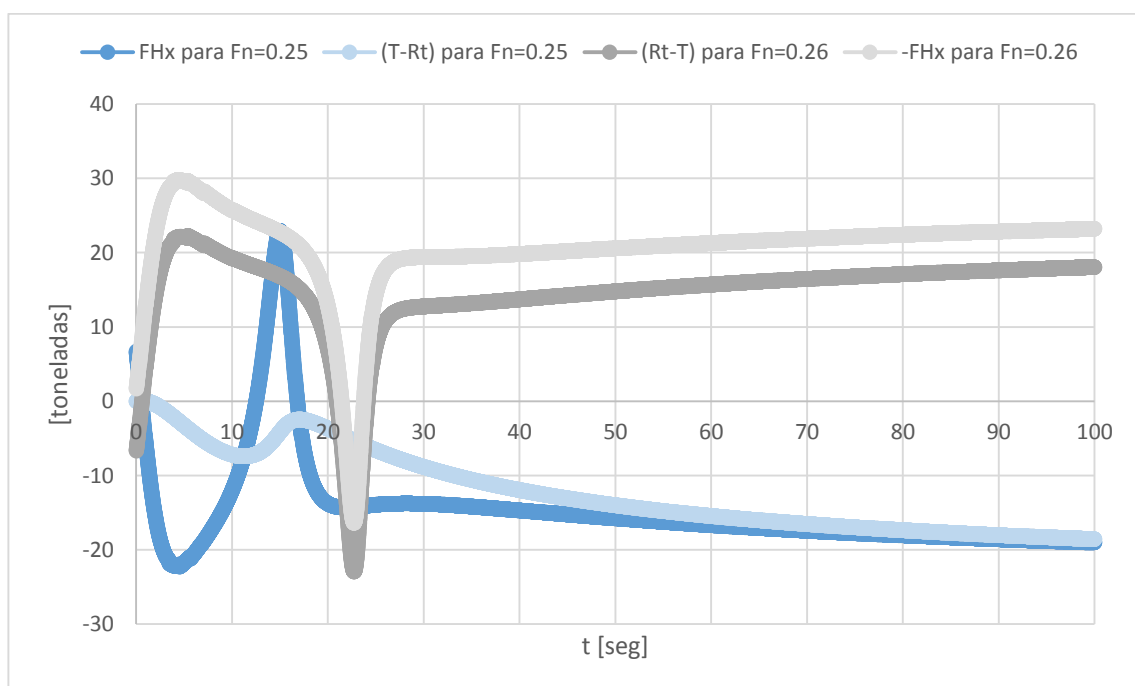


Fuente: Elaboración Propia.

Por último en la Figura 33 se presenta igual que la primera condición de carga, la fuerza hidrodinámica y la diferencia entre la Resistencia al avance y Empuje, para las mismas condiciones iniciales descritas en el subcapítulo anterior. En esta

condición de carga, el desequilibrio de fuerzas provoca una aceleración pequeña para ambas velocidades iniciales, debido a que el buque desplaza más que la primera condición de carga como se mencionó anteriormente. Después de un tiempo de simulación de 100 segundos, el buque pesquero analizado en esta segunda condición de carga, no es capaz de presentar el fenómeno de Surf-riding como se indicó en la Figura 30, a pesar de tener las mismas condiciones iniciales de la condición de carga de menor desplazamiento.

Figura 33: Fuerza hidrodinámica de la ola para $A_w/L_{bp}=0.015$, para la condición de carga 2.



Fuente: Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe el fenómeno de Surf-riding y el criterio a ser evaluado para determinar si un buque es susceptible a sufrir este fenómeno, según la OMI, en el desarrollo de Criterios de Estabilidad de Segunda Generación. Se implementó luego la integración en tiempo con el método de Runge Kutta cuarto orden para aproximar la solución numérica de Surf-riding a un buque atunero de la flota pesquera ecuatoriana vulnerable a este modo de falla. Finalmente, se realizaron simulaciones para dos condiciones de carga de dicha embarcación, obteniendo las siguientes conclusiones:

1. Cuando el buque navega en olas de popa, la fuerza hidrodinámica es capaz de acelerar o desacelerar a la embarcación dependiendo de su ubicación respecto de la misma. Si la cresta de la ola está la proa del

buque, la componente axial de la fuerza hidrodinámica lo desacelerará. En cambio cuando la cresta de la ola está en popa, la embarcación es acelerada y si la fuerza es lo suficientemente alta, el buque puede alcanzar la velocidad de la ola, y se presenta el fenómeno de Surf-riding.

2. La OMI, en el desarrollo de los Criterios de Segunda Generación para el Surf-riding, establece que una embarcación es capaz de surfear en la ola cuando navega en olas de popa operando con número de Froude superior a 0.3. Otros autores que han estudiado este fenómeno, han determinado que si la relación entre la longitud de la ola y la eslora del buque es mayor que 0.75 y la altura de significativa de la ola es mayor que el 4% la eslora entre perpendiculares, es posible que se presente Surf-riding. En función de los criterios previamente mencionados, se consideró embarcaciones pesqueras ecuatorianas que han sufrido zozobra. De entre ellos se determinó que el buque atunero que zozobró cerca de las Islas Galápagos, que operando a una velocidad aproximada de 11 nudos, es proclive a que presente el fenómeno de Surf-riding.
3. Se logró implementar la solución numérica del fenómeno de Surf-riding para un buque navegando en olas de popa aplicando el método de Runge

Kutta de cuarto orden. La Fuerza hidrodinámica de la ola fue estimada como la componente de Froude-Krylov, mediante la integración de presiones sobre la superficies sumergidas del buque, y su dirección depende del vector normal de cada segmento de superficie. El desequilibrio de fuerzas en dirección x , hacen posible calcular la aceleración del buque lo que permite integrar en tiempo la velocidad del mismo.

4. En este trabajo se ha simulado el movimiento de Largada, en dos posibles condiciones de carga de un buque atunero que opera desde el puerto de Manta. Si después 100 segundos de integración numérica el buque no alcanza al menos el 95% de la velocidad de la ola, se considera que la ola no captura a la embarcación y no se produce Surf-riding. De las simulaciones realizadas se encontró que si la velocidad inicial del buque está sobre los 8.5 nudos, con razón λ_w/L_{bp} entre el 0.75 y 1.50, y, con A_w/L_{bp} mayores al 0.0125. Se concluye que el buque es capaz de surfear en la ola.

RECOMENDACIONES

1. Una vez realizadas las simulaciones donde se determinó que existen condiciones iniciales capaces de lograr que el buque navegando en olas de popa llegue al surfteo, se recomienda para trabajos futuros realizar el análisis probabilístico como indica la OMI, en el segundo nivel de vulnerabilidad con características propias del mar ecuatoriano.
2. En este trabajo la solución numérica del fenómeno de Surf-riding fue desarrollado para mar regular, por lo que sería de interés el estudio de un caso especial donde se determine la posibilidad de

bajo qué condiciones puede este fenómeno ocurrir en olas irregulares.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **MARÓN, A., CARRILLO, E., VALLE, J., PRIETO, M., GUTIERREZ, C., TABOADA, M.**, “Investigation on the Capsizing of a Small Fishing Vessel in Following Seas”, Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles – STAB’06, Rio de Janeiro, 2006.
- [2] **PEREZ, L., PEREZ, F., ZAMORA, R., GUERRERO, A.**, “On the Accidents of Small Fishing Vessels”, Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles – STAB’06, Rio de Janeiro, 2006.
- [3] **BELENKY, V.L., SEVASTIANOV, N.B.**, Stability and safety of Ships. Risk of Capsizing. SNAME. 2007.
- [4] **OMI**, Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas. London, 1995.
- [5] **OMI**, Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. London, 2007.
- [6] **DIARIO EL COMERCIO**, Dos muertos y tres desaparecidos en naufragio del atunero Tuna 1, Abril 2012 (<http://www.elcomercio.com>).
- [7] **DIARIO LA HORA**, Pesquero zozobra cerca de Posorja, Octubre del 2005 (<http://www.lahora.com.ec>).

- [8] **DIARIO HOY**, Cuatro muertos y derrame de diésel por naufragio, Mayo 2010, (<http://hoy.com.ec>).
- [9] **NEVES, M.A.S, FERMAMDES, J.C.**, Desarrollos Recientes de Nuevos Criterios de Estabilidad Intacta de Buques en Olas. Brasil.
- [10] **BELENKY, V.L., BASSLER, C.C., SPYROU, K.J.**, Development of Second Generation Intact Stability Criteria. US, 2011.
- [11] **PRESS, H., FLANNERY, B., TEUKOLSKY, S., VETTERLING. W.**, “Numerical Recipes”. Cambridge University Press, 1992.
- [12] **TAKAISHI, Y.**, “Consideration on the Dangerous Situations Leading to Capsize of Ships in Waves”, Proceedings of the 2nd International Conference on Stability of ships and Ocean Vehicles – STAB’82, Tokyo, 1982, The Society of Naval Architects of Japan Editor, Tokyo, 1983, pp. 243-253.
- [13] **BULIAM, G.**, Second Generation Intact Stability Criteria, Seminario ESPOL, 12-15 de Mayo del 2014.
- [14] **MAGAP**, Situación actual de la pesca en el Ecuador, VMAP 2014.
- [15] **SPTMF**, Estadísticas de Buques pesqueros hasta el año 2014. Guayaquil – Ecuador 2014.
- [16] <http://www.fao.org/fi/oldsite/FCP/es/ecu/body.htm>
- [17] **MARTINEZ, A., VALERA, P.**, Atunero Congelador al cerco de 1935 m3 de capacidad de cubas, Proyecto No. 1263.

[18] **RAMIL, A.**, Dimensionamiento Preliminar de un buque Atunero, Universidad de la Coruña, 2015.

[19] **SOTELO, M.**, Simulación Numérica de problemas de estabilidad intacta debido a Balance Paramétrico, en buques pesqueros ecuatorianos, ESPOL, 2015.

[20] **MARÍN, J.R.**, Programa para generar líneas de formas preliminares de un buque, 1990.

[21] **MARÍN, J.R.**, Programa para diseñar sistemas propulsores marinos, 2005.

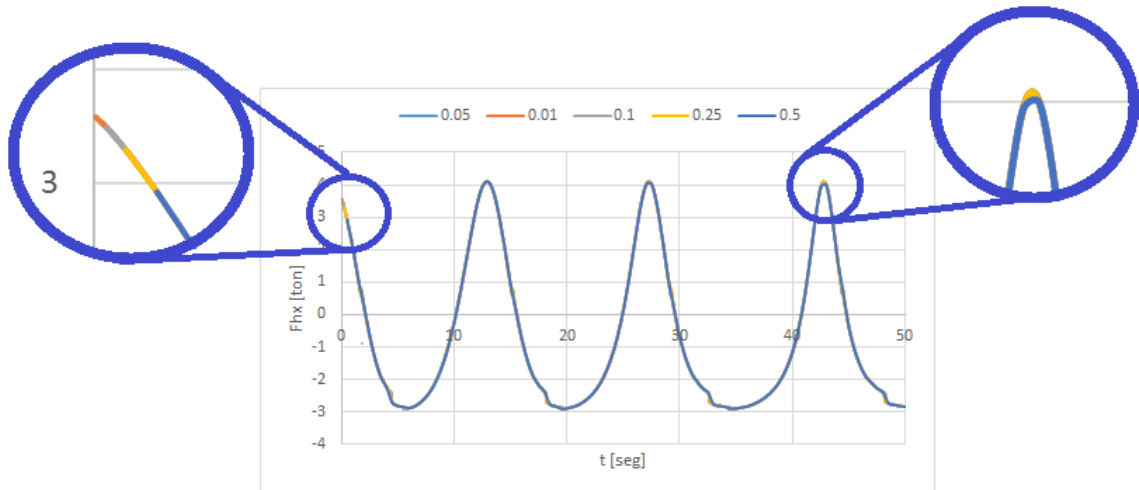
ANEXOS

ANEXO A

DETERMINACIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Siguiendo la recomendación de [19], donde se analizó numéricamente el fenómeno de Balance Paramétrico de un buque pesquero, se procedió a realizar varias simulaciones con diferentes valores de Δt comparando posteriormente su nivel de convergencia. Se realizaron simulaciones con intervalos de tiempo Δt inferiores a 0.01 seg., donde se notó que las soluciones prácticamente coinciden. Sin embargo, para intervalos de tiempo superiores a 0.05 seg., se observó que las soluciones se alejaban entre sí. En la Figura 34 se grafica la fuerza de la ola sobre la embarcación analizada, con una amplitud y longitud de ola de 0.4 y 29.85 metros respectivamente, con una velocidad inicial de 9 nudos.

Figura 34: Nivel de convergencia en función del intervalo de tiempo.



Fuente: Elaboración Propia.

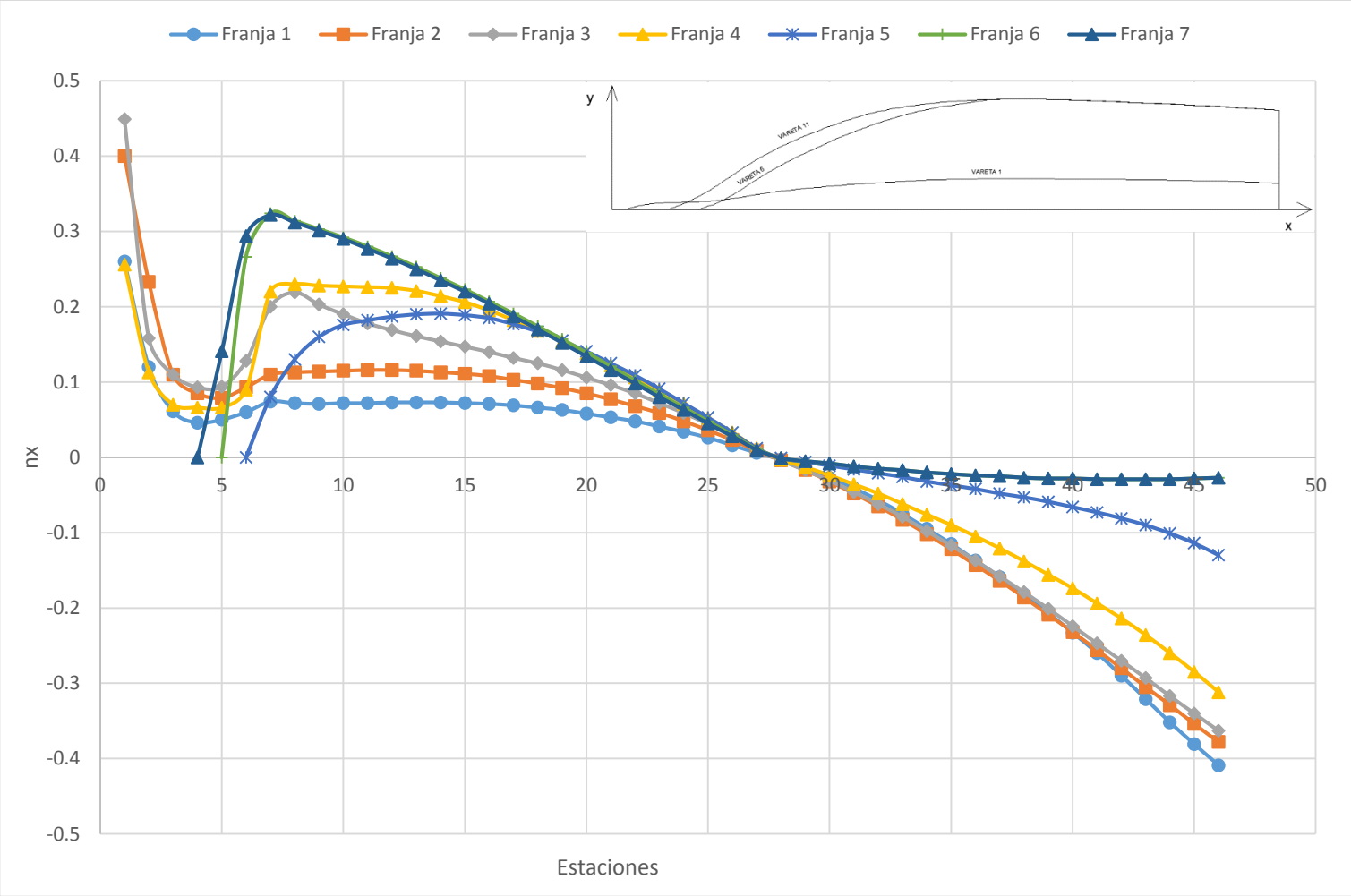
Debido a que con valores de Δt muy pequeños el tiempo de simulación se extiende, se procedió a utilizar $\Delta t = 0.01 \text{ seg}$, ya que para valores mayores, la solución no coincide como se mencionó anteriormente.

ANEXO B

DISTRIBUCIÓN DE LA COMPONENTE AXIAL Y VERTICAL DE LOS VECTORES NORMALES SOBRE EL CASCO

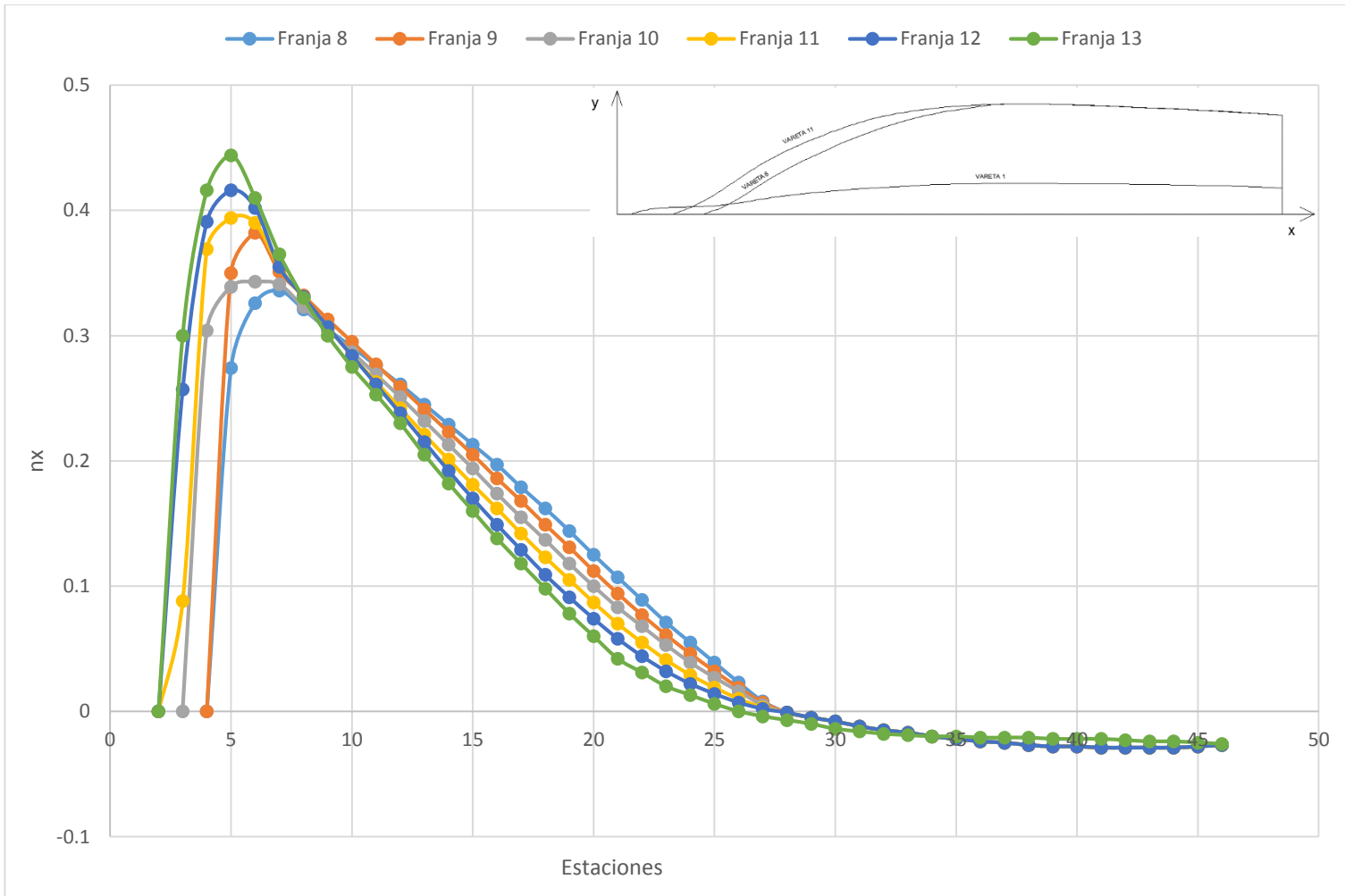
Como se mencionó en el Capítulo 3, la componente axial neta de la fuerza de la ola es obtenida mediante la combinación de componentes axiales de las fuerzas $\overrightarrow{F_{H_x}}$ y $\overrightarrow{F_{H_z}}$, las cuales dependen de $\hat{n}_{x(i,j)}$ y $\hat{n}_{z(i,j)}$, que son las componentes en dirección x y z de los vectores normales que apuntan hacia adentro de la superficie del casco, respectivamente. Una adecuada distribución de estas componentes a lo largo de la eslora, sirven como guía para predecir la bondad de la representación de las formas empleadas para el buque analizado. En las Figuras 35 y 36 se grafican la distribución de la componente axial de los vectores normales sobre el casco a lo largo de la eslora; y, en las Figuras 37 y 38, la distribución de la componente vertical.

Figura 35: Componente axial del vector normal desde la franja 1 hasta la 7, a lo largo de la eslora.



Fuente: Elaboración Propia.

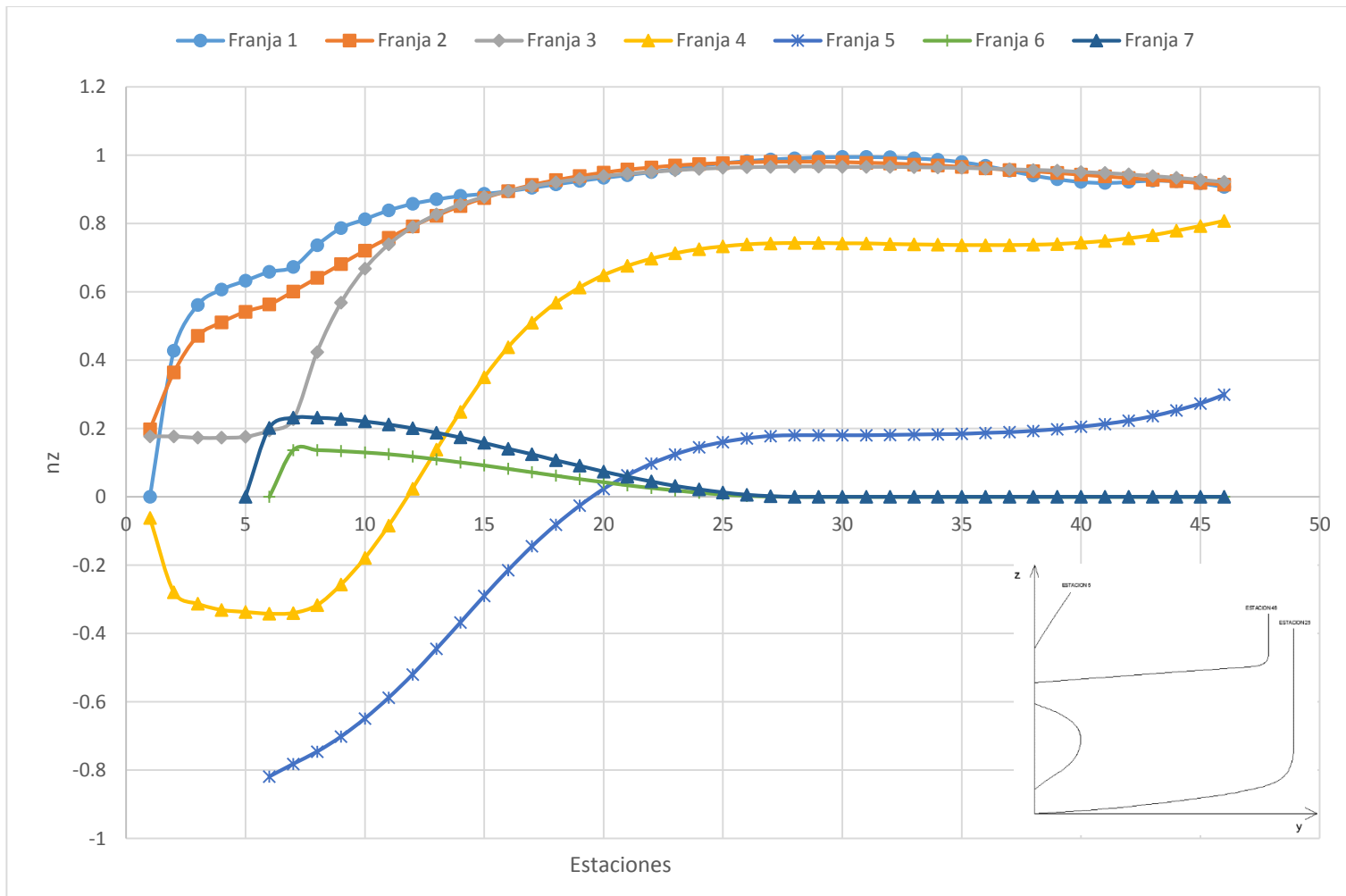
Figura 36: Componente axial del vector normal desde la franja 8 hasta la 13, a lo largo de la eslora.



Fuente: Elaboración Propia.

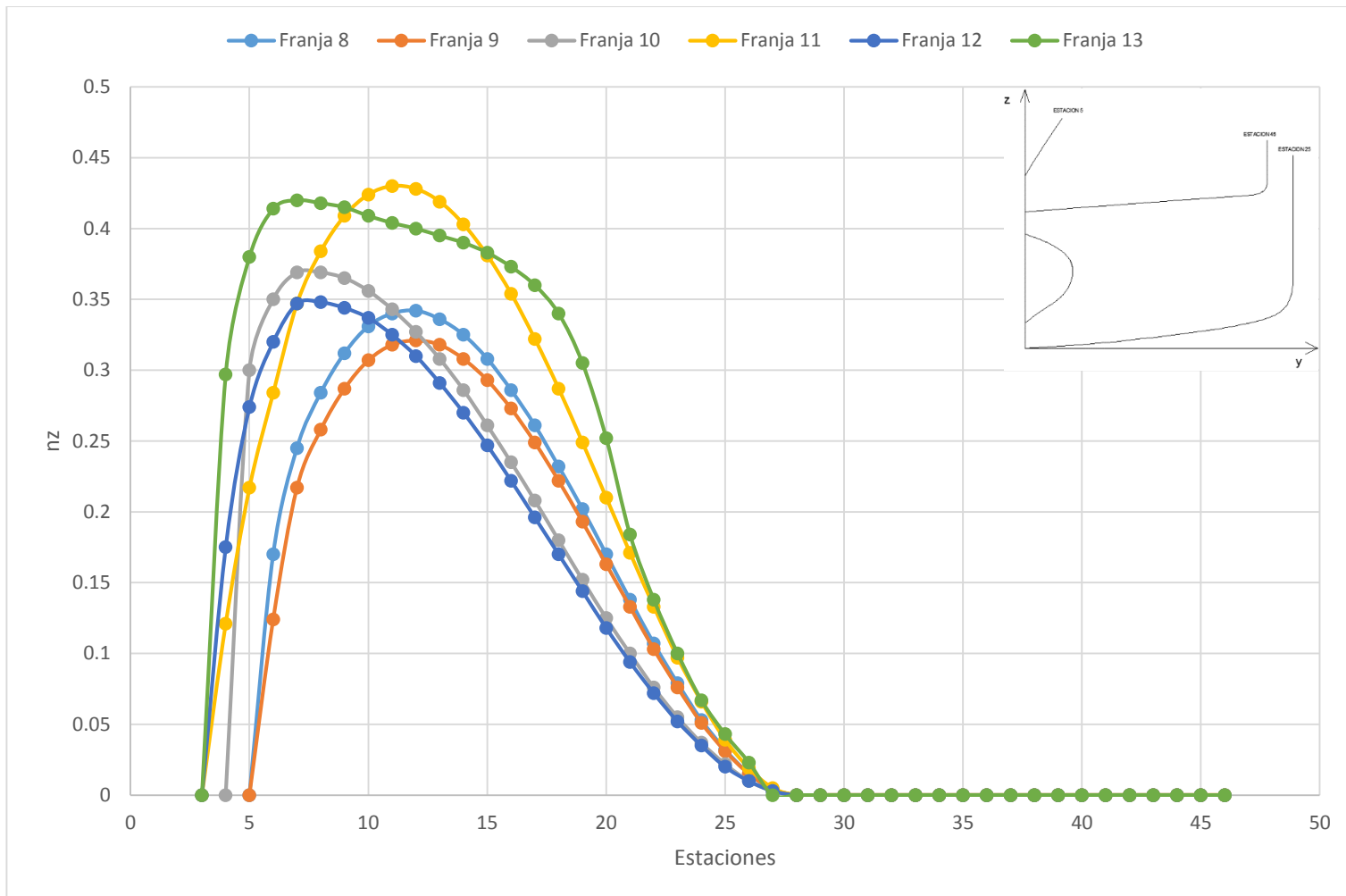
En las Figuras 35 y 36 se observa que la distribución de la normal en las franjas inferiores comienzan mucho antes que las superiores y con valor alto debido a la influencia del bulbo. En los primeros espaciamientos de las franjas superiores, se muestra que el vector normal aumenta de magnitud debido a las formas de la proa, donde posteriormente ocurre un cambio de signo por el cambio de pendiente hacia la popa. Por otro lado, en las Figuras 37 y 38 se observa que la contribución en las franjas superiores de la componente vertical del vector normal es nula, debido a que están ubicadas en el costado que tiene prácticamente forma plana vertical.

Figura 37: Componente vertical del vector normal desde la franja 1 hasta la 7, a lo largo de la eslora.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 38: Componente vertical del vector normal desde la franja 8 hasta la 13, a lo largo de la eslora.



Fuente: Elaboración Propia.